فن آوریهای نوین بهینه سازی مصرف انرژی
در صنعت شیشه

تالیف : مجتبی معین افشاری
مدیر کارخانه شرکت شیشه لیا

مقدمه

ذوب شیشه فرایندی انرژی بر است، زیرا در دماهای بسیار بالا (بیشتر از ۱۵۹۰°C ـ ۱۵۰۰) صورت می گیرد. علاوه بر آن در کوره های پیوسته تولید شیشه، حجم زیادی مذاب (۲۰۰۰ـ۱۰۰تن) می بایست همواره در دماهای بالا نگهداشته شود . با توجه به توضیحات فوق از نظر تئوریک در کوره های مدرن شیشه تنها ۲۵ الی ۴۰ درصد از کل انرژی مصـرفی برای ذوب شیشه مورد نیاز است و بقیه انرژی مورد استفاده به صورت های مختلف تلف می شود.

بازده حرارتی یک کوره ذوب شیشه عبارت است از نسبت بین انرژی جذب شده توسط بچ و مذاب شیشه به انرژی حاصل از احتراق سوخت وانرژی حاصل از تقویت الکتریکی مذاب (electric boosting)

$$\text{بازده حرارتی کوره} = \frac{\text{انرژی مورد نیاز برای ذوب}}{\text{کل انرژی انتقال یافته به کوره}}$$

شدت انرژی یا انرژی مورد استفاده برای ذوب یک کیلو گرم شیشه به عوامل کلی زیر بستگی دارد :

- فرمولاسیون بچ و بویژه درصد قلیایی های موجود در آن
- درصد شیشه خرده
- دانه بندی مواد اولیه و شکل ظاهری آن (بچ فله یا متراکم شده)
- میزان رطوبت بچ و شیشه خرده
- دمای بچ هنگام ورود به کوره
- دمای شیشه خرده هنگام ورود به کوره
- عایق کاری و درز بندی قسمتهای مختلف کوره و ریجنراتورها
- حداکثر دمای کوره با توجه به کیفیت مورد انتظار در محصول
- میزان کشش روزانه کوره
- نسبت هوای احتراق به سوخت و مناسب بودن آن
- تنظیم شعله و موقعیت مشعل های کوره
- دمای هوای احتراق ورودی به کوره (بازده پیش گرم کف های هوا)
- پیوسته یا غیر پیوسته بودن فرایند ذوب
- برخی عوامل طراحی کوره (نحوه شارژ بچ به کوره، وجود حباب سازهای هوا و.....)

به همین ترتیب انرژی مورد استفاده در کوره های ذوب شیشه را می توان به ۴ گروه تقسیم بندی نمود :

۱ ـ انرژی انتقال یافته برای گرم نگهداشتن مذاب و ساختار کوره .

۲ ـ انرژی مصرفی برای ذوب و تصفیه شیشه

۳ ـ انرژی همراه گازهای خروجی از کوره

۴ ـ انرژی تلف شده از سقف ـ کف ـ دیواره های کوره و منافذ آن

روش های متداول برای بهینه سازی مصرف انرژی در کوره های ذوب شیشه نظیر تشدید عایق کاری کوره، بهینه سازی مشعل ها و احتراق، افزایش دمای هوای احتراق از طریق بهبود طراحی و نسوز چینی ریجنراتورها و غیره در جزوات و مقالات مختلفی مورد بحث و بررسی قرار گرفته، در مقاله حاضر برخی فن آوری های جدیدتر در بهینه سازی مصرف انرژی در صنعت شیشه مورد بررسی قرار می گیرد .

۱ ـ استفاده از بار متراکم شده شیشه

یکی از شیوه های متداول برای کاهش انرژی مصرفی در کوره های ذوب شیشه که همزمان کاهش آلاینده های کوره و بهبود قابل توجه کیفیت مذاب تولیدی را نیز بهمراه دارد استفاده از بار متراکم شده شیشه بجای بار فلّه ورودی به کوره است .

در این روش ذرات بچ توسط پرس یا دستگاه اکسترودر و با کمک چسب های نسوز به قطعاتی به شکل کره ـ بیضی یا مکعب مستطیل تبدیل شده و با استفاده از بچ شارژهای مخصوص به کوره شارژ می شوند. اندازه قطعات متراکم شده بچ معمولا بین ۴ تا ۱۰ میلیمتر است .

