بررسی عملکرد و ممیزی انرژی

واحد نورد سبک در کارخانجات فولاد

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول : فرآیند نورد سبک کارخانه ی فولاد	**۵**
۱-۱. شرح فرآیند واحد نورد سبک	۵
۱-۱-۲. کوره گامی	۶
۱-۱-۲-۱. هوای احتراق	۷
۱-۱-۲-۲. نحوه کنترل فشار کوره	۸
۱-۱-۲-۳. ورود و خروج بیلت از کوره	۸
۱-۱-۲-۴. نحوه کنترل دمای مناطق مختلف کوره	۹
۱-۱-۲-۵. نحوه کنترل دمای کوره در زمان توقفات	۹
۱-۱-۲-۶. کنترل دمای هوا و دود در ورودی و خروجی رکوپراتور	۹
۱-۱-۳. کوره Holding	۹
۱-۱-۴. پمپ پوسته‌زدا	۱۰
۱-۱-۵. استندهای واحد نورد سبک	۱۱
۱-۱-۶. گرید محصولات	۱۱
۱-۱-۷. عملیات حرارتی در واحد نورد سبک	۱۲
۱-۲. دسته‌بندی تجهیزات موجود در واحد نورد سبک	۱۲
۱-۳. سیستم توزین مواد اولیه و محصولات در واحد نورد	۱۳
فصل دوم : ممیزی انرژی واحد نورد سبک	**۱۴**
۲-۱. ممیزی انرژی حرارتی	۱۴
۲-۱-۱. بررسی شرایط کارکرد تجهیزات خط تولید و انجام اندازهگیرهای لازم	۱۴
۲-۱-۲. بررسی وضعیت عایقکاری تجهیزات و شناسایی سطوح بدون عایق	۱۵
۲-۱-۳. شناسایی فاکتورهای قابل اندازه‌گیری حامل‌های انرژیجهت تعیین انرژی ویژۀ حرارتی	۱۹
۲-۲. شناسایی عوامل موثر بر مصرف انرژی در بخش‌های مختلف فرایند تولید	۲۰
۲-۲-۱. اتلافات	۲۰
۲-۲-۱-۲. میزان هوای اضافه	۲۱
۲-۲-۱-۳. دمای دود و هوای پیش‌گرم	۲۲
۲-۲-۲. انرژی مفید خروجی	۲۲
۲-۲-۲-۱. دمای شمش ورودی	۲۳
۲-۲-۲-۲. توقفات	۲۳
مراجع	۲۴

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول۱-۱. دسته بندی گریدهای فولاد تولیدی بر مبنای میزان عناصر آلیاژی ۱۱

جدول۲-۱. اثر هوای اضافه بر میزان مصرف انرژی کوره پیش‌گرم فولاد ۲۲

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل۱-۱. نمودار گردش مواد در واحد نورد سبک ۵

شکل۱-۲. نحوه شارژ و دیسشارژ بیلت در کوره گامی واحد نورد سبک ۶

شکل۱-۳. نحوهٔ گردش و کنترل هوای احتراق ۷

شکل۱-۴. فلودیاگرام پمپ پوسته‌زدا ۱۰

شکل۱-۵. دسته‌بندی تجهیزات و سیستمهای موجود در واحد نورد سبک ۱۲

شکل۲-۱. مقاومت حرارتی دیوار کوره ۱۶

شکل۲-۲. (الف)، (ب) و (ج) توزیع دما سقف کوره فولاد ۱۷

شکل۲-۳. (الف)، (ب)، (ج) و (د) توزیع دما دیوار های جانبی کوره فولاد ۱۸

شکل۲-۴. دیاگرام سانکی عمومی از یک کوره پیش گرم ۲۱

شکل۲-۵. شماتیک سیستم بازیافت حرارت کوره‌های پیشگرم ۲۱

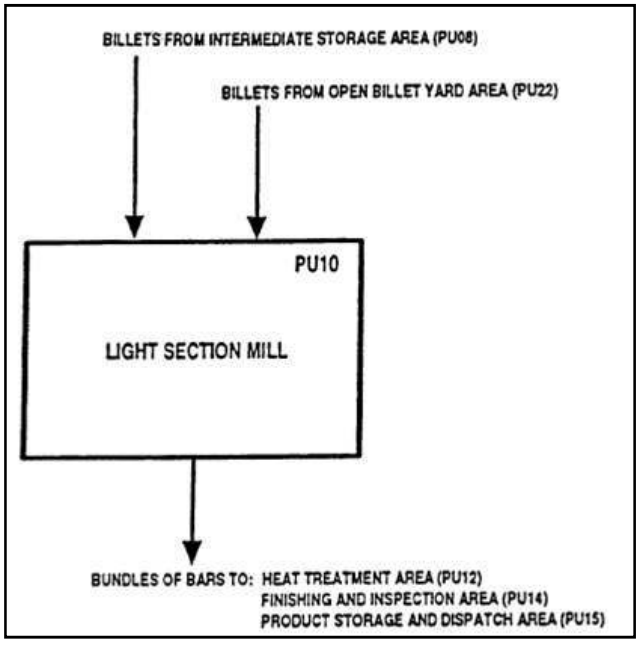
شکل۲-۶. شماتیک سیستم بازیافت حرارت کوره‌های پیشگرم ۲۲

فصل اول
فرآیند نورد سبک کارخانه فولاد

در این بخش فرآیند نورد سبک کارخانه فولاد شرح داده می شود.

۱-۱. شرح فرآیند واحد نورد سبک

خط نورد سبک وظیفه تبدیل بیلت به محصولات نهایی شامل مقاطع گِرد و تخت را بر عهـده دارد. بیلـت در خط نورد سبک تولید و پس از عبور از ناحیه آماده سازی بیلت و ذخیره سازی، به ناحیه نورد سبک وارد می‌شـود. در شکل۱-۱ شماتیکی از گردش مواد در ناحیه نورد سبک نمایش داده شده است.



شکل۱-۱. نمودار گردش مواد در واحد نورد سبک

بیلت‌های وارد شده به خط نورد سبک دارای مقطع مختلف با سایز های مختلف اسـت. بـه طـور کلـی، خـط نورد سبک شامل سه منطقه به شرح ذیل می‌باشد:

- منطقه پیشگرم بیلت شامل کوره پیشگرم
- منطقه نورد شامل قفسه‌های نورد

- منطقه خنک کردن محصول شامل بسترهای خنک کننده

بیلت ضمن عبور از کوره پیشگرم تا دمای مناسب برای نورد، گرم می‌شود و با عبور از استندهای خط نورد سبک، تا رسیدن به سایز نهایی، تغییر مقطع می‌دهد. بعد از خاتمه نورد، برای خنک شدن، محصولات تولیدی به بسترهای خنک کننده منتقل می‌شوند.

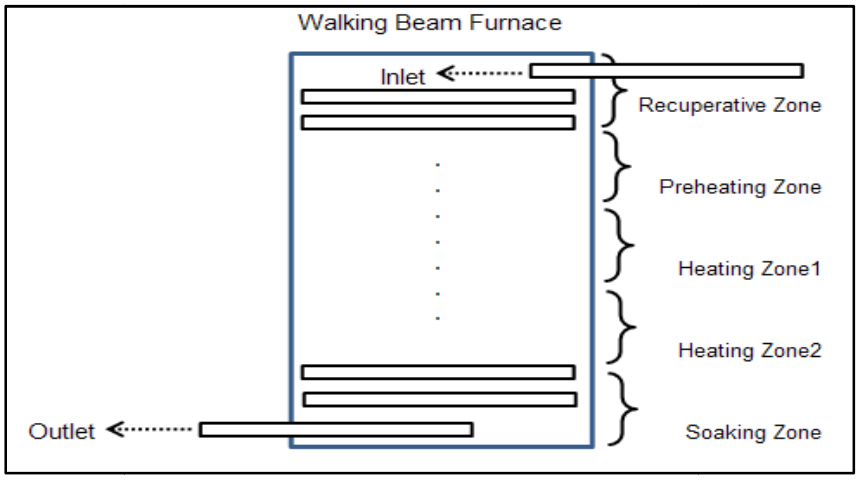
محصولات تولید شده در واحد نورد سبک، با توجه به نوع و گرید محصول، جهت انجام فرایندهای تکمیلی، به واحدهای مختلف به شرح زیر منتقل می‌شود:

- واحد عملیات حرارتی
- واحد نظارت و تکمیل‌کاری
- واحد ذخیره سازی

۱-۱-۱. کوره گامی

بیلت ورودی به واحد نورد سبک، ضمن عبور از کوره گامی (Walking Beam Furnace) و قفسه‌های نورد به محصول تبدیل می‌شود. بیلت خروجی از کوره، برای فولاد با گریدهای مختلف، بین ۱۱۰۰ تا ۱۲۸۰ درجه سانتیگراد گرم می‌شود.

در شکل ۱-۲ شماتیک شارژ و دیس شارژ کوره گامی واحد نورد سبک نمایش داده شده است. بیلت‌ها از دیواره جانبی کوره توسط رول‌های مخصوصی وارد می‌شود. بیلت وارد شده با گام زدن داخل کوره حرکت می‌کند و نهایتاً از دیواره مقابل خارج می‌شود.



شکل ۱-۲. نحوه شارژ و دیسشارژ بیلت در کوره گامی واحد نورد سبک

بلوم ورودی به کوره ابتدا از یک منطقه بدون مشعل (Recuperative Zone) عبور می‌کند. ضمن عبور از این منطقه بلوم مقداری پیشگرم می‌شود و از انرژی دود خروجی از منطقه یک نیز استفاده می‌شود.

در ادامه، بلوم از چهار منطقه متوالی که مجهز به مشعل است عبور می‌کند. دمای هر منطقه در محدوده خاصی کنترل می‌شود و بلوم با عبور از این مناطق به دمای خروجی می‌رسد.

منطقه اول (Preheating Zone) وظیفه پیشگرم کردن بلوم را بر عهده دارد. این منطقه از تعدادی مشعل تشکیل شده است که در سقف کوره قرار دارند و شعله از بالا به بیلت می‌خورد.

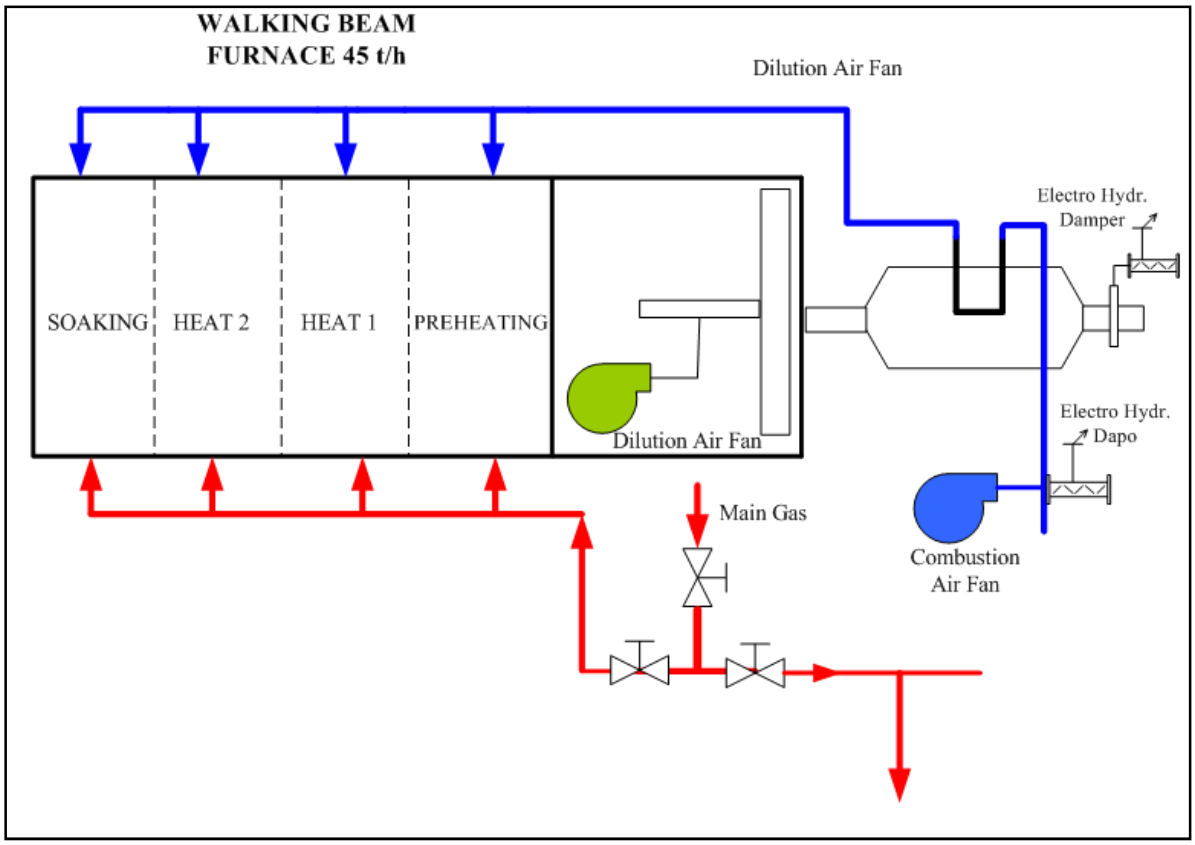
منطقه دوم (Heating Zone1) بعد از منطقه اول قرار دارد و دارای تعداد بیشتری از مشعل است که در سقف کوره قرار دارند و شعله از بالا به بیلت می‌خورد.

منطقه سوم (Heating Zone2) دارای به اندازه منطقه اول مشعل دارد که در سقف کوره قرار دارند و شعله از بالا به بیلت می‌خورد.

منطقه چهارم (Soaking Zone) که مانند منطقه اول و سوم دارای تعداد مشابهی مشعل است که در سقف کوره قرار دارند و شعله از بالا به بیلت می‌خورد.

۱-۱-۱-۱. هوای احتراق

هوای مورد نیاز برای احتراق از طریق دو فن که یکی در سرویس و دیگری رزرو است، تأمین می‌شود. هوای عبوری از فن، با عبور از رکوپراتور تا حدود ۴۰۰ درجه سانتیگراد گرم می‌شود و از طریق سیستم توزیع هوای احتراق، بین مناطق مختلف کوره توزیع می‌شود. در شکل ۱-۳ نمایی از نحوهٔ توزیع و کنترل هوای احتراق به طور شماتیک نمایش داده شده است.



شکل ۱-۳. نحوهٔ گردش و کنترل هوای احتراق

دبی هوای احتراق از طریق یک دمپر که در ورودی فن قرار دارد و DAPO نامیده می‌شود، کنترل می‌شود.

فشار هوا از طریق یک فشارسنج که در مسیر هوای احتراق بعد از رکوپراتور قرار دارد اندازه‌گیری می‌شود و سیستم کنترل فشار هوا، از طریق دریچه DAPO، میزان هوای مورد نیاز برای احتراق را تنظیم می‌کند. در حقیقت با تغییر میزان هوای مورد نیاز در مشعل‌ها، فشار هوا بعد از رکوپراتور تغییر می‌کند و سیستم کنترل فشار، با ثابت نگه داشتن این فشار، دبی هوای احتراق را تنظیم می‌نماید.

دمای هوای گرم خروجی از رکوپراتور به کمک یک ترموکوپل اندازه‌گیری می‌شود و چنانچه این دما از ۴۵۰ درجه سانتیگراد بیشتر شود، با باز کردن یک مسیر فرعی به هوای محیط از طریق یک دریچه موتوری، میزان هوای عبوری از رکوپراتور افزایش می‌یابد و از این طریق دمای هوای خروجی رکوپراتور کاهش می‌یابد.

بعد از این مرحله، هوای احتراق وارد خطوط تغذیه هوای کوره می‌شود. مسیر هوای احتراق در هر منطقه از کوره مجهز به یک فلومتر اوریفیسی است و از این طریق، دبی هوای ورودی اندازه‌گیری می‌شود. میزان هوای مورد نیاز در هر منطقه، از طریق یک شیر موتوری که بعد از فلومتر قرار دارد کنترل می‌شود.

فلوی گاز ورودی به کوره نیز از طریق یک فلومتر اوریفیسی اندازه‌گیری می‌شود و از طریق یک شیر موتوری که بعد از فلومتر قرار دارد، میزان آن کنترل می‌شود. با توجه به اندازه‌گیری فلوی سوخت و هوا در هر منطقه، نسبت هوا به سوخت، در حدود ۱۰ به ۱ کنترل می‌شود.

۱-۱-۱-۲. نحوه کنترل فشار کوره

در مسیر دود خروجی، بعد از رکوپراتور، یک دمپر پروانه‌ای[1] تعبیه شده است که وظیفه آن، کنترل فشار کوره است.

