

پیش گفتار

در دهه‌های اول قرن بیستم کشورهای جهان در مصرف انرژی با یکدیگر رقابت نموده و تنها به فکر توسعه سریع فناوری و رشد اقتصادی برای دستیابی به رفاه بیشتر در جامعه بودند، اما بروز بحران‌های نفتی در دهه 70 میلادی و نگرانی‌های جدی مربوط به آلودگی محیط‌زیست، طی دهه‌های 80 و 90 میلادی، کشورهای صنعتی را بر آن داشت که خط‌مشی خود را در زمینه انرژی مورد بازنگری قرار دهند. در این راستا سازمان‌های بزرگی نظیر آژانس بین‌المللی انرژی در کشورهای پیشرفته، سازمان بهره‌وری آسیا در کشورهای درحال توسعه و دهها مؤسسه دیگر، تشکیل شدند. هدف کلی تمام این سازمان‌ها مدیریت صحیح انرژی در راستای کاهش و صرفه‌جویی مصرف انرژی، کنترل عرضه و تقاضای انرژی، کاهش انتشار گازهای آلاینده و ... است.

در کشورهای صنعتی دنیا فعالیت‌های گسترده‌ای در راستای کاهش مصرف انرژی، افزایش کارایی و استفاده از انرژی‌های نو انجام گرفته که نتیجه آن کاهش شدت انرژی (میزان انرژی مصرفی به ازای مقدار مشخصی از تولید ناخالص داخلی) در این کشورهاست. [1]

امروزه مقادیر بسیاری گاز گرم حاصل از احتراق سوخت توسط بویلرها و انواع متنوع کوره‌ها در صنایع مختلف تولید می‌شود. بازیافت انرژی (Waste Heat Recovery) موجود در این گازها این امکان را فراهم می‌کند که مقادیر بسیاری از انرژی اولیه مصرفی کاهش یابد. "کیفیت حرارت" در کنار کمیت انرژی موجود در جریان خروجی یکی از متغیرهای اصلی تأثیرگذار روی میزان توجیه‌پذیری اقتصادی طرح‌های بازیافت حرارت می‌باشد. در صنایع مختلف جریان‌های گرم خروجی اعم از گاز یا مایع با دماهای متفاوت به محیط دفع می‌شوند. معمولاً جریان‌های خروجی با دمای بالا به دلیل کیفیت مناسب حرارت جهت اجرای واحدهای بازیافت از توجیه اقتصادی بالاتری برخوردار هستند. بهای انرژی نیز یکی از مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار روی تحلیل هزینه-فایده طرح‌های WHRS می‌باشد. کاهش هزینه‌های انرژی مصرفی به طور مستقیم و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، اندازه تجهیزات و مصرف انرژی تجهیزات جانبی همگی از مزایای غیرمستقیم بازیافت حرارت از جریان‌های خروجی می‌باشد. حتی در برخی از کاربردها بازیافت حرارت از جریان‌های خروجی منجر به افزایش ظرفیت تولید در واحد صنعتی می‌شود.

بازیافت حرارت از جریان‌های گرم خروجی به روش‌های مختلفی انجام می‌شود. افزایش حرارت جریان‌های ورودی، افزایش دمای محیط فرآیند و تولید انرژی الکتریکی از انرژی بازیافتی طرق اصلی به‌کارگیری انرژی بازیافتی می‌باشند که با توجه به کیفیت و کمیت جریان گرم خروجی یکی از روش‌های موجود بازیافت حرارتی استفاده می‌شود. [2]

بخش صنعت و تجارت با استفاده کاراتر از فرآیندهای حرارتی، سبب صرفه‌جویی مؤثر و دراز مدت در مصرف انرژی شده و نهایتاً به کاهش چشم‌گیر هزینه‌ها در واحدهای صنعتی منجر می‌گردد. [3]

1- فواید اقتصادی بازیافت حرارتی

برخلاف بسیاری از سرمایه‌گذاری‌های تجاری یا صنعتی، فواید اقتصادی نصب تجهیزات بازیافت حرارتی می‌تواند به-سادگی ارزیابی شود و در صورتی که افت‌های اساسی در قیمت انرژی رخ ندهد بازگشت سرمایه عملاً تضمین می‌شود. برای نیل به بهترین بازگشت مالی ضرورت دارد که تعادلی بهینه بین بخش گرمای بازیافتی، سرمایه و هزینه جاری تجهیزات بازیافت (در صورت وجود) به‌دست آید.

در این خصوص باید توجه داشت که اگر اختلاف دمای بسیار کمی بین دو جریان سیال مایع و گاز موردنظر باشد هزینه مبدل‌های حرارتی می‌توانند سریعاً افزایش یابند، علاوه بر این، در برآورد هزینه‌های مربوط به یک پروژه، در صورتی که بازگشت سرمایه در درازمدت انتظار می‌رود، برآورد قیمت انرژی در آینده نیز باید مورد تحلیل قرار گیرد. در بررسی امکان بالقوه بازیافت، بایستی تمامی امکانات مورد توجه قرار گیرد و حرارت تلف شده بر حسب مقدار بالقوه، مطابق جدول 1 درجه‌بندی شود. [3]

جدول 1. منابع و کیفیت حرارت تلف شده

منابع	کیفیت
حرارت موجود در گازهای خروجی	هرچه دما بالاتر رود توانایی بالقوه بازیافت حرارت بیشتر می‌شود
حرارت موجود در مایعات فرآیند یا جریان‌های بخار	با افزایش دما توانایی بالقوه بازیافت حرارت بیشتر می‌شود و چنانچه میعان صورت گیرد، گرمای نهان هم قابل بازیافت است
حرارت همرفتی و تشعشعی تلف شده از سطح خارجی تجهیزات	ارزش کم- در صورت جمع‌آوری ممکن است برای گرم- کردن فضا یا پیش‌گرم کردن هوا مورد استفاده قرار گیرد.
تلفات حرارت در آب‌سردکن‌ها	ارزش کم- چنان‌چه حرارت با آب ورودی مبادله شود، بهره خوبی دارد.
تلفات حرارتی در تأمین آب سرد یا دورریزی آن	الف) ارزش بالا- اگر بتواند به‌منظور کاهش تقاضای تبرید به‌کار رود ب) ارزش کم- اگر واحد تبرید به شکل پمپ گرمایی به‌کار رود.
حرارت ذخیره شده در محصولات خروجی فرآیند	کیفیت به دما بستگی دارد
حرارت موجود در خروجی‌های فرآیند که به شکل گاز یا مایع هستند	در صورت آلوده بودن، مطلوب نیست و بدین ترتیب به مبدل‌های حرارتی آلیاژی نیاز دارد

2- تلفات حرارتی- کیفیت

بسته به نوع فرآیند، حرارت می‌تواند در هر دمایی از دمای آب سرد تا دمای گازهای خروجی از یک کوره صنعتی، هدر رود. معمولاً هرچه دما بیشتر باشد، کیفیت بالاتر رفته و بازیافت حرارت مقرون به‌صرفه‌تر است. بدیهی است در هر

مطالعه بازیافت حرارت هدر رفته، باید امکان استفاده از حرارت بازیابی شده وجود داشته باشد. نمونه‌هایی از موارد کاربرد حرارت بازیابی شده عبارت‌اند از: پیش‌گرم کردن هوای احتراق، گرم کردن فضا، یا پیش‌گرم کردن آب تغذیه فرایندها یا دیگ بخار. برای بازیافت حرارت در دمای بالا، امکان دارد از یک سیستم زنجیره‌ای (چند مرحله‌ای) بازیافت حرارت استفاده شود تا اطمینان حاصل شود که حداکثر مقدار گرما در بالاترین پتانسیل بازیابی می‌شود. یک مثال از این تفکیک بازیافت حرارت می‌تواند به این صورت باشد که از مرحله دمای بالا برای پیش‌گرم کردن هوا و از مرحله دمای پایین برای گرم کردن آب تغذیه فرآیند یا بخار استفاده نمود [3].

3- تلفات حرارتی - کمیت

در هر مرحله بازیافت حرارت لازم است که مقدار حرارت قابل بازیافت و همچنین نحوه استفاده از آن معلوم باشد. مثال زیر وجود تلفات حرارت را در یک تجهیز صنعتی نشان می‌دهد.

مثال: تلفات حرارت در آب خنک‌کننده

76 لیتر بر دقیقه آب خنک‌کننده با دمای متوسط 30°C وارد شده و با دمای 52°C خارج می‌گردد.

