

فصل دهم

پتانسیل‌های صرفه‌جویی

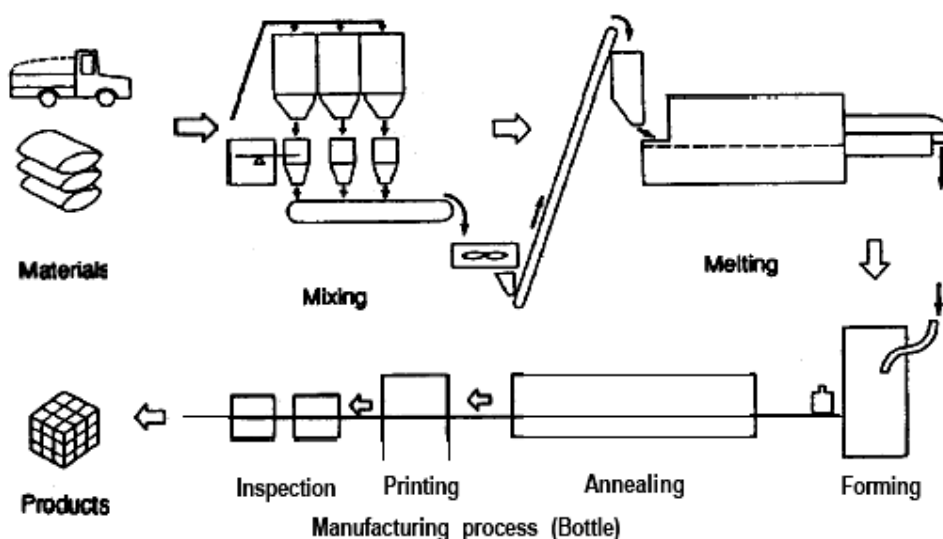
انرژی در صنعت شیشه

۱۰-۱- فرآیند تولید در صنعت شیشه

صنعت شیشه، بسیار انرژی‌بر است و در آن انواع سوخت‌های فسیلی و سایر حامل‌های انرژی به مصرف می‌رسد تا درجه حرارت بالایی در درون کوره بدست آید. در ضمن بالارفتن دما، مواد اولیه تشکیل دهنده بچ با یکدیگر واکنش می‌دهند، گازهای خود را از دست می‌دهند، پالایش می‌شوند و بالاخره به صورت یک فرآورده شیشه‌ای از قبیل بطری شیشه‌ای یا ظروف شیشه‌ای (استکان و لیوان) از ماشین شیشه‌سازی خارج می‌شوند. سپس محصولات شیشه‌ای برای تنش‌زدایی وارد گرمخانه‌ای به نام لهر می‌شوند و در نهایت سطوح آنها از چاپ مورد نیاز برخوردار می‌شوند. در انتهای خط تولید نیز محصولات انبار و نگهداری می‌گردند. پس همانطور که ملاحظه می‌شود در این فرآیندها از کوره‌ای استفاده می‌شود که انرژی بسیار زیادی مصرف می‌کند. در شکل (۱-۱۰)، نمونه‌ای از فرآیند ساخت بطری‌های شیشه‌ای نشان داده شده است.

سوخت‌های فسیلی از قبیل ذغال سنگ، نفت و گاز طبیعی که به عنوان منابع انرژی استفاده می‌شوند، منابع محدودی هستند که می‌بایست حتی الامکان برای نسل‌های بعد باقی بمانند. از سوی دیگر گازهای SO_x و NO_x که از احتراق سوخت‌های فسیلی حاصل می‌شوند در اتمسفر زمین تخلیه شده و طبعاً بر سلامت و بهداشت انسانی تأثیر می‌گذارند. این موضوع امروزه مسائل و مشکلات حادی برای شهروندان بوجود آورده است.

گفته می‌شود که در سالهای اخیر، گاز دی اکسید کربن که به مقدار بسیار زیادی تولید و وارد جو می‌شود، عامل گرم شدن محیط زیست شده است و تأثیر آن بر محیط روز به روز جدیتر می‌شود. امروزه تلاش‌های بسیار زیادی در سراسر جهان برای کاهش میزان انتشار گاز دی اکسید کربن صورت گرفته و می‌گیرد. تلاش‌های معطوف به صرفه‌جویی انرژی در فعالیت‌های صنعتی مستقیماً به سوی کاهش دادن میزان مصرف انرژی و پایین آوردن هزینه‌های سرسام آور تأمین انرژی هدایت شده‌اند. این کار باعث می‌شود که روز به

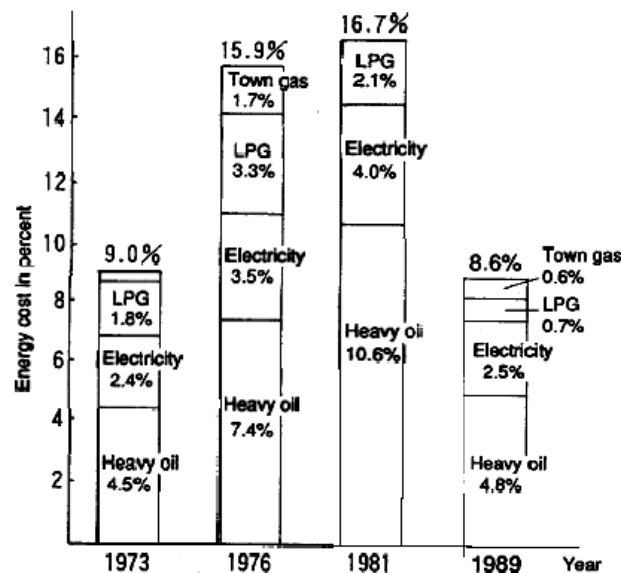


شکل (۱۰-۱): فرآیند ساخت بطری

روز رقابت‌های صنعتی پیچیده‌تر شوند. همزمان با تلاش‌های مذکور، کوشش‌های فراوان دیگری صورت می‌گیرد که کیفیت محیط زیست را ارتقاء بخشد و کره زمین را برای تأمین بهداشت و سلامت ساکنان خود تا سالیان دور آماده سازد. برای صنعتگران حائز کمال اهمیت است که دریابند صرفه‌جویی در مصرف انرژی یکی از مهمترین سیاست‌های صنعتی، ملی و جهانی است.

۱۰-۲- ویژگی‌های مصرف انرژی در فرآیند تولید شیشه

شکل (۱۰-۲) نسبت هزینه انرژی به کل هزینه‌های ساخت بطری شیشه‌ای در سال ۱۹۷۳ میلادی و قبل از ظهور اولین شوک نفتی را نشان می‌دهد. نسبت مذکور بعد از دومین شوک نفتی، سال ۱۹۸۱ و ۱۹۸۹ در شکل (۱۰-۲) نشان داده شده است. علیرغم تلاش‌های معطوف به صرفه‌جویی انرژی، این نسبت که در سال ۱۹۷۳ میلادی ۹ درصد بوده است در سال ۱۹۸۱ به ۱۶/۷ درصد رسیده است (عموماً به دلیل افزایش قیمت نفت) ولی در سال ۱۹۸۹ به دلیل تلاش‌های صرفه‌جویانه و همین‌طور پایین تر آمدن قیمت نفت نسبت مذکور به حد ۸/۶ درصد کاهش یافته است.



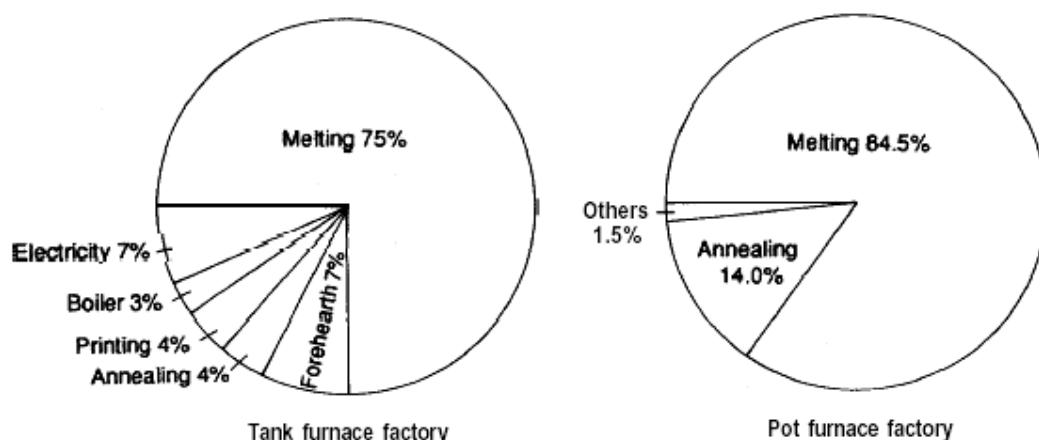
شکل (۲-۱۰): نسبت هزینه انرژی مصرفی به کل هزینه‌ها در فرآیند تولید بطری شیشه‌ای

به منظور کاهش هزینه‌ها، یافتن زمینه‌های صرفه‌جویی انرژی در مورد هر یک از حاملهای انرژی بسیار با اهمیت می‌باشد. شکل (۳-۱۰) درصد انرژی مصرفی در بخشهای مختلف فرآیند تولید بطری شیشه‌ای را که با کوزه مخزنی یا با کوره پات تجهیز شده‌اند، نشان می‌دهد. فرآیند ذوب مواد اولیه بزرگترین بخش مصرف‌کننده انرژی در کوره‌های مخزنی با عملکرد پیوسته می‌باشد. چنانچه از کوره پات که معمولاً برای تولید محصولات شیشه‌ای در ظرفیت‌های کمتر ولی با تنوع بیشتر محصولات تولیدی بکار می‌رود، استفاده شود، سهم انرژی در عملیات ذوب تا حدود ۸۵ درصد هم خواهد رسید.

چنانچه سهم ۷ درصدی انرژی مصرفی در فورهارت کوره به سهم ۷۵ درصدی مصرف انرژی در عملیات ذوب در مورد کوره‌های مخزنی اضافه گردد، عدد ۸۲ درصد به دست می‌آید که تقریباً نزدیک به سهم ۸۵ درصدی مصرف انرژی در عملیات ذوب مربوط به کوره پات است. بنابراین اولویت نخست در زمینه صرفه‌جویی انرژی به کوره‌ها و اولویت دوم به لهر اختصاص خواهد داشت.

معمولاً برای تحلیل وضعیت مصرف انرژی در یک فرآیند تولیدی از عبارت مصرف ویژه انرژی که معادل انرژی مصرف شده به ازاء واحد تولید محصول (یک کیلوگرم یا یک تن شیشه) استفاده می‌شود. اساساً صرفه‌جویی انرژی در کارخانه‌های تولید شیشه معطوف به کاهش دادن میزان شدت انرژی است. برای کاستن از میزان شدت انرژی ضروری است که کارهای ذیل صورت گیرد:

- ✖ کاهش میزان سوخت مصرفی، افزایش میزان محصول تولیدی بدون افزایش مقادیر سوخت مصرفی و بالاخره کاهش نرخ خطاهای تولیدی و اپراتوری به گونه‌ای که از افزایش تولید (محصول تایید شده نهایی) در مرحله پایانی اطمینان حاصل شود.



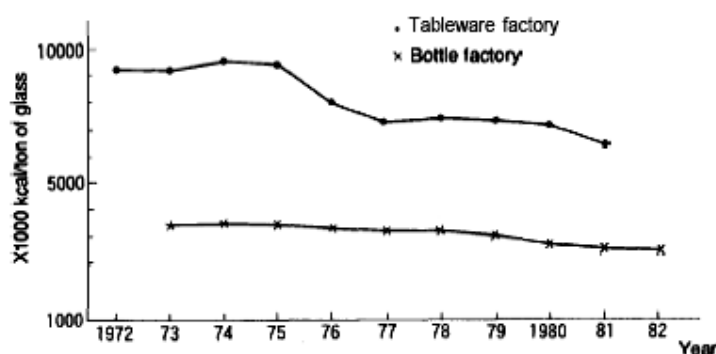
شکل (۳-۱۰): انرژی مصرفی در بخشهای مختلف فرآیند تولید بطری شیشه‌ای

مصرف ویژه انرژی شامل همه انواع انرژی است که در ساخت یک فرآورده شیشه‌ای مصرف می‌شود و شامل نفت، مازوت، نفت کروزن، گاز مایع، قدرت الکتریکی، گازوییل مصرفی در حمل و نقل و ... می‌باشد. جدول (۱-۱۰)، توزیع انرژی مصرفی در فرآیندهای مختلف یک کارخانه تولید بطری شیشه‌ای را نشان می‌دهد. مدیریت مصرف انرژی ایجاب می‌کند که تصویری کلی و در عین حال دقیق از کلیه زیر بخش‌های تشکیل دهنده فرآیند تولیدی ایجاد گردد. به عبارت دیگر هر فرآیند متعلق به کارخانه می‌بایست مصرف ویژه انرژی (سوخت یا انرژی الکتریکی) بهینه‌ای داشته باشد.