فشار کوره از طریق سنسور اندازه‌گیری فشار کوره، اندازه‌گیری می‌شود. هر تغییر فشار ایجاد شده در کوره نسبت به نقطه تنظیم[2]، توسط سیستم کنترل فشار کوره بررسی و با تنظیم موقعیت قرارگیری پره‌های دمپر، فشار کوره کنترل می‌شود.

۱-۱-۱-۳. ورود و خروج بیلت از کوره

بیلت وارد شده به کوره، با گام زدن به سمت درب خروجی حرکت می‌کند. با خارج شدن یک بیلت از کوره، بیلت دیگری جایگزین آن می‌شود. با توجه به نوع و سایز محصول تولیدی، تعداد استندهای مورد استفاده در فرایند نورد، تعداد پاسهای نورد در استند اول و فاصله زمانی خروج بیلت‌ها از کوره متفاوت است. لذا نرخ تولید کوره (تن بر ساعت) نیز با توجه به موارد ذکر شده متغیر است.

فاصله زمانی خروج بیلت از کوره بستگی به تعداد پاس نورد استند اول دارد. چنانچه محصول نهایی به صورت کلاف باشد، با توجه به اینکه سرعت تولید کاهش می‌یابد، خروج بیلت از کوره از حالت اتوماتیک خارج

[1] Butterfly Damper
[2] Set Point

شده و با فرمان اپراتور بیلت از کوره خارج می‌شود.

علاوه بر عوامل مذکور، توقفات نیز بر نرخ تولید کوره تأثیرگذار است. با توجه به بررسیهای انجام پذیرفته، تعداد توقفات برنامه‌ریزی نشده بسیار زیاد است. علیرغم اینکه مدت زمان هرکدام از آنها کوتاه می‌باشد، ولی مدت زمان مجموع آنها قابل توجه است.

۱-۱-۱-۴. نحوه کنترل دمای مناطق مختلف کوره

با توجه به گرید محصولات تولیدی، دماهای مختلفی در هرکدام ازمناطق کوره مورد نیاز است. دستورالعمل دما در مناطق مختلف کوره برای گریدهای مختلف در اتاق کنترل کوره موجود و در اختیار اپراتورها قرار داده می‌شود.

برای هر گرید، نقطه تنظیم دمای کوره با توجه به دستورالعمل مذکور تنظیم خواهد شد. سیستم کنترل دمای کوره با توجه به اندازه‌گیری دمای کوره، با کم و زیاد کردن دبی گاز طبیعی، دمای هر منطقه را کنترل می‌کند.

۱-۱-۱-۵. نحوه کنترل دمای کوره در زمان توقفات

به منظور صرفه‌جویی در مصرف گاز طبیعی، دستورالعمل خاصی برای کنترل کوره در زمان توقفات تهیه و در اختیار اپراتورها قرار داده می شود. با توجه به مدت زمان توقفات، نقطه تنظیم دما در مناطق مختلف کوره کاهش خواهد یافت.

لازم به ذکر است که هنگام توقفات، دمای مناطق مختلف به صورت ناگهانی کاهش نمی‌یابد، بلکه به صورت تدریجی، کاهش دما انجام می‌شود.

۱-۱-۱-۶. کنترل دمای هوا و دود در ورودی و خروجی رکوپراتور

در رکوپراتور، انرژی دود در تماس با دسته لوله‌های استیل که در مسیر آن قرار گرفته است، به هوای احتراق منتقل می‌شود و از این طریق هوای احتراق پیشگرم می‌شود.

نقطه تنظیم دمای دود ورودی به کوره ۶۵۰ درجه سانتیگراد است. چنانچه دمای دود بیشتر از ۶۵۰ درجه سانتیگراد شود، دریچه مربوط به هوای رقیق کننده[1] باز می‌شود و از این طریق دمای دود ورودی کنترل می‌شود.

چنانچه به هر دلیلی، دمای دود از ۷۵۰ درجه سانتیگراد بیشتر شود، سیستم اعلام خطر دمای دود ورودی به رکوپراتور فعال می‌شود و نهایتاً چنانچه دما از ۷۸۰ درجه سانتیگراد بیشتر شود، کوره تریپ می‌کند.

۱-۱-۲. کوره Holding

بیلت خارج شده از کوره، پس از عبور از استند اول، به منظور گرمایش مجدد از کوره Holding عبور می‌کند. در هنگام تولید خط به صورت نرمال، محصول خروجی استند اول، بدون اینکه در کوره Holding توقف

[1] Dilution Air

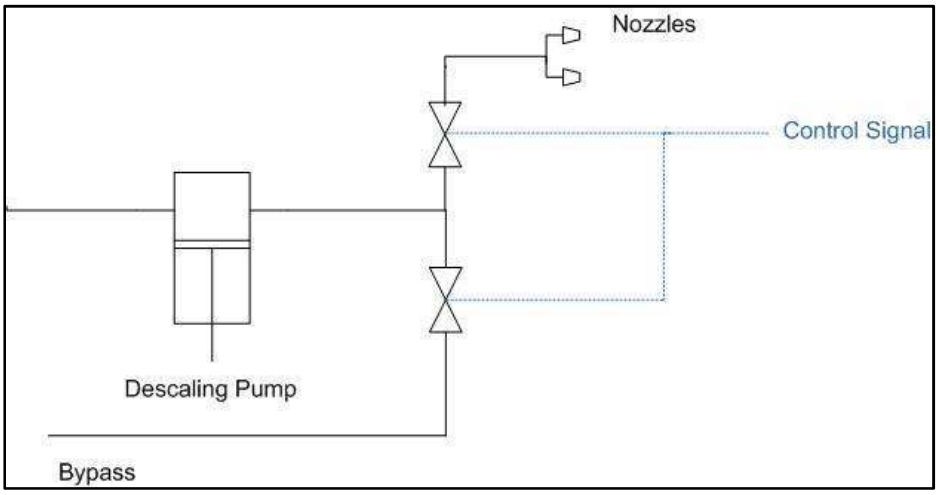
کند، از آن خارج می‌شود. اما چنانچه لازم باشد، این امکان وجود دارد که بیلت برای مدت زمان خاصی در کوره Holding باقی بماند. به عنوان مثال، چنانچه خط دچار توقف برنامه ریزی نشده شود، بیلت خروجی استند اول تا آماده شدن مجدد خط در این کوره باقی می‌ماند. اگر بیلت خروجی از استند اول دچار کاهش دما شود، تا رسیدن به دمای مناسب برای ادامه نورد در این کوره باقی می‌ماند.

کوره Holding دارای تعدادی مشعل است که در دیواره کوره قرار دارند. این کوره نیز، از نوع گامی است و این امکان وجود دارد که شش عدد بیلت در آن قرار بگیرد. برای این کوره رکوپراتور تعبیه نشده است، اما نسبت هوا به سوخت به صورت ۱۰ به ۱ کنترل می‌شود.

۱-۱-۳. پمپ پوسته‌زدا

از آنجا که لایه خارجی شمش گداخته شده در مجاورت هوا اکسید می‌شود، به منظور دستیابی به کیفیت مطلوب، از پمپ پوسته‌زدا برای جدا کردن این پوسته‌های سطحی استفاده می‌شود. این عمل به کمک دستگاه پوسته‌زدا و پاشیدن آب با فشار بالا، بر روی شمش انجام می‌شود. پمپ پوسته زدا قبل از استند اول واقع شده است. در این مرحله در اثر پوسته‌زدایی حدود ۱/۳٪ مواد اولیه ضایع می‌شود.

این پمپ معمولا از نوع رفت و برگشتی است. فلودیاگرام پمپ پوسته‌زدا در شکل۱-۴ نمایش داده شده است. در هنگام عبور بیلت از میان نازل‌های پوسته‌زدا، مسیر منتهی به نازل‌ها باز می‌شود و آب با فشار بر روی بیلت پاشیده می‌شود. پس از خروج بیلت از زیر نازل‌ها، مسیر منتهی به نازل‌ها بسته و مسیر بای‌پاس باز می‌شود. با توجه به اینکه این پمپ از نوع رفت و برگشتی است، در زمان بای‌پاس شدن جریان، توان مصرفی فقط صرف جبران افت فشار مسیر بای‌پاس می‌شود و توان مصرفی افت چشمگیری خواهد داشت. پمپ پوسته‌زدا در هنگام توقفات بلندمدت توسط اپراتور خاموش می‌شود، در حالی که در توقفات کوتاه مدت بای‌پس[1] می‌شود.



شکل۱-۴. فلودیاگرام پمپ پوسته‌زدا

[1] Bypass

۱-۱-۴. استندهای واحد نورد سبک

خط نورد سبک مجهز به تعدادی استند جهت نورد و تبدیل بیلت به مقاطع مختلف است.

استند اول از نوع رفت و برگشتی است. این استند مجهز به چندین شیار است که در هر پاس نورد، شمش از یکی از این شیارها عبور می‌کند. غلطک بالایی با حرکت عمودی فاصله این شیارها را تغییر می‌دهد. شمش با حرکت افقی روی میز نورد، در مقابل شیارها قرار می‌گیرد.

مابقی استندها از نوع تک پاس هستند، شمش بعد از عبور از این استندها و تغییر سطح مقطع، به محصول نهایی تبدیل می‌شود.

۱-۱-۵. گرید محصولات

آلیاژهای فولاد تولیدی بر مبنای میزان عناصر آلیاژی در سه گروه کم آلیاژ، آلیاژ متوسط و پرآلیاژ دسته‌بندی می شوند که در جدول۱-۱ این دسته‌بندی مشخص شده است. این دسته‌بندی با توجه به اطلاعات مربوط به درصد عناصر آلیاژی موجود در هر آلیاژ صورت گرفته است از جمله عناصر آلیاژی که در اکثر آلیاژها موجود است، می‌توان به کروم، نیکل، مس، قلع، تیتانیم و آلومینیم اشاره کرد، کروم بیشترین مقدار را نسبت به سایر عناصر دارد. علاوه بر این عناصر، کربن، سیلیس، منگنز، فسفر و گوگرد در تمامی آلیاژها موجود است.

جدول۱-۱. دسته‌بندی گریدهای فولاد تولیدی بر مبنای میزان عناصر آلیاژی

دسته-بندی	گریدها	
کم آلیاژ	0060I	1141D
	1121D	1181S
	1186D	1191S
	7035S	7176D
	9095I	
آلیاژ متوسط	1180P	1186P
	1209P	1249I
	1302P	5023D
	6541D	6582D
	7027J	7131S
	7139S	7147D
	7218P	7227D
	7264J	8159S
پرآلیاژ	2080S	2344D
	2379S	2436S
	4021D	7765D

دو آلیاژ مهم دسته کم آلیاژ 0060I و 1141D هستند که به ترتیب در ساخت میل‌گرد و فولاد ساده استفاده می‌شوند. یکی دیگر از آلیاژهای این دسته 7176D است که در ساخت فولاد فنر استفاده می‌شود. دو آلیاژ 1302P و 1209P از دسته آلیاژ متوسط بعنوان میکرو آلیاژ شناخته شده‌اند و در ساخت قطعات حساس اتومبیل استفاده می‌شوند. دو نمونه از آلیاژهای دسته پرآلیاژ که در فولاد ابزار کاربرد دارند 2379S و 2436D می‌باشند.

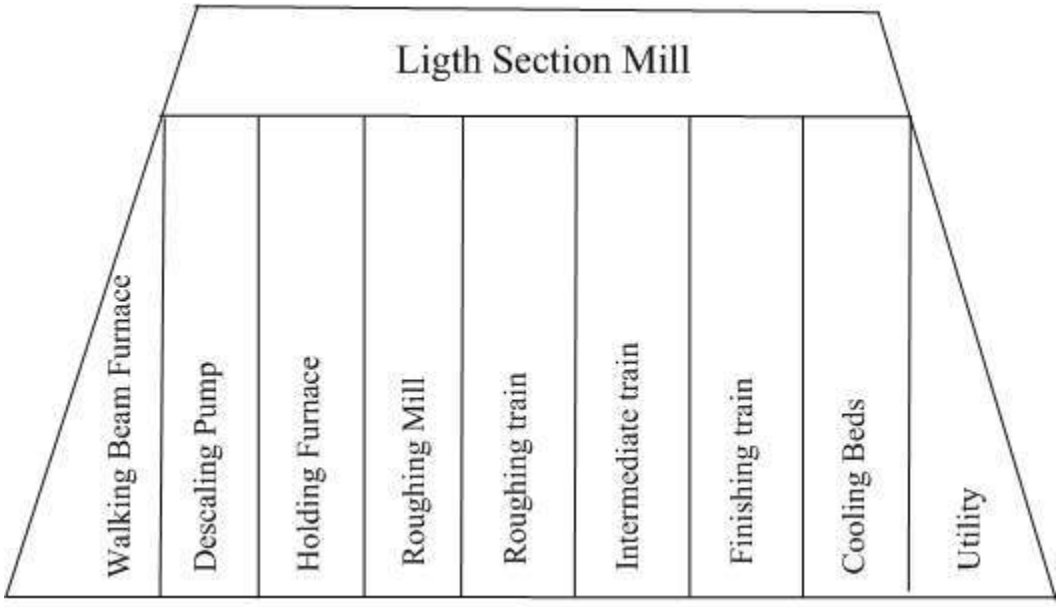
۱-۱-۶. عملیات حرارتی در واحد نورد سبک

برای برخی از گریدهای تولیدی، لازم است محصول تولید شده در انتهای خط، با گرادیان دمای خاصی خنک شود، یا برای مدت زمان خاصی حرارت ببینند.

در بعضی از موارد، به منظور اصلاح شرایط فیزیکی محصول تولیدی، سطح محصول را با فرو بردن در آب سریعاً خنک می‌کنند در حالیکه هسته آن همچنان گرم است. این فرایند، کوئنچینگ[1] نام دارد. در خط نورد سبک این سیستم پیش‌بینی شده است، اما به ندرت از آن استفاده می‌شود.

۱-۲. دسته‌بندی تجهیزات موجود در واحد نورد سبک

به منظور تسهیل در انجام ممیزی در واحد نورد سبک، سیستم‌های موجود در این واحد به صورت شکل۱-۵ دسته بندی شده است.



شکل۱-۵. دسته‌بندی تجهیزات و سیستمهای موجود در واحد نورد سبک

کورهٔ پیش‌گرم عمده‌ترین مصرف‌کننده انرژی حرارتی (گاز طبیعی) در واحد نورد سبک است. با توجه به

[1] Quenching

اینکه نحوهٔ بهره‌برداری از این تجهیز می‌تواند تاثیر بسزایی بر مصرف ویژه انرژی آن داشته باشد، لذا بیشترین توجه نیز بر روی نحوه بهره‌برداری از این کوره متمرکز خواهد شد. اندازه‌گیری‌های صورت پذیرفته در کورهٔ پیش‌گرم، شامل اندازه‌گیری دمای بدنهٔ کوره، آنالیز دود خروجی از کوره و اندازه‌گیری پارامترهای مهم در رکوپراتور شامل دمای هوا و دود در ورود و خروج از رکوپراتور می‌باشد. علاوه بر این، میزان گاز مصرفی کوره در بازه زمانی اندازه‌گیری نیز ثبت شده است.

در ارتباط با سایر تجهیزات نیز مانند پمپ پوسته‌زدا، استندهای نورد و ... میزان توان مصرفی اندازه‌گیری شده است. میزان آب مصرفی واحد نورد نیز اندازه‌گیری شده است.

۱-۳. سیستم توزین مواد اولیه و محصولات در واحد نورد

در ورودی واحد نورد سبک، سیستم توزین وجود دارد. بیلت ورودی قبل از ورود به کوره توسط باسکول وزن شده، و در سیستم اتوماسیون ثبت می‌شود.

در خروجی واحد نورد سبک نیز، سیستم جداگانه‌ای به منظور توزین محصول وجود دارد، که محصول تولیدی وزن شده و در سیستم اتوماسیون ثبت می‌شود.

لازم به ذکر است، سیستم توزین واحد نورد سبک باید هر دو ماه یک بار توسط کارشناسان کالیبره شود.

فصل دوم
ممیزی انررژی واحد نورد سبک

در این بخش از گزارش ممیزی انرژی واحد نورد سبک در کارخانجات فولاد مورد توجه قرار می گیرد.

۲-۱. ممیزی انرژی حرارتی

کوره گامی (Walking Beam Furnace) و کوره Holding عمده مصرف کنندگان گاز طبیعی در واحد نورد سبک فولاد هستند، بنابراین بررسی و بهینه سازی مصرف انرژی در آن از لحاظ اقتصادی بسیار حائز اهمیت است.

