

تبیین و تفسیر فیزیکی اصول و مبانی انتقال حرارت مبتنی بر انواع مبدل‌های حرارتی

احسان نیکزاد^۱، لاله آقاجری^۲، امیر نیکزاد^۳

^۱دکترای شیمی تجزیه دانشگاه آزاد اسلامی واحد امیدیه

^۲کارشناسی ارشد شیمی گرایش معدنی دانشگاه آزاد اسلامی واحد امیدیه

^۳کارشناسی ارشد مهندسی شیمی گرایش صنایع گاز دانشگاه آزاد اسلامی واحد امیدیه

چکیده

دستگاهی است که به وسیله آن انتقال حرارت انجام گرفته و بین دو سیال تبادل گرما ایجاد می‌نماید. به عبارت دیگر مبدل‌های حرارتی دسته‌ای از دستگاه‌های انتقال حرارت هستند که در آن‌ها حرارت بین دو سیال در دو قسمت مختلف پروسس مبادله می‌شود. هدف از این پژوهش تبیین و تفسیر فیزیکی اصول و مبانی انتقال حرارت مبتنی بر انواع مبدل‌های حرارتی است. در ابتدا به مفاهیم فیزیکی و معادلات نرخ انتقال حرارت سپس به دستگاه‌های انتقال حرارت (مبدل‌های حرارتی) پرداخته شد و مبدل‌های حرارتی از نوع جریان متقاطع و مبدل‌های حرارتی از نوع جریان مخالف همچنین مبدل‌های حرارتی از نوع جریان موازی بیان شد. در این تحقیق به بررسی انواع مبدل‌های دارای پوسته و لوله و پدیده‌های گرفتگی و مسدود شدن حرکت بخار نیز پرداخته شد. به تفصیل به تقسیم‌بندی مبدل‌های حرارتی از نقطه نظر مکانیسم انتقال حرارت بین سیال و انتقال حرارت بین سیال سرد و گرم همراه با تقسیم‌بندی مبدل‌های حرارتی از نقطه نظر نوع کاربرد بر اساس استاندارد TEMA و تقسیم‌بندی مبدل‌های حرارتی از نقطه نظر ساختمان مکانیکی آن‌ها توجه شد.

کلمات کلیدی: مبدل حرارتی، انتقال حرارت، تشعشع، ضریب انتقال حرارت هدایتی

مقدمه

انتقال حرارت (گرما) به عملی گفته می‌شود که به علت اختلاف درجه حرارت صورت می‌پذیرد یعنی هنگامی که اختلاف دما در یک محیط یا بین اجسام وجود داشته باشد، انتقال حرارت اتفاق می‌افتد انواع مختلف فرآیندهای انتقال حرارت را مکانیزم های انتقال حرارتی می‌نامند. شکل ۱-۱ هنگامی که گرادیان یا اختلاف درجه حرارت در یک محیط ساکن که می‌تواند جامد یا سیال باشد وجود داشته و از کلمه هدایت^۱ جهت معرفی نوع انتقال حرارت در این محیط نیز استفاده می‌گردد. جابجایی^۲ معرف انتقال حرارت بین یک سطح و یک سیال متحرک با دماهای متفاوت می‌باشد. تشعشع سومین نوع انتقال حرارت می‌باشد. کلیه سطوحی که دارای دمای معین می‌باشند انرژی را بصورت امواج الکترومغناطیس از خود ساطع می‌کنند بنابراین اگر هیچ گونه حائلی بین دو سطح نباشد، انتقال حرارت خالص بواسطه تشعشع^۳ بین سطوح با دمای متفاوت وجود خواهد داشت. شکل ۱ انواع مختلف انتقال حرارت هدایتی، جابجایی و تشعشعی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. انواع مختلف انتقال حرارت

مبانی نظری

مفاهیم فیزیکی و معادلات نرخ انتقال حرارت

از نکات بسیار مهم در تجزیه و تحلیل مسائل انتقال حرارت درک اصول فیزیکی که مبنای مکانیزم های انتقال حرارت هستند و تعیین معادلات نرخ انتقال حرارت که مقدار انتقال انرژی در واحد زمان را معین می‌کنند، می‌باشد. با این مقدمه به شرح و تفصیل مکانیزم های ذکر شده می‌پردازیم