جدول (۱-۱۰): توزیع انرژی مصرفی در یک کارخانه تولید بطری شیشه‌ای (مقادیر بر حسب $\text{kcal/ton glass} \times 10^4$)

سهم از کل (درصد)	جمع کل	الکتریسیته	گاز طبیعی	گاز مایع (LPG)	نفت	مازوت	
۰/۵۸	۱/۴۷	۱/۴۷					بیج
۷۱/۰۳	۱۷۸/۷۶	۱۶/۹۶				۱۶۱/۸۰	کوره ذوب
۶/۸۹	۱۹/۳۳	۰/۸		۱۴/۷۶		۱/۷۷	فورهارت
۱۰/۷۰	۲۶/۹۳	۲۶/۸۵	۰/۰۸				شکل دهی
۴/۹۵	۱۲/۴۵	۲/۸۶		۹/۵۹			لهر
۳/۱۶	۷/۹۵	۱/۵۴	۰/۰۹	۶/۳۲			چاپ
۰/۱۹	۰/۴۷	۰/۴۷					بسته بندی
۱/۶۳	۴/۱۱	۳/۵۸	۰/۱۴	۰/۳۲	۰/۰۲	۰/۰۵	سایر
	۲۵۱/۶۸	۵۶/۷۴	۰/۳۱	۳۰/۹۹	۰/۰۲	۱۶۳/۶۱	جمع کل
۱۰۰		۲۲/۵۴	۰/۱۲	۱۲/۳۱	۰/۰۱	۶۵/۰۱	سهم حامل انرژی از کل (درصد)

در خصوص کوره، ضروری است که اطلاعات درستی در مورد مصرف انرژی به ازاء واحد تولید محصول یا مصرف ویژه انرژی موجود باشد. این بدان مفهوم است که مقادیر مصرف انرژی برای کل شیشه تولید شده توسط کوره در دسترس باشد. در مواقعی که از بوستر الکتریکی استفاده می شود مقدار مصرف انرژی می بایست شامل انرژی الکتریکی بوستر هم باشد. در محاسبه میزان مصرف انرژی می بایست بخش تنش زدایی کوره را هم مدنظر قرار داد. در این حالت مقدار مصرف انرژی به ازاء مقدار شیشه تنش زدایی شده در لهر ارائه می شود. بدیهی است مصرف ویژه انرژی برای محصول خاص کاملاً به میزان تولید آن محصول و همچنین به نوع محصول وابسته است. شکل (۴-۱۰) تفاوت های مصرف انرژی را در کارخانجات تولید ظروف شیشه ای و کارخانه بطری شیشه ای نشان می دهد.



شکل (۴-۱۰): مصرف ویژه انرژی در کارخانجات تولید ظروف شیشه ای و بطری

کوچکتر بودن ظرفیت تولید و بالاتر بودن سطح کیفیت محصول در کارخانه تولید محصولات شیشه ای ظروف نسبت به کارخانه تولید بطری شیشه ای، بالاتر بودن مصرف ویژه انرژی در کارخانه تولید ظروف شیشه ای را توجیه می نماید.

برای کارخانه ای که از کوره پات کم ظرفیت استفاده می کند و محصولات متنوع تولید می نماید، مصرف انرژی به ازاء واحد تولید محصول در حد $\frac{Kcal}{kg}$ ۸۰۰۰ - ۴۰۰۰ می باشد. این تفاوت در مصرف انرژی کوره کاملاً

به اندازه کوره و نوع شیشه (شیشه بوروسیلیکاتی، شیشه سودا - لایم و شیشه کریستالی) بستگی دارد.

جدول (۲-۱۰) میزان مصرف انرژی در تونل تنش زدایی شیشه یا لهر را نشان می دهد. همانطور که از جدول مذکور مشاهده می شود عواملی مانند روش گرم کردن، زمان عملیات، گرمای شیشه ای که می بایست به لهر فرستاده شود و مقدار شیشه ای که می بایست طبق ظرفیت لهر به آن بارگذاری شود باعث می شود تا در مقادیر مصرف ویژه انرژی در لهر اختلاف های فاحشی مشاهده گردد. هنگامی که مصرف انرژی به ازاء واحد تولید (کیلوگرم یا تن) یک کارخانه با کارخانه دیگر مقایسه می شود، باید به استاندارد یا مرجع انتخابی توجه نمود. به عنوان مثال کل انرژی مصرفی در کارخانه مورد نظر است یا فقط انرژی مصرفی در کوره یا فورهای مورد توجه است. شکل (۵-۱۰) نمودار جریانی فعالیت های صرفه جویی انرژی را نشان می دهد. لازم بذکر است این نمودار باید برحسب نیازها و الزام های ویژه هر کارخانه ای تعدیل شود.

جدول (۲-۱۰): مصرف ویژه انرژی در لهر

نوع	انرژی مصرفی	زمان عملیات (hr)	زمان نگهداری (hr)	محصول تولیدی	شرایط ورود محصول	ظرفیت (kg/hr)	مصرف ویژه انرژی (متوسط ماهانه) (kcal/kg)
Muffle	گاز طبیعی	۸	۴	Cup	پس از شکل‌دهی	۲۱۹	۴۴۸
Direct	الکتریسته	۸	۴	Cup	پس از شکل‌دهی	۲۱۹	۳۸۵
Muffle	گاز طبیعی	۸	۴	Cup	پس از شکل‌دهی	۱۵۶	۱۵۷۲
Muffle	نفت	۸	۱۶	Head Lens	پس از شکل‌دهی	۲۵۰	۱۸۶۱
Direct	گاز طبیعی	۸	۲	Head Lens	پس از شکل‌دهی	۲۵۰	۵۹۶
Muffle	گاز طبیعی	۲۴		Bottle	پس از شکل‌دهی	۳۶۰	۴۶۲
Direct Radiation	گاز طبیعی	۸	۱	Grove Lens	پس از شکل‌دهی	۱۸۰	۷۷۸
Muffle	نفت	۲۴		Bottle	پس از شکل‌دهی	۱۶۸	۸۲۷
Radiant tube	گاز طبیعی	۸	۱	Bottle	پس از شکل‌دهی	۲۳۸	۵۰۶

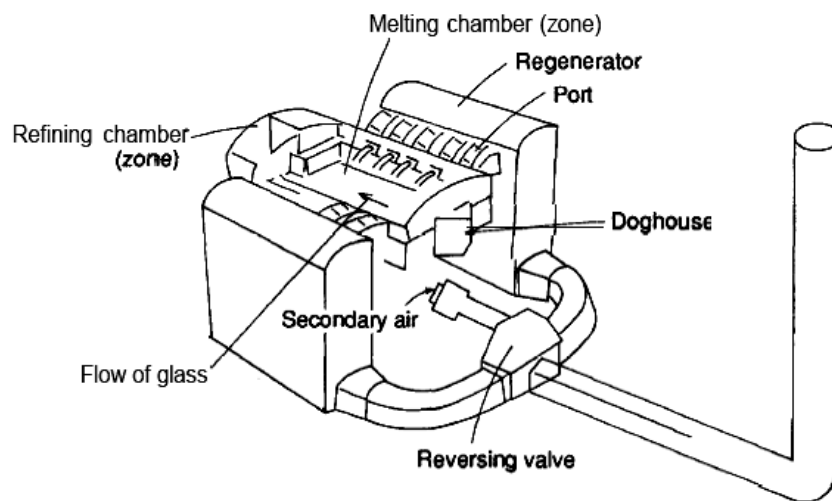


شکل (۵-۱۰): نمودار سیستمی صرفه جویی انرژی

۳-۱۰- فناوری های صرفه جویی انرژی

۱-۳-۱۰- کوره ذوب

کوره های ذوب مورد استفاده در تولید شیشه در انواع بسیار زیادی قابل دسترس است. آنها را می توان به انواعی که در اشکال (۶-۱۰) تا (۱۰-۱۰) مشاهده می شود، طبقه بندی نمود. شکل (۶-۱۰) یک کوره نوع دریچه از پهلوی^۱ را نشان می دهد. این نوع کوره از انواع کوره های بزرگ است که ظرفیت روزانه آن ۱۰۰ تا ۱۵۰ تن و حتی بیشتر می باشد. معمولاً دو تا از دریچه ها (یا بیشتر) طوری نصب شده اند که با مسیر جریان شیشه زاویه مستقیم دارند و توزیع درجه حرارت در درون کوره می تواند با کنترل کردن میزان احتراق هر دریچه به مقدار مشخص و مطلوبی تغییر داده شود. این امر تولید شیشه با کیفیت بالا را امکان پذیر می سازد. این نوع کوره اغلب اوقات به عنوان کوره تولید کننده شیشه جام یا کوره تولید بطری های شیشه ای استفاده می شود.



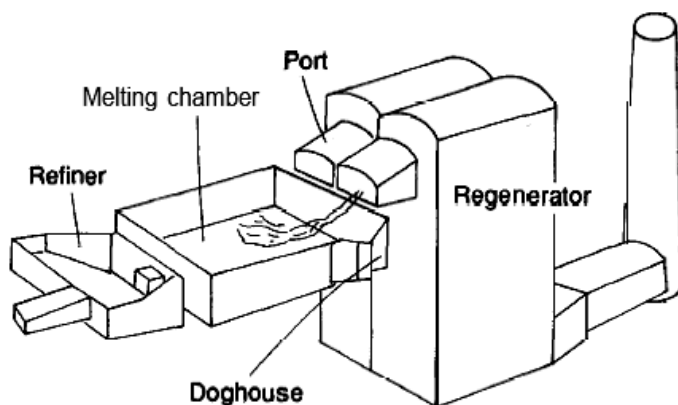
شکل (۶-۱۰): کوره مخزنی دریچه از پهلوی (SidePort)

شکل (۷-۱۰) یک کوره نوع دریچه از انتها^۲ را نشان می دهد. این نوع کوره ظرفیت روزانه کم یا متوسطی دارد و ظرفیت آن به ۱۰۰ تن در روز یا کمتر بالغ می گردد. در مقام مقایسه با کوره های دریچه از پهلوی، کوره های دریچه از انتها ساختار ساده تر و هزینه های نصب پایینتری دارند ولی در افزایش اندازه آنها مشکلات خاص خود را دارد. شعله در جهت عمود بر مسیر کوره باز می گردد و به درون پورتی که در جهت مقابل دیوار عقب قرار

1- Side Port
2- End Port

دارد کشیده و مکیده می‌شود. توزیع درجه حرارت در درون کوره بر حسب طول شعله تغییر می‌کند و نسبتاً تغییر توزیع درجه حرارت مشکل می‌باشد.

در بسیاری مواقع به منظور بازیافت حرارت در دو نوع کوره مذکور از ریژنراتور استفاده می‌کنند ولی در انواع کوچکتر این کوره‌ها از رکوپراتور بهره می‌برند.



شکل (۷-۱۰): کوره مخزنی نوع دریچه از انتها (End Port)

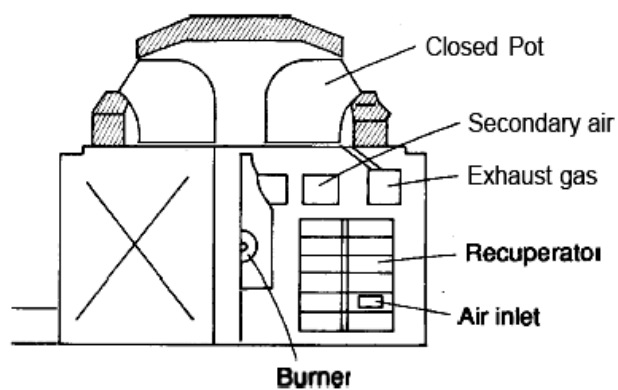
شکل‌های (۸-۱۰) تا (۱۰-۱۰) کوره‌های پات^۱ را نشان می‌دهند. شکل (۸-۱۰) نشان دهنده یک کوره پات معمولی چندگانه است که از زمانهای قدیم استفاده می‌شود. در این کوره‌ها معمولاً شش تا ده پات به صورت مدور قرار می‌گیرند که در هر یک از آنها شیشه‌هایی به مقدار کم اما با کیفیت‌های متفاوت ذوب می‌گردد. بچ به درون پات بارریزی می‌شود و معمولاً عملیات ذوب در شب صورت می‌گیرد و عملیات فرم‌دهی شیشه در طول روز انجام می‌گیرد. بازدهی این گونه کوره‌ها چندان مطلوب نیست و نمی‌توان شیشه‌ای با کیفیت عالی با استفاده از آنها تولید نمود. بسیاری از شرکت‌های کوچک و متوسط از این نوع کوره‌ها استفاده می‌کنند.

شکل (۹-۱۰) یک کوره پات را که به صورت منفرد نصب شده است، نشان می‌دهد. این نوع کوره منفرد نه تنها استفاده از پات بسته^۲ بلکه استفاده از پات باز^۳ را میسر می‌سازد. اگر چه اندازه این نوع کوره‌ها کوچک است ولی از بازدهی بالایی برخوردارند. مصرف ویژه انرژی در برخی از این نوع کوره‌ها به ۴۰۰۰ تا ۵۰۰۰ کالری بر کیلوگرم شیشه بالغ می‌گردد.