۲-۱-۱. بررسی شرایط کارکرد تجهیزات خط تولید و انجام اندازه‌گیرهای لازم

جهت بررسی وضعیت مصرف انرژی در تجهیزات مختلف واحد نورد سبک، لازم است پارامترهای مرتبط با مصرف و اتلاف انرژی مورد اندازه‌گیری قرار گیرند.

به منظور محاسبه راندمان کوره و همچنین بررسی عملکرد عایق‌های حرارتی، لازم است میزان تلفات تشعشعی کوره محاسبه شود. بدین منظور، با استفاده از دستگاه ترموویژن، دمای سطوح بیرونی کوره (دیواره‌های جانبی و سقف کوره) اندازه‌گیری می شود. علاوه بر آن برای محاسبهٔ راندمان کوره، دمای محیط و دمای بیلت در ورود و خروج از کوره نیز اندازه‌گیری می شود.

از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر عملکرد کوره، میزان هوای اضافه موجود در احتراق است. بدین منظور در مکانی مناسب، دود خروجی از کوره مورد آنالیز قرار گرفته و میزان هوای اضافه مورد استفاده در احتراق محاسبه شده است.

با توجه به اینکه کورهٔ پیش‌گرم، جهت بازیابی انرژی دود خروجی از کوره، مجهز به رکوپراتوراست، لازم است عملکرد رکوپراتورمورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور، دمای دود و هوا در ورودی و خروجی رکوپراتور ثبت شده است.

جهت خنک‌کاری تجهیزات واحد نورد سبک از سه نوع سیکل آب غیر مستقیم و یک نوع مستقیم استفاده می‌شود.

KW: سیکل باز آب (مستقیم)، جهت خنک‌کاری گازبند و غلطک‌ها

CW: سیکل بسته آب (غیر مستقیم)، جهت خنک‌کاری دوربین‌ها

QW: سیکل آب غیر مستقیم، جهت خنک‌کاری رولینگ‌ها و Kick-off

EW: آب اضطراری (غیر مستقیم)، سیکل بسته آب جهت خنک‌کاری رولینگ‌ها و Kick-off، زمانیکه آب QW به هر دلیلی قطع شده باشد.

آنالیز گازهای خروجی از دودکش کوره گامی، شامل دمای دود ($FT\ [^0C]$)، درصد اکسیژن ($O_2\%$)، میزان مونوکسید کربن ($CO\ [ppm]$)، درصد دی‌اکسید کربن ($CO_2\%$) و دمای هوای محیط ($AT\ [^0C]$) انجام پذیرفته است.

۲-۱-۲. بررسی وضعیت عایقکاری تجهیزات و شناسایی سطوح بدون عایق

در طراحی‌ها عموماً اتلاف حرارتی از بدنه کوره حدود ۲ درصد منظور می‌شود. اصولاً عایق‌های به کار رفته در کوره‌ها از نظر سرویس‌دهی مناسب، عمر معینی دارند و به مرور زمان ساختمان کریستالی آنها تغییر یافته و ضخامت آن‌ها کم می‌شود و این تغییرات ساختمانی موجب افزایش ضریب انتقال حرارت و افزایش اتلاف انرژی به بیرون خواهد شد.

در صورتی که عایق دیواره‌های کوره بر اثر ساخت ناصحیح، عدم انجام صحیح Curing بر مبنای دستورالعمل، در اثر حرارت زیاد و یا شوک‌های حرارتی ترک بردارد، نشت گازهای حاصل از احتراق و بخار آب در لابلای این ترک‌ها و تجمع آن‌ها در لایه بین بدنه کوره و عایق دیواره و سرد شدن تدریجی آن‌ها تا دمای نقطه شبنم، باعث خوردگی بدنه می‌شود.

تداوم این امر ضمن اتلاف مقدار بسیار زیاد انرژی (از طریق بدنه کوره به محیط اطراف)، باعث ریختن عایق و در نتیجه اتلاف بیشتر انرژی و گسترش خوردگی بر روی بدنه کوره و سایر نقاط آن خواهد شد. در کوره‌هایی که چندین سال از عمر عایق آن گذشته، ضمن جدا شدن عایق از دیواره کوره و گسترش خوردگی در نقاط مختلف بدنه، گرم شدن بدنه کوره نیز موجب خم شدن دیواره ها می‌شود، در نتیجه سرعت خوردگی افزایش یافته و باعث خرابی قسمت های مختلف کوره می شود. به طور کلی برای جلوگیری و یا کاهش مشکلات خورندگی بر روی بدنه کوره، لازم است به هنگام تعمیرات اساسی ضمن توجه به عمر عایق دیواره، در صورتی که عمر آنها از حد معمول گذشته باشد (البته با توجه به درجه حرارتی که در هنگام کار کردن واحد در معرض آن بوده‌اند) آن‌ها را با عایق مناسب و استاندارد تعویض کرد و در صورت وجود ترک (قبل و یا بعد از ساخت)، محل ترک ها با الیاف مخصوص KAOWOOL پر شود.

همانطور که بیان شد سطوح کوره به علت تفاوت دما با دمای محیط اطراف کوره، دارای تلفات حرارتی به صورت انتقال حرارت جابجایی و تشعشع می‌باشند. به همین دلیل سعی می‌شود با عایق‌کاری کوره‌ها تا حد ممکن اختلاف دمای سطوح کوره و دمای محیط کاهش یابد.

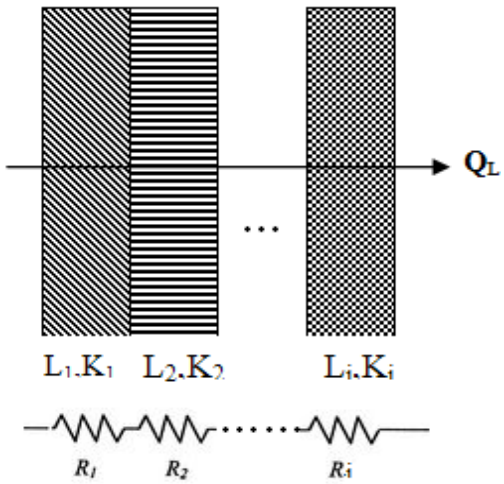
به منظور بررسی عایق کاری کوره در شرایط موجود، ابتدا در صورت امکان مقاومت حرارتی دیواره‌های کوره

در شرایط طراحی و شرایط موجود، محاسبه و با هم مقایسه می‌شوند. سپس با بررسی عکس‌های گرفته شده توسط دستگاه Thermovision نقاطی از بدنه کوره که دچار ریزش عایق شده شناسایی و مورد بررسی قرار می‌گیرد.

برای محاسبه مقاومت حرارتی دیواره کوره بر حسب اطلاعات موجود می‌توان از دو روش زیر استفاده نمود.

۱-در صورت وجود اطلاعات مربوط به ضخامت لایه‌ها و رسانش گرمایی آن‌ها، به کمک رابطه (۱) می‌توان مقاومت حرارتی کل دیواره‌های کوره را محاسبه نمود. (شکل۲-۱)

$$R_{tot} = \sum \frac{L_i}{K_i A_i} \qquad (۱)$$



شکل۲-۱. مقاومت حرارتی دیوار کوره

۲- در صورت وجود اطلاعات مربوط به دمای محیط (T_a)، دمای جداره داخلی (T_i)، دمای جداره خارجی (T_s)، سرعت باد و ضریب نشر کوره (ε)، ابتدا شار حرارتی گذرنده از دیواره کوره به کمک رابطه (۲) محاسبه و سپس از طریق رابطه (۳) مقاومت حرارتی کوره محاسبه می‌شود.

$$Q = 0.174 \times \varepsilon \times (T_s{}^4 - T_a{}^4) \times 10^{-8} + 0.296 \times (T_s - T_a)^{1.25} \times \sqrt{\frac{v_m + 69}{69}} \qquad (۲)$$

در رابطه فوق:

Q: نرخ تلفات حرارتی در واحد سطح $\frac{BTU}{hr.ft^2}$

T_s: دمای سطح خارجی کوره بر حسب رانکین

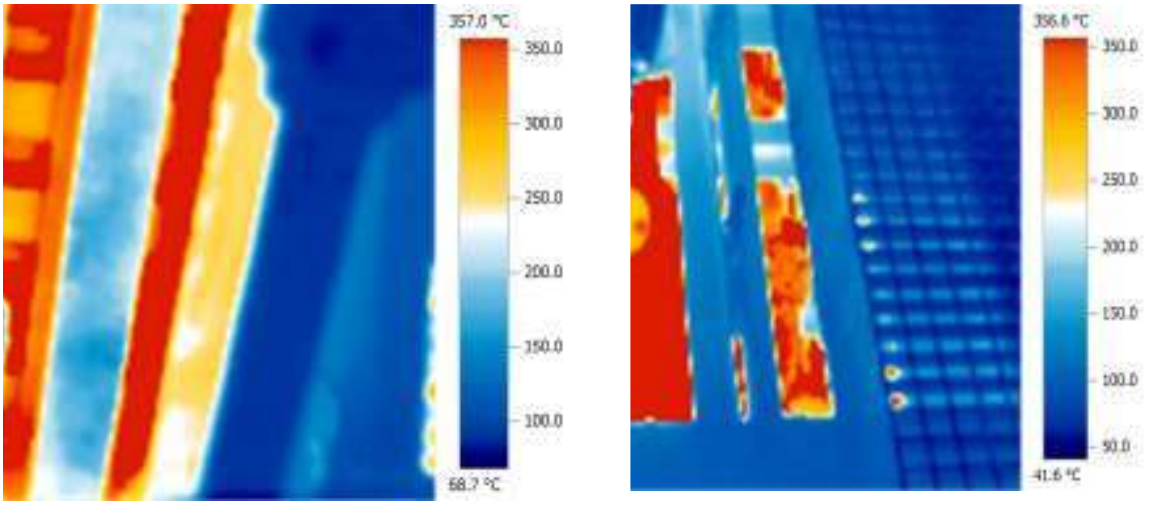
T_a: دمای محیط بر حسب رانکین

ε: ضریب صدور تشعشع سطوح خارجی

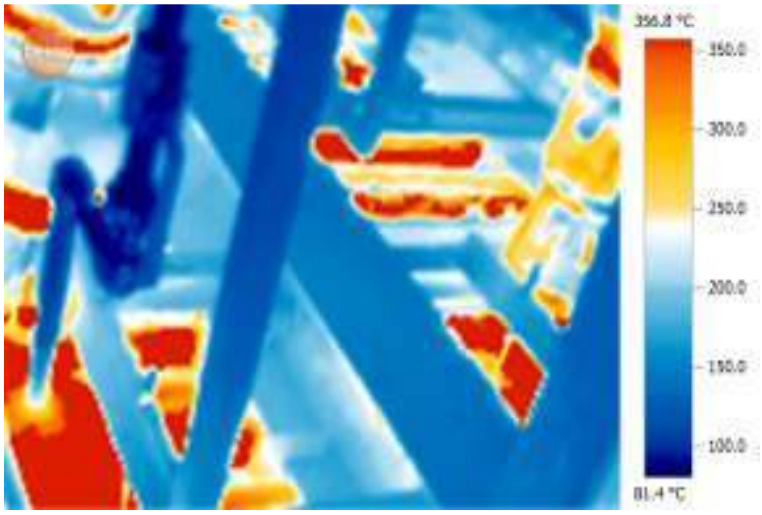
v_m: سرعت باد بر حسب فوت بر دقیقه

$$R_{tot} = \frac{T_i - T_o}{Q} \qquad (۳)$$

نمونه ای از عکس های گرفته شده توسط دستگاه Thermovision در شکل۲-۲ و شکل۲-۳ نشان داده شده است. همانطور که از این عکس ها مشخص است، به علت توزیع پیوسته دما در سطوح دیواره های کوره پیشگرم فولاد، ریزش عایق در دیواره های آن وجود ندارد.

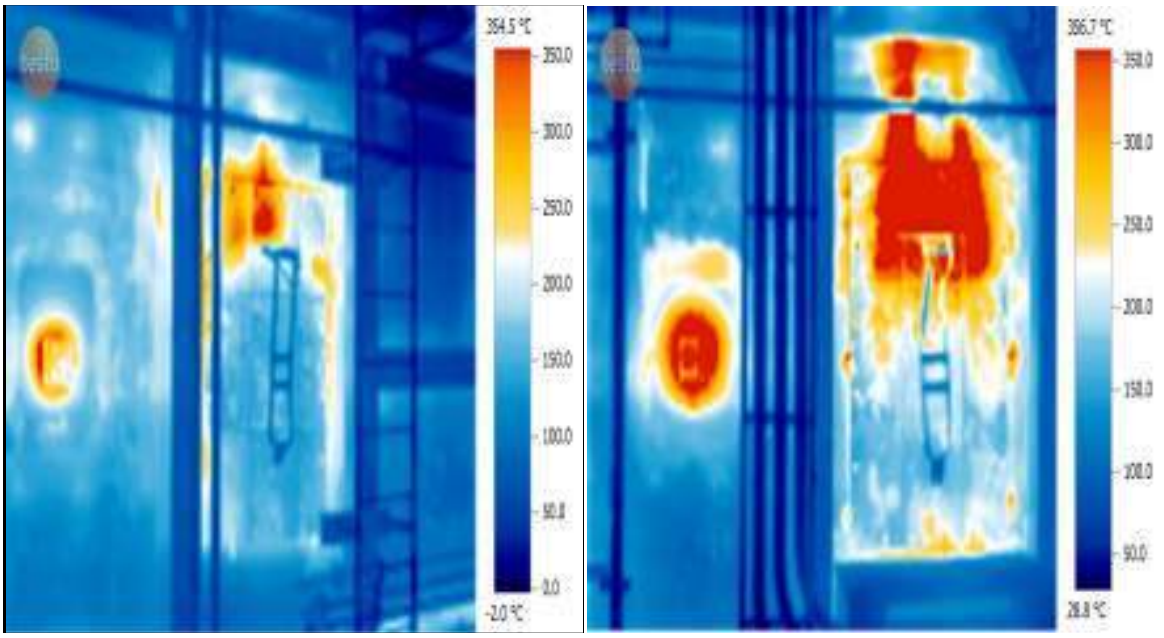


(ب) (الف)

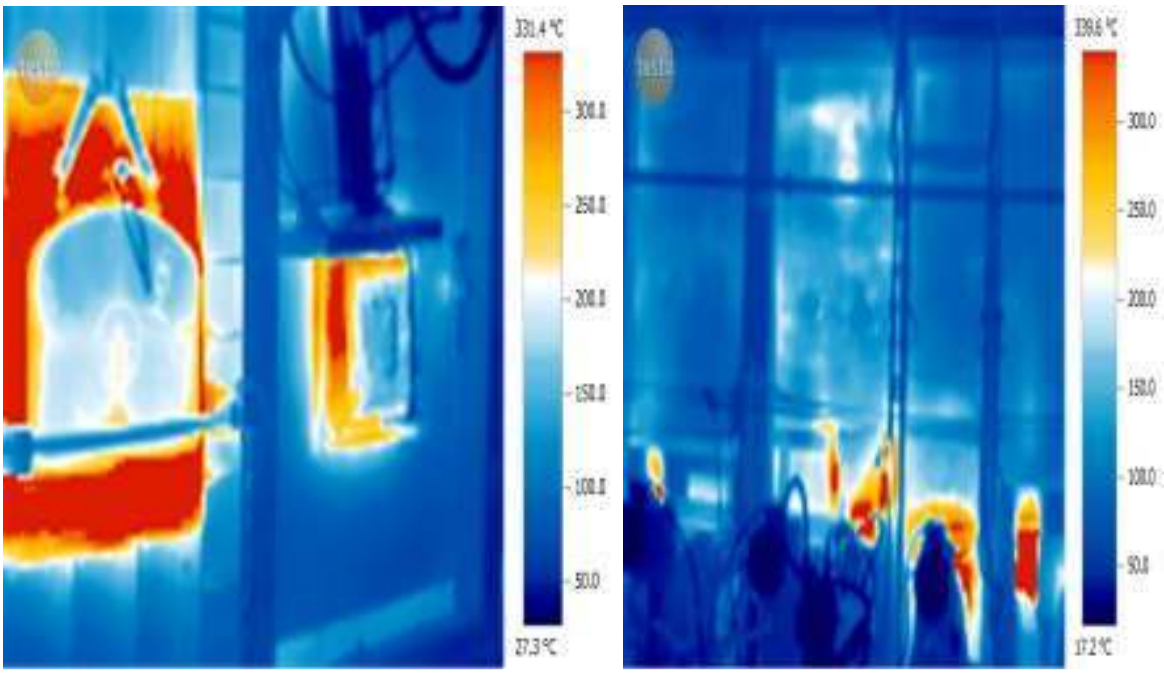


(ج)

شکل۲-۲. (الف)، (ب) و (ج) توزیع دما سقف کوره فولاد



(ب) (الف)



(د) (ج)

شکل۲-۳. (الف)، (ب)، (ج) و (د) توزیع دما دیوار های جانبی کوره فولاد

۲-۱-۳. شناسایی فاکتورهای قابل اندازه‌گیری حامل‌های انرژی (بدون ابزار و ادوات ممیزی) جهت تعیین انرژی ویژهٔ حرارتی و تعیین نوع و محل نصب کنتورهای مورد نیاز در خط تولید

همان طور که قبلا ذکر شد، کوره های پیشگرم عمده‌ترین مصرف‌کننده انرژی حرارتی در واحد نورد هستند. جهت محاسبه انرژی ویژه حرارتی (SEC[1]) باید میزان مصرف انرژی کوره را محاسبه نمود. میزان مصرف انرژی کوره به کمک دو روش مستقیم و غیر مستقیم تعیین می‌شود.