حرارت موجود در آن عبارت است از: [3]

$$76 \times 60 \times (52 - 30) \times \frac{4}{1868} \times 10^6 = 0.46 \frac{GJ}{h} = 117 \text{ kw}$$

4- بازیابی گرمای فاضلاب

مصرف انرژی برای گرم کردن آب 17 درصد انرژی مصرفی بخش خانگی و 7 درصد انرژی مصرفی بخش تجاری را در ایالات متحده به خود اختصاص می‌دهد. تحقیقی که توسط دپارتمان انرژی ایالات متحده (DOE) انجام شد نشان داد که سالانه تقریباً 350 میلیارد کیلووات ساعت انرژی به شکل آب گرم مصرف شده روانه فاضلاب می‌شود. با بهره‌گیری از فناوری بازیابی گرمای فاضلاب، DWHR که به‌عنوان مبدل حرارتی آب خاکستری (GWHE) نیز شناخته می‌شود، می‌توان توسط بازیابی مقداری از این انرژی و استفاده از آن جهت پیش‌گرمایش آب ورودی، مقدار انرژی مصرفی برای گرم کردن آب را کاهش داد.

آب گرم مصرف شده، در هنگام ورود به فاضلاب، محتوی 80 تا 90 درصد انرژی حرارتی اولیه، در هنگام خروج از آب‌گرم‌کن است. با استفاده از یک مبدل حرارتی بازیاب گرما بین فاضلاب (آب خاکستری) و آب تازه ورودی، می‌توان تا 40 درصد این انرژی اتلافی را بازیابی کرده و مقدار انرژی اتلافی را به 49 تا 54 درصد انرژی مصرف شده برای گرم کردن اولیه آب گرم موردنیاز کاهش داد.

سامانه‌های DWHR از فاضلاب برای گرم کردن آب سرد ورودی ساختمان استفاده می‌کنند. این امر توسط یک مبدل حرارتی مسی انجام می‌شود که از جریان لایه‌ای فاضلاب عبوری از لوله‌های قائم بهره برده و انرژی گرمایی مصرف نشده در فاضلاب را استخراج می‌کند.

واحدهای DWHR در دو نوع عرضه می‌شوند: ذخیره و عندالمطالبه (یا On-demand). واحدهای ذخیره می‌تواند در تجهیزاتی که به‌طور پیوسته تقاضا ندارند، یا وسایلی که به‌طور هم‌زمان تقاضا و تخلیه به فاضلاب دارند، مورد استفاده قرار گیرند [4].

4-1. صرفه‌جویی انرژی ناشی از بازیابی گرمای فاضلاب

بازیابی گرما منجر به صرفه‌جویی مقادیر قابل توجهی انرژی می‌شود. تحقیقی در انگلستان در سال میلادی 1975، 35.5 درصد صرفه‌جویی در سوخت مصرفی موردنیاز برای گرمایش آب ناشی از به‌کارگیری سامانه‌های بازیافت گرمای فاضلاب را نشان داد. مطالعه دیگری در سال 1995، 35 تا 50 درصد صرفه‌جویی را برحسب پیکربندی مبدل حرارتی (متعادل یا نامتعادل) مشخص نمود. تحقیقی در مونترال کانادا به این نتیجه رسید که 40 درصد بار انرژی برای آب گرم توسط جریان هم‌زمان، یعنی تخلیه و تقاضای آب در آن واحد، به مصرف می‌رسد؛ بنابراین، کاهش تقاضای برق آب‌گرم‌کن با و بدون واحدهای GWHE مورد بررسی قرار گرفت. ده پروفیل شبیه‌سازی شده تقاضای آب‌گرم‌کن برقی تهیه و 600 مجموعه از داده‌های تجربی مقایسه گردید و میانگین برحسب ساعت مصرف تعیین شد. مجموعه داده‌های تجربی، مصارف انرژی مشاهده شده در داده‌های شبیه‌سازی شده را تأیید کردند و یک پیک روزانه 1.3 کیلووات ثبت شد. همچنین، بر اساس نتایج تجربی نتیجه‌گیری شد که دمای سردتر آب ورودی منجر به بازیابی انرژی بیشتری می‌گردد. تحقیقی انجام شده برای DOE نشان داد که واحدهای DWHR متناسب با تعداد واحدهای نصب شده، می‌توانند بین 800 تا 2300 کیلووات ساعت در سال صرفه‌جویی کنند. [4]

5- انواع تجهیزات بازیافت اتلافات گرما

در این بخش به توصیف تجهیزات مختلف صنعتی و تجاری که می‌توانند برای بازیافت اتلاف گرما و کاربردها و موارد دیگر، مورد استفاده قرار بگیرند، می‌پردازیم.

5-1. پیش‌گرم‌کن هوا

در پیش‌گرم‌کن هوا، انتقال گرما بین دود و هوا از طریق دیوارهای فلزی یا سرامیکی صورت می‌گیرد. کانال‌ها یا لوله‌ها، هوا را برای احتراق جابه‌جا می‌کنند تا پیش‌گرم شوند و از طرف دیگر حاوی جریان اتلاف گرما می‌باشد.

5-1-1- پیش‌گرم‌کن هوای تابشی فلزی

ساده‌ترین شکل پیش‌گرم‌کن هوا، پیش‌گرم‌کن هوای تابشی فلزی می‌باشد،

گازهای داغ توسط هوای ورودی احتراق خنک می‌شود که اکنون این هوای ورودی، حامل انرژی اضافی به درون اتاقک احتراق است. این انرژی لازم نیست توسط سوخت فراهم شود، در نتیجه برای بارگذاری کوره، سوخت کمتری سوزانده می‌شود. صرفه‌جویی در مصرف سوخت هم‌چنین به معنای کاهش هوای احتراق می‌باشد و بنابراین، اتلافات از دودکش، نه تنها با کاهش دمای گاز دودکش بلکه با تخلیه مقادیر کمتری از گاز خروجی، کاهش یافته است. پیش‌گرم‌کن هوای تابشی نام خود را از این حقیقت گرفته است که بخش قابل توجهی از انتقال حرارت از گازهای داغ به سطح داخلی لوله توسط انتقال گرمای تابشی صورت می‌گیرد. اگرچه هوای سرد داخل حلقه‌ها، تقریباً در برابر اشعه مادون قرمز شفاف است، بنابراین توسط هوای ورودی تنها انتقال گرما جابجایی صورت می‌گیرد. دو جریان گاز معمولاً به موازات یکدیگر هستند، اگرچه در صورتی که جریان‌ها در جهت مخالف یکدیگر باشند (و یا counter flow)، آرایش فضایی آن ساده‌تر شده و انتقال گرما آن‌ها کارآمدتر خواهد بود. دلیل استفاده از جریان موازی این است که پیش‌گرم‌کن‌های هوا، بارها عمل اضافی خنک کردن لوله حامل گازهای خروجی را انجام می‌دهند و در نتیجه عمر آن را افزایش می‌دهند.

5-1-2- پیش‌گرم‌کن هوای همرفتی

دومین شکل رایج پیش‌گرم‌کن هوا، پیش‌گرم‌کن هوای همرفتی یا از نوع لوله نامیده می‌شود. گازهای داغ از طریق تعدادی از لوله‌های موازی و با قطر کم جابجا می‌شوند، در حالی که هوای ورودی برای گرم شدن وارد پوسته‌ای، احاطه شده توسط لوله‌ها می‌شود و در جهت عمود بر محور خود، یک یا چند بار از بین لوله‌های داغ عبور می‌کند.