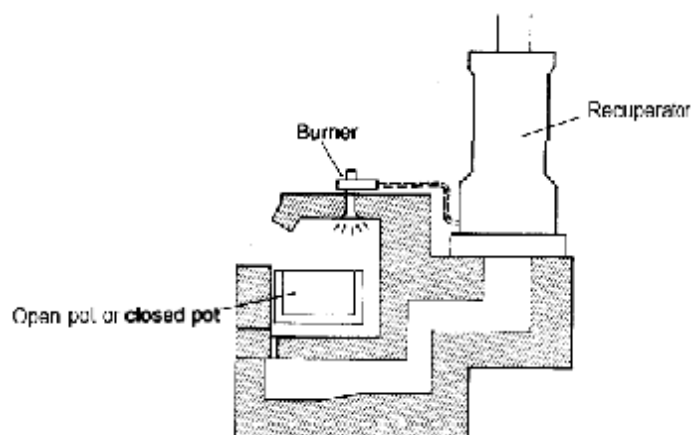
شکل (۱۰-۱۰) یک کوره پات چند گانه^۴ را در حالتی که پات‌ها به صورت موازی قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهد. اغلب کارخانه‌های کوچک و متوسط برای حمل و نقل مذاب از انواع تسمه نقاله‌ها و برای برداشت لقمه از کوره از روبات استفاده می‌نمایند. از آنجا که استفاده از کوره‌های پات که به صورت مدور (نه به صورت موازی)

1- Pot Furnace
2- Close Pot
3- Open Pot
4- Multiple

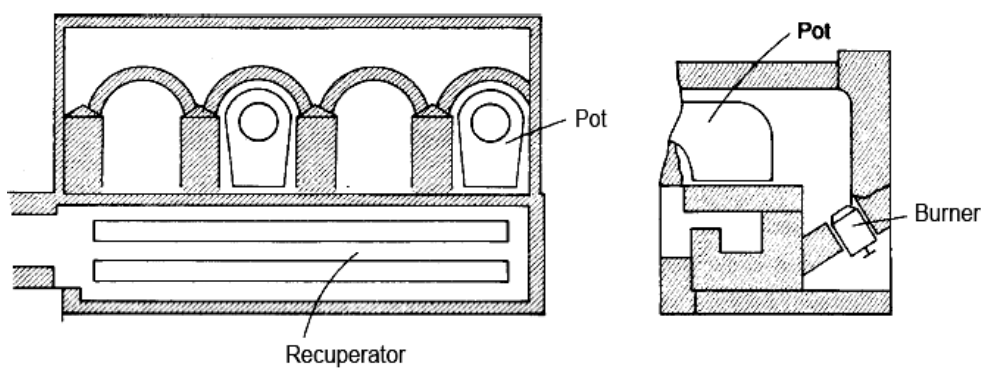
نصب می‌شوند، دارای مشکلات بیشتری در هنگام کار می‌باشند لذا این نوع کوره‌ها باید به طریقی دستخوش تغییر طراحی شوند تا مشکلات مذکور برطرف گردد.



شکل (۸-۱۰): کوره پات



شکل (۹-۱۰): کوره پات منفرد (نوع جدید)



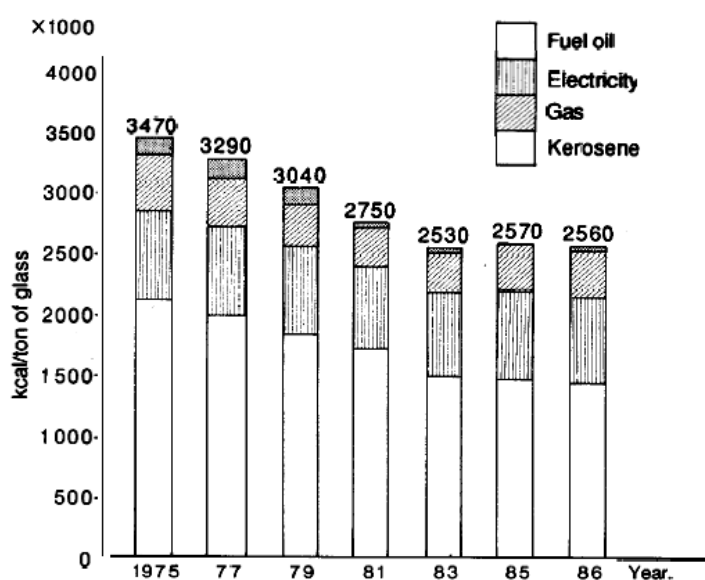
شکل (۱۰-۱۰): کوره پات چند گانه به صورت موازی

در کوره پات از رکوپراتور به عنوان مبدل حرارتی جهت بازیافت حرارت اتلافی استفاده می‌شود. از آنجا که کوره ذوب انرژی زیادی مصرف می‌کند طرح استفاده از رکوپراتور تأثیر زیادی در صرفه جویی انرژی دارد که عملاً در کاهش میزان مصرف انرژی به ازاء واحد تولید نمایان می‌گردد.

شکل (۱۰-۱۱) روند نزولی مصرف ویژه انرژی برای تولید بطری شیشه‌ای را در کشور ژاپن طی سالهای ۱۹۷۵ به بعد نشان می‌دهد.

در عرض دوازده سال یعنی از سال ۱۹۷۵ تا سال ۱۹۸۶، میزان مصرف انرژی به ازاء واحد تولید محصول حدود ۲۶ درصد کاهش داشته و مقدار آن از $3/470/000$ کیلوکالری بر تن به $2/560/000$ کیلوکالری بر تن رسیده است. در سالهای اخیر، برخی از شرکت‌ها توانسته‌اند مصرف انرژی به ازاء واحد تولید خود را به کمتر از $2/000/000 \frac{\text{kcal}}{\text{ton}}$ کاهش دهند. این امر تنها هنگامی محقق می‌گردد که مقدار سوخت مصرفی در کوره تقلیل یافته باشد.

نخستین گام به سوی منطقی کردن و بهینه نمودن مصرف انرژی در کوره‌های ذوب شیشه، بهبود بخشیدن به بازدهی احتراق، عایق کاری مناسب‌تر و استفاده مفید از انرژی گازهای خروجی از دودکش از طریق بازیافت حرارت می‌باشد.



شکل (۱۰-۱۱): مصرف ویژه انرژی برای تولید بطری در ژاپن

۲-۳-۱۰- کنترل احتراق

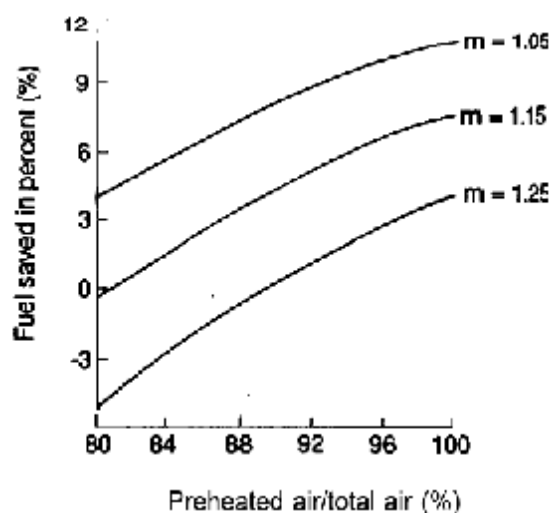
در کوره‌های ذوب شیشه از سوخت مایع (گازوئیل یا مازوت) و یا سوخت گازی (LPG-LNG) بعنوان تامین کننده انرژی حرارتی استفاده می‌شود. مناسب بودن احتراق در یک کوره را می‌توان با اندازه‌گیری میزان تولید گازهای CO_2 و O_2 و CO در محصولات احتراقی خروجی از دودکش کنترل کرد.

مواد سازنده شیشه که در کوره‌های مخزنی استفاده می‌شود، کربنات‌هایی از قبیل کربنات سدیم و سنگ آهک ($CaCO_3$) هستند. این مواد در طی واکنش‌هایی که در کوره اتفاق می‌افتد، تجزیه می‌شوند و گاز CO ایجاد می‌کند. بنابراین چنانچه آنالیزی از گازها تهیه شود CO تولید شده در کوره مخزنی حاصل جمع CO تولید شده از احتراق و CO تولید شده از مواد کربناتی مصرفی باشد و لذا مقدار CO بیشتر از حالتی است که فقط پدیده احتراق مدنظر قرار گرفته باشد. لازم بذکر است که اگر کنترل احتراق مورد نظر باشد مقدار CO به تنهایی برای قضاوت کافی نیست. مطلوبتر آن است که در کنترل احتراق کوره‌های مخزنی مقدار اکسیژن در محصولات احتراقی خروجی از دودکش ملاک سنجش قرار گیرد.

۱-۲-۳-۱۰- تأثیر هوای خنک شرکت کننده در احتراق از دیدگاه صرفه‌جویی مصرف سوخت

هوای مورد استفاده در احتراق معمولاً توسط مبدل حرارتی پیش‌گرم می‌شود (هوای ثانویه). از طرف دیگر هوای وارد شده از درزهای محفظه مشعل نیز در پدیده احتراق شرکت می‌کند (هوای اولیه). از آنجاییکه هوای مذکور خنک می‌باشد بنابر این کاهش دادن حجم آن صرفه‌جویی در مصرف انرژی را بدنبال خواهد داشت.

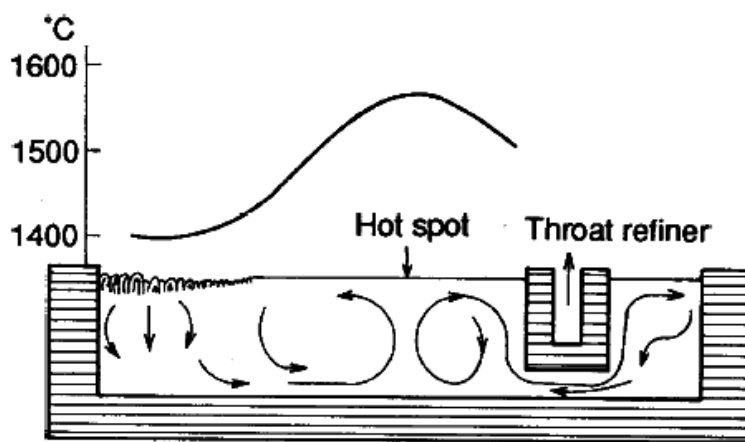
شکل (۱۲-۱۰) نتایج محاسبه میزان صرفه‌جویی انرژی قابل حصول از طریق کاهش دادن حجم هوای خنک و جایگزین کردن آن با هوای پیش‌گرم شده را نشان می‌دهد. نتایج ارائه شده در شکل مذکور بر مبنای $m=1/25$ و حجم هوای خنک معادل ۱۰ درصد از کل هوا می‌باشد. اگر هوای خنک به مقدار ۱ درصد کاهش یابد و هوای پیش‌گرم هم ۱ درصد افزایش یابد لذا نسبت هوا به مقدار ۱ درصد کاهش یافته و بنابر این صرفه‌جویی در سوخت مصرفی به میزان ۰/۵ درصد حاصل خواهد شد.



شکل (۱۰-۱۲): رابطه موجود بین هوای پیش‌گرم شده و صرفه‌جویی در مصرف سوخت

۲-۳-۱۰- توزیع درجه حرارت درون کوره

برای کسب اطمینان از تولید پایدار یک شیشه مرغوب و باکیفیت، توزیع درجه حرارت در درون کوره باید در حد بهینه نگهداری شود. همانطور که در شکل (۱۰-۱۳) نشان داده شده است، توزیع درجه حرارت درون کوره مخزنی باید طوری طراحی شود که نقاط داغ^۱ تقریباً در موقعیت وسط و مستقر در نزدیکی گلوگاه باشد. البته موقعیت نقاط داغ تا حدی به شرایط بار بستگی دارد. اگر احتراق به گونه‌ای باشد که نقاط داغ به مقدار زیادی جابجا شوند آنگاه جریان شیشه در درون کوره توزیع می‌شود و در نهایت سبب ایجاد عیوبی در محصول شیشه‌ای خواهد شد.

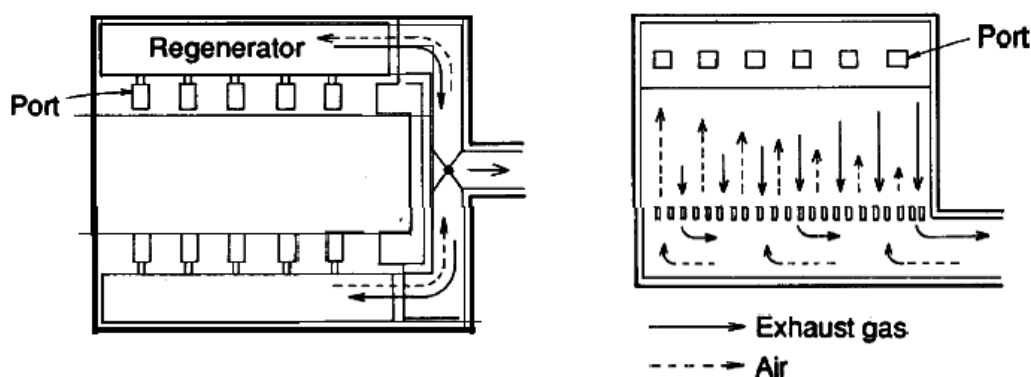


شکل (۱۰-۱۳): رابطه بین توزیع درجه حرارت و جریان شیشه مذاب

1- Hot Spot

اگر توزیع درجه حرارت در درون کوره در مقدار بهینه نگهداری شود، حاشیه هدایت کنندهٔ بچ بارریزی شده به گونه‌ای حرکت خواهد کرد که به سمت عقب برگردد و اگر توزیع درجه حرارت در درون کوره مطلوب نباشد جریان عقبی شیشه ضعیف خواهد بود و بچ به سمت جلو حرکت خواهد کرد.