جهت محاسبه انرژی مصرفی کوره‌ها به کمک روش غیر مستقیم، باید اتلافات کوره‌ها محاسبه شود. اندازه‌گیری پارامترهای مورد نیاز جهت محاسبه اتلافات در روش غیر مستقیم نیاز به دستگاه‌های اندازه گیری دارد. به طور مثال، جهت محاسبه اتلافات دود خروجی از دودکش باید میزان اکسیژن موجود در دود خروجی اندازه‌گیری شود، که این اندازه‌گیری توسط دستگاه آنالایزر دود صورت می‌گیرد.

در روش مستقیم جهت محاسبه مصرف انرژی کوره، بر خلاف روش غیر مستقیم که در بالا توضیح داده شد، نیازی به محاسبه اتلافات و به تبع آن نیازی به استفاده از ابزار و ادوات ممیزی نیست. بلکه برای محاسبه انرژی مصرفی از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$\text{انرژی مصرفی کوره} = m_g \times LHV_g$$

بر اساس نیاز و هدف گذاری‌های کارخانه فولاد، می‌توان میزان مصرف ویژه انرژی واحد نورد سبک را به صورت کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت محاسبه نمود. بدین منظور اطلاعات زیر مورد نیاز است:

۱- میزان مصرف گاز در بازه زمانی مورد نظر: اولین قدم جهت پایش مصرف انرژی به صورت دقیق، مداوم و محاسبه مصرف ویژه انرژی بدون ابزار و ادوات ممیزی، نصب یک کنتور گاز مجهز به تصحیح‌گر دما و فشار در مسیر گاز ورودی به کوره پیشگرم است.

۲- ارزش حرارتی: بر اساس آنالیز سوخت گاز مصرفی، ارزش حرارتی آن تعیین می شود.

۳- میزان تولید: با توجه به ثبت شدن میزان تولید در واحد نورد سبک کارخانجات فولاد ، تناژ تولید در بازه زمانی مورد نظر موجود می باشد.

با اندازه‌گیری میزان مصرف گاز، ارزش حرارتی سوخت و میزان تولید در بازه زمانی موردنظر، SEC واحد نورد سبک تعیین می‌شود.

با توجه به اینکه توقفات در افزایش مصرف ویژه انرژی نقش بسزایی دارد، به همین دلیل محاسبه و مقایسه SEC در بازه‌های زمانی مشخص (به طور مثال بازه‌های زمانی یک ماهه) بدون در نظر گرفتن اثر توقفات نتایج درستی را در بر ندارد. به طور مثال ممکن است کوره در یک ماه در بهترین شرایط عملکرد بوده باشد، اما به علت نقص فنی استندها و افزایش زمان توقفات، SEC در این بازه زمانی از SEC سایر ماه‌ها و SEC متوسط سالانه بیشتر باشد. در نتیجه تنها با استفاده از SEC در این بازهٔ زمانی نمی‌توان در مورد عملکرد کوره یا خط نورد

[1] Specific Energy Consumption

سبک اظهار نظر کرد. به همین دلیل به منظور تحلیل دقیق‌تر عملکرد واحد نورد، علاوه بر مقایسه مقدار SEC در بازه‌های زمانی متفاوت، باید توقفات و علت آن را نیز مدنظر داشت.

۲-۲. شناسایی عوامل موثر بر مصرف انرژی در بخش‌های مختلف فرایند تولید

کوره‌های پیش‌گرم از بزرگترین مصرف کنندگان سوخت فسیلی‌اند. در سال ۱۹۶۰ میلادی، میزان سوخت مصرفی کوره‌های نوع Pusher در گستره (kcal/ton) ۳۷۰×۱۰^{۳}-۴۵۰×۱۰^{۳} و برای کوره‌های نوع Walking-Beam در گستره (kcal/ton) ۴۵۰×۱۰^{۳}-۵۹۰×۱۰^{۳} بوده است. در حالیکه در سال ۱۹۸۹ میلادی، میزان مصرف کوره‌های پیش‌گرم به علت اجرای راهکارهای کاهش مصرف انرژی به حدود (kcal/ton) و می‌تواند بین ۰/۷ تا ۶/۵ گیگاژول بر تن تغییر کند. همچنین مصرف ویژه انرژی به ازای هر تن محصول خروجی از ۱/۱۳ GJ/ton تا ۱۰/۹۹ GJ/ton متغیر بوده و به طور میانگین ۱/۹ GJ/ton برای کوره‌های ۲۰۳×۱۰^{۳}-۵۶۶×۱۰^{۳} کاهش یافت. مصرف ویژه انرژی به عواملی همچون طراحی کوره، عملکرد و ... وابسته بوده top-fired و ۲/۰ GJ/ton برای کوره‌های top-and-bottom fired می‌باشد [۱].

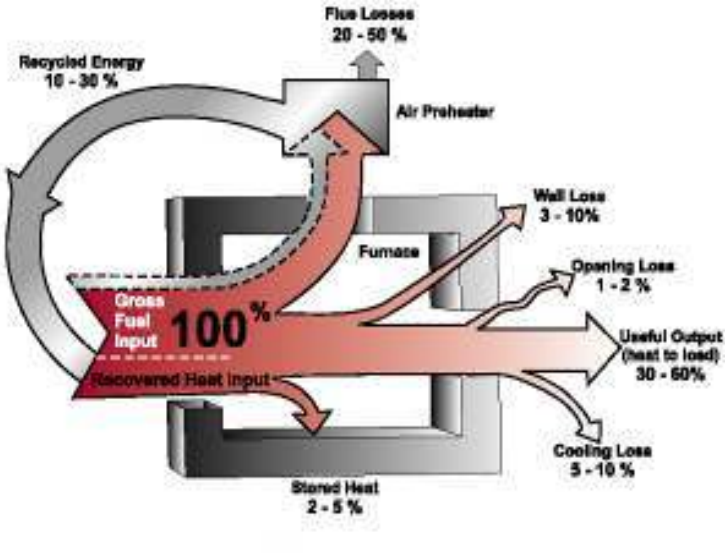
سهم عمده مصرف انرژی در واحدهای نورد سبک مربوط به کوره‌های پیش‌گرم می‌باشد، به طوریکه با صرف نظر از مصارف اندک جانبی در واحد نورد سبک (مصارف گاز جهت گرمایش محیط و ...) می‌توان گفت تمام گاز ورودی به واحد نورد سبک در کوره‌های پیش‌گرم مصرف می‌شود. به همین دلیل شناسایی عوامل موثر بر مصرف انرژی در کوره پیش‌گرم تاثیر بسزایی در شناسایی فرصت‌های صرفه‌جویی و کاهش مصرف انرژی دارد.

از دیدگاه انرژی، یک کوره ایده‌ال، کوره‌ای است که تا حد ممکن بیشترین مواد شارژ شده را با کمترین مصرف سوخت و انرژی به دمای مورد نظر برساند.

مستقل از نوع فرایند به کار رفته، انرژی مصرفی از دو قسمت اتلافات و انرژی مفید خروجی تشکیل شده است. در واقع عوامل موثر بر اتلافات و انرژی مفید خروجی، عوامل موثر بر مصرف انرژی کوره پیش‌گرم می‌باشند. به همین منظور ابتدا عوامل مذکور معرفی شده و سپس سهم هر یک در مصرف انرژی یک کارخانه فولاد تعیین می‌گردد.

۲-۲-۱. اتلافات

دیاگرام سانکی عمومی یک کوره پیش‌گرم در شکل۲-۴ نمایش داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است، بیشترین سهم اتلافات انرژی مربوط به اتلافات دود خروجی از دودکش می‌باشد. به همین دلیل ابتدا عوامل موثر بر میزان اتلافات انرژی دود خروجی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

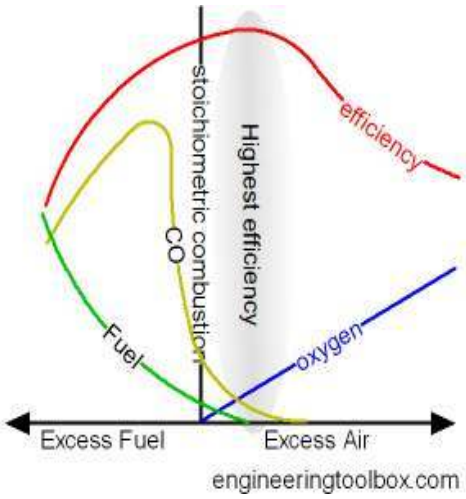


شکل۲-۴. دیاگرام سانکی عمومی از یک کوره پیش گرم

۲-۲-۱-۲. میزان هوای اضافه

میزان هوای لازم جهت احتراق کامل سوخت در حالت تئوری، هوای استوکیومتریک نامیده می‌شود که در صورت مخلوط شدن کامل سوخت با این میزان هوا، احتراق کامل صورت خواهد گرفت و مشعل بالاترین راندمان حرارتی را خواهد داشت. ولی با توجه به اینکه مخلوط شدن کامل هوا و سوخت در عمل به میزان صد در صد انجام نمی‌شود، لذا همانگونه که در شکل۲-۵ ملاحظه می‌گردد، بالاترین راندمان مشعل در حالتی اتفاق می‌افتد که مقداری هوای اضافه (Excess Air) وجود داشته باشد.

البته همانگونه که شکل۲-۵ نشان می دهد با افزایش بیش از حد هوای اضافه راندمان حرارتی مشعل کاهش می‌یابد که دلیل آن، جذب حرارت توسط هوای اضافه ورودی می‌باشد.



شکل۲-۵. شماتیک سیستم بازیافت حرارت کوره‌های پیشگرم

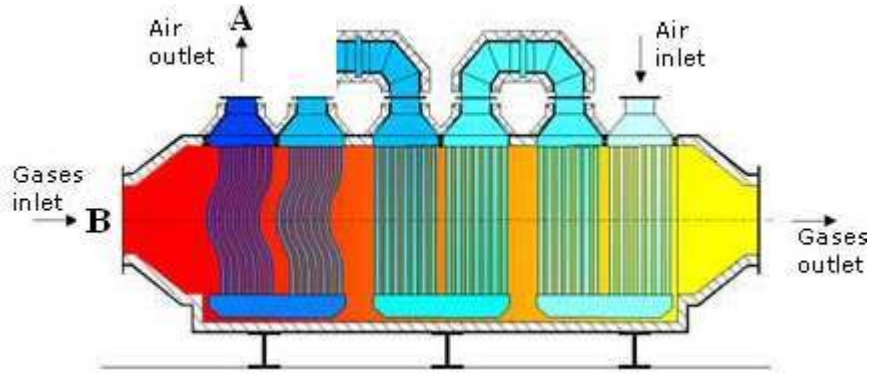
اثر هوای اضافه بر راندمان احتراق میزان هوای اضافه مناسب برای کوره‌های پیشگرم با سوخت گاز طبیعی، ۵ درصد است. در جدول۲-۱ اثر افزایش میزان هوای اضافه بر مصرف انرژی گزارش شده است.

جدول۲-۱. اثر هوای اضافه بر میزان مصرف انرژی کوره پیش‌گرم فولاد

هوای اضافه (%)	افزایش مصرف انرژی (%)
5	Base
10	1.46
20	4.61
30	8.16

۲-۲-۱-۳. دمای دود و هوای پیش‌گرم

سیستم بازیافت حرارت کوره پیش‌گرم فولاد، رکوپراتور می‌باشد (شکل۲-۶). دمای Set point های رکوپراتور (نقاط A و B در شکل۲-۶) که توسط اوپراتورهای کوره تنظیم می‌شود، اثر مستقیمی بر میزان اتلافات دود دارد. علاوه بر این، در صورت نقص فنی رکوپراتور (گرفتگی لوله‌های رکوپراتور، سوراخ شدن لوله‌های رکوپراتور و نشت هوای احتراق در دود و...) دمای هوای ورودی به مشعل‌ها به حد مطلوب نرسیده و اتلافات دود افزایش می‌یابد.



شکل۲-۶. شماتیک سیستم بازیافت حرارت کوره‌های پیشگرم

همانطور که از شکل۲-۴ مشخص است سایر اتلافات ازجمله اتلافات آب خنک کن، اتلافات حرارتی از دیوارهای کوره و... علاوه بر اینکه نقش چندانی در مصرف انرژی کوره ندارند، مستقل از چگونگی بهره‌برداری نیز می‌باشند. به همین دلیل از بررسی بیشتر آنها صرف نظر شده است.

۲-۲-۲. انرژی مفید خروجی

یکی دیگر از عوامل موثر در مصرف انرژی کوره پیش‌گرم، انرژی مفید خروجی می‌باشد. از عوامل موثر بر انرژی مفید خروجی می‌توان به دمای شمش ورودی و توقفات اشاره کرد.

۲-۲-۲-۱. دمای شمش ورودی

یکی از پارامترهای موثر در میزان مصرف انرژی کوره، انرژی مفید خروجی یا حداقل انرژی مورد نیاز جهت رساندن دمای شمش داخل کوره به حد مطلوب می‌باشد.

در صورتی که بتوان از طریق hot charge یا استفاده از انرژی دود خروجی از دودکش، دمای شمش ورودی به کوره را افزایش داد، میزان انرژی مفید خروجی و به تبع آن مصرف انرژی کوره کاهش می‌یابد.

۲-۲-۲-۲. توقفات

ایده‌آل‌ترین حالت برای یک کوره زمانی حاصل می‌گردد که کوره بتواند در طول مدت بهره برداری به صورت مداوم با بیشترین ظرفیت ممکن، تولید کند. اما در عمل به علت توقفات، مدت زمان زیادی از عملکرد کوره به صورت Partial Production و Idling می‌باشد. به طور معمول ۳۰٪ از زمان کارکرد یک کوره به صورت Idling (بی باری)، ۲۰٪ به صورت Partial Production (۷۵٪ ظرفیت نامی) و ۵۰٪ از زمان کارکرد با ظرفیت نامی می باشد [۲]. همانطور که بیان شد انرژی مصرفی کوره برابر است با:

$$\text{انرژی مصرفی کوره} = \text{انرژی مفید خروجی} + \text{اتلافات} \quad (۴)$$

$$\text{راندمان کوره} = \frac{\text{انرژی مفید خروجی}}{\text{انرژی مفید خروجی} + \text{اتلافات}} = 1 - \frac{\text{اتلافات}}{\text{انرژی مصرفی کوره}} \quad (۵)$$

در توقفات، به جز موارد برنامه ریزی شده یا توقفات طولانی، اتلافات انرژی کوره تقریبا ثابت می‌باشد [۲]. پس با توجه به رابطه (۵)، با کاهش تولید یا همان انرژی مفید خروجی، راندمان کوره کاهش و با افزایش تولید، راندمان کوره افزایش می یابد. توقفات، با کاهش میزان تولید کوره، باعث کاهش راندمان، یا به عبارت دیگر باعث افزایش انرژی مخصوص کوره می شوند.

عوامل موثر بر میزان مصرف انرژی کوره پیش‌گرم را به عوامل داخلی و عوامل خارجی نیز می‌توان تقسیم کرد. عوامل داخلی عبارتند از میزان هوای اضافه، دمای شمش ورودی و... که به تفصیل توضیح داده شد. از جمله عوامل خارجی می‌توان به دمای محیط اشاره کرد. دمای محیط بر دمای هوای احتراق و دمای شمش ورودی اثر گذار می‌باشد.

مراجع:

[1] "Energy Consumption in Continuous Steel Reheating Furnaces".

[2] Si, Minxing, Thompson, Shirley Calder, "Energy efficiency assessment by process heating assessment and survey tool (PHAST) and feasibility analysis of waste heat recovery in the reheat furnace at a steel company", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15, Issue 6, August 2011, Pages 2904–2908.