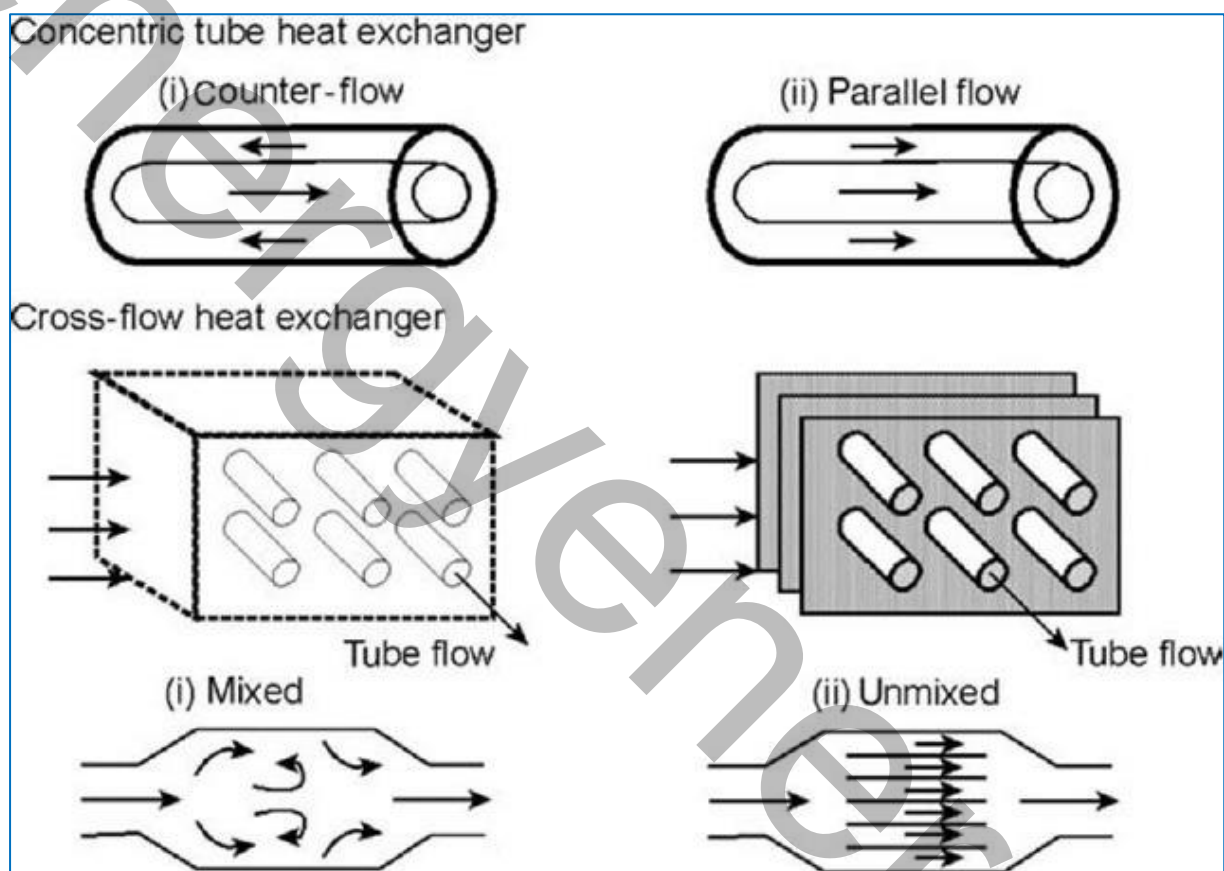
اگر لوله‌ها سپرگذاری شوند تا اجازه دهند که گاز دو بار از آن‌ها عبور کند، آنگاه مبدل گرمایی، پیش‌گرم‌کن هوای دوگذر نامیده می‌شود و اگر از دو سپر استفاده شود، پیش‌گرم‌کن هوای سه‌گذر نامیده می‌شود و غیره. اگرچه افزایش سپر، هزینه مبدل و افت فشار در مسیر هوای احتراق را افزایش می‌دهد، میزان کارایی مبدل را هم افزایش می‌دهد. پیش‌گرم‌کن هوا از نوع پوسته و لوله به طور کلی جمع‌وجور هستند و به دلیل سطح بیشتر انتقال گرما که با استفاده از لوله‌های متعدد گازها حاصل می‌شود نسبت به پیش‌گرم‌کن هوای تابشی کارایی بالاتری دارند.

5-1-3- پیش‌گرم‌کن هوای مختلط

برای بیشینه کارایی انتقال گرما، از پیش‌گرم‌کن هوای مختلط استفاده می‌شود. این پیش‌گرم‌کن‌ها ترکیبی از طراحی تابش و همرفت هستند. از نظر هزینه این نوع پیش‌گرم‌کن از پیش‌گرم‌کن‌های هوای تابشی فلزی ساده ارزان‌تر و از نظر اندازه، نسبت به آن‌ها حجم کم‌تری می‌گیرند.

5-1-4- پیش‌گرم‌کن هوای سرامیکی

محدودیت اصلی سامانه‌های بازیافت گرما از پیش‌گرم‌کن‌های هوای فلزی، کاهش عمر بوش در دماهای ورودی بیش از 1100 درجه سانتی‌گراد است. به‌منظور غلبه بر محدودیت‌های دمایی پیش‌گرم‌کن‌های هوای فلزی، پیش‌گرم‌کن‌های هوا با لوله سرامیکی گسترش یافته‌اند که مواد اولیه آن‌ها اجازه می‌دهد که دمای عملیات در بخش گاز به 1550 درجه سانتی‌گراد و در سمت هوای پیش‌گرم شده به 815 درجه سانتی‌گراد برسد شکل 1. نشان‌دهنده شماتیک و نحوه عبور جریان گازها در انواع مبدل‌های فوق می‌باشد.



نحوه عبور جریان گازها از درون انواع پیش‌گرم‌کن

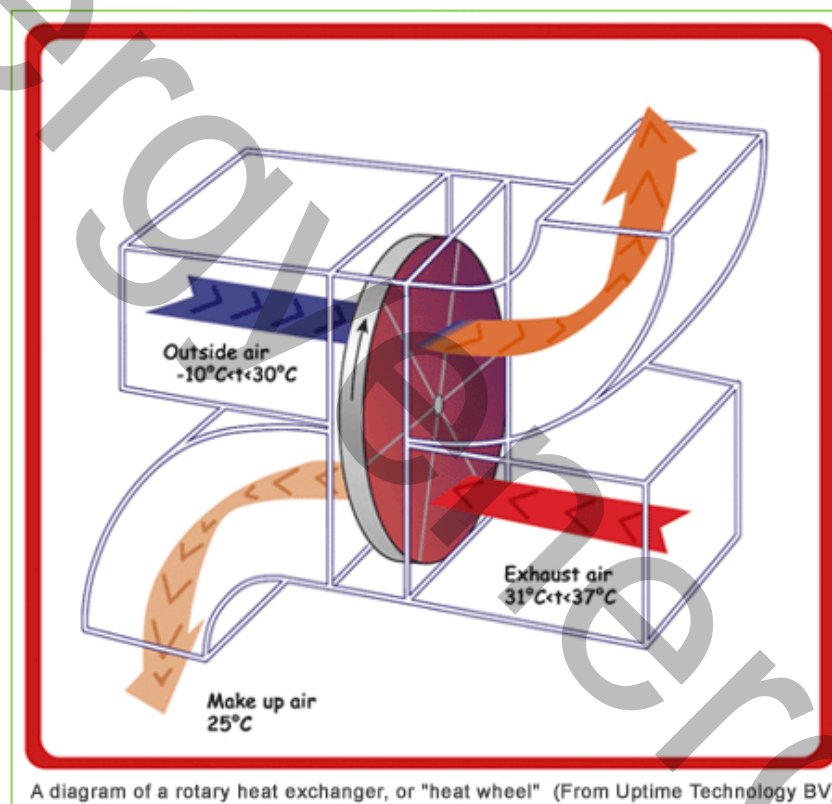
5-2. تقویت‌کننده‌ها

تقویت‌کننده‌ها برای ظرفیت‌های بزرگ مناسب هستند و به‌طور گسترده‌ای در کوره‌های ذوب شیشه و فولاد استفاده می‌شوند. روابط مهمی بین اندازه تقویت‌کننده‌ها، زمان بین برگشت‌ها، ضخامت آجر، قابلیت هدایت آجر و نسبت ذخیره-سازی گرما در آجر وجود دارد. در یک تقویت‌کننده، زمان بین برگشت‌ها وجه مهمی است. دوره تناوب طولانی به معنای ذخیره‌سازی گرمایی بالاتر و در نتیجه هزینه بیشتر است. همچنین دوره تناوب طولانی بین برگشت‌ها منجر به درجه گرمای متوسط کمتر پیش‌گرمایش و در نتیجه کاهش صرفه‌جویی در سوخت می‌شود. تجمع گرد و غبار و خاکستر روی سطوح کارایی انتقال گرما را کاهش می‌دهد، به‌طوری که کوره فرسوده می‌شود. اتلاف گرما از جداره‌های تقویت‌کننده،

نشت هوا به داخل در طول دوره تناوب گاز و نشت به خارج در طول دوره تناوب هوا هم‌چنین انتقال گرما را کاهش می‌دهد.

3-5. چرخ‌های گرمایی

این وسیله یک دیسک متخلخل بزرگ است که از موادی که ظرفیت گرمایی نسبتاً بالایی دارند ساخته شده است و بین دو کانال پهلوه‌پهلوه (کانال گاز سرد و دیگری کانال گاز داغ) می‌چرخد. محور دیسک، به موازات و در حد فاصل بین دو کانال واقع شده است. هنگامی که دیسک به آرامی می‌چرخد، گرمای محسوسی (رطوبتی که شامل گرمای نهان است) از هوای گرم به دیسک منتقل می‌شود [5]. شکل 2 زیر شماتیک یک چرخ گرمایی را نشان می‌دهد.



شماتیک یک نمونه چرخ گرمایی (heat wheel)

چون جریان گاز هدر رفته و جریان‌های هوای ورودی باید از هم جدا نگاه داشته شوند به کانال‌کشی احتیاج است و اندازه چرخ و مجاری به میزان (شدت) جریان دو سیال بستگی دارند. معمولاً سیالات باید کاملاً متعادل باشند. استفاده از روکش‌های جاذب رطوبت، امکان بازیافت گرمای نهان را فراهم می‌نماید. به‌عنوان مثال در کاربردهای مربوط به استخر شنا، چنین روکشی می‌تواند تلفات گرمای نهان مربوط به هوای اشباع شده تهویه کننده را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد [3].

برای این نوع تقویت‌کننده، بازده کلی انتقال گرمای محسوس می‌تواند به مقدار 85 درصد باشد. چرخ‌های گرمایی می‌توانند به بزرگی 21 متر در قطر و با ظرفیت هوا $1130 \text{ m}^3/\text{min}$ ساخته شوند.