هدایت

هدایت حرارتی ناشی از فعالیت های مولکولی و اتم های سازنده یک ماده می‌باشند و این فعالیت ها بطور مداوم باعث ادامه هدایت حرارتی می‌شوند، هدایت در واقع انتقال انرژی از ذرات پرانرژی به ذرات کم انرژی در یک ماده می‌باشد. فرآیندهای انتقال حرارت را می‌توان بر حسب معادلات نرخ انتقال بصورت کمی در آورد و با استفاده از این معادلات مقدار انتقال انرژی بر واحد زمان را می‌توان محاسبه نمود. در رابطه با هدایت حرارتی معادله نرخ انتقال قانون فوریه نام دارد همانطور که در نمودار ۱ نشان داده شده است در یک دیوار مسطح یک بعدی که دارای توزیع دمای (T) است معادله نرخ انتقال حرارت بصورت زیر می‌باشد:

معادله ۱

$$q = -k \frac{dt}{dx}$$

که :

$$q = \text{شدت جریان حرارت بر حسب وات بر متر مربع (w/m}^2\text{)}$$

¹ Conduction

² Convection

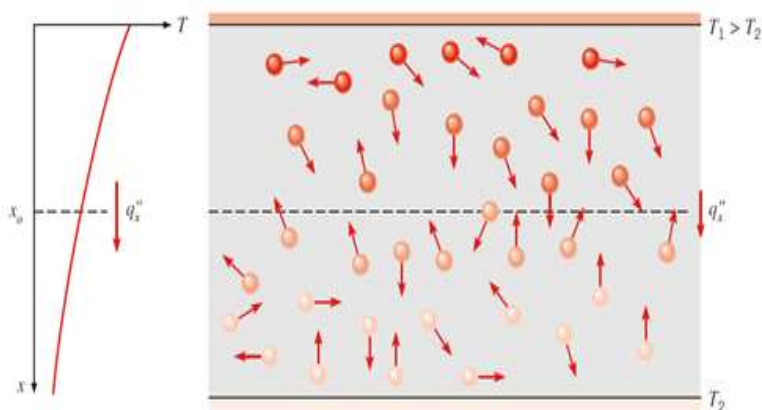
³ Radiation

$k =$ ضریب هدایت حرارتی بر حسب $(w/m.k^{\circ})$

$dt/dx =$ اختلاف درجه حرارت در جهت $x (k^{\circ}/m)$

همانطور که از معادله فوق مشخص است شدت جریان حرارت رابطه مستقیم با ضریب هدایت حرارتی و اختلاف درجه حرارت بین دو سطح دارد.

علامت منفی در معادله فوق به این معنا است که درجه حرارت در جهت کاهش دما انتقال می یابد. شکل ۱-۲ ارتباط بین انتقال حرارت هدایتی با پخش انرژی که بواسطه فعالیت مولکولی صورت می گیرد را نشان می دهد.



نمودار ۱. ارتباط بین انتقال حرارت هدایتی با پخش انرژی بواسطه فعالیت مولکولی

با توجه به نمودار ۱ می توان معادله ۱ را بصورت زیر بیان کرد:

معادله (۲)

$$q = -k \frac{(T_2 - T_1)}{L}$$

ضریب انتقال حرارت هدایتی (K)

خاصیتی از ماده است که معرف میزان عبور انرژی می باشد. اجسامی که، قابلیت انتقال انرژی یا حرارت را بصورت هدایت دارند، هادی^۱ نامیده می شوند.

مواردی که مقدار ضریب انتقال حرارت هدایتی در آنها ثابت است همگن یا هموزن نامیده می شوند. در صورتی که یک ماده از K ثابتی برخوردار نباشد، ناهمگن یا هتروژن خوانده می شود. چنان که در یک ماده K در سه بعد متغیر و در هر بعد به صورت یکسان تغییر کند، به آن ایزوتوپ گفته می شود.

تغییرات ضریب انتقال حرارت هدایتی با دما

الف (گازها

در مورد گازها با ازدیاد دما جنبش مولکولی و بنابراین میزان انتقال انرژی از یک مولکول به مولکول دیگر فزونی می یابد لذا با افزایش دما به طور مرتب بر مقدار K افزوده می شود. ذکر این نکته ضروری است که بطور کلی گازها از مقدار کمتری از K نسبت به سایر حالات ماده (جامد - مایع) برخوردار هستند.

ب (مایعات

در مورد مایعات با افزایش دما مقدار K کاهش می یابد قابل توجه است که در مورد آب بین ۰ تا ۴ درجه سانتی گراد رفتاری عکس حالت پیش گفته مشاهده می شود به عبارت دیگر بین ۰ تا ۴ درجه سانتی گراد با اضافه شدن دما مقدار K نیز زیاد می گردد.