بررسی عملکرد و ممیزی انرژی

واحد نورد سبک در کارخانجات فولاد

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول : فرآیند نورد سبک کارخانه ی فولاد **۵**

۱-۱. شرح فرآیند واحد نورد سبک ۵
۱-۱-۲. کوره گامی ۶
۱-۱-۲-۱. هوای احتراق ۷
۱-۱-۲-۲. نحوه کنترل فشار کوره ۸
۱-۱-۲-۳. ورود و خروج بیلت از کوره ۸
۱-۱-۲-۴. نحوه کنترل دمای مناطق مختلف کوره ۹
۱-۱-۲-۵. نحوه کنترل دمای کوره در زمان توقفات ۹
۱-۱-۲-۶. کنترل دمای هوا و دود در ورودی و خروجی رکوپراتور ۹
۱-۱-۳. کوره Holding ۹
۱-۱-۴. پمپ پوسته‌زدا ۱۰
۱-۱-۵. استندهای واحد نورد سبک ۱۱
۱-۱-۶. گرید محصولات ۱۱
۱-۱-۷. عملیات حرارتی در واحد نورد سبک ۱۲
۱-۲. دسته‌بندی تجهیزات موجود در واحد نورد سبک ۱۲
۱-۳. سیستم توزین مواد اولیه و محصولات در واحد نورد ۱۳

فصل دوم : ممیزی انرژی واحد نورد سبک **۱۴**

۲-۱. ممیزی انرژی حرارتی ۱۴
۲-۱-۱. بررسی شرایط کارکرد تجهیزات خط تولید و انجام اندازهگیرهای لازم ۱۴
۲-۱-۲. بررسی وضعیت عایقکاری تجهیزات و شناسایی سطوح بدون عایق ۱۵
۲-۱-۳. شناسایی فاکتورهای قابل اندازه‌گیری حامل‌های انرژیجهت تعیین انرژی ویژهٔ حرارتی ۱۹
۲-۲. شناسایی عوامل موثر بر مصرف انرژی در بخش‌های مختلف فرایند تولید ۲۰
۲-۲-۱. اتلافات ۲۰
۲-۲-۱-۲. میزان هوای اضافه ۲۱
۲-۲-۱-۳. دمای دود و هوای پیش‌گرم ۲۲
۲-۲-۲. انرژی مفید خروجی ۲۲
۲-۲-۲-۱. دمای شمش ورودی ۲۳
۲-۲-۲-۲. توقفات ۲۳

مراجع ۲۴

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول۱-۱. دسته بندی گریدهای فولاد تولیدی بر مبنای میزان عناصر آلیاژی ۱۱

جدول۲-۱. اثر هوای اضافه بر میزان مصرف انرژی کوره پیش‌گرم فولاد ۲۲

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل۱-۱. نمودار گردش مواد در واحد نورد سبک ۵

شکل۱-۲. نحوه شارژ و دیسشارژ بیلت در کوره گامی واحد نورد سبک ۶

شکل۱-۳. نحوهٔ گردش و کنترل هوای احتراق ۷

شکل۱-۴. فلودیاگرام پمپ پوسته‌زدا ۱۰

شکل۱-۵. دسته‌بندی تجهیزات و سیستمهای موجود در واحد نورد سبک ۱۲

شکل۲-۱. مقاومت حرارتی دیوار کوره ۱۶

شکل۲-۲. (الف)، (ب) و (ج) توزیع دما سقف کوره فولاد ۱۷

شکل۲-۳. (الف)، (ب)، (ج) و (د) توزیع دما دیوار های جانبی کوره فولاد ۱۸

شکل۲-۴. دیاگرام سانکی عمومی از یک کوره پیش گرم ۲۱

شکل۲-۵. شماتیک سیستم بازیافت حرارت کوره‌های پیشگرم ۲۱

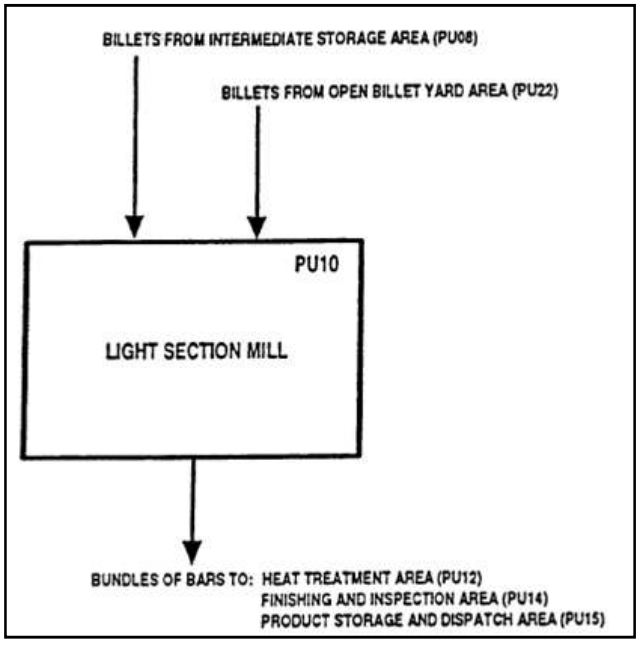
شکل۲-۶. شماتیک سیستم بازیافت حرارت کوره‌های پیشگرم ۲۲

فصل اول
فرآیند نورد سبک کارخانه فولاد

در این بخش فرآیند نورد سبک کارخانه فولاد شرح داده می شود.

۱-۱. شرح فرآیند واحد نورد سبک

خط نورد سبک وظیفه تبدیل بیلت به محصولات نهایی شامل مقاطع گِرد و تخت را بر عهـده دارد. بیلـت در خط نورد سبک تولید و پس از عبور از ناحیه آماده سازی بیلت و ذخیره سازی، به ناحیه نورد سبک وارد می‌شـود. در شکل۱-۱ شماتیکی از گردش مواد در ناحیه نورد سبک نمایش داده شده است.



شکل۱-۱. نمودار گردش مواد در واحد نورد سبک

بیلت‌های وارد شده به خط نورد سبک دارای مقطع مختلف با سایز های مختلف اسـت. بـه طـور کلـی، خـط نورد سبک شامل سه منطقه به شرح ذیل می‌باشد:

- منطقه پیشگرم بیلت شامل کوره پیشگرم
- منطقه نورد شامل قفسه‌های نورد

- منطقه خنک کردن محصول شامل بسترهای خنک کننده

بیلت ضمن عبور از کوره پیشگرم تا دمای مناسب برای نورد، گرم می‌شود و با عبور از استندهای خط نورد سبک، تا رسیدن به سایز نهایی، تغییر مقطع می‌دهد. بعد از خاتمه نورد، برای خنک شدن، محصولات تولیدی به بسترهای خنک کننده منتقل می‌شوند.

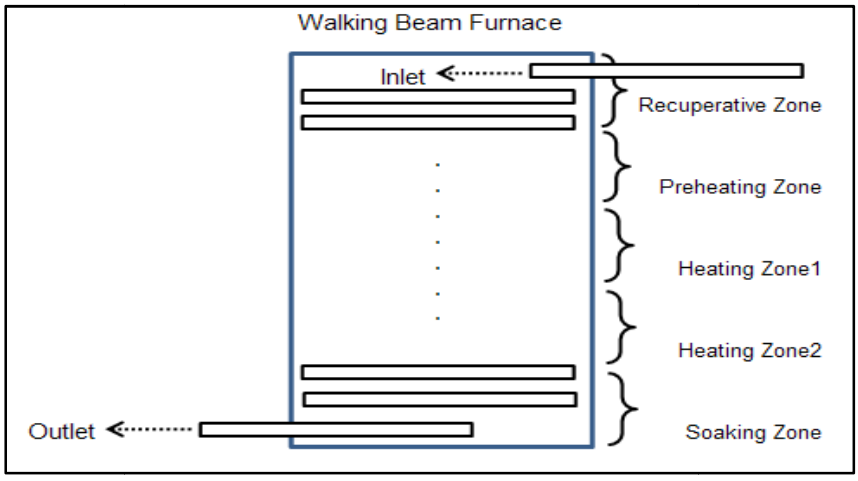
محصولات تولید شده در واحد نورد سبک، با توجه به نوع و گرید محصول، جهت انجام فرایندهای تکمیلی، به واحدهای مختلف به شرح زیر منتقل می‌شود:

- واحد عملیات حرارتی
- واحد نظارت و تکمیل‌کاری
- واحد ذخیره سازی

۱-۱-۱. کوره گامی

بیلت ورودی به واحد نورد سبک، ضمن عبور از کوره گامی (Walking Beam Furnace) و قفسه‌های نورد به محصول تبدیل می‌شود. بیلت خروجی از کوره، برای فولاد با گریدهای مختلف، بین ۱۱۰۰ تا ۱۲۸۰ درجه سانتیگراد گرم می‌شود.

در شکل ۱-۲ شماتیک شارژ و دیس شارژ کوره گامی واحد نورد سبک نمایش داده شده است. بیلت‌ها از دیواره جانبی کوره توسط رول‌های مخصوصی وارد می‌شود. بیلت وارد شده با گام زدن داخل کوره حرکت می‌کند و نهایتاً از دیواره مقابل خارج می‌شود.



شکل ۱-۲. نحوه شارژ و دیسشارژ بیلت در کوره گامی واحد نورد سبک

بلوم ورودی به کوره ابتدا از یک منطقه بدون مشعل (Recuperative Zone) عبور می‌کند. ضمن عبور از این منطقه بلوم مقداری پیشگرم می‌شود و از انرژی دود خروجی از منطقه یک نیز استفاده می‌شود.

در ادامه، بلوم از چهار منطقه متوالی که مجهز به مشعل است عبور می‌کند. دمای هر منطقه در محدوده خاصی کنترل می‌شود و بلوم با عبور از این مناطق به دمای خروجی می‌رسد.

منطقه اول (Preheating Zone) وظیفه پیشگرم کردن بلوم را بر عهده دارد. این منطقه از تعدادی مشعل تشکیل شده است که در سقف کوره قرار دارند و شعله از بالا به بیلت می‌خورد.

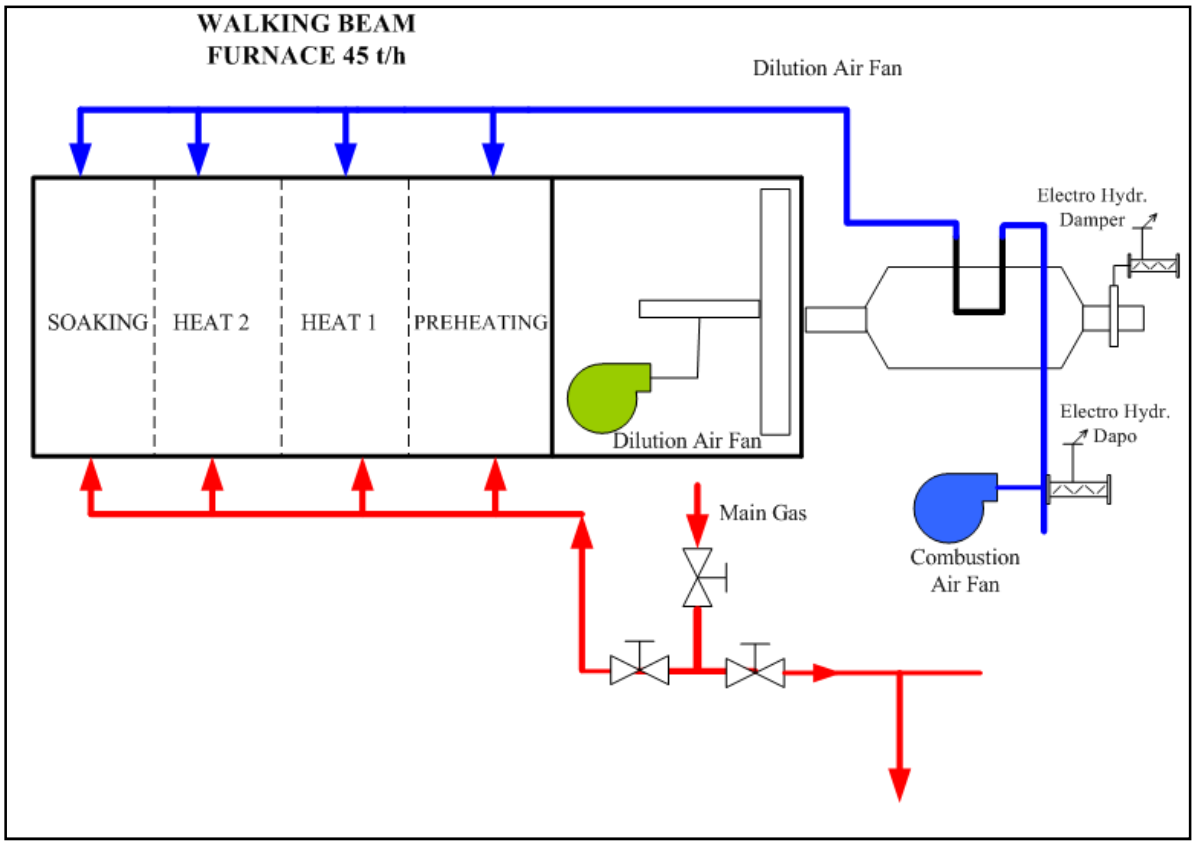
منطقه دوم (Heating Zone1) بعد از منطقه اول قرار دارد و دارای تعداد بیشتری از مشعل است که در سقف کوره قرار دارند و شعله از بالا به بیلت می‌خورد.

منطقه سوم (Heating Zone2) دارای به اندازه منطقه اول مشعل دارد که در سقف کوره قرار دارند و شعله از بالا به بیلت می‌خورد.

منطقه چهارم (Soaking Zone) که مانند منطقه اول و سوم دارای تعداد مشابهی مشعل است که در سقف کوره قرار دارند و شعله از بالا به بیلت می‌خورد.

۱-۱-۱-۱. هوای احتراق

هوای مورد نیاز برای احتراق از طریق دو فن که یکی در سرویس و دیگری رزرو است، تأمین می‌شود. هوای عبوری از فن، با عبور از رکوپراتور تا حدود ۴۰۰ درجه سانتیگراد گرم می‌شود و از طریق سیستم توزیع هوای احتراق، بین مناطق مختلف کوره توزیع می‌شود. در شکل ۱-۳ نمایی از نحوهٔ توزیع و کنترل هوای احتراق به طور شماتیک نمایش داده شده است.



شکل ۱-۳. نحوهٔ گردش و کنترل هوای احتراق

دبی هوای احتراق از طریق یک دمپر که در ورودی فن قرار دارد و DAPO نامیده می‌شود، کنترل می‌شود.

فشار هوا از طریق یک فشارسنج که در مسیر هوای احتراق بعد از رکوپراتور قرار دارد اندازه‌گیری می‌شود و سیستم کنترل فشار هوا، از طریق دریچه DAPO، میزان هوای مورد نیاز برای احتراق را تنظیم می‌کند. در حقیقت با تغییر میزان هوای مورد نیاز در مشعل‌ها، فشار هوا بعد از رکوپراتور تغییر می‌کند و سیستم کنترل فشار، با ثابت نگه داشتن این فشار، دبی هوای احتراق را تنظیم می‌نماید.

دمای هوای گرم خروجی از رکوپراتور به کمک یک ترموکوپل اندازه‌گیری می‌شود و چنانچه این دما از ۴۵۰ درجه سانتیگراد بیشتر شود، با باز کردن یک مسیر فرعی به هوای محیط از طریق یک دریچه موتوری، میزان هوای عبوری از رکوپراتور افزایش می‌یابد و از این طریق دمای هوای خروجی رکوپراتور کاهش می‌یابد.

بعد از این مرحله، هوای احتراق وارد خطوط تغذیه هوای کوره می‌شود. مسیر هوای احتراق در هر منطقه از کوره مجهز به یک فلومتر اوریفیسی است و از این طریق، دبی هوای ورودی اندازه‌گیری می‌شود. میزان هوای مورد نیاز در هر منطقه، از طریق یک شیر موتوری که بعد از فلومتر قرار دارد کنترل می‌شود.

فلوی گاز ورودی به کوره نیز از طریق یک فلومتر اوریفیسی اندازه‌گیری می‌شود و از طریق یک شیر موتوری که بعد از فلومتر قرار دارد، میزان آن کنترل می‌شود. با توجه به اندازه‌گیری فلوی سوخت و هوا در هر منطقه، نسبت هوا به سوخت، در حدود ۱۰ به ۱ کنترل می‌شود.

۱-۱-۱-۲. نحوه کنترل فشار کوره

در مسیر دود خروجی، بعد از رکوپراتور، یک دمپر پروانه‌ای[1] تعبیه شده است که وظیفه آن، کنترل فشار کوره است.