یک تغییر در چرخ گرمایی، تقویت‌کننده دوار است که قالب، در یک استوانه دوار در میان گاز پسماند و در جریان هوا قرار داده می‌شود. چرخ بازیافت گرما با انرژی یک تقویت‌کننده گرمایی گاز دوار است که می‌تواند گرمای حاصل از خروجی را به گازهای ورودی انتقال دهد.

کاربرد اصلی آن در جایی است که گرما بین حجم بزرگی از هوا که اختلاف دمای کمی دارند، رد و بدل می‌شود. نمونه‌هایی از کاربردهای آن در سامانه‌های گرمایش و تهویه و بازیافت گرما از خشک‌کن هوای خروجی است [5]. سامانه‌های گرمایشی و تهویه و بازیافت حرارت از هوای خروجی خشک‌کن، نمونه‌ای از کاربردهای آن هستند [3].

4-5. لوله گرمایی

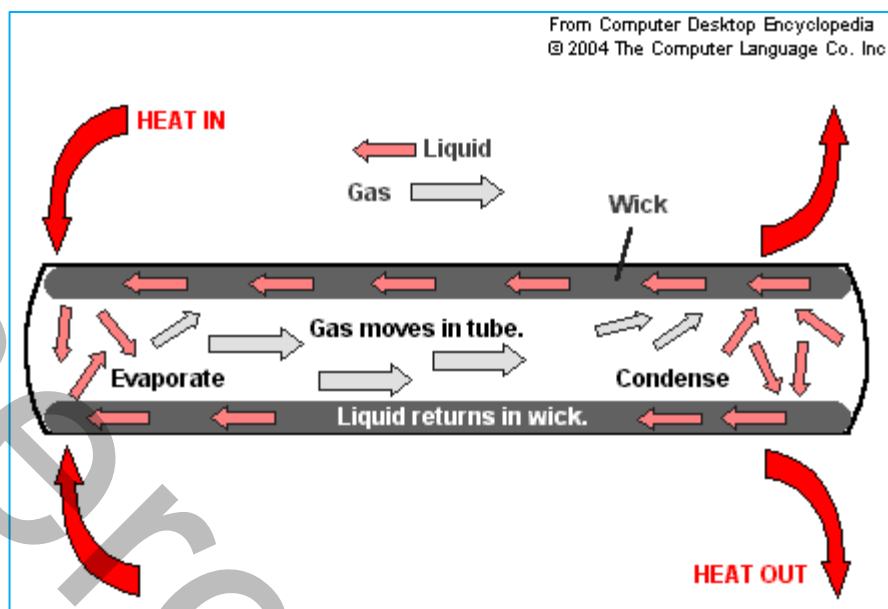
4-5-1- توضیحات

یک لوله گرمایی می‌تواند 100 برابر بیشتر از مس، بهترین هادی حرارتی شناخته شده در صنعت، انرژی گرمایی را انتقال دهد.

لوله گرمایی یک سامانه انتقال و جاذب انرژی گرمایی با اجزاء بدون حرکت است و از این رو به کمترین تعمیر و نگهداری نیاز دارد [5].

لوله حرارتی و ترموسیفون، دو نوع از سامانه‌های تبخیر و میعان هستند که معمولاً به شکل لوله‌ای بوده و حرارت را با سرعت در راستای طولی‌شان منتقل می‌نمایند. هر دو نوع شامل یک حامل هستند که در یک لوله فلزی آب‌بندی شده گنجانیده شده است. لوله‌های حرارتی می‌توانند از موادی ساخته شوند که مناسب هر کاربرد باشند. این مواد به‌طور نمونه مس، آلومینیم و فولاد ضدزنگ می‌باشند [3].

لوله گرمایی از سه جزء تشکیل شده است، محفظه محافظ در برابر ورود و خروج هوا، ساختار جذب موئینگی و سیال عامل. ساختار جذب موئینگی به‌طور کامل در سطح داخلی لوله محافظ ساخته شده و در آن خلأ ایجاد شده است. انرژی گرمایی اعمال شده در سطح خارجی لوله گرمایی، در تعادل با بخار آن است به‌طوری که در لوله محافظ خلأ ایجاد شده است. انرژی گرمایی اعمال شده در سطح خارجی لوله گرمایی باعث می‌شود که سیال عامل در نزدیکی سطح فوراً تبخیر شود؛ بنابراین بخار تشکیل شده گرمای نهان تبخیر را جذب می‌کند و این بخش از لوله گرمایی یک منطقه تبخیر کننده است. سپس بخار به انتهای دیگر لوله می‌رود که در آنجا انرژی گرمایی خارج می‌شود، باعث می‌شود که دوباره بخار به حالت مایع چگالیده شود، در نتیجه گرمای نهان میعان آزاد شود. این بخش از لوله گرمایی به‌عنوان یک منطقه چگالیده شده سپس به منطقه تبخیر کننده برمی‌گردد [5]. شکل 3 نشان دهنده نحوه عبور سیال و انتقال حرارت در لوله گرمایی (heat pipe) است.



تخوه عبور سیال در لوله گرمایی (heat pipe)

5-4-2- مزایا و کارایی

مبدل لوله گرمایی (HPHE)، یک سامانه بازیافت گرمایی بسیار سبک وزن و جمع و جور است. این وسیله به علت نداشتن اجزاء متحرک عملاً نیاز به تعمیرات مکانیکی اساسی ندارد. لوله گرمایی برای عملیات خود به قدرت ورودی، آب خنک کننده و سامانه روغن کاری نیاز ندارد و همچنین توان مورد نیاز دمنده را کاهش می دهد و بازده کلی سامانه را افزایش می دهد. سامانه های بازیافت گرما از لوله گرمایی قادر به عملیات در دمای 315 درجه سلسیوس با قابلیت بازیافت گرما 60 تا 80 درصد می باشند.

5-4-3- نمونه هایی از کاربردها

لوله های گرمایی در موارد صنعتی زیر به کار برده می شوند:

- فرآیند گرمایش فضا: مبدل گرمایی لوله گرمایی برای گرمایش ساختمان، انرژی گرمایی را از فرآیند تخلیه منتقل می کند. هوای پیش گرم شده می تواند در صورت لزوم ترکیب گردد. نیاز به تجهیزات گرمایشی اضافی برای انتقال هوای جبرانی گرم شده به شدت کاهش یافته و یا حذف شده است.
- فرآیند به فرآیند: مبدل های گرمایی لوله گرمایی، اتلاف انرژی گرمایی از فرآیند تخلیه را بازیافت می کنند و این انرژی را به هوای ورودی منتقل می کنند. هوای ورودی به این ترتیب گرم می شود و می تواند یا به همین روند یا در فرآیندهای دیگر استفاده شود، بنابراین روند مصرف انرژی کاهش می یابد.
- کاربردهای تهویه مطبوع:

الف) سرمایش: مبدل‌های گرمایی لوله گرمایی، در تابستان هوای جبرانی ساختمان را پیش-سرد می‌کند و در نتیجه جدا از صرفه‌جویی در عملیات سامانه سرمایش، میزان کل سردسازی را کاهش می‌دهد. انرژی گرمایی از خروجی‌های سرد بازیافت شده و به منبع هوای گرم جبرانی منتقل می‌شود.

ب) گرمایش: روند فوق در طول زمستان معکوس شده تا هوای جبرانی را پیش-گرم کند.

- کاربردهای دیگر در صنعت عبارت‌اند از:

پیش‌گرمایش دیگ بخار احتراق هوا

بازیافت اتلاف گرما از کوره

گرمایش مجدد هوای تازه برای خشک‌کن‌های هوای گرم

بازیافت اتلاف گرما از تجهیزات بی‌بو کردن کاتالیزوری

استفاده مجدد از گرما کوره زباله به‌عنوان منبع گرما برای استفاده در اجاق‌های دیگر

سرمایش اتاق‌های در بسته با هوای خارج

پیش‌گرمایش آب تغذیه دیگ بخار با بازیافت اتلاف گرمایی دودها در پیش‌گرم‌کن‌های لوله گرمایی

کوره‌های خشک کردن، به‌عمل آوردن و پخت

اتلاف بخار زباله‌ها

کوره‌های آجر (بازیافت ثانویه)

کوره‌های بازتابی (بازیافت ثانویه)

گرمایش و تهویه و سامانه‌های تهویه مطبوع.

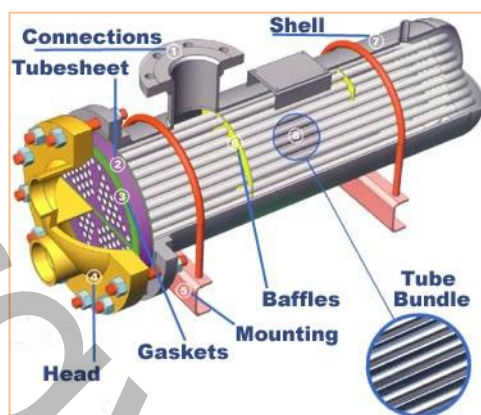
5-5. پیش‌گرم‌کن آب تغذیه

در مورد سامانه‌های دیگ بخار، پیش‌گرم‌کن آب تغذیه می‌تواند فراهم شود تا از گرمای دود برای پیش‌گرمایش آب تغذیه دیگ بخار استفاده کند. از سوی دیگر، در پیش‌گرم‌کن هوا، از اتلافات گرمایی برای گرم کردن هوای احتراق استفاده می‌شود. در هر دو مورد، کاهش در سوخت مورد نیاز دیگ بخار به وجود می‌آید.