¹ Conductor

ج (جامدات

همچنین رفتار جامدات در برابر ازدیاد درجه حرارت مانند مایعات می باشد. یعنی با افزایش درجه حرارت مقدار K کاهش می یابد اما باید توجه داشت که رفتار آلیاژها که مخلوطی از جامدات هستند، مانند گازها می باشد یعنی با افزایش میزان درجه حرارت مقدار K زیاد می شود.

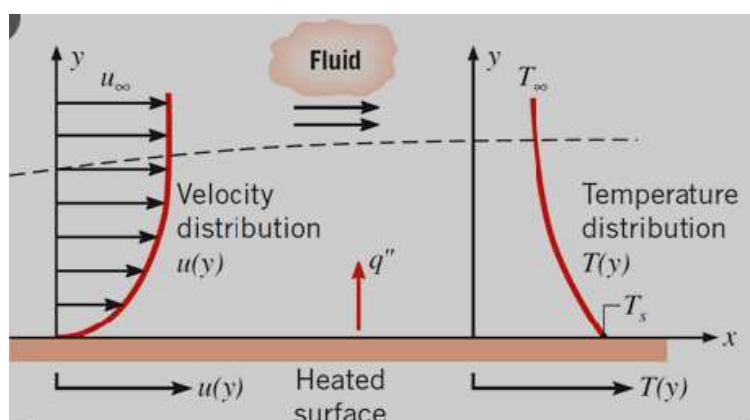
جابجایی

انتقال حرارت از نوع جابجایی شامل دو مکانیسم است :

۱ - انتقال انرژی بواسطه حرکت تصادفی مولکول ها (بخش حرارت)

۲ - انتقال انرژی توسط حرکت توده سیال

به طور معمول از لغت جابجایی هنگامی استفاده می گردد که جمع دو اثر فوق مد نظر باشد در صورتی که انتقال انرژی تنها به واسطه حرکت توده سیال باشد از کلمه ادواکسیون^۱ استفاده می گردد. نمودار ۲ توزیع دما را که ناشی از جابجایی حرارت است را نشان می دهد.

**نمودار ۲. توسعه لایه مرزی در انتقال حرارت جابجایی**

در انتقال حرارت جابجایی از هر نوع که باشد معادله نرخ انتقال حرارت بصورت زیر محاسبه می گردد.

$$q = h(T_s - T_{\infty}) \quad ۳$$

که:

q = شدت جریان حرارتی و بر حسب وات بر متر مربع (W/m^2)

T_s = دمای سطح (K°)

T_{∞} = دمای سیال (K°)

h = ضریب انتقال حرارت جابجایی و بر حسب (W/m^2K°)

رابطه فوق بنام قانون سرمایش نیوتن معروف می باشد.

ضریب انتقال حرارت جابجایی (h)

همانند K در انتقال حرارت هدایتی، h نیز معرف میزان انتقال انرژی بواسطه حرکت سیال می باشد. همانطور که از معادله ۳ مشخص است هر چه مقدار عددی افزایش یابد میزان شدت جریان حرارتی با مکانیسم جابجایی فزونی می یابد.

بطور کلی دو عامل بسیار مهم که بر روی مقدار مؤثر هستند عبارتند از:

الف (درجه حرارت

¹ Advection

صرف نظر از نوع حالات ماده (جامد، مایع، گاز) با افزایش درجه حرارت میزان (h) نیز اضافه می گردد. شرایط یکسان ضریب انتقال حرارت جابجایی در گازها بیش از مایعات می باشد.

ب) نوع جریان

بطور کلی از نظر هیدرودینامیکی جریان سیالات را می توان به دو بخش تقسیم نمود:

۱ - جریان آرام^۱

۲ - جریان درهم^۲

در جریان آرام عمل انتقال حرارت توسط حرکت منظم مولکول های تشکیل دهنده سیال صورت می گیرد در صورتی که در جریان درهم عمل انتقال توسط حرکت نامنظم و گردابی مولکول ها و بسته های تشکیل دهنده سیال^۳ صورت می گیرد. بنابراین عمل انتقال حرارت در جریان درهم سریع تر صورت گرفته و این بدان معنا است که ضریب انتقال حرارت جابجایی در جریان درهم بزرگ تر از ضریب انتقال حرارت جابجایی در جریان آرام است.

از جمله عوامل مؤثر دیگر بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی ماهیت سیال می باشد. همانطوری که بیان شد ضریب انتقال حرارتی جابجایی گازها در شرایط یکسان از مایعات بیشتر می باشد همچنین در مورد دو مایع در یک شرایط یکسان مایعی که از گرانی^۴ کمتری برخوردار است، ضریب انتقال حرارت جابجایی بالاتری را دارا می باشد.