در کوره‌های مخزنی دریچه^۱ از پهلوی، توزیع درجه حرارت درون کوره می‌بایست از طریق کنترل کردن احتراق در هر دریچه با سهولت قابل بهینه‌سازی باشد، ولی در عمل اینکار همیشه با مشکلاتی مواجه است. این امر به این علت است که تنظیم سوخت برای هر دریچه می‌تواند توسط مشعل صورت گیرد، ولی حجم هوای ثانویه پیش‌گرم شده را نمی‌توان برای هر دریچه کنترل نمود. شکل (۱۴-۱۰) حجم هوای تأمین شده برای هر دریچه را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل دیده می‌شود، محصولات احتراقی با جریان بیشتری در موقعیت نزدیکتر به محل خروج گازهای اگزوز وجود دارند و آجرهای چکر هم تا درجه حرارت بالایی گرم می‌شوند. بنابر این حجم بزرگی از هوا در دریچه‌ای جریان می‌یابد که بیشترین فاصله را از محل خروج گازهای اگزوز دارد. معمولاً در این حالت مقدار m مربوط به احتراق (شکل ۱۲-۱۰) بزرگ بوده و به همین ترتیب در دریچه‌ای که نزدیکترین فاصله را از محل خروج گازهای اگزوز دارد، احتراق با m کوچک اتفاق خواهد افتاد. مقدار میانگین این دو m ، به عنوان مقدار m اصلی در آنالیز گازهای درون کوره به کار می‌رود. لازم بذکر است که نه از منظر بدست آوردن توزیع درجه حرارت بهینه و نه از منظر صرفه‌جویی انرژی به تنهایی نمی‌توان به مسئله احتراق نگاه کرد بلکه عوامل دخیل در آن متعدد هستند. برای بهبود بخشیدن به وضعیت مذکور، محفظه ریژنراتور جداگانه‌ای تعبیه شده است که کنترل کردن حجم هوای در هر یک از دریچه‌ها را امکان پذیر می‌سازد. بهرحال، این پیشنهاد هم بدلیل بروز برخی مسائل از قبیل مسدود شدن راه انتقال، چندان با موفقیت روبه رو نشده است.



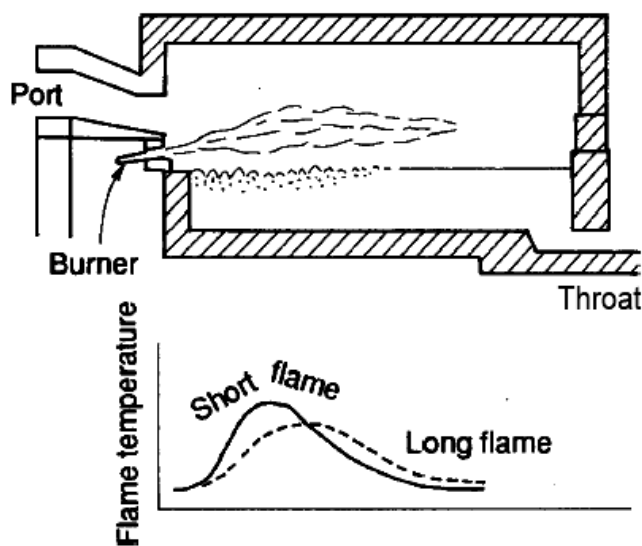
شکل (۱۴-۱۰): توزیع جریان گازهای احتراقی و هوا در داخل ریژنراتور

توزیع بهینه درجه حرارت در کوره‌های دریچه از انتها بسیار مشکل‌تر از کوره‌های دریچه از پهلوی است. همانطور که در شکل (۱۵-۱۰) نشان داده شده است، مشعل کوره دریچه از انتها در یک پایانه جریان شیشه نصب شده است و لذا هیچ راهی برای ایجاد توزیع درجه حرارت جز کنترل کردن طول شعله باقی نخواهد بود. اگر شعله کوتاه انتخاب شده باشد، نقاط داغ نزدیک‌تر به مشعل واقع خواهد شد و اگر شعله بلندتر انتخاب شده باشد، نقاط داغ به سوی منطقه گلوئی حرکت خواهد کرد.

طول شعله می‌تواند از راههای ذیل تنظیم گردد:

- تغییر ظرفیت مشعل (با تعویض نازل)
- تغییر نوع مشعل (با تغییر دادن حجم هوای اولیه و زاویه چرخش شعله)
- تغییر فشار مشعل برای اتمیزه کردن سوخت (شعله بلندتر با کمتر کردن فشار اولیه)
- تنظیم هوای ثانویه

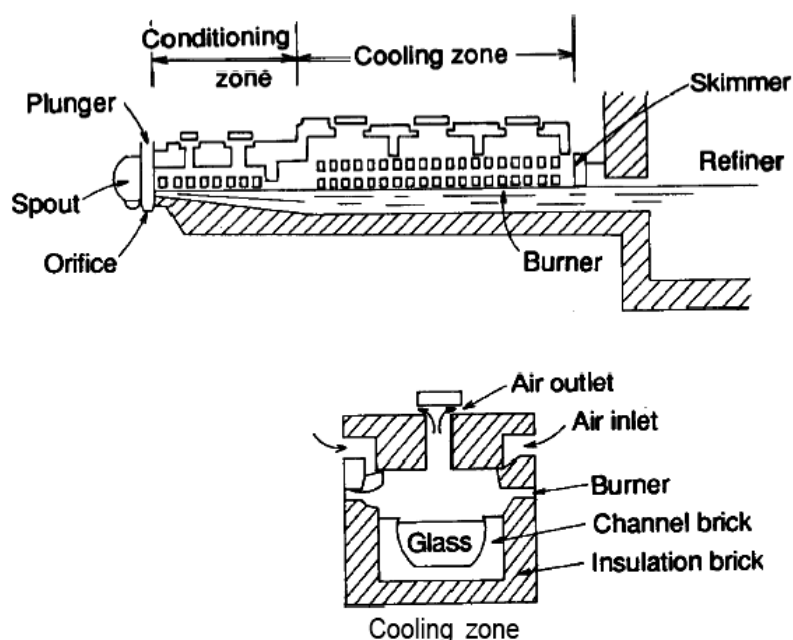
در هر حال روش‌های مذکور، تأثیرات محدودی دارند و لذا غالباً یک کوره نوع دریچه از انتها نمی‌تواند بجای کوره بزرگی که ظرفیت روزانه آن ۱۰۰ تا ۱۵۰ تن با بیشتر است، استفاده شود.



شکل (۱۵-۱۰): توزیع درجه حرارت مشعل برای کوره نوع دریچه از انتها

۳-۲-۳-۱۰- احتراق در فورهارت

فورهارت عمل کنترل کردن دمای شیشه قبل از عملیات شکل‌گیری را انجام می‌دهد و تأثیر مستقیمی بر کیفیت محصول شیشه‌ای دارد. رئوس کار فورهارت در شکل (۱۶-۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۱۶-۱۰): نمودار تفصیلی فورهارت

اساس کنترل درجه حرارت عبارت است از :

- بهینه کردن حرارت لقمه‌ای که می‌بایست به ماشین شکل‌دهی تغذیه شود.
 - توزیع درجه حرارت از مدخل فورهارت به تغذیه کننده^۱ می‌بایست طوری تنظیم شود که درجه حرارت به تدریج در طول جریان شیشه کم گردد و هیچ درجه حرارت بالایی در مسیر اتفاق نیفتد.
- برای کنترل درجه حرارت تعداد زیادی مشعل‌های کوچک در مسیر جریان نصب می‌شوند. برای کنترل درجه حرارت، منطقه خنک کننده^۲ به ۳ یا ۴ منطقه تقسیم می‌شود.
- در فورهارت از گاز مایع یا گاز مشابه به عنوان سوخت استفاده می‌شود زیرا گاز به عنوان سوختی سبک، احتراق سریعی دارد و به سهولت می‌تواند شعله‌های کوتاه تولید کند و میزان کربن تولیدی توسط آن بسیار کم و یا در حد صفر است. در صورت وجود کربن بر روی مذاب شیشه، حباب و Foam تشکیل می‌شود و پدیده رنگی شدن شیشه را در پی خواهد داشت.
- موقعی که شیشه رنگی تولید می‌شود، ممکن است رنگ شیشه تحت تاثیر اتمسفر کوره تغییر کند. برای کسب اطمینان از ثبوت و پایداری رنگ می‌بایست مراقبت‌های کافی در خصوص اتمسفر اکسیداسیونی یا احیائی در فورهارت بعمل آید.
- هوا اغلب اوقات از قبل با گاز مخلوط شده و سپس گاز سوزانده می‌شود. همانطور که در شکل (۱۷-۱۰) دیده می‌شود، این روش به سه طریق قابل دسترسی خواهد بود.

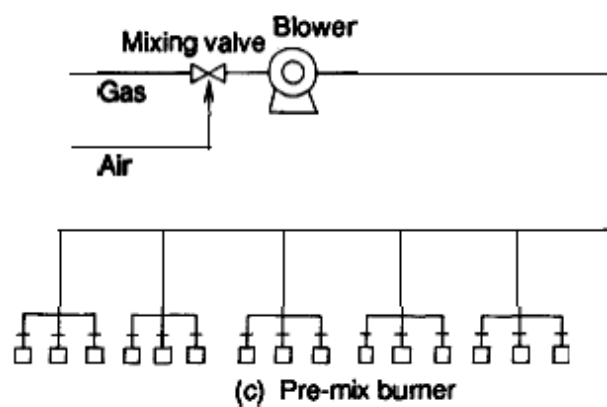
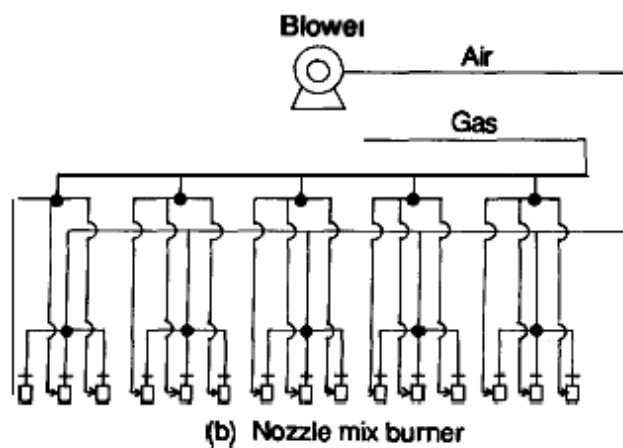
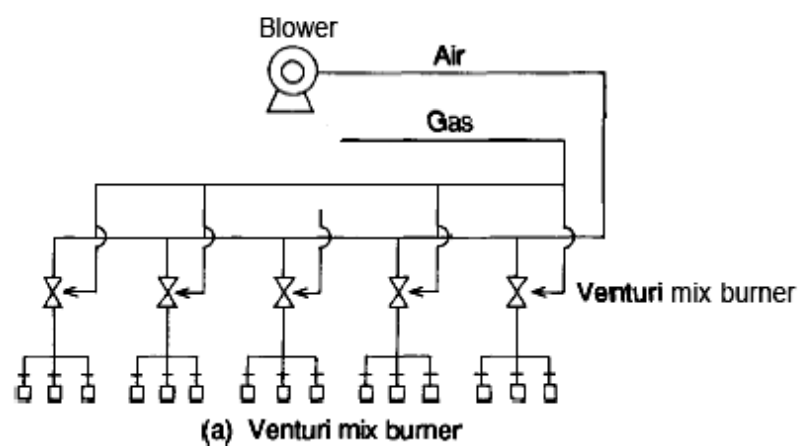
1- Feeder
2- Cooling Zone

در شکل (۱۷a-۱۰) یک سیستم پیش مخلوط‌کن با استفاده از مخلوط‌کن ونتوری نشان داده شده است. این روش اجازه می‌دهد که نسبت هوای کل همواره بهینه شود و اگر نسبت هوا در هر منطقه‌ای تغییر کرد نسبت‌های هوا در مناطق دیگر هم تحت تأثیر قرار گیرد. البته اگر تعداد مشعل‌ها خیلی زیاد باشد سیستم کنترل احتراق مذکور، نمی‌تواند عملکرد مطمئنی داشته باشد.

شکل (۱۷b-۱۰) روشی را نشان می‌دهد که گاز و هوا از سر مشعل با هم مخلوط می‌شوند. این روش برای کسب اطمینان از جلوگیری "آتشکاری به عقب" طراحی شده است، ولی برای حذف تداخل بین گاز و مناطق هوا ناتوان است.

شکل (۱۷c-۱۰) روشی را نشان می‌دهد که شیر پیش مخلوط‌کن گاز - هوا در جلو دمنده نصب شده است. بر اساس این روش، نسبت گاز - هوا در جلو دمنده ثابت است، لذا نسبت هوا در همه مناطق ثابت می‌ماند (حتی اگر آن حجمی از هوا که توسط مشعل سوزانده می‌شود، برای هر منطقه تغییر کند). روش مذکور اطمینان لازم از کنترل نسبت گاز - هوا را فراهم می‌کند و صرفه‌جویی انرژی را به میزان قابل ملاحظه‌ای امکان پذیر می‌سازد.

مقایسه مقدار اکسیژن (O_2) در خروجی از دودکش براساس سه روشی که عنوان گردید، نشان می‌دهد که در روش اول مقدار اکسیژن ۸ درصد و در روش دوم ۶ درصد و در روش سوم ۱ درصد می‌باشد. کاهش اساسی در نسبت هوای احتراق، شرط اصلی موفقیت در کاهش حجم گازهای سوختی بوده است.



شکل (۱۷-۱۰): سیستم مشعل گازی

از آنجا که کوره ذوب شیشه مساحت زیادی دارد، لذا به حداقل رساندن افت‌های حرارتی از دیوارهای کوره مطلب بسیار مهمی در صرفه‌جویی انرژی می‌باشد.

در هر حال عایقکاری حرارتی کوره ذوب می‌بایست با کمال دقت مورد مطالعه قرار گیرد چرا که ممکن است سبب فرسایش آجرهای نسوز. کاهش دوره سرویس‌دهی کوره و تنزل کیفیت شیشه گردد.