در هر 220 درجه سلسیوس کاهش دمای دود با عبور از پیش‌گرم‌کن آب تغذیه یا پیش‌گرم‌کن، 1 درصد صرفه-جویی در سوخت دیگ بخار وجود دارد. به عبارت دیگر برای افزایش 60 درجه سانتی‌گراد درجه گرما آب تغذیه از طریق پیش‌گرم‌کن آب تغذیه و یا 20 درجه سانتی‌گراد افزایش دمای هوای احتراق از طریق پیش‌گرم‌کن، 1 درصد صرفه‌جویی در سوخت دیگ بخار وجود دارد. [5]

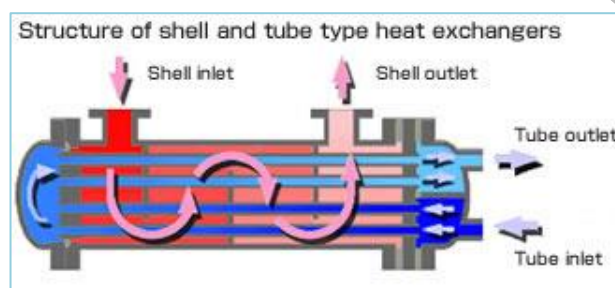
5-6. مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله

این مبدل یکی از انواع عمده مبدل‌های حرارتی مورد استفاده در صنایع شیمیایی و نفت، برای مبادله حرارت بین دو سیال می‌باشد، لیکن اصول کلی آن برای مبادله حرارت بین گازهای داغ تحت فشار و مایعات (مثل دیگ‌های بخار حرارت تلف شده) که در آن‌ها اختلافات دما زیاد است، نیز به کار بسته می‌شود [3]. در شکل 4 اجزاء تشکیل‌دهنده یک نمونه مبدل حرارتی پوسته و لوله نشان داده شده است.



اجزاء تشکیل‌دهنده یک نمونه مبدل حرارتی پوسته و لوله

وقتی واسطه‌ای که حاوی اتلاف گرمایی است یک مایع یا بخار است که مایع دیگری را گرم می‌کند، باید از مبدل گرمایی پوسته و لوله استفاده شود؛ زیرا هر دو راه باید برای حفظ فشار مایعات خود درزگیری شوند. پوسته شامل دسته لوله و معمولاً سپر داخلی است تا سیال را در پوسته در طول لوله‌ها و چند راهه‌ها هدایت کند. پوسته ذاتاً ضعیف‌تر از لوله است، بنابراین سیال با فشار بالاتر در لوله‌ها به گردش درمی‌آید در حالی که جریان فشار پایین از طریق پوسته به گردش درمی‌آید. هنگامی که بخار حاوی اتلاف گرمایی است، معمولاً متراکم می‌گردد، گرمای نهان خود را به مایع می‌دهد تا گرم شود. در این کاربرد، بخار تقریباً همواره در داخل پوسته است. اگر برعکس شود، تراکم بخار در داخل لوله‌های موازی با قطر کوچک باعث ناپایداری‌های جریان می‌شود. مبدل‌های گرمایی پوسته و لوله در طیف گسترده‌ای از اندازه‌های استاندارد با ترکیبات متفاوتی از مواد لوله‌ها و پوسته‌ها موجود هستند. شکل 5 نشان‌دهنده نحوه عبور سیال از مبدل حرارتی پوسته و لوله (shell and tube) است.

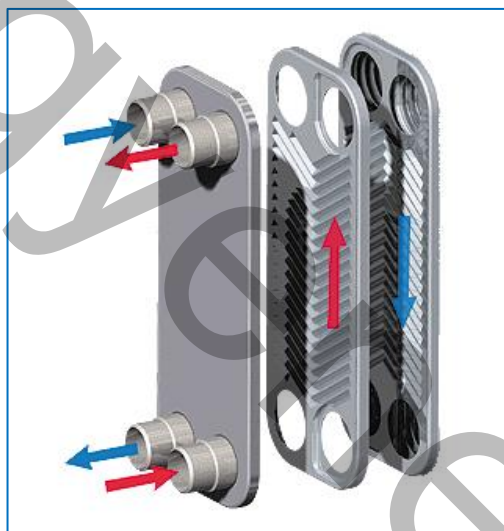


نحوه عبور سیال از مبدل حرارتی پوسته و لوله

نمونه‌هایی از کاربردهای مبدل‌های پوسته و لوله شامل گرمایش به سیال با گرمای حاصل از تراکم در سامانه‌های سردسازی و تهویه مطبوع، میعان‌ات از فرآیند بخار آب، سرماسازها از درب کوره، بخاری‌های پنجره‌ای و نگه‌دارنده‌های لوله، سرماسازها از موتورهای کمپرسورهای هوا، بلبرینگ‌ها و گریس و میعان‌ات حاصل از تقطیر می‌شود.

5-7. مبدل‌های گرمایی صفحه‌ای

زمانی که اختلاف دماها زیاد نیست، هزینه سطح تبادل گرما یک عامل هزینه‌ای اصلی است. یکی از راه‌های مشاهده این مشکل در مبدل‌های صفحه‌ای است که متشکل از یک سری صفحات جداگانه موازی است که راه نازکی برای عبور جریان ایجاد می‌کند. هر صفحه به وسیله واشر از دیگری جدا می‌شود و جریان گرم به‌طور موازی از صفحات تناوبی عبور می‌کند، در حالی که مایع برای گرم شدن به‌صورت موازی از بین صفحات موازی می‌گذرد. به‌منظور بهبود انتقال حرارت صفحات موج‌دار هستند. شکل 6 نمایشگر شماتیک کلی تجهیز مبدل صفحه‌ای می‌باشد.



شماتیک کلی مبدل گرمایی صفحه‌ای

مایع داغ عبوری از دریچه پایین در کلاhek اجازه دارد که به سمت بالا بین صفحات زوج عبور کند، درحالی که مایع سرد در بالای کلاhek مجاز است به سمت پایین میان صفحات فرد عبور کند. هنگامی که جهت سیال سرد و گرم مخالف هستند، آرایششان به‌عنوان جریان متقابل توصیف شده است.

نمونه‌هایی از کاربردهای صنعتی آن عبارت‌اند از:

- بخش پاستوریزه در کارخانه بسته‌بندی شیر
- کارخانه‌های تبخیر در صنعت مواد غذایی

5-8. مبدل‌های کویل چرخشی (Run Around Coil Exchangers)

اصول مبدل‌های کویل چرخشی کاملاً مشابه مبدل‌های لوله گرمایی است. گرما از سیال گرم از طریق یک مایع واسطه به نام سیال انتقال گرما، به سیال سرد منتقل می‌شود. یک کویل از این حلقه بسته در جریان داغ نصب می‌شود، در حالی که دیگری در جریان سرد نصب می‌شود. گردش این مایع با استفاده از پمپ چرخان حفظ می‌شود. بهتر است مایعات سرد دور از یکدیگر قرار داده شوند و به راحتی در دسترس نباشند. نمونه‌هایی از کاربردهای صنعتی آن عبارت‌اند از بازیافت گرما از سامانه تهویه، سامانه تهویه مطبوع و بازیافت گرما در دمای پایین.

5-9. دیگ‌های بازیافت اتلاف گرما

این دیگ‌ها معمولاً دیگ‌هایی با لوله‌های آب جداری (Water Tube Boiler) هستند که در آن‌ها گازهای داغ خروجی از توربین‌های گازی، کوره‌های زباله‌سوز و غیره، از روی تعدادی از لوله‌های موازی حاوی آب عبور می‌کنند. آب در لوله‌ها بخار شده و در دیگ جمع‌آوری می‌شود که از آنجا برای استفاده به عنوان گرمایش یا بخار فرآوری شده خارج می‌شود.

از آنجا که گازهای خروجی معمولاً در محدوده دمای متوسط هستند و به منظور صرفه‌جویی در فضا، یک دیگ بخار فشرده‌تر می‌تواند تولید شود، اما در صورتی که لوله‌های آب منظور افزایش سطح انتقال گرمای مؤثر در سمت گاز پره‌دار شده باشند. اگر انرژی گرمایی تلف شده در گازهای خروجی برای تولید مقادیر مورد نیاز در فرآیند بخار کافی نباشد، مشعل‌های کمکی که سوخت را در دیگ اتلاف گرما می‌سوزاند یا یک پس-سوز که در آن دودهای خروجی وجود دارد، اضافه می‌شوند [5].