تشعشع

تشعشع حرارتی به نوعی انرژی گفته می شود که از ماده ای با دمای معین ساطع می گردد. جامدات، مایعات و گازها قابلیت صدور انرژی از خود را دارند بطور کلی صدور انرژی به تغییرات الکترونی اتم ها و مولکول های سازنده یک ماده بستگی دارد در مکانیزم تشعشع به وجود محیطی برای انتقال انرژی نیازی نمی باشد و در حقیقت انتقال توسط مکانیزم مذکور در شرایط خلأ بهتر صورت می گیرد. حداکثر شدت جریان حرارت که از یک سطح ساطع می گردد توسط قانون استفان بولتزمن طبق رابطه ۴ ارائه شده است.

$$q = \sigma \cdot Ts^4 \quad \text{معادله ۴}$$

که:

$$q = \text{شدت جریان حرارتی بر حسب وات بر متر مربع (W/m}^2\text{)}$$

$$Ts^4 = \text{دمای مطلق سطح بر حسب کلوین (K}^\circ\text{)}$$

$$\sigma = \text{ثابت استفان - بولتزمن و برابر است با}$$

$$5.18 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}^4$$

اگر شدت جریان حرارت ساطع شده از جسم توسط رابطه فوق بیان گردد، آن جسم را جسم تشعشع کننده ایده آل یا جسم سیاه می نامند. برای اجسام غیر سیاه انرژی حرارتی ساطع شده از رابطه زیر بدست می آید:

$$q = \sigma \cdot \epsilon \cdot Ts^4 \quad \text{معادله ۵}$$

که:

ϵ : یک خاصیت تشعشعی سطح بوده و ضریب صدور نامیده می شود. برای اجسام مختلف ضریب فوق مقادیر متفاوتی را دارا بوده و همواره مقدار آن کوچک تر از ۱ می باشد ($\epsilon < 1$)

¹ Laminar

² Turbulent

³ Vortex

⁴ Viscosity

ماده و تغییر حالت آن از دیدگاه انتقال حرارت

همان طور که از قبل آموخته ایم بطور کلی یک ماده در یکی از سه حالت جامد، مایع و گاز می تواند وجود داشته باشد. در شرایطی که یک جسم شکل ثابت داشته و حجم ثابتی را اشغال کند، آن جسم در حالت جامد است و چنانچه حجم ثابتی را اشغال کند ولی شکل مشخص نداشته باشد به حالت مایع و در حالی که نه حجم مشخص و نه شکل ثابتی داشته باشد در حالت گازی شکل قرار دارد.

البته از دیدگاه میکروسکوپی فاصله بین مولکول ها و ذرات تشکیل دهنده یک گاز به مراتب بیشتر از مایعات و جامدات می باشد و آزادی حرکت در گازها و مایعات بیشتر از جامدات است.

در این بخش فرآیندهای جابه جایی مربوط به تغییر حالت ساده (سیال) مورد بررسی قرار می گیرد. از میان فرآیندهای مربوط به تغییر حالت فیزیکی یک سیال دو حالت جوشش^۱ که مربوط به تغییر حالت سیال از حالت مایع به بخار و تقطیر^۲ که عکس حالت است و فرآیند مربوط به تبدیل حالت سیال از فاز بخار به مایع می باشد را بررسی خواهیم نمود. علت آنچه از میان فرآیندهای جوشش تقطیر، ذوب، انجماد و تصعید (که مربوط به تغییر حالت از فاز جامد به بخار است) تنها دو فرآیند جوشش و تقطیر را بررسی خواهیم نمود. اهمیت آن در صنعت است. فرآیندهای انجام شده در مبدل حرارتی که یکی به نام دیگ بخار^۳ و دیگری به نام تبرید^۴ می باشد دقیقاً همان فرآیندهای جوشش و تقطیر است.

چون این فرآیندها شامل حرکت سیال هستند لذا جوشش و تقطیر به عنوان یکی از مکانیزم های انتقال حرارت جابه جایی تلقی می شوند. ولی این دو مکانیسم توسط ویژگی های منحصر به فرد مشخص شده اند. به علت وجود تغییر فاز انتقال حرارت به سیال می تواند بدون تأثیر دمای سیال صورت گیرد در حقیقت هنگام جوشش و یا تقطیر با اختلاف دمای کم می توان به نرخ انتقال حرارت زیادی دسترسی پیدا نمود. در ادامه بحث فوق لازم است دو اصطلاح مفید در این رابطه تعریف گردد

۱ - حرارت محسوس^۵: مقدار حرارتی که یک جسم دریافت می کند تا دمای آن از T_1 به دمای T_2 افزایش یابد بدون اینکه تغییر فازی در جسم صورت گیرد.