۱-۳-۳-۱- عایق‌کاری برای کف محفظه ذوب

عایق‌کاری بهینه در کف محفظه ذوب باعث بالا رفتن درجه حرارت کف کوره خواهد شد. این کار باعث بهسازی ظرفیت ذوب کوره و برداشت بیشتر محصول خواهد شد. امتیاز مرتبطی که بلافاصله بعد از بهسازی در میزان برداشت محصول حاصل می‌شود، مجدداً به کاهش افت حرارت از کف کوره کمک می‌کند.

شکل (۱۸-۱۰) نمونه‌ای از لایه‌های عایق‌کاری را نشان می‌دهد.

Glass 1350°C
Fused AZS
AZS
Zircon
insulation SK-36
insulation SK-34
insulation B-5
114°C

شکل (۱۸-۱۰): عایق‌کاری کف محفظه ذوب

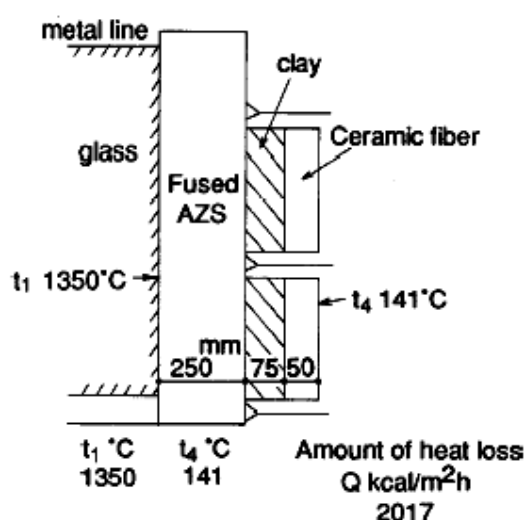
در مقام مقایسه با حالت متعارف و بدون استفاده از آجر عایق‌کاری، در این حالت مقدار افت حرارت حدود ۴۳ درصد کاهش پیدا می‌کند و از $3240 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$ به $1382 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$ می‌رسد.

محفظه تصفیه همانند محفظه ذوب می‌بایست عایق‌کاری حرارتی شود. عایق‌کاری ممکن است برای جلوگیری از خنک شدن شیشه ضرورت بیشتری پیدا کند.

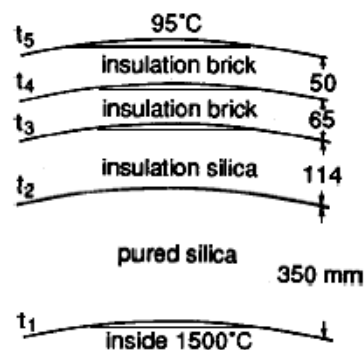
۱-۳-۳-۲- عایق‌کاری تاج کوره

از آجر سیلیسی برای پوشاندن سقف کوره استفاده می‌شود و امروزه آجرهای سیلیسی با طول عمر بالا^۱ به وفور در اختیار قرار دارند. این آجرها محصولاتی با درجه خلوص بالا و با حداقل مقدار قلیایی و آلومینا هستند که عایقکاری بهبود یافته‌ای را مهیا می‌سازند.

در تاج برخی کوره‌ها از نسوزهای الکتروفیوز AZS (آلومینا-زیر کونیا-سیلیکا) استفاده می‌شود. شکل (۱۹-۱۰) مثالی از این نوع عایق کاری را نشان می‌دهد. هنگامیکه درجه حرارت داخل کوره 1500°C باشد، درجه حرارت اکثر نقاط دیوار عایق کاری حدود 95°C خواهد بود و میزان افت حرارت هم به مقدار $810 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$ خواهد رسید. اما در حالتی که عایق کاری انجام نشده باشد، درجه حرارت دیوار بیرونی سقف به حدود $300 - 400^{\circ}\text{C}$ می‌رسد.



شکل (۲۰-۱۰): بلوک‌های مخزن ذوب



$t_1, ^{\circ}\text{C}$	$t_2, ^{\circ}\text{C}$	$t_3, ^{\circ}\text{C}$	$t_4, ^{\circ}\text{C}$	$t_5, ^{\circ}\text{C}$	$Q \text{ kcal/m}^2\text{h}$
1500	1343	1079	769	95	810
1600	1432	1150	820	100	865

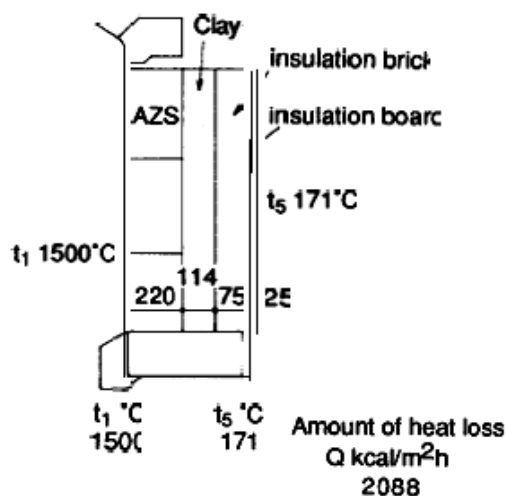
شکل (۱۹-۱۰): عایق کاری سقف محفظه ذوب

۳-۳-۱۰- عایق کاری دیوار جانبی

گرایش به استفاده از نسوزهای ذوب و ریخته گری AZS به عنوان بلوک‌های مخزن ذوب در کنار آجرهای عایق کاری بسیار رایج است (مگر در metal line). اتصالات آجری هم می‌بایست عایق کاری شوند، ولی در این خصوص دقت فراوانی مورد نیاز می‌باشد. شکل (۲۰-۱۰) نمونه‌ای از عایق کاری دیوار جانبی را نشان می‌دهد.

هنگامیکه میانگین درجه حرارت در دیوار داخلی 135°C باشد، درجه حرارت دیوار بیرونی 141°C خواهد بود و مقدار افت حرارت هم معادل $2017 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$ می‌باشد. اما در صورت عدم عایق‌کاری، درجه حرارت دیوار بیرونی 232°C بوده و مقدار افت حرارت هم معادل $6102 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$ خواهد بود.

در صورت استفاده از آجرهای ذوب و ریخته گری AZS به جای آجرهای سیلیسی در قسمت‌های بالایی دیوار جانبی که در تماس با مذاب شیشه نمی‌باشد، عایق‌کاری اثرات مفیدی خواهد داشت (شکل ۲۱-۱۰). هنگامیکه درجه حرارت میانگین در دیوار داخلی 150°C باشد، دیوار خارجی درجه حرارت 171°C خواهد داشت و میزان افت حرارت هم معادل $2088 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$ خواهد بود و در صورت عدم عایق‌کاری، درجه حرارت در دیوار بیرونی به 304°C خواهد رسید و میزان افت حرارت معادل $6152 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$ خواهد بود.



شکل (۲۱-۱۰): عایق‌کاری دیوار جانبی محفظه ذوب

۴-۳-۱۰- بازایی حرارت از گازهای خروجی کوره

ذوب شیشه نیاز به درجه حرارت 1450°C تا 1550°C دارد، لذا گازهای احتراقی خروجی از کوره محتوی مقدار زیادی انرژی حرارتی است. درجه حرارت محصولات احتراقی که از طریق محفظه ذوب، وارد ریژنراتور می‌شود بالغ بر دمای بالای 1450°C می‌رسد. بنابر این گازهای خروجی از کوره درجه حرارت بالایی دارند که می‌بایست توسط ریژنراتور یا رکوپراتور بازایی می‌گردد و برای پیش‌گرم کردن هوای ثانویه مورد نیاز احتراق استفاده می‌شود.

۱-۴-۳-۱- بازیابی انرژی گازهای احتراقی خروجی توسط ریژنراتور

ریژنراتورها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که گازهای با دمای بالای حاصل از احتراق خروجی از کوره‌ها از بین آجرهای چکر عبور کرده و گرمای آن جذب این آجرها گردد. مکانیزم عمل بازیابی حرارت در ریژنراتورها به این صورت است که گازهای احتراقی هنگام خروج از کوره و پیش از ورود به دودکش، به داخل ریژنراتورها هدایت می‌شود و این عمل در یک پریود زمانی ۳۰-۱۵ دقیقه‌ای انجام می‌گردد. سپس هوای احتراقی برای پیش‌گرم شدن از میان آجرهای چکر عبور کرده و گرمای آنرا جذب می‌نماید که این عمل سبب افزایش قابل ملاحظه دمای هوا می‌گردد. رویه مذکور به طور متناوب در فاصله زمانی ۳۰-۱۵ دقیقه تکرار می‌گردد و به همین خاطر دو ریژنراتور برای هر کوره مورد نیاز است.

درجه حرارت گازهای احتراقی خروجی در مدخل ریژنراتور C ۱۴۵۰-۱۳۵۰ می‌باشد و در هنگام خروج از ریژنراتور به حدود C ۵۰۰-۴۰۰ کاهش می‌یابد. هوای مصرفی نیز در دمای اتاق وارد ریژنراتور می‌شود و در هنگام خروج به دمای C ۱۳۰۰-۱۲۰۰ می‌رسد. این هوا به عنوان هوای ثانویه برای احتراق استفاده می‌شود.

۲-۴-۳-۱- بازیابی انرژی گازهای احتراقی خروجی توسط رکوپراتور

در این روش بازیابی، انرژی حرارتی گازهای احتراقی خروجی از کوره از طریق دیواره رکوپراتور که در واقع یک مبدل حرارتی گاز-گاز است، به هوای احتراق (در دمای محیط) منتقل می‌شود. این روش برای کوره‌های کوچک و متوسط که مقدار گاز احتراقی خروجی از آنها کم است، استفاده می‌شود و ظرفیت هم‌طوری تعیین می‌شود که درجه حرارت هوای پیش‌گرم شده، پایداری و ثبات قابل تضمینی داشته باشد.

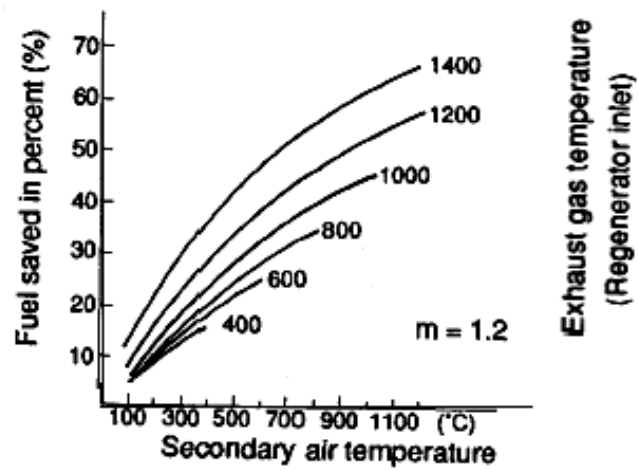
بهر حال، ماکزیمم درجه حرارت هوای پیش‌گرم شده نمی‌تواند به آن مقداری که در کوره‌های ریژنراتوری معمول است، برسد. در رکوپراتورهای نوع brick work، نشت هوا از دیوار رکوپراتور به مسیر گازهای احتراقی خروجی صورت می‌گیرد. بهترین راه کنترل کردن نشت مذکور آنالیز کردن گاز خروجی به منظور بررسی تغییر میزان اکسیژن است. اگر هوا به دلیل نشتی وارد جریان گازهای احتراقی خروجی شود، درجه حرارت گازهای احتراقی کاهش خواهد یافت و مقدار افزایش یافته گاز خروجی سبب افت انرژی بیشتری در گازهای خروجی خواهد شد. اگر هوا از طریق پاساژ هوای ثانویه به داخل گاز خروجی نشت کند، مقدار هوای ثانویه ناکافی خواهد بود و قطعاً مشکلاتی در مکانیزم احتراق پیش خواهد آمد.

جدول (۳-۱۰) نشت رکوپراتور مورد استفاده در یک کوره پات را نشان می‌دهد. در این تحلیل چهار کوره در نظر گرفته شده است و مقدار اکسیژن (O_2) موجود در گازهای خروجی از کوره (درون کوره) و در خروجی از رکوپراتور آنالیز گردیده و نسبت هوا (m) هم در این دو مقطع با یکدیگر مقایسه گردیده‌اند. کمترین مقدار اختلاف بین نسبت هوا مربوط به کوره C است که از ۱/۰۵ به ۱/۳ رسیده است و بیشترین مقدار اختلاف در نسبت هوا هم در کوره B مشاهده می‌شود که از مقدار ۱/۱۷ به ۲/۲ رسیده است که افزایشی در حدود ۱/۸ برابر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نفوذ هوا در رکوپراتور غیر قابل اجتناب است و این تمایل هر چه کوره پیرتر و فرسوده‌تر می‌شود برجسته‌تر و آشکارتر می‌گردد.