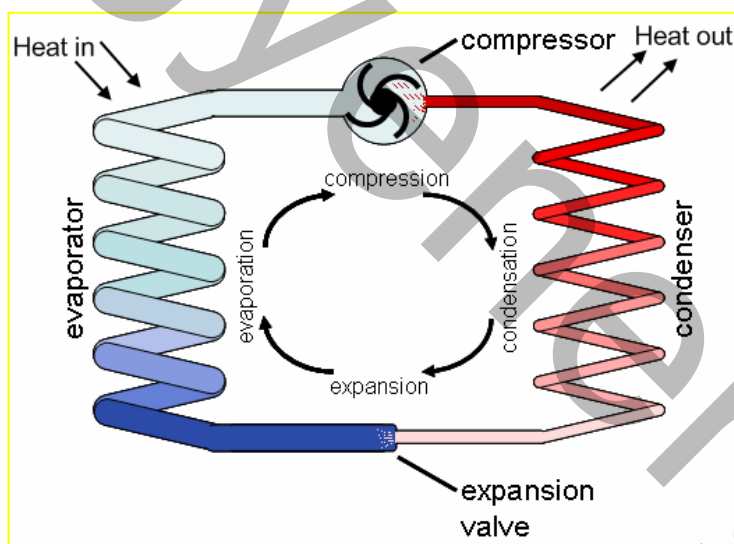
5-10. پمپ‌های گرمایی

همان‌طور که پیش از این بیان شد، گرمای تلف شده از یک سیال داغ به سیالی در دمایی پایین‌تر منتقل می‌شود. گرما باید خودبه‌خود به سمت سرازیری جریان داشته باشد، یعنی از یک سامانه در دمای بالا به سمت دیگری در دمای پایین‌تر جریان داشته باشد. هنگامی که انرژی بارها و بارها منتقل یا تبدیل شود، کمتر و کمتر قابل استفاده خواهد بود. در نهایت انرژی آن چنان شدت کمی خواهد داشت که دیگر کاربردی نخواهد بود.

این یک قاعده کلی در عملیات صنعتی است که به دلیل خطر تراکم مایعات خورنده، مایعات با دمای کمتر از 120 درجه سانتی‌گراد (برای اطمینان 150 درجه سانتی‌گراد)، به عنوان محدوده‌ای برای بازیافت اتلاف گرما قرار داده شده‌اند. با این حال با توجه به افزایش هزینه‌های سوخت، اتلافات گرما می‌تواند از لحاظ اقتصادی برای گرم کردن فضا و دیگر موارد کاربردی دما پایین مورد استفاده قرار بگیرد. معکوس کردن جهت خودبه‌خودی جریان انرژی با استفاده از یک سامانه ترمودینامیکی شناخته شده تحت عنوان پمپ گرمایی امکان‌پذیر است.

اکثر پمپ‌های گرمایی بر اساس اصول تراکم بخار کار می‌کنند. در این چرخه، ماده در گردش از نظر فیزیکی از منبع (اتلاف گرما، با درجه گرما T_{in}) و جریان‌های کاربر (گرمای استفاده شده در فرآیند، T_{out}) جدا شده است و دوباره به شکل چرخه مورد استفاده قرار می‌گیرد، بنابراین چرخه بسته نامیده می‌شود. در پمپ گرمایی، فرآیندهای زیر انجام می‌گیرد:

- در تبخیر کننده، گرما از منبع گرما خارج می‌شود تا ماده در گردش را به جوش بیاورد.
- کمپرسور، ماده در گردش را متراکم می‌کند در نتیجه فشار و درجه گرما آن بالا می‌رود. بخار با دمای پایین توسط کمپرسور متراکم می‌شود که نیاز به کار خارجی دارد. کار انجام شده بر روی بخار، فشار و دمای آن را به حدی بالا می‌برد که انرژی آن قابل استفاده باشد.
- گرما به کندانسور داده می‌شود.
- فشار ماده در گردش (سیال عامل) در شیر کنترل، به اندازه شرایط تبخیرکننده کاهش می‌یابد، سپس چرخه تکرار می‌شود. چرخه گرمایی و نحوه انتقال حرارت در پمپ گرمایی در شکل 7 نشان داده شده است.



چرخه گرمایی و نحوه انتقال حرارت در پمپ گرمایی

پمپ گرمایی می‌تواند گرما را به مقدار بیش از دو برابر انرژی مصرف شده توسط دستگاه افزایش دهد. پتانسیل کاربرد پمپ‌های گرمایی در حال رشد است و صنایع زیادی از بازیافت اتلاف گرما با ارزش کم و تقویت کردن آن استفاده از آن در جریان فرآیند اصلی بهره‌مند شده‌اند.

کاربرد پمپ‌های گرمایی زمانی موفق‌تر است که هر دو قابلیت گرمایش و سرمایش بتوانند در یک مجموعه استفاده شوند. به عنوان نمونه، در کارخانه پلاستیک از آب سرد به منظور سرد کردن ماشین‌آلات قالب‌گیری-تزریق استفاده می‌شود، در حالی که گرمای خروجی از پمپ گرمایی برای گرمایش کارخانه یا دفتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمونه‌های

دیگر از نصب پمپ‌های گرمایی عبارت‌اند از خشک کردن محصول، حفظ فضای خشک برای ذخیره‌سازی و خشک کردن هوای فشرده می‌باشد.

11-5. کمپرسور گرمایی

در بسیاری از موارد در نبود هیچ گزینه بهتری برای استفاده مجدد، از بخار با فشار کم به‌عنوان آب پس از عملیات تراکم، استفاده مجدد می‌شود. در بسیاری از موارد، تراکم این بخار با فشار کم با بخار فشار بالا و استفاده مجدد از آن به‌عنوان بخار با فشار متوسط امکان‌پذیر است. انرژی اصلی در بخار در مقدار گرمای نهان آن است و در نتیجه تراکم گرمایی، پیشرفت بزرگی در بازیافت اتلاف گرما است.

کمپرسور-گرمایی دستگاه ساده‌ای با یک نازل است که در آن سرعت بخار HP را در یک مایع با سرعت بالا می‌افزاید. این بخار LP را توسط انتقال مومنتوم به‌دنبال خود می‌کشد و سپس در یک لوله واگرا دوباره متراکم می‌شود. [5]

ارزیابی بازیافت اتلاف گرما

در این بخش به نحوه ارزیابی پتانسیل بازیافت اتلاف گرما می‌پردازیم.

12-5. تعیین کیفیت اتلاف گرما

در زمان بازیافت اتلاف گرما ابتدا باید کیفیت انرژی گرمایی تلف شده در نظر گرفته شود. بسته به نوع فرآیند، انرژی گرمایی تلف شده می‌تواند تقریباً در هر دمایی از دمای آب سرد خنک‌کننده تا دمای بالای گازهای تلف شده در اجاق‌ها یا کوره‌های صنعتی، دور ریخته شود. معمولاً دماهای بالاتر برابر با کیفیت بیشتر بازیافت گرما و کارایی بیشتر در میزان هزینه است. در مطالعه بازیافت اتلاف گرما، کاملاً ضروری است که از گرما بازیافت شده استفاده کنیم. مثال‌هایی از کاربرد آن عبارت از پیش‌گرمایش هوای احتراق، گرمایش فضا، یا پیش‌گرمایش آب تغذیه دیگ می‌باشد. با بازیافت انرژی گرمایی در دمای بالا، ممکن است که یک سامانه آبخاری از بازیافت اتلاف گرما به‌کار برده شود تا اطمینان حاصل شود که بیش‌ترین مقدار انرژی گرمایی با بالاترین پتانسیل بازیافت شده است.

1-1-5. کیفیت و کاربردهای بالقوه

در هنگام در نظر گرفتن پتانسیل بازیافت گرما، توجه به تمام منابع ممکن اتلاف، کیفیت آن‌ها و استفاده‌های احتمالی از آن‌ها، مفید است.

2-1-5. پتانسیل بازیافت برای فرآیندهای مختلف صنعتی

اتلاف گرما می‌تواند توسط فرآیندهای مختلف صنعتی بازیافت شود. تمایزی بین دماهای کم، متوسط و زیاد اتلاف گرما ایجاد شده است.

5-13. تعیین کیفیت اتلاف گرمایی

در تمامی حالات بازیافت گرما، دانستن مقدار گرمای قابل بازیافت و همچنین نحوه استعمال آن‌ها ضروری است. کل گرمایی که به‌طور بالقوه می‌تواند بازیافت شود، با استفاده از این فرمول محاسبه می‌شود:

$$Q = V \times \rho \times C_p \times \Delta T$$

که:

Q مقدار گرما بر حسب kcal

V نرخ جریان ماده اصلی بر حسب m³/hr

ρ دانسیته دود بر حسب kgr/m³

C_p گرمای ویژه ماده اصلی بر حسب kCal/kg°C

ΔT اختلاف درجه حرارت بر حسب °C [5].

6- کاربردهای بازیابی گرما در صنعت

در این قسمت به بررسی و تشریح نمونه‌هایی از کاربرد بازیابی حرارت در صنایع مختلف می‌پردازیم.