وزن مخصوص بیشتر واحدهای متراکم نسبت به بار شیشه معمولی در حالت غیر متراکم، ضرایب هدایت حرارتی بالاتری را امکان پذیر می سازد. در مورد ضرایب هدایت حرارتی، تخمین ها و اندازه گیری های مختلفی به عمل آمده و مقادیری از ۲ تا ۱۰ برابر بیشتر از ضریب هدایت حرارتی بار غیر متراکم گزارش شده است .ضرایب هدایت حرارتی بالاتر به نوبه خود موجبات افزایش قدرت ذوب در کوره را فراهم می آورد .

هنگامی که واحدهای بار متراکم وارد کوره می شوند، گرمایی که از طریق جذب انرژی مادون قرمز در سطح بار ایجاد می شود به سمت داخل و در جهت مرکز توده متراکم هدایت می شود. تقریبا نصف کل انرژی حرارتی که از لحاظ تئوریک برای افزایش دمای مواد اولیه تا دمای مذاب شیشه ای از کوره خارج می شود، مورد نیاز است، با سرعت های انتقال حرارت بسیار بیشتری نسبت به آنچه که در مورد بار غیر متراکم امکان پذیر است قابل حصول است .

ضرایب انتقال حرارت بالاتر و جذب انرژی بیشتر و سریع تر از محیط کوره توسط مواد متراکم شده باعث ذوب مواد اولیه در دماهای پایین تر شده و کاهش قابل ملاحظه ای را در مصرف انرژی مورد نیاز برای ذوب فراهم می آورد .

استفاده از بار متراکم شده گر چه در تمامی شاخه های صنعت شیشه امکان پذیر است، لیکن مصرف آن در شیشه های حاوی مواد اولیه سمّی و فرّار نظیر کریستال سربی، اوپال و شیشه های مشابه از تقدم برخوردار است .

۲ ـ تاثیر فرمولاسیون شیشه در کاهش مصرف انرژی

امکان بالقوه دیگری که برای کاهش مصرف انرژی برای ذوب شیشه وجود دارد، بهینه سازی فرمولاسیون شیشه و استفاده از مواد گدازآور مناسب است . معهذا دامنه عمل در این مورد بسیار محدود بوده و معمولا صرفه جویی اندکی را از لحاظ اصلاح فرمولاسیون شیشه یا جایگزینی مواد گدازآور با یکدیگر بهمراه دارد .

به عنوان مثال جایگزینی کربنات سدیم با سود سوزآور و همچنین کربنات کلسیم با اکسید کلسیم باعث کاهش مقادیر انرژی مورد نیاز در واکنش های ذوب می شود و قدرت ذوب کوره را افزایش می دهد، لیکن در خصوص ارقام صرفه جویی در انرژی برای این جایگزینی ها، آماری ارائه نشده است.

۳ ـ استفاده از سیستم های احتراق اکسیژن سوز

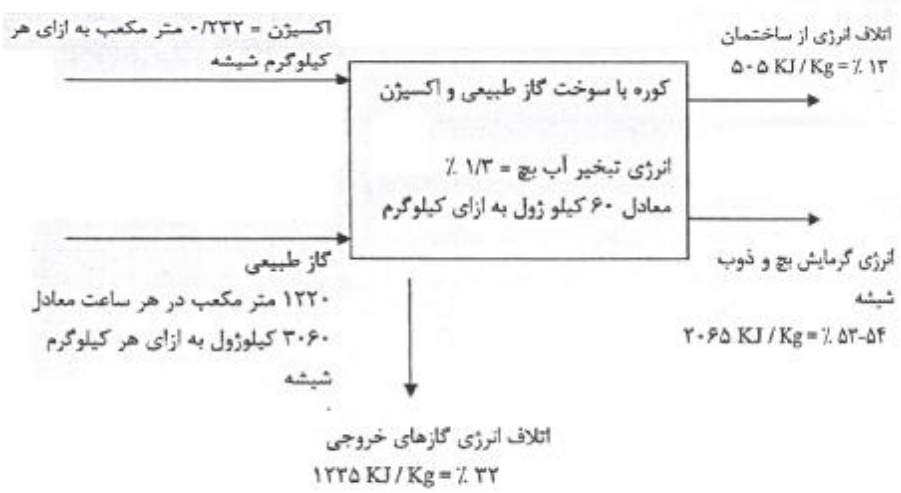
در صورتیکه بجای هوا از اکسیژن خالص یا مخلوط اکسیژن و هوا برای احتراق سوخت استفاده شود، صرفه جویی قابل ملاحظه ای در مصرف سوخت حاصل می شود . استفاده از اکسیژن بجای هوا که حاوی حدود ۲۱ درصد اکسیژن است باعث می شود به ازاء تولید همان مقادیر از انرژی حاصل از احتراق، حجم بسیار کمتری گاز در کوره ایجاد شود. در نتیجه میزان خروج انرژی توسط گازهای احتراق به طرز محسوسی کاهش می یابد. علت این مسئله بسیار واضح است، در واقع با مصرف اکسیژن از ورود ۷۹ درصد حجمی گاز ازت موجود در هوا به کوره جلوگیری می شود .