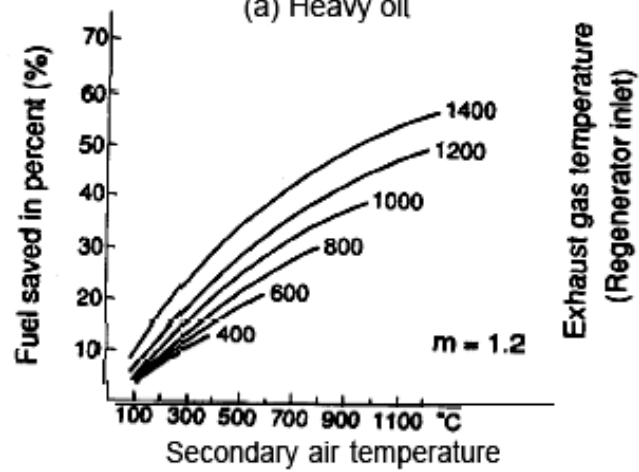
جدول (۱۰-۳): نسبت هوای گاز خروجی برای یک کوره پات و رکوپراتور

D	C	B	A	
۰/۶	۱/۰	۳/۳	۰/۲	درصد اکسیژن خروجی از کوره ($O_2\%$)
۱/۰۲	۱/۰۵	۱/۱۷	۱/۰۱	نسبت هوا (m)
۸/۹	۵/۶	۱۱/۸	۶/۲	درصد اکسیژن خروجی از رکوپراتور ($O_2\%$)
۱/۷	۱/۳	۲/۲	۱/۴	نسبت هوا (m)

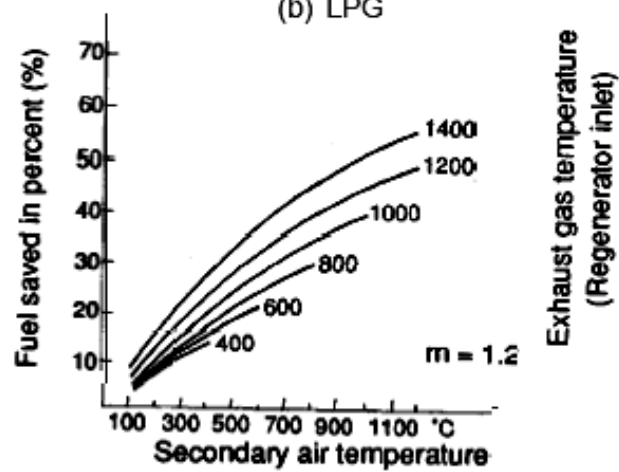
شکل‌های (۱۰-۲۲a) و (۱۰-۲۲b) و (۱۰-۲۲c) رابطه موجود بین درصد صرفه‌جویی سوخت و درجه حرارت هوای پیش‌گرم را در صورت استفاده از گاز خروجی برای پیش‌گرم کردن هوای ثانویه نشان می‌دهد. شکل (۱۰-۲۲a) ارتباط بین پارامترهای مذکور را در حالت استفاده از نفت سنگین به عنوان سوخت مصرفی کوره نشان می‌دهد. هنگامیکه درجه حرارت در مدخل ریژنراتور $1200^\circ C$ باشد و هوای احتراق تا $900^\circ C$ پیش‌گرم شود، حدود ۵۰ درصد صرفه‌جویی در مصرف سوخت حاصل خواهد شد. اگر درجه حرارت هوای پیش‌گرم شده تا $600^\circ C$ افزایش یابد و درجه حرارت گازهای خروجی هم $800^\circ C$ باشد، صرفه‌جویی در مصرف سوخت حدود ۲۸ درصد خواهد بود. به این ترتیب هر چه درجه حرارت گازهای خروجی بیشتر باشد، تأثیر بهتری بر عملیات پیش‌گرم کردن هوا خواهد داشت. شکل (۱۰-۲۲b) وضعیت مذکور را در هنگام استفاده از گاز مایع و شکل (۱۰-۲۲c) هم وضعیت را در هنگام استفاده از گاز طبیعی نشان می‌دهد.



(a) Heavy oil



(b) LPG



(c) LNG

شکل (۲۲-۱۰): صرفه‌جویی در مصرف سوخت از طریق پیش‌گرمایش هوای احتراق

۵-۳-۱۰- لهر

تنش‌زدایی یک فرآیند بسیار مهم در تولید شیشه است. چنانچه محصول شیشه‌ای پس از آنکه شکل گرفت به حال خود رها شود به دلیل اختلاف دمای بسیار زیاد بین سطح و درون محصول، کرنش اتفاق خواهد افتاد و در صورتی که مقدار این کرنش از حد معینی بیشتر شود، شیشه خواهد شکست. فرآیند تنش‌زدایی برای به حداقل رساندن امکان تشکیل کرنش‌هایی است که در طی فرآیند سرد کردن محصول اتفاق می‌افتد.

لهرها عمدتاً در دو نوع در دسترس می‌باشند. یک نوع شعله مستقیم^۱ می‌باشد که در آن گاز احتراق در تماس مستقیم با محصول قرار می‌گیرد و نوع دیگر انباره‌ای^۲ است که در آن گاز و محصولات توسط پارتیشن از همدیگر جدا شده‌اند. لهرهای نوع انباره‌ای دارای بازدهی حرارتی پایینی بوده ولی امکان استفاده از نفت سنگین و کم‌هزینه‌تر در آنها وجود دارد.

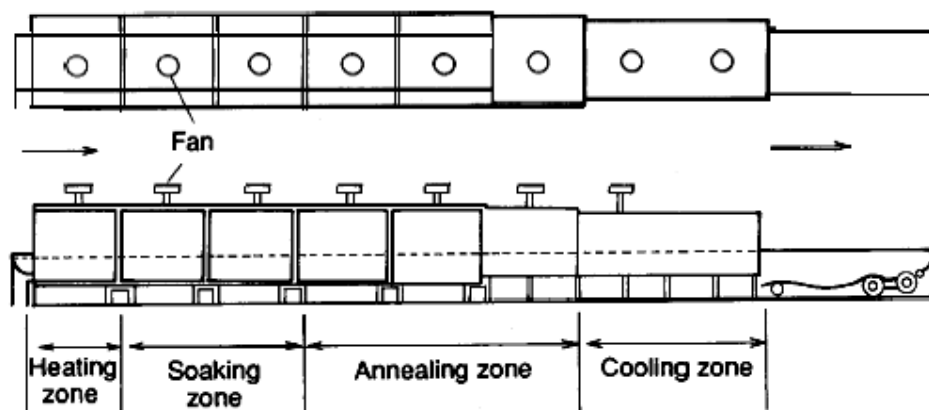
لهرهای نوع شعله مستقیم از گاز و الکتریسیته به عنوان انرژی مصرفی سوخت استفاده می‌کنند و دارای دو مزیت عمده هستند که عبارتند از: بازدهی حرارتی بالا و کنترل ساده و آسان درجه حرارت. بنابراین طبیعی است که از لهرهای نوع اخیر به تعداد بیشتری در صنایع شیشه‌سازی استفاده شود.

شکل (۲۳-۱۰) نمونه‌ای از یک لهر را که بر اساس سیستم جابه‌جایی اجباری هوا بنا شده است، نشان می‌دهد. گاز درون کوره از طریق یک فن به صورت اجباری چرخش داده می‌شود تا از توزیع یکنواخت درجه حرارت اطمینان حاصل شود. این عمل باعث بهبود بازدهی انتقال حرارت می‌شود. زمان تنش‌زدایی در این نوع لهرها در مقام مقایسه با لهرهای متعارف و معمولی کوتاه‌تر می‌باشد. با اعمال روش‌های ذیل می‌توان نسبت به صرفه‌جویی انرژی در لهر اقدام کرد.

۱-۵-۳-۱۰- عایق‌کاری حرارتی دیوار لهر

موادی که در دیواره‌های لهر بکار می‌روند، عمدتاً آجرهای نسوز و آجرهای عایق‌کاری می‌باشند. برای دیوار کوره استفاده از مواد عایق حرارت که از جنس الیاف هستند و کمترین ظرفیت حرارتی را دارند، مؤثر است. علی‌الخصوص اگر درجه حرارت لهر در حدود 600°C بوده و احتمال توقف عملیات در شب وجود داشته باشد، استفاده از مواد عایق تاثیر قابل توجهی خواهد داشت. در صورت عایق‌کاری مناسب، از آنجا که کوره کمترین ظرفیت حرارتی را خواهد داشت به تغییرات دمایی حساس بوده و مراقبت و ملاحظه اصلی می‌بایست معطوف به سیستم کنترلی باشد. چنانچه محصولات شیشه‌ای با درجه حرارت قابل ملاحظه و بالایی وارد لهر شوند با انجام عایق‌کاری کافی و مناسب می‌توان مقدار مصرف سوخت برای گرم نگه داشتن لهر را کاهش داد.

1- Direct Fired
2- Muffle



شکل (۱۰-۲۳): طرح شماتیک لهر

۲-۵-۳-۱۰- جلویی از ورود هوای خنک از طریق دهانه‌های ورودی

در لهر، فاصله کوتاهی بین مقطع ورودی و منطقه گرمایش وجود دارد و منطقه Soaking هم کاملاً نزدیک مقطع ورودی تعبیه شده است. بنابر این ورود هوای سرد از مدخل ورودی تاثیر کاملاً جدی بر جای می‌گذارد. بعنوان نمونه توزیع درجه حرارت درون کوره را دچار اغتشاش می‌کند. از آنجا که دهانه به عنوان ورودی محصول عمل می‌کند، لذا طوری طراحی می‌شود که پهن و عریض باشد. در این شرایط به منظور جلوگیری از تلفات انرژی ضروری است که یک دمپر یا پرده عایق کننده نصب شود و سعی گردد که این دمپر همیشه باز باقی نماند. دهانه ورودی لهر هم چنین برای تخلیه حرارت با دمای بالا از منطقه Soaking مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳-۵-۳-۱۰- جلویی از باز شدن دهانه خروجی

از آنجاییکه بخش درونی انتهای لهر نسبت به محیط درجه حرارت بالاتری دارد، هوا به داخل لهر جریان پیدا می‌کند. هوای وارد شونده از انتهای لهر، توزیع درجه حرارت درون لهر را هم در جهت افقی و هم در جهت عمودی بر هم می‌زند. مطلوب آن است که پوشش‌هایی در قسمت باز تسمه نقاله در مقطع خروجی لهر تدارک دیده شود تا بخوبی و تا آنجا که امکان دارد فضای باز را بپوشاند.

۴-۵-۳-۱۰- کاهش ظرفیت حرارتی تسمه نقاله

mesh belt تسمه نقاله‌ای که محصولات شیشه‌ای را پس از شکل‌دهی برای انجام عملیات حرارتی تنش‌زدایی از داخل لهر می‌گذرد، از سیم‌های فولادی یا فولاد زنگ نزن درست شده است. هنگامیکه شبکه فلزی

تسمه نقاله وارد لهر می‌شود، انرژی حرارتی را به شکل قابل ملاحظه‌ای در خود جذب می‌کند. برای مثال فرضیات ذیل را در نظر بگیرید :

- وزن محصولاتی که باید تنش‌زدایی شوند: 630 kg/h
- درجه حرارت محصول در هنگام ورود به لهر: 400°C
- درجه حرارت Soaking: 500°C
- ظرفیت گرمایی ویژه محصولات: $0.252 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ \text{C}}$

انرژی مورد نیاز برای گرم کردن محصول به منظور تنش‌زدایی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$Q_1 = 0.252 \times (550 - 400) \times 630 = 23814 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

که در آن :

- عرض تسمه 1500 mm
- وزن تسمه 20 kg/m^2
- سرعت حرکت تسمه: 380 mm/min
- درجه حرارت تسمه در هنگام ورود به لهر: 15°C
- درجه حرارت ناحیه Soaking: 500°C
- ظرفیت گرمایی ویژه تسمه: $0.132 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ \text{C}}$

انرژی مورد نیاز برای گرم کردن تسمه عبارت است از :

$$Q_2 = 0.252 \times (550 - 15) \times 20 \times 0.38 \times 1.5 \times 60 = 23814 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

همانطور که ملاحظه می‌شود انرژی مورد نیاز برای گرم کردن تسمه بیش از دو برابر انرژی حرارتی مورد نیاز برای گرم کردن محصول است. برای صرفه‌جویی در مصرف این مقدار انرژی حرارتی، قطر سیمهای تسمه را می‌توان به کمترین مقدار ممکن تقلیل داد و وزن آن را قدری کاست. در هر حال، این روش معایبی در کاهش دادن قدرت و توان دستگاه دارد. تسمه نقاله در مسیر بازگشت از انتهای لهر به ابتدای آن از خارج لهر عبور می‌کند لذا برای جلوگیری از کاهش درجه حرارت تسمه تا حدود دمای محیط برخی کارخانجات تمهیداتی به کار برده‌اند. منجمله آنکه تسمه از کف درون کوره عبور می‌کند و تسمه حرارت دیده وارد منطقه گرمایش لهر می‌شود.

۵-۳-۱۰- یکنواخت کردن درجه حرارت درون لهر

فضای داخل لهر طوری طراحی می‌شود که نسبت به جریان هوا، منحنی دمایی مشخصی داشته باشد. با این وجود توزیع درجه حرارت در جهات عمودی و افقی را نسبت به جریان نمی‌توان کنترل کرد. اگر این توزیع درجه حرارت یکنواخت نباشد کرنش ممکن است به شکل متفاوتی تغییر کند که البته این تغییر و حرکت وابسته به موقعیت شیشه بر روی تسمه نقاله خواهد بود. این امر تأثیر معکوسی بر بازده تولید خواهد داشت.

همانطور که در شکل (۲۳-۱۰) نشان داده شده است، برای بهبود بخشیدن به توزیع درجه حرارت می‌توان از سیستم جابه‌جایی اجباری هوا استفاده نمود.

۶-۵-۳-۱۰- دمای محصول در هنگام ورود به لهر

بعد از عملیات شکل‌دهی، محصول شیشه‌ای توسط تسمه نقاله حمل می‌شود و به داخل لهر هدایت می‌گردد. درجه حرارت محصول بسته به مسافتی که می‌بایست توسط تسمه نقاله حمل شود، تغییر می‌کند. از نقطه نظر صرفه‌جویی انرژی، محصول می‌بایست در حداقل فاصله و مسافت ممکن به لهر وارد شود. این امر وابستگی کاملی به چیدمان تجهیزات فرآیندهای تولید دارد، به طوریکه تغییر آن چندان آسان نیست. چنانچه تغییر چیدمان در آینده امکان پذیر باشد، امکان استفاده از این توانایی در بهسازی امور را می‌بایست مورد مطالعه قرار گیرد.