6-1. بازیافت گرما از چیلرهای هوا خنک

آب داغ در طی سالیان متمادی عموماً توسط سوخت‌های فسیلی مشتعل شده پیرامون یک ظرف فلزی پر از آب تأمین شده است. در دوره معاصر، از المنت‌های الکتریکی غوطه‌ور در یک ظرف آب، جهت گرمایش آب استفاده می‌شود. هنگام گرمایش با سوخت‌های فسیلی در یک بویلر از نوع چگالنده، بازدهی‌ها می‌توانند به بیش از 90 درصد و با گرم‌کن-های الکتریکی غوطه‌ور در آب تا 100 درصد افزایش یابند. راندمان‌های بیان شده به ترتیب معادل ضریب عملکرد COP 0.9 و 1 می‌باشند. این در حالی است که آب داغ را می‌توان با ضریب عملکرد COP بالاتر از 1 نیز تولید نمود.

بازیافت گرما، انرژی رو به اتلاف در حال حرکت به‌سمت اتمسفر به گرمای مفید تبدیل می‌کند. در برخی مصارف گرمای در حال اتلاف از کندانسور گرفته‌شده و برای تولید آب داغ مورد استفاده قرار می‌گیرد. با تسخیر این گرمای رو به اتلاف، می‌توان مجموع راندمان‌های سیستم را به‌طور چشم‌گیری افزایش داد.

برخلاف فرآیندهای تولید گرما از آب گرم‌کن‌های احتراقی یا الکتریکی، جذب گرمای زائد از کندانسور می‌تواند به راندمان بالای 100 درصد منجر شود در نتیجه استفاده از گرمای گرفته‌شده از کندانسور و اثر سرمایی اواپراتور، وقتی که هر دو منبع گرما جذب می‌شوند، می‌توان به راندمان‌های بیش‌تر از 100 درصد دست پیدا کرد. در واقع، COP کل برای بازیافت گرما از سیستم چیلر برای هر دو مقصد گرمایش و سرمایش آب می‌تواند به بالای 5 برسد.

$$COP_{Total} = \frac{Heat_{out}}{Work_{in}} + \frac{Heat_{in}}{Work_{in}}$$

معادله بالا COP کل برای بازیافت گرما+آب چیلر را نشان می‌دهد.

6-1-1. چیلر هوا خنک با قابلیت بازیافت گرما

یک چیلر هوا خنک هم‌زمان با انتقال مقادیر چشم‌گیر گرما به بیرون از طریق کندانسور هوا خنک، آب چیلر تولید می‌کند. چنان‌چه این گرما را بتوان تسخیر و مجدداً به‌سوی یک کندانسور آب‌خنک هدایت نمود، این سیستم نه‌تنها قادر است یک منبع کنترل شده از آب چیلر را تولید کند بلکه می‌تواند مقادیر چشم‌گیری از گرمای مفید را نیز به‌منظور تولید آب داغ ایجاد نماید.

هنگامی که یک چیلر هوا خنک در وضعیت بازیافت گرما کار می‌کند، الزاماً نیاز هم‌زمان به آب چیلر و آب داغ وجود دارد. این نکته حائز اهمیت است که این چیلر همواره بایستی دمای آب چیلر خروجی را ثابت نگه دارد. در نتیجه چیلر در عین حال که دمای آب چیلر خروجی را کنترل می‌کند تا آنجایی که امکان دارد آب داغ فراوانی را تولید خواهد کرد. آب داغ خروجی یک محصول جنبی از چرخه سرمایش است. دمای آب داغ خروجی تابعی از دمای آب داغ ورودی، جریان آب داغ و ظرفیت چیلر می‌باشد.

6-1-2. کاربردهای آب داغ در ساختمان‌ها

درک نوع ساختمان یا فرآیند و چگونگی استفاده از گرمای بازیافت شده برای یک کاربری معین حائز اهمیت است. آب داغ می‌تواند برای گرمایش ساختمان یا پیش‌گرمایش هوای تهویه، برای کویل‌های دوبار گرم‌کن منطقه‌ای، حفظ شرایط استخر، پیش‌گرمایش پرکن آب خانگی، یا گرمایش فرآیند مورد استفاده قرار گیرد. در هریک از این کاربردها توجه به نیاز هم‌زمان به آب چیلر و آب داغ ضرورت دارد. این نیازمندی می‌تواند در هر یک از انواع ساختمان‌های لیست شده در زیر، ارائه شود. در تمام موارد، آب چیلر می‌تواند برای سرمایش فضا و مقاصد تهویه مطبوع مورد استفاده قرار گیرد.

- هتل‌ها، متل‌ها، استراحتگاه‌ها- تأمین آب داغ برای مقاصد آشامیدنی و غیر آشامیدنی از قبیل گرمایش رخت‌شویی، آشپزخانه، دستشویی و استخر شنا.

- امکانات ورزشی (دانشگاه، دبیرستان، اجتماعات) - آب مورد نیاز حمام و دستشویی و گرمایش استخر شنا.

- خوابگاه‌های دانشجویی- تأمین آب داغ برای امکانات حمام، رخت‌شویی، آشپزخانه و ناهارخوری رخت‌شویی‌های تجاری- تأمین آب داغ

- بیمارستان‌ها و امکانات خانه سالمندان- آب داغ مورد نیاز اتاق بیمار، تسهیلات رخت‌شویی و آشپزخانه.

- مجتمع‌های مسکونی و مشاعات- تهیه آب داغ برای امکانات حمام، رخت‌شویی، آشپزخانه و ناهارخوری

2-6. بازیابی حرارت در صنعت سیمان

بازیافت حرارت در کارخانه‌های سیمان یکی از روش‌های متداول جهت افزایش بازده انرژی مصرفی است. بازیافت حرارت از گازهای گرم خروجی از فرایند پخت و کولر دو منبع اصلی تأمین حرارت سیستم بازیافت حرارت در کارخانه‌های سیمان می‌باشد. در فناوری‌های قدیمی و جدید تولید سیمان که از پیش‌گرم‌کن‌های چهار یا پنج طبقه در سیستم پخت و از گریت کولر جهت خنک کردن کلینکر استفاده می‌کنند، قابلیت بهره‌گیری از سامانه‌های بازیافت حرارت وجود دارد. گرمای بازیافت شده از دو منبع فوق در بویلرهای بازیافت حرارت صرف افزایش دمای آب و تبدیل آن به بخار شده که از انرژی آن در توربین بخار جهت تولید انرژی الکتریکی بهره‌گیری می‌شود.

بهای انرژی و کیفیت منبع گرمایی مهم‌ترین فاکتورهای تأثیرگذار بر میزان توجیه‌پذیری اقتصادی سامانه‌های بازیافت حرارت می‌باشد. گاز گرم خروجی از پیش‌گرم‌کن‌های چندطبقه‌ای، متناسب نوع فناوری و شرایط بهره‌برداری دمایی در حدود 370 تا 450 درجه سانتی‌گراد و گاز گرم خروجی از کولر 320 تا 420 درجه سانتی‌گراد دارد که کیفیت نسبی مطلوبی را جهت بازیاب حرارت دارا می‌باشد.

جدول 2 پتانسیل تولید انرژی الکتریکی را از بازیافت حرارت در کارخانه‌های سیمان با ظرفیت‌های مختلف نشان می‌دهد.

جدول 2. پتانسیل تولید انرژی الکتریکی از بازیافت حرارت در کارخانه سیمان

ظرفیت	دما و دبی گاز خروجی از پیش‌گرم‌کن	دما و دبی گاز خروجی از کولر	انرژی الکتریکی تولیدی
ton/day 2500	150000Nm ³ /h-340 C	65000Nm ³ /h-350 C	4.5MW
ton/day 2×2500	2×150000Nm ³ /h-340 C	2×65000Nm ³ /h-350 C	7.5MW
ton/day 5000	340000Nm ³ /h-350 °C	240000Nm ³ /h-360 C	9MW
ton/day 2×5000	2×340000Nm ³ /h-350 C	2×240000Nm ³ /h-360 C	18MW

انرژی الکتریکی تولیدی توسط واحد WHRS بخشی از انرژی الکتریکی مصرفی کارخانه سیمان را تأمین می‌کند. بهره‌گیری از سیستم بازیافت حرارت در کارخانه‌های سیمان 20 تا 38 کیلووات ساعت به ازای تولید هر تن کلینکر تولیدی در کارخانه‌های سیمان را تأمین می‌کند. انرژی تولیدی توسط این واحد با توجه به کارکرد یا توقف آسیاب مواد متغیر خواهد بود.