۲- حرارت نهان^۶: مقدار حرارتی که جسم می گیرد تا تغییر فازی در آن صورت گیرد. ذکر این نکته ضروری است که در طول فرآیند تغییر فاز برای یک ماده خالص دما ثابت بوده و مقدار حرارت نهان به مراتب بیشتر از حرارت محسوس است به همین دلیل است که همواره متذکر می شوند که در کوره ها یا بویلرها سیال ورودی به لوله ها باید در حالت دو فازی باشد. در غیر اینصورت لوله های کوره ذوب و از بین خواهد رفت. همانطور که ذکر شد از جمله مبدل هایی که در آن ها تغییر فاز در سیال صورت می گیرد بویلرها هستند که به طور کلی به دو دسته اساسی تقسیم بندی می شوند:

1) Water tube boiler

2) Fire tube boiler

که هر کدام از بویلرهای فوق خود به چند دسته تقسیم بندی می شوند نوع تیوب آب^۷ معمولاً در نیروگاه های بخار از آن استفاده می شود و نوع تیوب آتش^۸ در مجتمع های صنعتی بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد نوع دیگر مبدل ها که تغییر فاز سیال در آن صورت می گیرد و استفاده فراوانی در صنعت دارد کندانسورها هستند که تغییر فاز از حالت بخار به مایع در آن رخ می دهد.

¹ Boiling

² Condensation

³ Boiler

⁴ Condenser

⁵ Sensible Heat

⁶ Latent Heat

⁷ Water tube

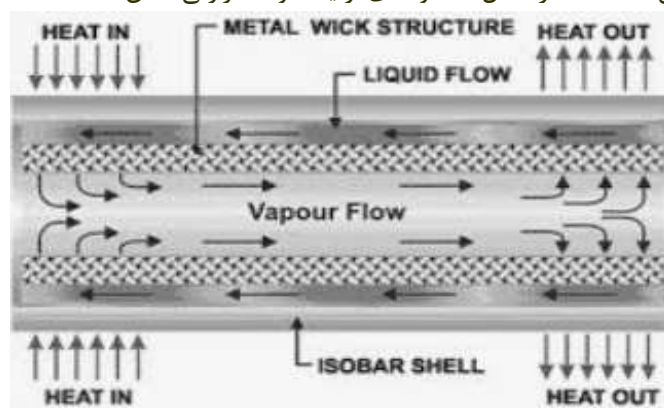
⁸ Fire tube

کندانسورها نیز به طور کلی به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱- کندانسورها با تماس مستقیم بخار و مایع

۲- کندانسورها با تماس غیر مستقیم بخار و مایع

در صنایع بزرگ از هر دو نوع کندانسور به ویژه زمانی که تبدیل بخار آب به آب مایع مورد نظر باشد، استفاده می‌گردد. یکی دیگر از دستگاه‌هایی که بر اساس فرآیند تقطیر و جوشش عمل کرده و جهت تبادل حرارت بین دو سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد لوله‌های حرارتی^۱ هستند. در شکل ۲ نمونه‌ای از یک لوله حرارتی نشان داده شده است.



شکل ۲. لوله حرارتی

همان طور که ذکر شده میزان حرارت نهان و نرخ حرارت انتقال یافته در حالت‌های تغییر فاز بسیار بیشتر از حالتی است که تغییر فازی در سیال صورت نگیرد.

در ضمن ذکر این نکته ضروری است که برای مواد غیر خالص مثل هیدروکربن‌های نفتی نقطه جوش و تقطیر با یکدیگر برابر نیست و در اصطلاح به این دو نقطه، نقاط حباب و شبنم گفته می‌شود.

اندازه‌گیری درجه حرارت

از جمله اطلاعات بسیار مهم در تعیین میزان انتقال حرارت شناخت توزیع درجه حرارت در اجسام و مقادیر عددی آن‌ها در نقاط مختلف می‌باشد.

وقتی جسمی گرم می‌شود سرعت حرکت ارتعاشی مولکول‌های تشکیل دهنده آن افزایش می‌یابد این پدیده باعث تغییراتی در عوامل فیزیکی از قبیل مقاومت الکتریکی، ابعاد و درجه حرارت می‌گردد.