۴-۱۰- موازنه حرارتی کوره ذوب و در لهر

اندازه‌گیری دمای کوره یا مشاهده وضعیت احتراق، روش عادی و متعارف کسب اطمینان از عملیات پایدار کوره و کیفیت بالای محصول می‌باشد. موازنه حرارتی هم وسیله مؤثر و کارآمدی برای بهبود وضعیت مصرف و صرفه‌جویی انرژی است. جدول موازنه حرارتی کوره، درک کمی از تلفات حرارتی و درصد بازدهی در عملیات کوره را ارائه می‌دهد.

موارد ذیل نقاط قابل اهمیت و نکات اصلی در مورد اندازه‌گیری‌های مربوطه به موازنه انرژی حرارتی را ارائه می‌دهد.

× گرمای ورودی

انرژی حرارتی حاصل از احتراق سوخت : بر مبنای ارزش حرارتی پایین.
گرمای محسوس سوخت : اگر سوخت پیش گرم نشده باشد این مقدار در موازنه حرارتی حذف می‌گردد.
گرمای محسوس هوای احتراق : گرمای محسوس هوای پیش گرم شده در ریژنراتور و ...
گرمای محسوس بچ : مقدار گرمای محسوس بچ موقعی که عملیات پیش گرم کردن بچ انجام شده باشد.

× گرمای خروجی

انرژی حرارتی مذاب شیشه خروجی : مخزن تصفیه مذاب باید در موازنه حرارتی لحاظ گردد. درجه حرارت مذاب شیشه در این حالت در ورودی فوره‌ها در اندازه‌گیری می‌شود. مقدار شیشه هم می‌بایست با احتساب مقدار شیشه شکل داده شده یا عبور کرده از ماشین یا مقدار بچ بارریزی شده منظور شود. جدول (۴-۱۰) موازنه حرارتی مذکور را نشان می‌دهد.

× آفت حرارت از دیوار کوره

آفت حرارت از سقف، دیوارهای جانبی، کف و سایر سطوح کوره توسط دستگاه اندازه‌گیری شار حرارتی اندازه‌گیری می‌شود. بدین منظور برای هر ۵ متر مربع ز سطوح خارجی کوره می‌بایست یک یا چند نقطه در نظر

گرفته شود. در حالتی که دستگاه اندازه‌گیری مذکور در اختیار نباشد، از دماسنج برای اندازه‌گیری دمای سطح استفاده می‌کنند و افت حرارتی را از طریق محاسبه بدست می‌آورند. باید خاطر نشان نمود که در محاسبات مذکور جریان هوا در نزدیکی دیوار کوره به طریق جابجایی طبیعی در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۴-۱۰): انرژی حرارتی مورد نیاز برای تولید انواع مختلف شیشه در دماهای گوناگون (مقدار تئوری)

انرژی حرارتی لازم برای ذوب شیشه (Kcal/Kg _{glass})						درجه حرارت (°C)	نوع محصول شیشه‌ای
درصد شیشه خرده							
۱۰۰	۸۰	۶۰	۴۰	۲۰	۰		
۴۱۱	۴۴۴	۴۷۷	۵۱۰	۵۴۳	۵۷۶	۱۴۰۰	ظروف شیشه‌ای
۳۶۵	۳۹۸	۴۳۱	۴۶۴	۴۹۷	۵۳۰	۱۲۵۰	
۴۰۹	۴۶۰	۵۱۲	۵۶۳	۶۱۵	۶۶۶	۱۴۰۰	ورق شیشه‌ای
۳۱۴	۳۶۵	۴۱۷	۴۶۸	۵۲۰	۵۷۱	۱۱۵۰	
۳۷۶	۴۰۲	۴۲۹	۴۵۵	۴۸۲	۵۰۸	۱۴۰۰	شیشه بوروسیلیکات
۳۴۵	۳۷۱	۳۹۸	۴۲۴	۴۵۱	۴۷۷	۱۳۰۰	
۳۷۶	۴۰۰	۴۲۴	۴۴۸	۴۷۲	۴۹۶	۱۴۰۰	شیشه کریستال سربی
۲۷۱	۲۹۵	۳۱۹	۳۴۳	۳۶۷	۳۹۱	۱۱۰۰	

× حرارت نهان مورد نیاز برای تبخیر رطوبت بچ

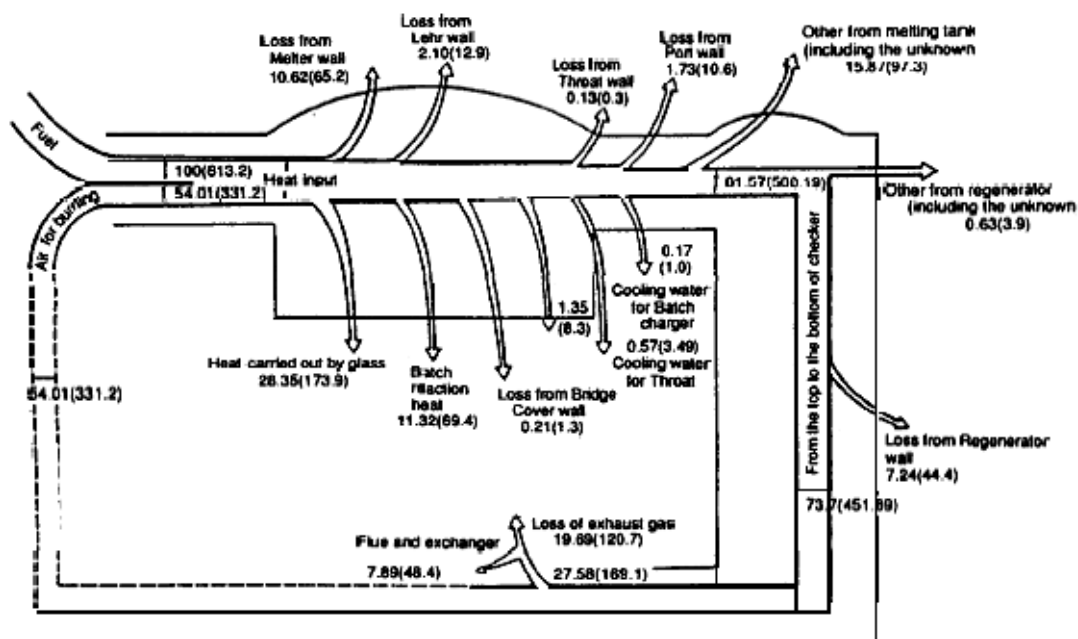
برای اندازه‌گیری نمونه‌ای از بچ که محتوی رطوبت است از هاپری که در جلو کوره تعبیه شده نمونه برداری می‌شود. در صورتی که تغذیه کننده بچ و گلوئی خنک می‌شوند، باید این مقدار به افت حرارت افزود. علاوه بر این اگر از تقویت کننده الکتریکی برای گرمایش جانبی و کمکی استفاده می‌شود، ضروری است که حرارت ورودی و خروجی آن در محاسبات منظور گردد.

چارت موازنه حرارتی برای یک مخزن ذوب شیشه در شکل (۲۴-۱۰) نشان داده شده است.

جداول (۵-۱۰) تا (۸-۱۰) نمونه‌هایی از موازنه حرارت را در کوره، فورهارت و لهر نشان می‌دهد. جدول (۵-۱۰) موازنه حرارت را برای سه نسل کوره نشان می‌دهد. در جدول مذکور نشان داده شده که با اعمال تلاش‌های معطوف به صرفه جویی انرژی نتایج خوبی حاصل شده است.

جداول (۶-۱۰) و (۷-۱۰) مقدار تلفات حرارت و موازنه حرارت را در فورهارت یک کوره نشان می‌دهند.

در شکل (۲۵-۱۰) نقاطی از کوره که برای اندازه‌گیری درجه حرارت مناسب است، نشان داده شده است. جدول (۸-۱۰) نمونه‌ای از موازنه حرارتی در لهر را نشان می‌دهد.



شکل (۲۴-۱۰): چارت موازنه حرارتی برای یک مخزن ذوب شیشه

جدول (۵-۱۰): موازنه حرارت در سه نسل کوره

C	B	A (پس از سال ۱۹۷۲)		
۲۶۴	۱۲۱	۲۶۶	(t/day)	کشش کوره
۵/۵۳	۵/۵۸	۴/۲۵	(fx ² /t)	
۱۱۰۷/۰	۱۲۱۵/۰	۱۳۲۳/۰	(1000 kcal/t)	
۶۷۷/۵	۱۲۲۳/۲	۱۶۶۶/۱	(kcal/m ² h)	تلفات حرارتی
۱۳۵/۰	۲۶۸/۰	۲۵۶/۰	(1000 kcal/t.d)	
۴۴/۰	۳۹/۷	۳۴/۱	درصد	بازده حرارتی

۳۱/۴	۲۸/۴	۲۷/۴	درصد	حرارت خروجی همراه با محصول شیشه ای
۱۲/۶	۱۱/۳	۶۷	درصد	حرارت حاصل از واکنش شیمیایی بچ
۱۶	۲۳	۳۸	درصد	درصد شیشه خرده

جدول (۵-۱۰): موازنه حرارت در سه نسل کوره (ادامه)

C	B	A		
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	سوخت فسیلی	انرژی حرارتی
۵۶/۶	۵۴/۰	۵۰/۷	هوای ثانویه	ورودی (درصد)
۵/۸	۱۰/۸۲	۱۲/۰	دیواره کوره ذوب	انرژی حرارتی خروجی(درصد)
۰/۸	۲/۱	۲/۰	دیواره محفظه تصفیه (پالاینده)	
۱/۴	۱/۷	۱/۷	دیواره پورت	
۰/۱	۰/۱۳	۰/۱	دیواره	
۲/۵۰	۱/۳۵	۲/۳	رطوبت بچ	
۰/۳۳	۰/۵۷	۰/۲	تلفات حرارتی از آب خنک کن	
۰	۰/۱۷	۰/۲	تلفات حرارتی از آب خنک کن تغذیه بچ	
۱۰/۹۳	۱۶/۸۴	۱۸/۵	جمع	
۳۱/۴	۲۸/۴	۲۷/۴	حرارت خروجی همراه با محصول شیشه ای	
۱۲/۶	۱۱/۳	۶/۷	حرارت حاصل از واکنش شیمیایی بچ	
۸۱/۹	۷۲/۴	۷۳/۷	جمع	
۳/۷	۷/۲	۳/۶	تلفات حرارتی از دیواره ریژنراتور	انرژی حرارتی خروجی(درصد)
۰/۵	۰/۶۳	۵/۴	سایر	
۴/۲	۷/۹	۹	جمع	
۱۳/۹	۱۹/۷	۱۷/۳	تلفات حرارتی از گازهای احتراقی خروجی	
۱۳/۹	۱۹/۷	۱۷/۳	جمع	
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	جمع کل	

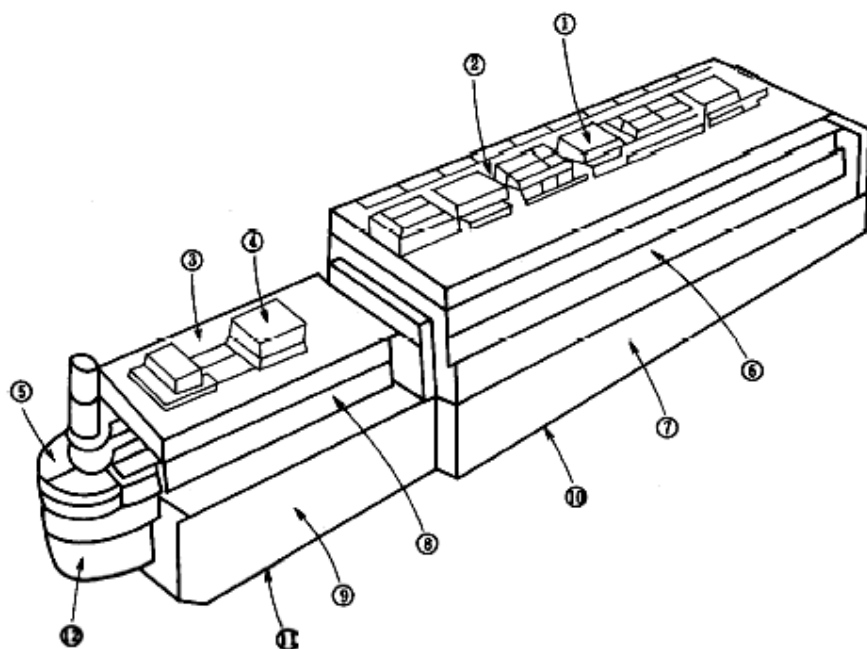
جدول (۶-۱۰): مقدار افت حرارت در فورهات

نسبت تلفات حرارتی (Kcal/m ² h)	درصد تلفات از کل	کل تلفات حرارتی (Kcal/d)	A×B (Kcal/hr)	B متوسط تلفات حرارتی (Kcal/m ² h)	A سطح (m ²)		
۱۵۲۶	۳۷/۳	۳۷۲۰۰۰	۵۶۰۰	۱۰۰۰۰	۰/۵۶	۱	تاج
			۳۷۸۸	۵۱۹	۷/۳۰	۲	
			۱۵۹۳	۸۸۵	۱/۸۰	۳	
			۹۹۰	۹۰۰۰	۰/۱۱	۴	
			۳۵۳۰	۹۰۵۰	۰/۳۹	۵	
۹۵۹	۴۱/۲	۴۱۱۰۰۰	۹۰۱۷	۱۲۰۶	۷/۴۸	۶	دیواره جانبی
			۵۸۸۶	۷۵۱	۷/۸۴	۷	
			۱۲۹۰	۱۲۹۰	۱/۰	۸	
			۹۳۱	۴۹۰	۱/۹۰	۹	
۷۶۸	۲۱/۴	۲۱۴۰۰۰	۵۸۶۰	۶۹۵	۸/۴۳	۱۰	کف
			۷۹۳	۳۸۷	۲/۰۵	۱۱	
			۲۲۵۳	۲۰۳۰	۱/۱۱	۱۲	
			۴۱۵۳۱		۳۹/۹۷	جمع کل	