آب مورد نیاز بویلرها با آنالیز ویژه توسط تصفیه‌خانه آب تأمین می‌شود. آب تصفیه شده توسط پمپ‌های انتقال آب به بویلرها منتقل شده و بخار مافوق گرم حاصل شده از بازیافت حرارت صرف تولید انرژی در توربین بخار می‌شود. دمای بخار میعان شده در برج‌های خنک کن کاهش یافته و جهت استفاده مجدد به مخزن ذخیره منتقل می‌شود. تلفات آب در سیکل تولید حرارت نیز از طریق خط تأمین آب Make Up جبران می‌شود. چشم‌انداز هزینه‌های مربوط به انرژی در کشور و رقابت تنگاتنگ تولیدکنندگان صنعت سیمان، اهمیت بالا و ضرورت بهینه‌سازی مصرف انرژی را در صنعت سیمان بیش از پیش روشن می‌کند [2].

3-6. سامانه‌های هوای پیش‌گرم‌کن هوای احتراق در پالایشگاه‌ها

کوره‌های فرآیند در صنعت نفت یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کننده‌های انرژی فسیلی به‌شمار می‌روند که با توجه به بهای روزافزون سوخت، نیاز به تحقیقات جدی در امر صرفه‌جویی و بازیافت انرژی در آن‌ها کاملاً احساس می‌شود. در راستای صرفه‌جویی در مصرف سوخت در کوره‌های پالایشگاه راهکارهای متنوعی را می‌توان ارائه داد، به‌عنوان نمونه به کاهش درصد هوای اضافه (از طریق گازسوز کردن مشعل‌ها) و انتخاب مشعل‌های مناسب (مشعل‌های با NO_x پایین) می‌توان اشاره کرد.

علاوه بر موارد ذکر شده روش‌های مختلف بازیافت انرژی از بخش جابجایی و دودکش نیز در راستای کاهش مصرف انرژی قابل توجه خواهند بود.

نصب پیش‌گرم‌کن هوای احتراق با توجه به میزان دمای گازهای دودکش، راندمان کوره‌ها را تا 25٪ افزایش می‌دهد. با کاهش هر 35 تا 40 درجه فارنهایت (20 درجه سانتی‌گراد) دمای دودکش، راندمان کوره حدود یک درصد افزایش می‌یابد.

مزایای سامانه‌های پیش‌گرم‌کن هوای احتراق کوره‌ها علاوه بر افزایش راندمان کوره عبارت‌اند از:

- با نصب سیستم پیش‌گرم‌کن به‌دلیل تبدیل مکش طبیعی به اجباری، شکل شعله به دقت قابل کنترل است.
- با نصب سیستم پیش‌گرم‌کن می‌توان ظرفیت کوره را افزایش داد. به‌عنوان مثال با نصب پیش‌گرم‌کن و همان نرخ مصرف سوخت، می‌توان ظرفیت کوره‌ای را از 16000 (bbl/day) به 20000 (bbl/day) افزایش داد.
- با وجود سیستم پیش‌گرم‌کن، احتراق کامل‌تر صورت می‌گیرد و سطوح خارجی لوله‌ها تمیزتر باقی‌مانده و دفعات تعمیر جهت تمیز نمودن سطوح خارجی لوله‌ها (soot blowing) را کاهش می‌دهد.
- تمیز ماندن سطوح خارجی لوله‌ها سبب توزیع انتقال حرارت مناسب روی لوله‌ها می‌شود و از پدیده کک زدن سطح داخلی لوله‌ها و افزایش دمای جداره لوله‌ها جلوگیری به‌عمل می‌آورد.

در ادامه جهت روشن شدن اثر پیش گرم کن هوای احتراق بر صرفه جویی و کاهش مصرف سوخت به یک نمونه عملی اجرا شده در صنعت نفت اشاره می شود. شرکت نفت فلمانت روش های مختلفی را جهت صرفه جویی انرژی در مراحل طراحی واحد تبدیل آمونیاکی مورد مطالعه قرار داد.

این واحد بر اساس مصرف گاز طبیعی جهت احتراق در کوره و تولید آمونیاک طراحی شده است. سامانه های بازیافت انرژی این واحد شامل یک بویلر اتلافی و یک سیستم پیش گرم کن هوای احتراق می باشد.

گازهای احتراق خروجی از کوره با دمای 2100 درجه فارنهایت وارد بویلر اتلافی شده و 70٪ انرژی حرارتی لازم جهت تولید 70000 (lb/hr) بخار را تأمین می کنند و سپس با دمای 750 درجه فارنهایت وارد سیستم پیش گرم کن هوای احتراق کوره تبدیل آمونیاکی می شود که در شرایط زمستان در حدود 107000 (lb/hr) هوای احتراق را از دمای 10 تا 305 درجه فارنهایت گرم کرده و دمای گازهای احتراق به 380 درجه فارنهایت کاهش می یابد. ملاحظه می شود که توسط دو سیستم بازیافت انرژی، جمعاً در حدود 45٪ راندمان کوره مذکور افزایش یافته است که حدود 10 درصد افزایش راندمان، مربوط به وجود سیستم پیش گرم کن هوای احتراق می باشد [7].

7- نتیجه گیری و چند نکته حائز اهمیت

اکثر اپراتورهای کارخانه ها از لزوم صرفه جویی در هزینه ها و کاهش تأثیرات زیست محیطی از طریق مدیریت بهتر انرژی آگاه اند. این مهم معمولاً به تدوین روش هایی برای کاهش مصرف آب منجر می شود. تمرکز بر کاستن از هزینه ها می تواند به پیدایش فرصت هایی از قبیل بازیابی انرژی گرمایی از فاضلاب های صنعتی منجر شود.

چندین عامل اپراتورهای کارخانه ها را وادار می دارند تا به فاضلاب به عنوان یک منبع گرما نگاه دقیق تری بیندازند. اولاً، ضرورت حفاظت از منابع مالی سازمان در برابر افزایش های ناگهانی هزینه انرژی توسط استفاده از منابع انرژی جایگزین از قبیل گرما فاضلاب و ثانیاً، لزوم مدیریت انتشار گازهای گلخانه ای از طریق کاهش مصرف سوخت های فسیلی.

بازیافت انرژی گرمایی موجود در آب خاکستری در صنایعی که مصرف آب بالایی دارند از قبیل صنایع چوب و کاغذ و کارخانه ها لبنیات از اهمیت ویژه ای برخوردار است. بازیافت گرما در بخش هایی که لجن ها را فرآوری می کنند نیز حائز اهمیت است. بسیاری از فرآیندهای صنعتی لجن هایی تولید می کنند که حاوی گرمای قابل ملاحظه ای بوده و به عنوان یک منبع ارزشمند نباید هدر رود. [8]

بسیار مهم است سیستم بازیابی انتخاب شود که بتواند خطر آلوده شدن جریان ورودی با جریان خروجی را به طور مطمئن مدیریت کند و هم چنین با فضای موجود مطابقت داشته باشد چرا که بعضی از سامانه ها جهت تأمین فضای کافی جهت تعویض لوله ها در صورت نشستی، خوردگی یا کثیفی نیاز به فضایی باز، طولی تر از لوله های واحد بازیافت، دارند.

جهت جلوگیری از کاهش راندمان و خاموشی سیستم جهت تعمیرات، در طراحی سامانه های بازیافت حرارت توجه به پیش گیری از انسداد لوله و جلوگیری از گرفتگی مسیر، مخصوصاً در مورد لجن ها، حائز اهمیت است [8].

منابع

1. نگرش کوتاه به طرح ملی طراحی و توسعه فناوری بازیافت انرژی در پالایشگاه اصفهان از آغاز تا فروردین 1379- مجری شهرک علمی و تحقیقاتی اصفهان- کمیته تخصصی انرژی و محیط زیست- مدیر پروژه- دکتر علی اصغر رستمی
2. وبسایت رسمی شرکت مهندسی فرآیند و انرژی فران- www.faran-co.com
3. کتابچه- راهنماها فنی مدیریت انرژی، بازیافت گرمای هدر رفته از فرآیندهای صنعتی- دفتر بهینه- سازی مصرف انرژی- وزارت نیرو و امور انرژی
4. مقاله بازیابی گرمای فاضلاب- اثر Alissa Cooperman- ترجمه دکتر سید علی اکبر طباطبایی- صنعت تأسیسات- سال دوازدهم- شماره 145 بهمن 1390
5. مقاله بازیابی اتلاف گرما- مجله تهویه تأسیسات- سال نهم- شماره 101- آبان 1391
6. مقاله بازیافت گرما از چیلرهای هوا خنک کاربردهایی برای چیلرهای بازیافت کننده گرما- نشریه داخلی شرکت یکتا تهویه اروند- شماره پنجاه- شهریورماه 1392
7. گزارش طراحی اولیه همراه با تحلیل فنی و اقتصادی سیستم پیش گرم کن هوا در کوره 101 پالایشگاه اصفهان- مجری: شهرک علمی و تحقیقاتی اصفهان، کمیته تخصصی انرژی و محیط زیست- مدیر پروژه: دکتر علی اصغر رستمی- بهار 1381
8. مقاله بازیافت گرما از فاضلابهای صنعتی- اثر Erwin Schwartz- ترجمه دکتر سید علی اکبر طباطبایی- مجله صنعت تأسیسات- سال چهاردهم- شماره 169- بهمن 1392