در اثر تشدید فعالیت مولکول‌ها درجه حرارت افزایش یافته و مقدار آن از T_0 به T_1 (درجه حرارت‌های اولیه و ثانویه به ترتیب) می‌رسد بدین لحاظ در اندازه‌گیری درجه حرارت فعالیت مولکول‌ها با یک عبارت کمی بیان می‌شود.

در صنعت، دستگاه‌های مختلفی جهت اندازه‌گیری درجه حرارت مواد وجود دارد. از جمله مهم‌ترین این دستگاه‌ها ترموکوپل‌ها هستند که در ذیل بشرح آن پرداخته می‌گردد.

ترموکوپل‌ها^۲

همانطور که بیان گردید از جمله وسایل اندازه‌گیری درجه حرارت در دستگاه‌های صنعتی ترموکوپل‌ها هستند. هنگامیکه دو سیم از جنس مختلف (به‌عنوان مثال آهن و کنستانتان) در یک پایانه با یکدیگر متصل باشند، تشکیل یک حلقه و در نتیجه یک مدار الکتریکی را می‌دهند.

نقطه اتصال دو سیم اصطلاحاً مهره^۱ نامیده می‌شود. شکل ۳ یک ترموکوپل را نشان می‌دهد.

^۱Heat Pipe

^۲ Thermo Couples



شکل ۳. ترموکوپل

اگر یکی از اتصالات نسبت به دیگری از درجه حرارت بالاتری برخوردار باشد اختلاف ولتاژی که تابع درجه حرارت است بین دو اتصال ایجاد می‌شود. به‌وسیله ارتباط دادن یک کنترل الکتریکی به مدار و تثبیت یکی از اتصالات در درجه حرارت ثابت یک میزان از درجه حرارت در اتصال دیگر حاصل شده که متناسب با مقدار ولتاژ اندازه گیری شده در کنتور الکتریکی است. جدول ۱ فلزات دوگانه^۲ و ترکیب آن‌ها با یکدیگر را در ترموکوپل های تجارتي که عمدتاً در صنایع از آن‌ها استفاده می گردد، نشان می‌دهد.

جدول ۱. انواع ترموکوپل های تجارتي

ردیف	ترموکوپل	قطب مثبت	قطب منفی
۱	کنستانتان _ آهن	آهن	کنستانتان
۲	کرومل _ آلومل	کرومل	آلومل
۳	پلاتین _ پلاتین و ۱۰٪ رادیم	پلاتین و ۱۰٪ رادیم	پلاتین
۴	پلاتین _ پلاتین و ۱۳٪ رادیم	پلاتین و ۱۳٪ رادیم	پلاتین
۵	مس _ کنستانتان	مس	کنستانتان

دستگاه‌های انتقال حرارت (مبدل‌های حرارتی)

در کارخانجات شیمیایی و پالایشگاه‌ها به منظور صرفه جویی در هزینه هایی از قبیل مخارج ساخت دستگاه‌ها و سوخت انتقال حرارت از یک سیال به سیال دیگر بسیار مد نظر قرار گرفته است. وضعیت اقتصادی پروژه‌ها بیشتر به‌وسیله سرویس دهنده‌ها^۳ کنترل می گردد. بدین منظور از انرژی حرارتی ذخیره شده در سیالات جهت گرم نمودن سیالات سرد استفاده و در نتیجه رد و بدل شدن حرارت از سیال گرم به سیال سرد تبادل حرارتی انجام می‌گیرد. بطور کلی انتقال حرارت از یک نقطه به نقطه دیگر بر اساس اختلاف دمای بین آن دو نقطه می باشد. همان گونه که در انتقال جریان برق اختلاف پتانسیل و در جریان سیالات اختلاف فشار نیروی محرکه می باشد در انتقال حرارت نیز اختلاف درجه حرارت نیروی محرکه است و باعث انتقال گرما از یک نقطه به نقطه دیگر می‌شود بنابراین از با صرفه ترین دستگاه‌های صنعتی مبدل‌های حرارتی جهت انتقال حرارت از سیالی به سیال دیگر استفاده می گردد.