در طراحی کوره های اکسیژن سوز تغییرات خاصی ایجاد شده است که از جمله می توان به حذف ریجنراتور و همچنین عایق کاری و درزبندی شدید کوره اشاره کرد. با توجه به طراحی خاص این نوع کوره و همچنین طراحی انواع جدید مشعل های اکسیژن سوز، زمان توقف گازهای احتراق در کوره به بیش از ۳۰ ثانیه افزایش می یابد، (در کوره های معمولی این زمان کمتر از ۱۰ ثانیه است). با توجه به زمان طولانی توقف گازهای احتراق و انرژی بسیار زیاد آنها، فرصت لازم برای انتقال حرارت و تعادل حرارتی با محیط فراهم خواهد آمد .

توزیع انرژی در کوره های اکسیژن سوز که به خوبی عایق کاری شده باشند به صورت زیر است :

- اتلاف انرژی از دیوارها، سقف و کف کوره = ۱۲ تا ۱۵ درصد کل انرژی مصرفی
- اتلاف انرژی از طریق گازهای خروجی = ۲۵ تا ۲۸ درصد کل انرژی مصرفی
- مصرف انرژی برای گرمایش و ذوب شیشه = ۵۷ تا ۶۳ درصد کل انرژی مصرفی

در شکل (۱)، توزیع انرژی در یک کوره تولید بطری با ظرفیت ۲۴۰ تن در روز و مصرف ۵۰ درصد شیشه خرده که برای احتراق، اکسیژن خالص مصرف می کند، نشان داده شده است.



شکل ۱- توزیع انرژی در یک کوره تولید بطری

۴ ـ بازیابی مجدد انرژی از گازهای خروجی کوره

با تکنولوژی های مورد استفاده در حال حاضر، حدود ۵۵ تا ۷۰ درصد از انرژی گازهای خروجی از کوره توسط سیستم های بازیابی حرارتی قابل استحصال است . به عبارت دیگر گازهایی که مثلا از ریجنراتور یک کوره ذوب خارج می شود هنوز انرژی زیادی را بهمراه دارد. از این انرژی تا کنون در صنایع شیشه به اشکال زیر استفاده شده است:

الف ـ پیش گرم کردن بیشتر هوای احتراق

ب ـ تولید بخار

ج ـ تولید آب گرم

د ـ پیش گرم کردن بچ یا شیشه خرده

ه ـ تولید انرژی الکتریکی

بجز ردیف های الف و د انجام بقیه موارد به دلیل آلودگی گازهای خروجی به ذرات جامد و همچنین وجود گازهای خورنده در آن با مشکلات و موانعی همراه است.

۱ ـ ۴ ـ پیش گرم کردن بچ یا شیشه خرده با استفاده از گازهای خروجی

یکی از شیوه های بازیابی انرژی از گازهای خروجی از ریجنراتور، تماس مستقیم این گازها با بچ یا شیشه خرده است که این عمل قبل از وارد شدن گازها به دودکش اصلی کوره صورت می گیرد .

به منظور پیش گرم کردن بچ یا شیشه خرده توسط گازهای خروجی، تجهیزات و روش های مختلفی توسط شرکت های اروپایی و آمریکایی ابداع گردیده است که متعاقباً به اختصار بررسی خواهد شد .در نتیجه پیش گرم کردن بچ، دمای گازهای خروجی از ۵۰۰ °C الی ۶۰۰ °C به حدود ۲۰۰ °C ـ ۱۵۰ کاهش می یابد و دمای بچ ورودی به کوره می تواند تا ۳۰۰ °C افزایش یابد. عمده ترین مزیت های پیش گرم بچ در رابطه با صرفه جویی در مصرف انرژی در ذیل به اختصار بررسی گردیده است :

الف ـ رطوبت موجود در بچ در مرحله پیش گرم کردن آن تبخیر شده و نیازی به مصرف انرژی اضافی برای تبخیر آن در کوره نخواهد بود .