فشار کوره از طریق سنسور اندازه‌گیری فشار کوره، اندازه‌گیری می‌شود. هر تغییر فشار ایجاد شده در کوره نسبت به نقطه تنظیم[2]، توسط سیستم کنترل فشار کوره بررسی و با تنظیم موقعیت قرارگیری پره‌های دمپر، فشار کوره کنترل می‌شود.

۱-۱-۱-۳. ورود و خروج بیلت از کوره

بیلت وارد شده به کوره، با گام زدن به سمت درب خروجی حرکت می‌کند. با خارج شدن یک بیلت از کوره، بیلت دیگری جایگزین آن می‌شود. با توجه به نوع و سایز محصول تولیدی، تعداد استندهای مورد استفاده در فرایند نورد، تعداد پاسهای نورد در استند اول و فاصله زمانی خروج بیلت‌ها از کوره متفاوت است. لذا نرخ تولید کوره (تن بر ساعت) نیز با توجه به موارد ذکر شده متغیر است.

فاصله زمانی خروج بیلت از کوره بستگی به تعداد پاس نورد استند اول دارد. چنانچه محصول نهایی به صورت کلاف باشد، با توجه به اینکه سرعت تولید کاهش می‌یابد، خروج بیلت از کوره از حالت اتوماتیک خارج

[1] Butterfly Damper
[2] Set Point

شده و با فرمان اپراتور بیلت از کوره خارج می‌شود.

علاوه بر عوامل مذکور، توقفات نیز بر نرخ تولید کوره تأثیرگذار است. با توجه به بررسیهای انجام پذیرفته، تعداد توقفات برنامه‌ریزی نشده بسیار زیاد است. علیرغم اینکه مدت زمان هرکدام از آنها کوتاه می‌باشد، ولی مدت زمان مجموع آنها قابل توجه است.

۱-۱-۱-۴. نحوه کنترل دمای مناطق مختلف کوره

با توجه به گرید محصولات تولیدی، دماهای مختلفی در هرکدام ازمناطق کوره مورد نیاز است. دستورالعمل دما در مناطق مختلف کوره برای گریدهای مختلف در اتاق کنترل کوره موجود و در اختیار اپراتورها قرار داده می‌شود.

برای هر گرید، نقطه تنظیم دمای کوره با توجه به دستورالعمل مذکور تنظیم خواهد شد. سیستم کنترل دمای کوره با توجه به اندازه‌گیری دمای کوره، با کم و زیاد کردن دبی گاز طبیعی، دمای هر منطقه را کنترل می‌کند.

۱-۱-۱-۵. نحوه کنترل دمای کوره در زمان توقفات

به منظور صرفه‌جویی در مصرف گاز طبیعی، دستورالعمل خاصی برای کنترل کوره در زمان توقفات تهیه و در اختیار اپراتورها قرار داده می شود. با توجه به مدت زمان توقفات، نقطه تنظیم دما در مناطق مختلف کوره کاهش خواهد یافت.

لازم به ذکر است که هنگام توقفات، دمای مناطق مختلف به صورت ناگهانی کاهش نمی‌یابد، بلکه به صورت تدریجی، کاهش دما انجام می‌شود.

۱-۱-۱-۶. کنترل دمای هوا و دود در ورودی و خروجی رکوپراتور

در رکوپراتور، انرژی دود در تماس با دسته لوله‌های استیل که در مسیر آن قرار گرفته است، به هوای احتراق منتقل می‌شود و از این طریق هوای احتراق پیشگرم می‌شود.

نقطه تنظیم دمای دود ورودی به کوره ۶۵۰ درجه سانتیگراد است. چنانچه دمای دود بیشتر از ۶۵۰ درجه سانتیگراد شود، دریچه مربوط به هوای رقیق کننده[1] باز می‌شود و از این طریق دمای دود ورودی کنترل می‌شود.

چنانچه به هر دلیلی، دمای دود از ۷۵۰ درجه سانتیگراد بیشتر شود، سیستم اعلام خطر دمای دود ورودی به رکوپراتور فعال می‌شود و نهایتاً چنانچه دما از ۷۸۰ درجه سانتیگراد بیشتر شود، کوره تریپ می‌کند.

۱-۱-۲. کوره Holding

بیلت خارج شده از کوره، پس از عبور از استند اول، به منظور گرمایش مجدد از کوره Holding عبور می‌کند. در هنگام تولید خط به صورت نرمال، محصول خروجی استند اول، بدون اینکه در کوره Holding توقف

[1] Dilution Air

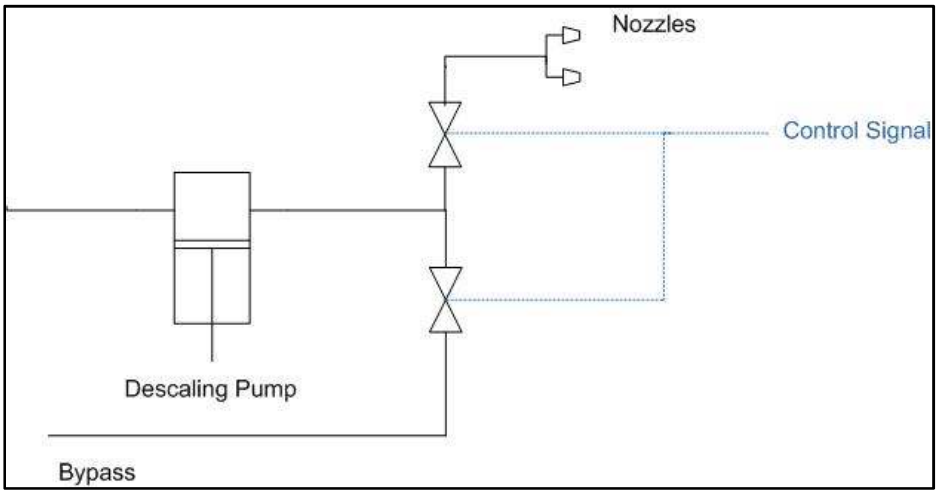
کند، از آن خارج می‌شود. اما چنانچه لازم باشد، این امکان وجود دارد که بیلت برای مدت زمان خاصی در کوره Holding باقی بماند. به عنوان مثال، چنانچه خط دچار توقف برنامه ریزی نشده شود، بیلت خروجی استند اول تا آماده شدن مجدد خط در این کوره باقی می‌ماند. اگر بیلت خروجی از استند اول دچار کاهش دما شود، تا رسیدن به دمای مناسب برای ادامه نورد در این کوره باقی می‌ماند.

کوره Holding دارای تعدادی مشعل است که در دیواره کوره قرار دارند. این کوره نیز، از نوع گامی است و این امکان وجود دارد که شش عدد بیلت در آن قرار بگیرد. برای این کوره رکوپراتور تعبیه نشده است، اما نسبت هوا به سوخت به صورت ۱۰ به ۱ کنترل می‌شود.

۱-۱-۳. پمپ پوسته‌زدا

از آنجا که لایه خارجی شمش گداخته شده در مجاورت هوا اکسید می‌شود، به منظور دستیابی به کیفیت مطلوب، از پمپ پوسته‌زدا برای جدا کردن این پوسته‌های سطحی استفاده می‌شود. این عمل به کمک دستگاه پوسته‌زدا و پاشیدن آب با فشار بالا، بر روی شمش انجام می‌شود. پمپ پوسته زدا قبل از استند اول واقع شده است. در این مرحله در اثر پوسته‌زدایی حدود ۱/۳٪ مواد اولیه ضایع می‌شود.

این پمپ معمولا از نوع رفت و برگشتی است. فلودیاگرام پمپ پوسته‌زدا در شکل۱-۴ نمایش داده شده است. در هنگام عبور بیلت از میان نازل‌های پوسته‌زدا، مسیر منتهی به نازل‌ها باز می‌شود و آب با فشار بر روی بیلت پاشیده می‌شود. پس از خروج بیلت از زیر نازل‌ها، مسیر منتهی به نازل‌ها بسته و مسیر بای‌پاس باز می‌شود. با توجه به اینکه این پمپ از نوع رفت و برگشتی است، در زمان بای‌پاس شدن جریان، توان مصرفی فقط صرف جبران افت فشار مسیر بای‌پاس می‌شود و توان مصرفی افت چشمگیری خواهد داشت. پمپ پوسته‌زدا در هنگام توقفات بلندمدت توسط اپراتور خاموش می‌شود، در حالی که در توقفات کوتاه مدت بای‌پس[1] می‌شود.



شکل۱-۴. فلودیاگرام پمپ پوسته‌زدا

[1] Bypass

۱-۱-۴. استندهای واحد نورد سبک

خط نورد سبک مجهز به تعدادی استند جهت نورد و تبدیل بیلت به مقاطع مختلف است.

استند اول از نوع رفت و برگشتی است. این استند مجهز به چندین شیار است که در هر پاس نورد، شمش از یکی از این شیارها عبور می‌کند. غلطک بالایی با حرکت عمودی فاصله این شیارها را تغییر می‌دهد. شمش با حرکت افقی روی میز نورد، در مقابل شیارها قرار می‌گیرد.

مابقی استندها از نوع تک پاس هستند، شمش بعد از عبور از این استندها و تغییر سطح مقطع، به محصول نهایی تبدیل می‌شود.

۱-۱-۵. گرید محصولات

آلیاژهای فولاد تولیدی بر مبنای میزان عناصر آلیاژی در سه گروه کم آلیاژ، آلیاژ متوسط و پرآلیاژ دسته‌بندی می شوند که در جدول۱-۱ این دسته‌بندی مشخص شده است. این دسته‌بندی با توجه به اطلاعات مربوط به درصد عناصر آلیاژی موجود در هر آلیاژ صورت گرفته است از جمله عناصر آلیاژی که در اکثر آلیاژها موجود است، می‌توان به کروم، نیکل، مس، قلع، تیتانیم و آلومینیم اشاره کرد، کروم بیشترین مقدار را نسبت به سایر عناصر دارد. علاوه بر این عناصر، کربن، سیلیس، منگنز، فسفر و گوگرد در تمامی آلیاژها موجود است.

جدول۱-۱. دسته‌بندی گریدهای فولاد تولیدی بر مبنای میزان عناصر آلیاژی

دسته-بندی	گریدها	
کم آلیاژ	0060I	1141D
	1121D	1181S
	1186D	1191S
	7035S	7176D
	9095I	
آلیاژ متوسط	1180P	1186P
	1209P	1249I
	1302P	5023D
	6541D	6582D
	7027J	7131S
	7139S	7147D
	7218P	7227D
	7264J	8159S
پرآلیاژ	2080S	2344D
	2379S	2436S
	4021D	7765D

دو آلیاژ مهم دسته کم آلیاژ 0060I و 1141D هستند که به ترتیب در ساخت میل‌گرد و فولاد ساده استفاده می‌شوند. یکی دیگر از آلیاژهای این دسته 7176D است که در ساخت فولاد فنر استفاده می‌شود. دو آلیاژ 1302P و 1209P از دسته آلیاژ متوسط بعنوان میکرو آلیاژ شناخته شده‌اند و در ساخت قطعات حساس اتومبیل استفاده می‌شوند. دو نمونه از آلیاژهای دسته پرآلیاژ که در فولاد ابزار کاربرد دارند 2379S و 2436D می‌باشند.

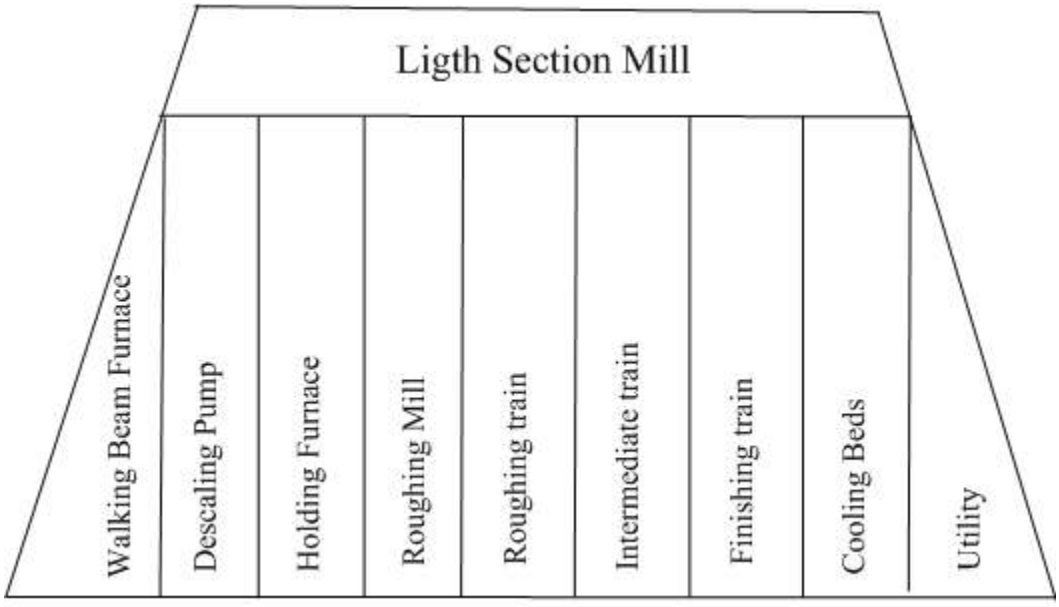
۱-۱-۶. عملیات حرارتی در واحد نورد سبک

برای برخی از گریدهای تولیدی، لازم است محصول تولید شده در انتهای خط، با گرادیان دمای خاصی خنک شود، یا برای مدت زمان خاصی حرارت ببینند.

در بعضی از موارد، به منظور اصلاح شرایط فیزیکی محصول تولیدی، سطح محصول را با فرو بردن در آب سریعاً خنک می‌کنند در حالیکه هسته آن همچنان گرم است. این فرایند، کوئنچینگ[1] نام دارد. در خط نورد سبک این سیستم پیش‌بینی شده است، اما به ندرت از آن استفاده می‌شود.

۱-۲. دسته‌بندی تجهیزات موجود در واحد نورد سبک

به منظور تسهیل در انجام ممیزی در واحد نورد سبک، سیستم‌های موجود در این واحد به صورت شکل۱-۵ دسته بندی شده است.



شکل۱-۵. دسته‌بندی تجهیزات و سیستمهای موجود در واحد نورد سبک

کورهٔ پیش‌گرم عمده‌ترین مصرف‌کننده انرژی حرارتی (گاز طبیعی) در واحد نورد سبک است. با توجه به

[1] Quenching

اینکه نحوهٔ بهره‌برداری از این تجهیز می‌تواند تاثیر بسزایی بر مصرف ویژه انرژی آن داشته باشد، لذا بیشترین توجه نیز بر روی نحوه بهره‌برداری از این کوره متمرکز خواهد شد. اندازه‌گیری‌های صورت پذیرفته در کورهٔ پیش‌گرم، شامل اندازه‌گیری دمای بدنهٔ کوره، آنالیز دود خروجی از کوره و اندازه‌گیری پارامترهای مهم در رکوپراتور شامل دمای هوا و دود در ورود و خروج از رکوپراتور می‌باشد. علاوه بر این، میزان گاز مصرفی کوره در بازه زمانی اندازه‌گیری نیز ثبت شده است.

در ارتباط با سایر تجهیزات نیز مانند پمپ پوسته‌زدا، استندهای نورد و ... میزان توان مصرفی اندازه‌گیری شده است. میزان آب مصرفی واحد نورد نیز اندازه‌گیری شده است.

۱-۳. سیستم توزین مواد اولیه و محصولات در واحد نورد

در ورودی واحد نورد سبک، سیستم توزین وجود دارد. بیلت ورودی قبل از ورود به کوره توسط باسکول وزن شده، و در سیستم اتوماسیون ثبت می‌شود.

در خروجی واحد نورد سبک نیز، سیستم جداگانه‌ای به منظور توزین محصول وجود دارد، که محصول تولیدی وزن شده و در سیستم اتوماسیون ثبت می‌شود.

لازم به ذکر است، سیستم توزین واحد نورد سبک باید هر دو ماه یک بار توسط کارشناسان کالیبره شود.

فصل دوم
ممیزی انررژی واحد نورد سبک

در این بخش از گزارش ممیزی انرژی واحد نورد سبک در کارخانجات فولاد مورد توجه قرار می گیرد.

۲-۱. ممیزی انرژی حرارتی

کوره گامی (Walking Beam Furnace) و کوره Holding عمده مصرف کنندگان گاز طبیعی در واحد نورد سبک فولاد هستند، بنابراین بررسی و بهینه سازی مصرف انرژی در آن از لحاظ اقتصادی بسیار حائز اهمیت است.