جدول (۷-۱۰): موازنه حرارتی در فورهات کوره

درصد نسبت به حرارت ورودی همراه با محصول شیشه ای	(درصد)	(10 ⁴ Kcal/d)		
۱۰۰	۸۳/۰	۲۱۸۴/۵	حرارت ورودی همراه با محصول شیشه ای	ورودی
۲۰/۵	۱۷/۰	۴۴۸/۸	حرارت حاصل از احتراق	

۱۲۰/۵	۱۰۰	۲۶۳۳/۳	جمع	
۹۶/۳	۷۹/۹	۲۱۰۴/۶	حرارت خروجی همراه با محصول شیشه‌ای	خروجی
۴/۶	۳/۸	۹۹/۷	تلفات حرارتی از دیواره	
۱۹/۶	۱۶/۳	۴۲/۹	تلفات حرارتی گازهای احتراقی خروجی و سایر تلفات	
۱۲۰/۵	۱۰۰	۲۶۳۳/۳	جمع	



شکل (۲۵-۱۰): نقاط مناسب برای اندازه‌گیری افت حرارت در فورهارت

جدول (۸-۱۰): موازنه حرارتی لهر

انرژی حرارتی خروجی			انرژی حرارتی ورودی		
(درصد)	Kcal/Kg		(درصد)	Kcal/Kg	
(			(		

سوخت	۴۵۰	۷۹/۵	تلفات حرارتی از دیواره های جانبی	۲۷/۴	۴/۸
گرمای ورودی همراه با محصول شیشه ای	۱۱۶/۳	۲۰/۵	تلفات حرارتی از دریچه های باز	۱۳۹/۱	۲۴/۵
			تلفات حرارتی از گازهای خروجی	۱۳۴/۰	۲۳/۷
			گرمای خروجی همراه با محصول شیشه ای	۱۴/۰	۲/۵
			سایر	۲۵۱/۸	۴۴/۵
جمع کل	۵۶۶/۳	۱۰۰	جمع کل	۵۶۶/۳	۱۰۰

۵-۱۰- استفاده از تقویت کننده الکتریکی

برای افزایش دادن میزان برداشت از کوره بدون آنکه اندازه کوره تغییر داده شود از انرژی الکتریکی برای محفظه ذوب یا عملیات گرمایش استفاده می شود. این روش اغلب اوقات برای کوره ساخت بطری به خدمت گرفته می شود. از آنجاییکه انرژی الکتریکی برای ذوب شیشه به کار می رود و بازدهی آن نزدیک به ۱۰۰ درصد است، این روش بسیار مؤثر است.

توان الکتریکی مورد نیاز برای افزایش کشش کوره به میزان یک تن، حدود ۲۸-۲۲ کیلووات است. در این صورت حتی با فرض ۲۸ کیلووات ساعت (معادل ۲۴۰۸۰ kcal) استفاده از تقویت کننده الکتریکی برای افزایش دادن میزان کشش کوره، قطعاً مصرف انرژی ویژه را خواهد کاست.

۶-۱۰- ایجاد حباب هوا

در این روش هوا از کف محفظه ذوب داخل می شود و شیشه توسط حباب بهم زده می شود لذا سرعت ر یکنواخت سازی و همگن شدن مذاب شیشه بیشتر شده و کیفیت محصول بهبود می یابد. ایجاد حباب، درجه حرارت کف محفظه ذوب را افزایش می دهد که این امر به افزایش درجه حرارت کوره منتهی خواهد شد. لذا این روش مستقیماً به صرفه جویی انرژی کمک خواهد کرد. علاوه بر این بهبود کیفیت محصول سبب کاهش محصولات معیوب شده و لذا مصرف انرژی ویژه کاهش می یابد.

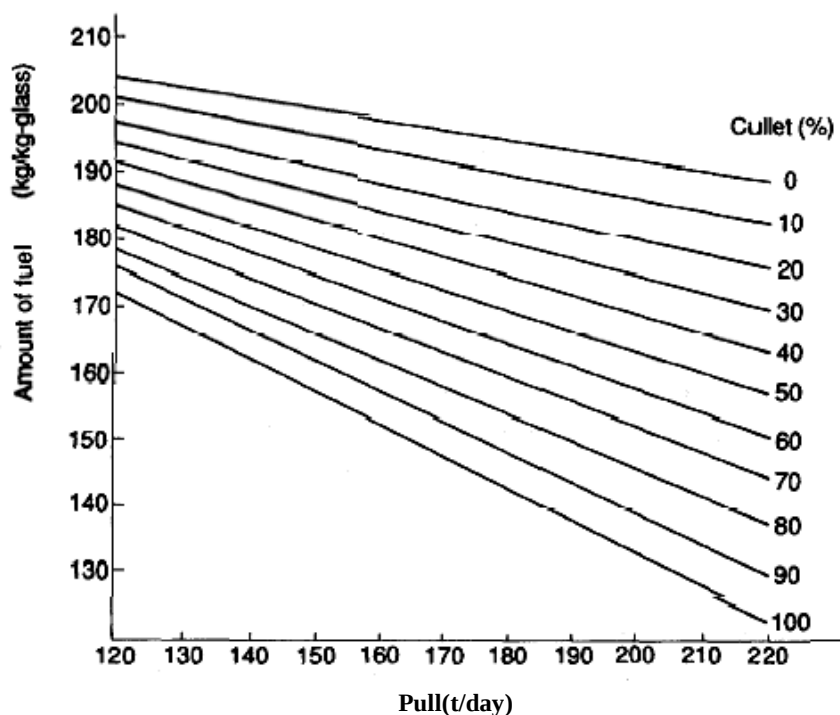
برای ایجاد حباب هوا در محفظه ذوب، ده (یا در مواردی حتی بیشتر) نازل نصب می شود که این نازل ها عمود بر جریان مذاب شیشه بوده و در کف نزدیک به نقاط داغ محفظه ذوب قرار می گیرند. در هر ساعت ۱ تا ۱۰ لیتر هوا بدرون شیشه مذاب تزریق می گردد.

۷-۱۰- گرمایش فورهات توسط انرژی الکتریکی

گرمایش مستقیم فورهارت توسط انرژی الکتریکی صرفه‌جویی انرژی بالایی را بدنبال خواهد داشت. در مورد شیشه‌های بورو سیلیکاتی، از تماس سطحی بین هوا و شیشه در کل فورهارت جلوگیری بعمل می‌آید و همین امر باعث می‌شود که کیفیت شیشه ارتقاء پیدا کند. اغلب اوقات از این روش استفاده نمی‌شود چون تاکنون مزایا و معایب استفاده از آن به درستی شناخته نشده است.

۸-۱۰- استفاده از شیشه خرده

شکل (۲۶-۱۰) استفاده از درصدهای متفاوت شیشه خرده و ارتباط آن با مقدار صرفه‌جویی انرژی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مذکور هنگامیکه شیشه خرده در کوره استفاده نشده باشد، برای کوره‌ای با ظرفیت تولید روزانه ۱۵۰ تن، سوخت مصرفی معادل ۲۰۰ کیلوگرم برای هر کیلوگرم شیشه خواهد بود. از سوی دیگر در صورتی که از ۵۰ درصد شیشه خرده در بچ استفاده شود، مصرف سوخت به ۱۸۰ کیلوگرم به ازاء هر کیلوگرم شیشه تنزل خواهد یافت. تنها استفاده از شیشه خرده برگشتی از خطوط تولید ممکن است در کارخانجات مطلوب باشد. بهر حال تولید مقدار زیاد شیشه خرده معرف آن است که نرخ بروز خطا در عملیات تولیدی بالاست، که البته این نکته مطلوب نیست. شیشه خرده خریداری شده از بیرون کارخانه احتمال آغستگی و آلودگی به مواد خارجی دارد و حفظ کیفیت محصول با مصرف آن گران و پرهزینه خواهد بود، اگر بتوان به شیشه خرده‌ای با کیفیت بالا دسترسی پیدا کرد، مصرف آن در هر چقدر که بیشتر شود، صرفه‌جویی بیشتری در مصرف انرژی حاصل خواهد آمد.



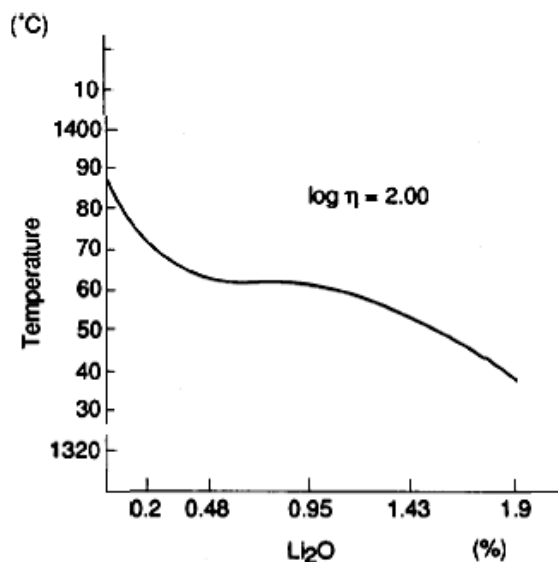
شکل (۲۶-۱۰): رابطه بین کشش کوره و مقدار سوخت در درصدهای مختلف شیشه خرده

۹-۱۰- توسعه کاربرد بچ‌هایی با دمای ذوب پایین

مطالعات گوناگونی به منظوراتخاب بچ‌هایی که دمای ذوب را کاهش می‌دهند ولی در عین حال به کیفیت شیشه هیچ گونه آسیبی نمی‌رسانند، صورت گرفته است. یکی از مؤثرترین روش‌ها که تاکنون معرفی شده، اضافه کردن لیتیوم می باشد. کربنات لیتیوم یا اسپودومن ($\text{Li}_2\text{O}, \text{Al}_2\text{O}_3, 4\text{SiO}_2$) به عنوان مواد کربنات‌دار مصرف می‌شوند. اسپودومن از ۵ درصد Li_2O ، ۱۸/۷ درصد Al_2O_3 ، ۷۴/۷ درصد SiO_2 و ۰/۱ درصد Fe_2O_3 ساخته شده است. این آنالیز قبل از مصرف اسپودومن حتماً می‌بایست کنترل گردد.

افزون مقدار کمی لیتیوم، ویسکوزیته شیشه با دمای بالا را کاهش می‌دهد و زمان از بین رفتن حبابها را هم خواهد کاست. به عنوان مثال اگر برای شیشه‌ای با ترکیبات Na_2O و CaO و SiO_2 ، همانطور که در شکل (۲۷-۱۰) نشان داده شده است، در صورت استفاده نکردن از لیتیوم دمای متناظر با $\log \eta = 2.0$ معادل 1400°C است. اگر ۰/۲ درصد لیتیوم مصرف شود، درجه حرارت به مقدار 30°C کاسته خواهد شد و موقعی که میزان مصرف لیتیوم به ۱/۹ درصد برسد، کاهش درجه حرارت ذوب حدود 60°C درجه و دمای ذوب معادل 1340°C خواهد بود. بنابر این افزودن مقدار کمی لیتیوم ویسکوزیته را خواهد کاست.

در هر حال لیتیوم ماده شیمیایی گران قیمتی است و استفاده از آن همیشه مقرون به صرفه نیست. بنابراین مطالعه‌ای جامعی باید ترتیب داده شود که در آن هم میزان صرفه‌جویی انرژی و هم هزینه تأمین مواد شیمیایی لحاظ شده باشد.



شکل (۲۷-۱۰): ویسکوزیته برحسب مقدار لیتیوم

مراجع:

- [1]. "Energy and Environmental Profile of the U.S. Glass Industry", Prepared by ENERGETICS, April 2002.
- [2]. Ruud Beerkens, "Future industrial glass melting concepts", Proceedings International Congress on Glass, Edinburgh Scotland 1-6 July 2001.
- [3]. GLASS INDUSTRY, United Nations Industrial Development Organization, 1993.
- [4]. Ruud G.C. Beerkens, "Energy Efficiency Benchmarking of Glass Furnaces", Eindhoven University of Technology (Netherlands), October 2001.
- [5]. "Reference Document on Best Available Techniques in the Glass Manufacturing Industry", Integrated Pollution Prevention and Control, October 2000
- [۵]. منصور حسنی قزلیچی، محمود حبیبیان "بهینه سازی فرآیند تولید شیشه بطر"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۷۶.
- [۶]. یعقوب تقی‌زاده، "برنامه‌ریزی انتقال تکنولوژی شیشه جام"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۰.
- [۷]. علیرضا آقایی میبدی، "حفاظت انرژی و محیط زیست در صنعت شیشه"، ۱۳۸۲.