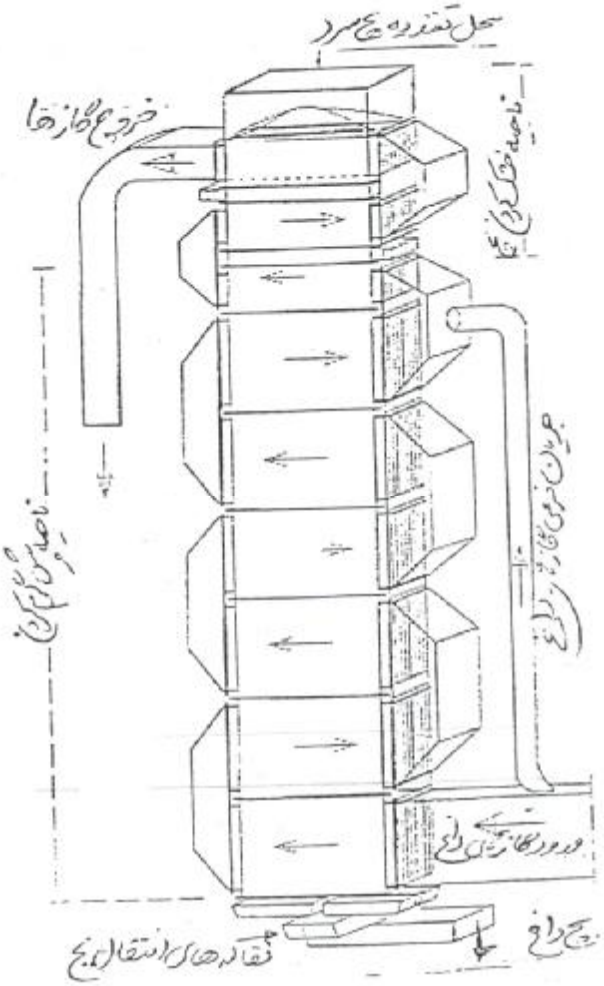
ب ـ بجای بچ سرد، بچ با دمای نسبتاً زیاد وارد کوره می شود

ج ـ طول قالیچه ذوب در کوره کاهش می یابد، در نتیجه فضای بیشتری برای انتقال انرژی به مذاب فراهم می آید .

د ـ بعلت کوتاه تر شدن زمان توقف بچ در کوره قدرت ذوب آن افزایش می یابد .

میزان صرفه جویی در مصرف انرژی به شرایط عملیاتی کوره و همچنین دمای بچ بستگی دارد و در اغلب موارد به ۱۰ تا ۲۰ درصد از کل مصرف انرژی بالغ می شود. بسیاری از مواد آلاینده محیط زیست نیز از گازهای خروجی جذب بچ می شود که در کاهش آلودگی زیست محیطی موثر است.

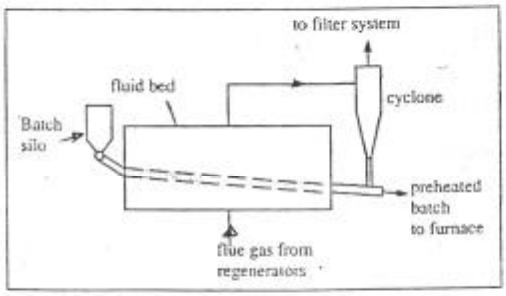
در صفحات بعد، نمونه هایی از تجهیزات مورد استفاده برای پیش گرم کردن بچ و شیشه خرده ارائه گردیده است.



شکل ۲- سیستم پیش گرم کردن بچ یا شیشه خرده عمودی

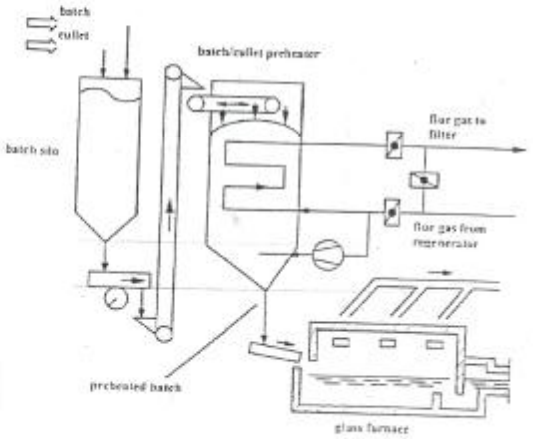
سیستم پیش گرم کردن بچ یا شیشه خرده به صورت عمودی در بخش های مختلف که بصورت مرحله ای عمل می کند. گازهای داغ از قسمت پایین محفظه وارد شده و از قسمت فوقانی آن خارج می گردد. مسیر عبور بچ عکس حرکت گازهای داغ است. این سیستم توسط شرکت zippe آلمان ابداع گردیده است.