۲-۱-۱. بررسی شرایط کارکرد تجهیزات خط تولید و انجام اندازه‌گیرهای لازم

جهت بررسی وضعیت مصرف انرژی در تجهیزات مختلف واحد نورد سبک، لازم است پارامترهای مرتبط با مصرف و اتلاف انرژی مورد اندازه‌گیری قرار گیرند.

به منظور محاسبه راندمان کوره و همچنین بررسی عملکرد عایق‌های حرارتی، لازم است میزان تلفات تشعشعی کوره محاسبه شود. بدین منظور، با استفاده از دستگاه ترموویژن، دمای سطوح بیرونی کوره (دیواره‌های جانبی و سقف کوره) اندازه‌گیری می شود. علاوه بر آن برای محاسبهٔ راندمان کوره، دمای محیط و دمای بیلت در ورود و خروج از کوره نیز اندازه‌گیری می شود.

از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر عملکرد کوره، میزان هوای اضافه موجود در احتراق است. بدین منظور در مکانی مناسب، دود خروجی از کوره مورد آنالیز قرار گرفته و میزان هوای اضافه مورد استفاده در احتراق محاسبه شده است.

با توجه به اینکه کورهٔ پیش‌گرم، جهت بازیابی انرژی دود خروجی از کوره، مجهز به رکوپراتوراست، لازم است عملکرد رکوپراتورمورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور، دمای دود و هوا در ورودی و خروجی رکوپراتور ثبت شده است.

جهت خنک‌کاری تجهیزات واحد نورد سبک از سه نوع سیکل آب غیر مستقیم و یک نوع مستقیم استفاده می‌شود.

KW: سیکل باز آب (مستقیم)، جهت خنک‌کاری گازبند و غلطک‌ها

CW: سیکل بسته آب (غیر مستقیم)، جهت خنک‌کاری دوربین‌ها

QW: سیکل آب غیر مستقیم، جهت خنک‌کاری رولینگ‌ها و Kick-off

EW: آب اضطراری (غیر مستقیم)، سیکل بسته آب جهت خنک‌کاری رولینگ‌ها و Kick-off، زمانیکه آب QW به هر دلیلی قطع شده باشد.

آنالیز گازهای خروجی از دودکش کوره گامی، شامل دمای دود (FT [^{0}C])، درصد اکسیژن (O_2%)، میزان مونوکسید کربن (CO [ppm])، درصد دی‌اکسید کربن (CO_2%) و دمای هوای محیط (AT [^{0}C]) انجام پذیرفته است.

۲-۱-۲. بررسی وضعیت عایقکاری تجهیزات و شناسایی سطوح بدون عایق

در طراحی‌ها عموماً اتلاف حرارتی از بدنه کوره حدود ۲ درصد منظور می‌شود. اصولاً عایق‌های به کار رفته در کوره‌ها از نظر سرویس‌دهی مناسب، عمر معینی دارند و به مرور زمان ساختمان کریستالی آنها تغییر یافته و ضخامت آن‌ها کم می‌شود و این تغییرات ساختمانی موجب افزایش ضریب انتقال حرارت و افزایش اتلاف انرژی به بیرون خواهد شد.

در صورتی که عایق دیواره‌های کوره بر اثر ساخت ناصحیح، عدم انجام صحیح Curing بر مبنای دستورالعمل، در اثر حرارت زیاد و یا شوک‌های حرارتی ترک بردارد، نشت گازهای حاصل از احتراق و بخار آب در لابلای این ترک‌ها و تجمع آن‌ها در لایه بین بدنه کوره و عایق دیواره و سرد شدن تدریجی آن‌ها تا دمای نقطه شبنم، باعث خوردگی بدنه می‌شود.

تداوم این امر ضمن اتلاف مقدار بسیار زیاد انرژی (از طریق بدنه کوره به محیط اطراف)، باعث ریختن عایق و در نتیجه اتلاف بیشتر انرژی و گسترش خوردگی بر روی بدنه کوره و سایر نقاط آن خواهد شد. در کوره‌هایی که چندین سال از عمر عایق آن گذشته، ضمن جدا شدن عایق از دیواره کوره و گسترش خوردگی در نقاط مختلف بدنه، گرم شدن بدنه کوره نیز موجب خم شدن دیواره ها می‌شود، در نتیجه سرعت خوردگی افزایش یافته و باعث خرابی قسمت های مختلف کوره می شود. به طور کلی برای جلوگیری و یا کاهش مشکلات خورندگی بر روی بدنه کوره، لازم است به هنگام تعمیرات اساسی ضمن توجه به عمر عایق دیواره، در صورتی که عمر آنها از حد معمول گذشته باشد (البته با توجه به درجه حرارتی که در هنگام کار کردن واحد در معرض آن بوده‌اند) آن‌ها را با عایق مناسب و استاندارد تعویض کرد و در صورت وجود ترک (قبل و یا بعد از ساخت)، محل ترک ها با الیاف مخصوص KAOWOOL پر شود.

همانطور که بیان شد سطوح کوره به علت تفاوت دما با دمای محیط اطراف کوره، دارای تلفات حرارتی به صورت انتقال حرارت جابجایی و تشعشع می‌باشند. به همین دلیل سعی می‌شود با عایق‌کاری کوره‌ها تا حد ممکن اختلاف دمای سطوح کوره و دمای محیط کاهش یابد.

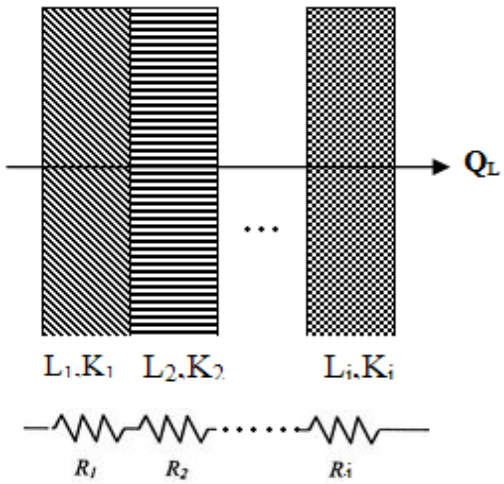
به منظور بررسی عایق کاری کوره در شرایط موجود، ابتدا در صورت امکان مقاومت حرارتی دیواره‌های کوره

در شرایط طراحی و شرایط موجود، محاسبه و با هم مقایسه می‌شوند. سپس با بررسی عکس‌های گرفته شده توسط دستگاه Thermovision نقاطی از بدنه کوره که دچار ریزش عایق شده شناسایی و مورد بررسی قرار می‌گیرد.

برای محاسبه مقاومت حرارتی دیواره کوره بر حسب اطلاعات موجود می‌توان از دو روش زیر استفاده نمود.

۱-در صورت وجود اطلاعات مربوط به ضخامت لایه‌ها و رسانش گرمایی آن‌ها، به کمک رابطه (۱) می‌توان مقاومت حرارتی کل دیواره‌های کوره را محاسبه نمود. (شکل۲-۱)

$$R_{tot} = \sum \frac{L_i}{K_i A_i} \qquad (۱)$$



شکل۲-۱. مقاومت حرارتی دیوار کوره

۲- در صورت وجود اطلاعات مربوط به دمای محیط (T_a)، دمای جداره داخلی (T_i)، دمای جداره خارجی (T_s)، سرعت باد و ضریب نشر کوره (ε)، ابتدا شار حرارتی گذرنده از دیواره کوره به کمک رابطه (۲) محاسبه و سپس از طریق رابطه (۳) مقاومت حرارتی کوره محاسبه می‌شود.

$$Q = 0.174 \times \varepsilon \times (T_s{}^4 - T_a{}^4) \times 10^{-8} + 0.296 \times (T_s - T_a)^{1.25} \times \sqrt{\frac{v_m + 69}{69}} \qquad (۲)$$

در رابطه فوق:

Q: نرخ تلفات حرارتی در واحد سطح $\frac{BTU}{hr.ft^2}$

T_s: دمای سطح خارجی کوره بر حسب رانکین

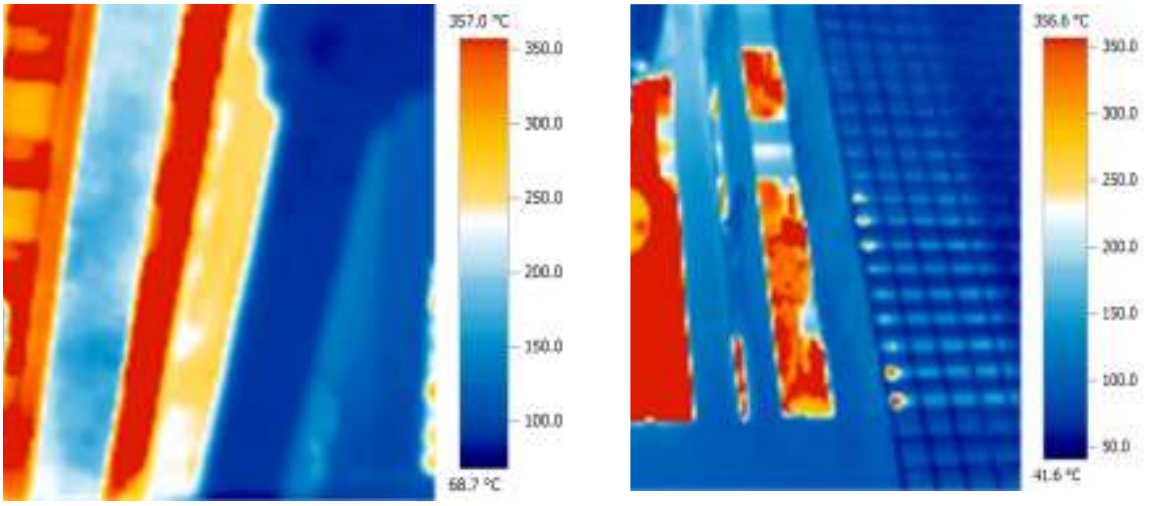
T_a: دمای محیط بر حسب رانکین

ε: ضریب صدور تشعشع سطوح خارجی

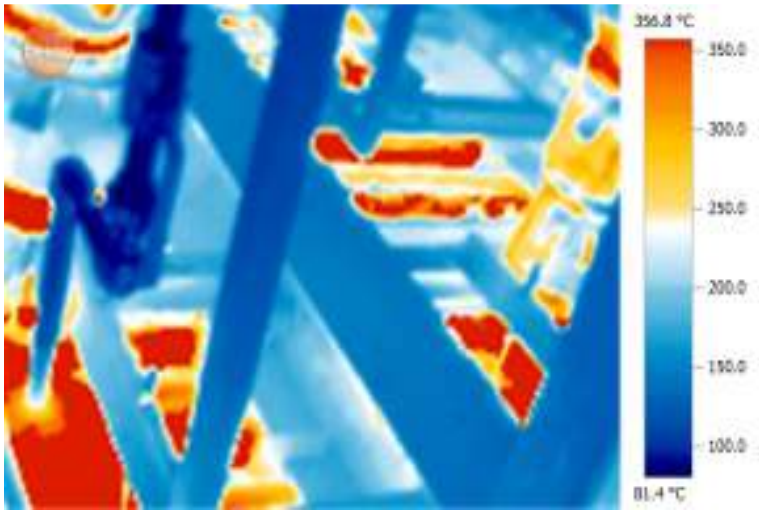
v_m: سرعت باد بر حسب فوت بر دقیقه

$$R_{tot} = \frac{T_i - T_o}{Q} \qquad (۳)$$

نمونه ای از عکس های گرفته شده توسط دستگاه Thermovision در شکل۲-۲ و شکل۲-۳ نشان داده شده است. همانطور که از این عکس ها مشخص است، به علت توزیع پیوسته دما در سطوح دیواره های کوره پیشگرم فولاد، ریزش عایق در دیواره های آن وجود ندارد.

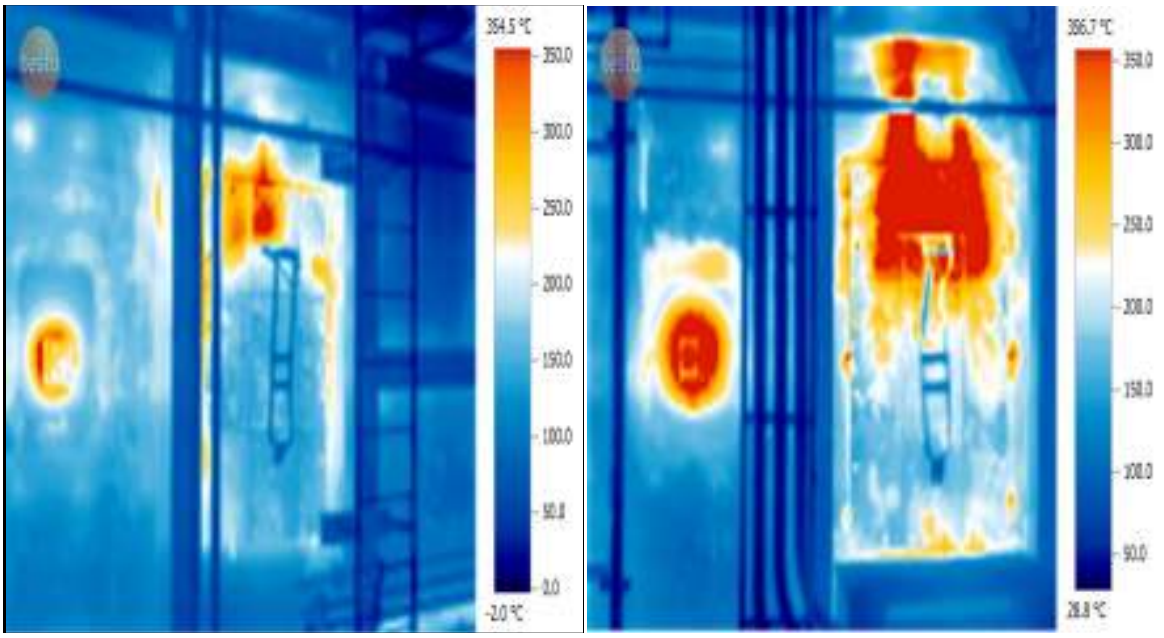


(ب) (الف)

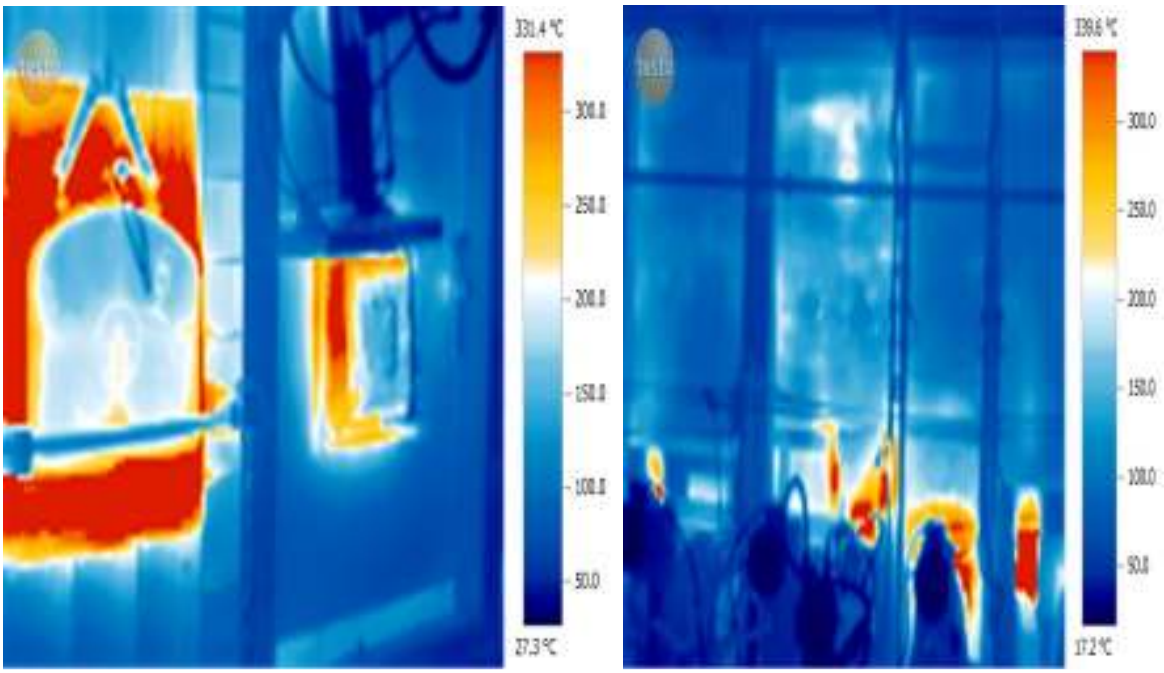


(ج)

شکل۲-۲. (الف)، (ب) و (ج) توزیع دما سقف کوره فولاد



(ب) (الف)



(د) (ج)

شکل۲-۳. (الف)، (ب)، (ج) و (د) توزیع دما دیوار های جانبی کوره فولاد

۲-۱-۳. شناسایی فاکتورهای قابل اندازه‌گیری حامل‌های انرژی (بدون ابزار و ادوات ممیزی) جهت تعیین انرژی ویژهٔ حرارتی و تعیین نوع و محل نصب کنتورهای مورد نیاز در خط تولید

همان طور که قبلا ذکر شد، کوره های پیشگرم عمده‌ترین مصرف‌کننده انرژی حرارتی در واحد نورد هستند. جهت محاسبه انرژی ویژه حرارتی (SEC[1]) باید میزان مصرف انرژی کوره را محاسبه نمود. میزان مصرف انرژی کوره به کمک دو روش مستقیم و غیر مستقیم تعیین می‌شود.

جهت محاسبه انرژی مصرفی کوره‌ها به کمک روش غیر مستقیم، باید اتلافات کوره‌ها محاسبه شود. اندازه‌گیری پارامترهای مورد نیاز جهت محاسبه اتلافات در روش غیر مستقیم نیاز به دستگاه‌های اندازه گیری دارد. به طور مثال، جهت محاسبه اتلافات دود خروجی از دودکش باید میزان اکسیژن موجود در دود خروجی اندازه‌گیری شود، که این اندازه‌گیری توسط دستگاه آنالایزر دود صورت می‌گیرد.

در روش مستقیم جهت محاسبه مصرف انرژی کوره، بر خلاف روش غیر مستقیم که در بالا توضیح داده شد، نیازی به محاسبه اتلافات و به تبع آن نیازی به استفاده از ابزار و ادوات ممیزی نیست. بلکه برای محاسبه انرژی مصرفی از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$\text{انرژی مصرفی کوره} = m_g \times LHV_g$$

بر اساس نیاز و هدف گذاری‌های کارخانه فولاد، می‌توان میزان مصرف ویژه انرژی واحد نورد سبک را به صورت کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت محاسبه نمود. بدین منظور اطلاعات زیر مورد نیاز است:

۱- میزان مصرف گاز در بازه زمانی مورد نظر: اولین قدم جهت پایش مصرف انرژی به صورت دقیق، مداوم و محاسبه مصرف ویژه انرژی بدون ابزار و ادوات ممیزی، نصب یک کنتور گاز مجهز به تصحیح‌گر دما و فشار در مسیر گاز ورودی به کوره پیشگرم است.

۲- ارزش حرارتی: بر اساس آنالیز سوخت گاز مصرفی، ارزش حرارتی آن تعیین می شود.

۳- میزان تولید: با توجه به ثبت شدن میزان تولید در واحد نورد سبک کارخانجات فولاد ، تناژ تولید در بازه زمانی مورد نظر موجود می باشد.

با اندازه‌گیری میزان مصرف گاز، ارزش حرارتی سوخت و میزان تولید در بازه زمانی موردنظر، SEC واحد نورد سبک تعیین می‌شود.

با توجه به اینکه توقفات در افزایش مصرف ویژه انرژی نقش بسزایی دارد، به همین دلیل محاسبه و مقایسه SEC در بازه‌های زمانی مشخص (به طور مثال بازه‌های زمانی یک ماهه) بدون در نظر گرفتن اثر توقفات نتایج درستی را در بر ندارد. به طور مثال ممکن است کوره در یک ماه در بهترین شرایط عملکرد بوده باشد، اما به علت نقص فنی استندها و افزایش زمان توقفات، SEC در این بازه زمانی از SEC سایر ماه‌ها و SEC متوسط سالانه بیشتر باشد. در نتیجه تنها با استفاده از SEC در این بازهٔ زمانی نمی‌توان در مورد عملکرد کوره یا خط نورد

[1] Specific Energy Consumption

سبک اظهار نظر کرد. به همین دلیل به منظور تحلیل دقیق‌تر عملکرد واحد نورد، علاوه بر مقایسه مقدار SEC در بازه‌های زمانی متفاوت، باید توقفات و علت آن را نیز مدنظر داشت.

۲-۲. شناسایی عوامل موثر بر مصرف انرژی در بخش‌های مختلف فرایند تولید

کوره‌های پیش‌گرم از بزرگترین مصرف کنندگان سوخت فسیلی‌اند. در سال ۱۹۶۰ میلادی، میزان سوخت مصرفی کوره‌های نوع Pusher در گستره (kcal/ton) ۳۷۰×۱۰^{۳}-۴۵۰×۱۰^{۳} و برای کوره‌های نوع Walking-Beam در گستره (kcal/ton) ۴۵۰×۱۰^{۳}-۵۹۰×۱۰^{۳} بوده است. در حالیکه در سال ۱۹۸۹ میلادی، میزان مصرف کوره‌های پیش‌گرم به علت اجرای راهکارهای کاهش مصرف انرژی به حدود (kcal/ton) و می‌تواند بین ۰/۷ تا ۶/۵ گیگاژول بر تن تغییر کند. همچنین مصرف ویژه انرژی به ازای هر تن محصول خروجی از ۱/۱۳ GJ/ton تا ۱۰/۹۹ GJ/ton متغیر بوده و به طور میانگین ۱/۹ GJ/ton برای کوره‌های ۲۰۳×۱۰^{۳}-۵۶۶×۱۰^{۳} کاهش یافت. مصرف ویژه انرژی به عواملی همچون طراحی کوره، عملکرد و ... وابسته بوده top-fired و ۲/۰ GJ/ton برای کوره‌های top-and-bottom fired می‌باشد [۱].

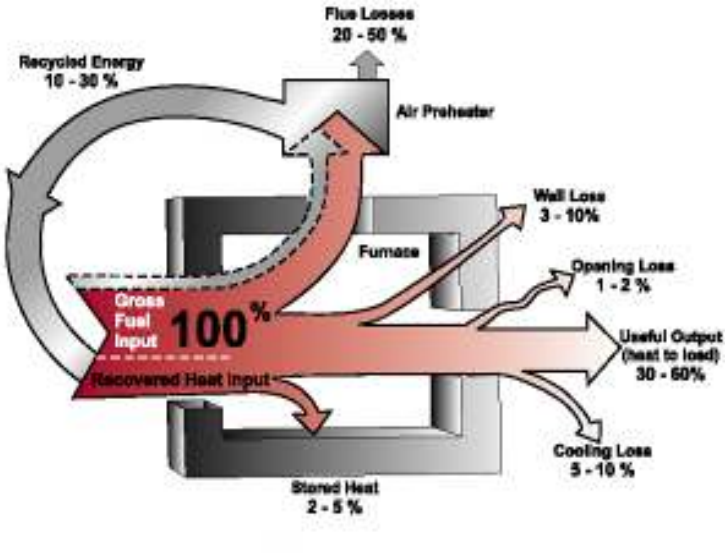
سهم عمده مصرف انرژی در واحدهای نورد سبک مربوط به کوره‌های پیش‌گرم می‌باشد، به طوریکه با صرف نظر از مصارف اندک جانبی در واحد نورد سبک (مصارف گاز جهت گرمایش محیط و ...) می‌توان گفت تمام گاز ورودی به واحد نورد سبک در کوره‌های پیش‌گرم مصرف می‌شود. به همین دلیل شناسایی عوامل موثر بر مصرف انرژی در کوره پیش‌گرم تاثیر بسزایی در شناسایی فرصت‌های صرفه‌جویی و کاهش مصرف انرژی دارد.

از دیدگاه انرژی، یک کوره ایده‌ال، کوره‌ای است که تا حد ممکن بیشترین مواد شارژ شده را با کمترین مصرف سوخت و انرژی به دمای مورد نظر برساند.

مستقل از نوع فرایند به کار رفته، انرژی مصرفی از دو قسمت اتلافات و انرژی مفید خروجی تشکیل شده است. در واقع عوامل موثر بر اتلافات و انرژی مفید خروجی، عوامل موثر بر مصرف انرژی کوره پیش‌گرم می‌باشند. به همین منظور ابتدا عوامل مذکور معرفی شده و سپس سهم هر یک در مصرف انرژی یک کارخانه فولاد تعیین می‌گردد.

۲-۲-۱. اتلافات

دیاگرام سانکی عمومی یک کوره پیش‌گرم در شکل۲-۴ نمایش داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است، بیشترین سهم اتلافات انرژی مربوط به اتلافات دود خروجی از دودکش می‌باشد. به همین دلیل ابتدا عوامل موثر بر میزان اتلافات انرژی دود خروجی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

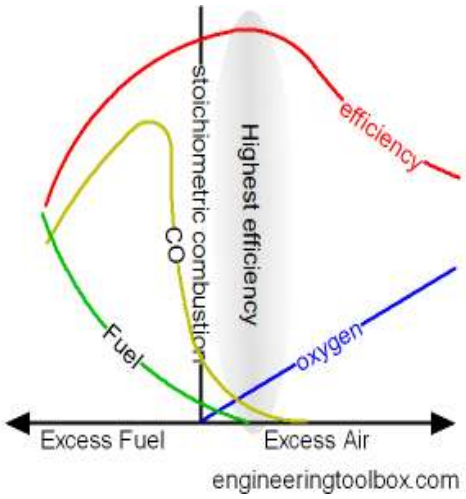


شکل۲-۴. دیاگرام سانکی عمومی از یک کوره پیش گرم

۲-۲-۱-۲. میزان هوای اضافه

میزان هوای لازم جهت احتراق کامل سوخت در حالت تئوری، هوای استوکیومتریک نامیده می‌شود که در صورت مخلوط شدن کامل سوخت با این میزان هوا، احتراق کامل صورت خواهد گرفت و مشعل بالاترین راندمان حرارتی را خواهد داشت. ولی با توجه به اینکه مخلوط شدن کامل هوا و سوخت در عمل به میزان صد در صد انجام نمی‌شود، لذا همانگونه که در شکل۲-۵ ملاحظه می‌گردد، بالاترین راندمان مشعل در حالتی اتفاق می‌افتد که مقداری هوای اضافه (Excess Air) وجود داشته باشد.

البته همانگونه که شکل۲-۵ نشان می دهد با افزایش بیش از حد هوای اضافه راندمان حرارتی مشعل کاهش می‌یابد که دلیل آن، جذب حرارت توسط هوای اضافه ورودی می‌باشد.



شکل۲-۵. شماتیک سیستم بازیافت حرارت کوره‌های پیشگرم

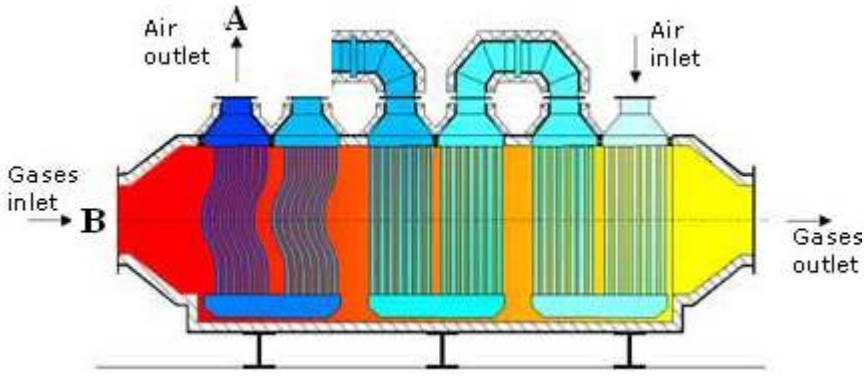
اثر هوای اضافه بر راندمان احتراق میزان هوای اضافه مناسب برای کوره‌های پیشگرم با سوخت گاز طبیعی، ۵ درصد است. در جدول۲-۱ اثر افزایش میزان هوای اضافه بر مصرف انرژی گزارش شده است.

جدول۲-۱. اثر هوای اضافه بر میزان مصرف انرژی کوره پیش‌گرم فولاد

هوای اضافه (%)	افزایش مصرف انرژی (%)
5	Base
10	1.46
20	4.61
30	8.16

۲-۲-۱-۳. دمای دود و هوای پیش‌گرم

سیستم بازیافت حرارت کوره پیش‌گرم فولاد، رکوپراتور می‌باشد (شکل۲-۶). دمای Set point های رکوپراتور (نقاط A و B در شکل۲-۶) که توسط اوپراتورهای کوره تنظیم می‌شود، اثر مستقیمی بر میزان اتلافات دود دارد. علاوه بر این، در صورت نقص فنی رکوپراتور (گرفتگی لوله‌های رکوپراتور، سوراخ شدن لوله‌های رکوپراتور و نشت هوای احتراق در دود و...) دمای هوای ورودی به مشعل‌ها به حد مطلوب نرسیده و اتلافات دود افزایش می‌یابد.



شکل۲-۶. شماتیک سیستم بازیافت حرارت کوره‌های پیشگرم

همانطور که از شکل۲-۴ مشخص است سایر اتلافات ازجمله اتلافات آب خنک کن، اتلافات حرارتی از دیوارهای کوره و... علاوه بر اینکه نقش چندانی در مصرف انرژی کوره ندارند، مستقل از چگونگی بهره‌برداری نیز می‌باشند. به همین دلیل از بررسی بیشتر آنها صرف نظر شده است.

۲-۲-۲. انرژی مفید خروجی

یکی دیگر از عوامل موثر در مصرف انرژی کوره پیش‌گرم، انرژی مفید خروجی می‌باشد. از عوامل موثر بر انرژی مفید خروجی می‌توان به دمای شمش ورودی و توقفات اشاره کرد.

۲-۲-۲-۱. دمای شمش ورودی

یکی از پارامترهای موثر در میزان مصرف انرژی کوره، انرژی مفید خروجی یا حداقل انرژی مورد نیاز جهت رساندن دمای شمش داخل کوره به حد مطلوب می‌باشد.

در صورتی که بتوان از طریق hot charge یا استفاده از انرژی دود خروجی از دودکش، دمای شمش ورودی به کوره را افزایش داد، میزان انرژی مفید خروجی و به تبع آن مصرف انرژی کوره کاهش می‌یابد.

۲-۲-۲-۲. توقفات

ایده‌آل‌ترین حالت برای یک کوره زمانی حاصل می‌گردد که کوره بتواند در طول مدت بهره برداری به صورت مداوم با بیشترین ظرفیت ممکن، تولید کند. اما در عمل به علت توقفات، مدت زمان زیادی از عملکرد کوره به صورت Partial Production و Idling می‌باشد. به طور معمول ۳۰٪ از زمان کارکرد یک کوره به صورت Idling (بی باری)، ۲۰٪ به صورت Partial Production (۷۵٪ ظرفیت نامی) و ۵۰٪ از زمان کارکرد با ظرفیت نامی می باشد [۲]. همانطور که بیان شد انرژی مصرفی کوره برابر است با:

$$\text{انرژی مصرفی کوره} = \text{انرژی مفید خروجی} + \text{اتلافات} \quad (۴)$$

$$\text{راندمان کوره} = \frac{\text{انرژی مفید خروجی}}{\text{انرژی مفید خروجی} + \text{اتلافات}} = 1 - \frac{\text{اتلافات}}{\text{انرزی مصرفی کوره}} \quad (۵)$$

در توقفات، به جز موارد برنامه ریزی شده یا توقفات طولانی، اتلافات انرژی کوره تقریبا ثابت می‌باشد [۲]. پس با توجه به رابطه (۵)، با کاهش تولید یا همان انرژی مفید خروجی، راندمان کوره کاهش و با افزایش تولید، راندمان کوره افزایش می یابد. توقفات، با کاهش میزان تولید کوره، باعث کاهش راندمان، یا به عبارت دیگر باعث افزایش انرژی مخصوص کوره می شوند.

عوامل موثر بر میزان مصرف انرژی کوره پیش‌گرم را به عوامل داخلی و عوامل خارجی نیز می‌توان تقسیم کرد. عوامل داخلی عبارتند از میزان هوای اضافه، دمای شمش ورودی و... که به تفصیل توضیح داده شد. از جمله عوامل خارجی می‌توان به دمای محیط اشاره کرد. دمای محیط بر دمای هوای احتراق و دمای شمش ورودی اثر گذار می‌باشد.

مراجع:

[1] "Energy Consumption in Continuous Steel Reheating Furnaces".

[2] Si, Minxing, Thompson, Shirley Calder, "Energy efficiency assessment by process heating assessment and survey tool (PHAST) and feasibility analysis of waste heat recovery in the reheat furnace at a steel company", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15, Issue 6, August 2011, Pages 2904–2908.