تماس گازهای داغ با ذرات بچ در یک صفحه مشبک. در اینجا از سیستم بستر شناور (fluidized bed) برای انتقال انرژی استفاده شده است. (طراح شرکت تولدو آمریکا)



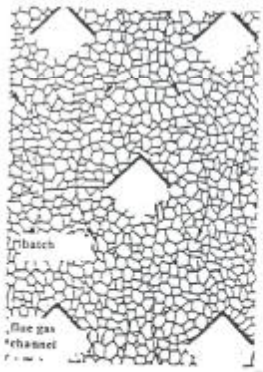
شکل ۳- تماس گازهای داغ با ذرات بچ در یک صفحه مشبک

سیستم پیش گرم کردن بچ و شیشه خرده، در این قسمت سیستم بچ و شیشه خرده در یک بستر آکنده در کانال هایی به شکل ۸ به سمت پایین حرکت می کنند. قسمت پایینی کانال ها باز است. این سیستم توسط شرکت Glass project آلمان ابداع گردیده است.

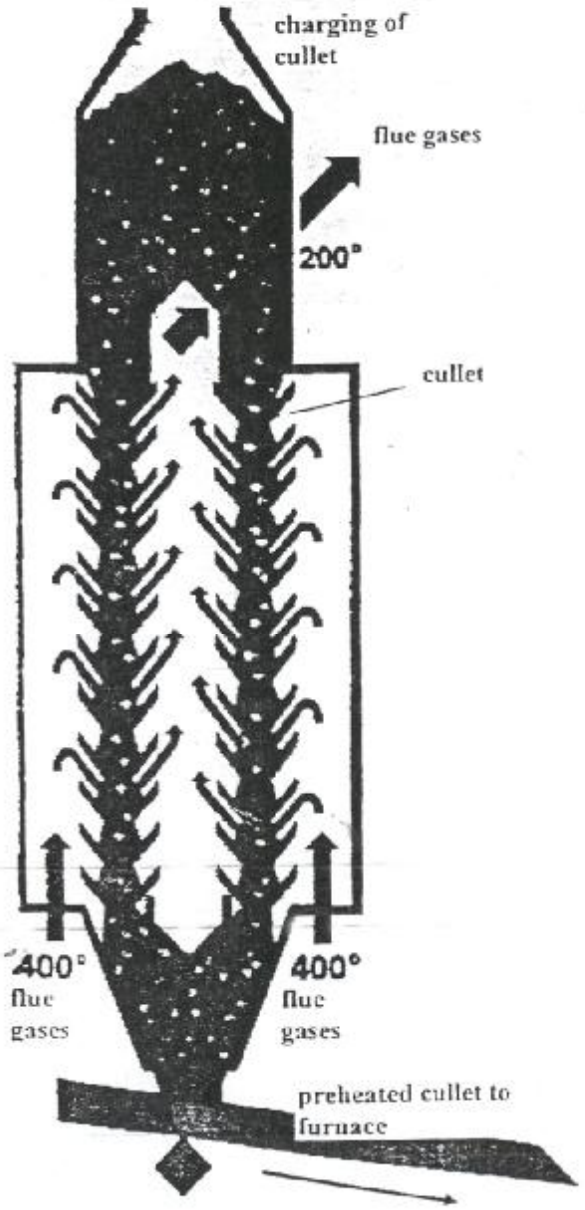


شکل ۴- سیستم پیش گرم کردن بچ و شیشه خرده در کانال

نمای داخلی پیش گرم کن



شکل ۵- نمای داخلی پیش گرم‌کن



شکل ۶- سیستم پیش گرم کردن شیشه خرده

شیشه خرده از قسمت فوقانی به سمت پایین و در جهت عکس گازهای داغ حرکت می کند.
طراح : شرکت SORG آلمان