تعریف مبدل حرارتی

دستگاهی است که به‌وسیله آن انتقال حرارت انجام گرفته و بین دو سیال تبادل گرما ایجاد می‌نماید. به عبارت دیگر مبدل‌های حرارتی دسته‌ای از دستگاه‌های انتقال حرارت هستند که در آن‌ها حرارت بین دو سیال در دو قسمت مختلف پروسس مبادله می‌شود. با توجه به این که آب خنک و بخار آب جزء عوامل اصلی پروسس محسوب نمی شوند و به عنوان سرویس دهنده تلقی

¹ Bead² Bi Metal³ Utilities

می گردند، آن دسته از دستگاههای انتقال حرارت که در آن ها بخار آب و آب خنک به عنوان عوامل گرم کننده و خنک کننده بکار گرفته می شوند جزء مبدل های حرارتی محسوب نمی شوند. سایر دستگاه های انتقال حرارت عبارتند از:

- ❖ گرم کننده ها^۱
- ❖ خنک کننده ها^۲
- ❖ چگالنده ها^۳
- ❖ تغلیظ کننده ها^۴
- ❖ تبخیر کننده ها^۵
- ❖ ریبو یلرها^۶
- ❖ کوره ها^۷
- ❖ برج های خنک کن^۸.

در این میان تنها برج های خنک کن، دو سیال را که عمل انتقال حرارت بین آن ها صورت می گیرد بطور مستقیم در تماس می گذارد و به همین علت است که دو عمل انتقال حرارت و جرم بطور هم زمان بین دو سیال هوا و آب انجام می گیرد در سایر دستگاه های انتقال حرارت تماس بین دو سیال غیر مستقیم است. همان طور که در تمام مطالب بالا صحبت از مبادله حرارت در یک دستگاه انتقال حرارت می باشد، بدین معناست که حرارت در این دستگاه ها به هیچ وجه تبدیل نشده، بلکه مبادله می شود.

انواع مبدل های حرارتی

مبدل های حرارتی از نقطه نظرهای مختلف دسته بندی می شوند.

تقسیم بندی انواع مبدل های حرارتی از نقطه نظر نوع و سطح تماس سیال سرد و گرم :

مبدل های حرارتی از نوع Recuperative

در این نوع مبدل های حرارتی دو سیال سرد و گرم که به ترتیب از دمای پائین و بالاتری برخوردار هستند توسط یک سطح جامد و ثابتی از یکدیگر جدا شده اند و انتقال انرژی از طریق سطح مذکور صورت می گیرد. اکثریت قریب به اتفاق مبدل های موجود در صنعت از این دسته هستند.

مبدل های حرارتی از نوع Regenerative

در این نوع از مبدل های حرارتی سطح جدا کننده سیال سرد یا گرم ثابت نبوده و بطور متناوب قسمت هایی از سطح مذکور در معرض حرکت سیال سرد یا گرم قرار می گیرند. این مبدل ها در مقیاس های آزمایشگاهی و تحقیقاتی بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند.

مبدل های حرارتی از نوع تماس مستقیم^۹

در این نوع از مبدل های حرارتی سیال سرد و گرم بطور مستقیم تماس حاصل کرده و تبادل انرژی یا حرارت انجام می گیرد این مبدل ها به طور معمول از راندمان حرارتی بالایی برخوردار هستند.

¹ Heaters

² Coolers

³ Condensers

⁴ Evaporators

⁵ Vaporizers

⁶ Reboilers

⁷ Furnaces

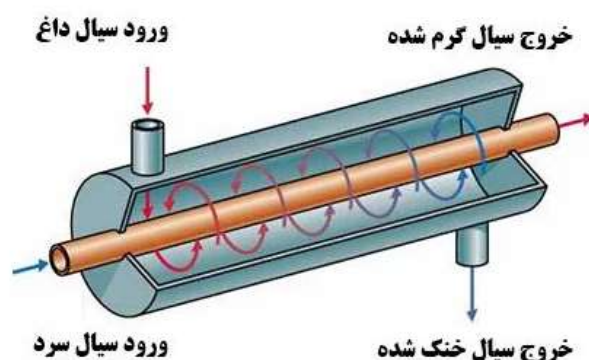
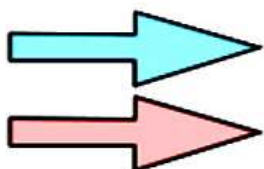
⁸ Cooling Towers

⁹ Direct Contact

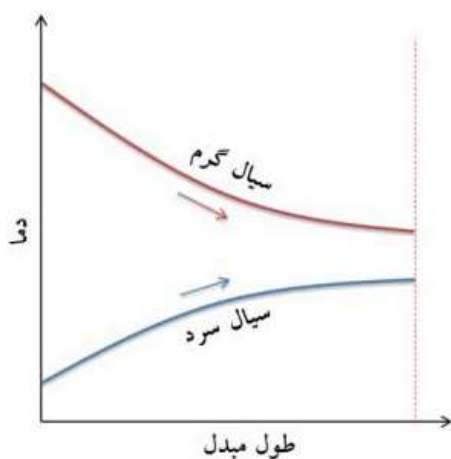
نمونه ای از این مبدل‌ها برج‌های خنک‌کن^۱، کولرهای آبی و گرمکن‌های باز آب^۲ در نیروگاه‌های بخار را می‌توان نام برد. تقسیم‌بندی انواع مبدل‌های حرارتی از نقطه نظر جهت جریان سیال سرد و گرم برای این اساس مبدل‌های حرارتی به سه دسته اساسی تقسیم می‌شوند:

مبدل‌های حرارتی از نوع جریان موازی^۳

در این نوع مبدل‌ها جهت جریان سیال گرم و سرد موافق یکدیگر می‌باشند. نکته ای که باید توجه داشت دمای سیال سرد خروجی از مبدل هیچ‌گاه به دمای سیال گرم خروجی نمی‌رسد شکل ۴ یک مبدل حرارتی از نوع جریان موازی را نشان می‌دهد. نمودار ۳ نزدیک شدن مقدار عددی دو دمای یاد شده مستلزم بکارگیری سطح انتقال حرارت موثر بسیار بزرگ می‌باشد.



شکل ۴. مبدل حرارتی از نوع جریان موازی



نمودار ۳. عدم رسیدن دمای سیال گرم و سرد خروجی

$$T_{ci} = \text{دمای سیال سرد ورودی}$$

$$T_{co} = \text{دمای سیال سرد خروجی}$$

$$T_{hi} = \text{دمای سیال گرم ورودی}$$

$$T_{ho} = \text{دمای سیال گرم خروجی}$$

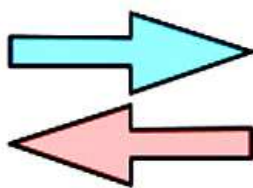
مبدل‌های حرارتی از نوع جریان مخالف^۴

^۱ Cooling Towers

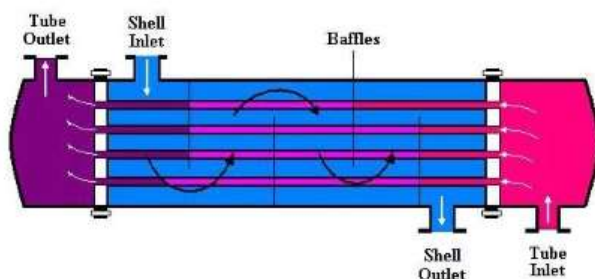
^۲ Open Feed Water Heater

^۳ Parallel flow

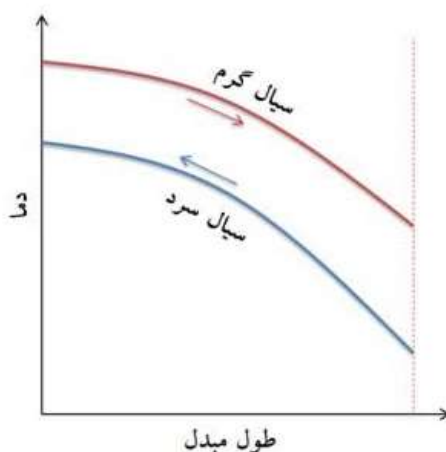
^۴ Counter flow



در شرایطی که جهت جریان سیال‌های سرد و گرم برخلاف یکدیگر باشد، مبدل را جریان مخالف می‌نامند. باید توجه داشت در این نوع مبدل‌ها امکان افزایش دمای سیال سرد خروجی نسبت به سیال گرم خروجی وجود دارد. این مبدل‌ها در شرایط یکسان از سطح انتقال حرارت کمتری نسبت به مبدل‌های Co Current برخوردار می‌باشند. شکل ۵ یک مبدل حرارتی از نوع جریان مخالف و نمودار ۴ دمای سیال سرد و گرم در این مبدل را نشان می‌دهد.

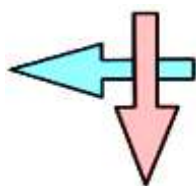


شکل ۵. مبدل حرارتی از نوع جریان مخالف



نمودار ۴. نمودار دمای سیال سرد و گرم

مبدل‌های حرارتی از نوع جریان متقاطع^۱



در این نوع مبدل‌ها جهت جریان‌های سرد و گرم عمود بر هم می‌باشند. یک نمونه از مبدل حرارتی جریان متقاطع، مبدل حرارتی هوا خنک است که در آن هوا به‌صورت عمود بر تیوب‌ها دمیده شده و انتقال حرارت صورت می‌گیرد. به‌عنوان متداول‌ترین نمونه می‌توان از رادیاتور اتومبیل‌ها نام برد. شکل شماره ۶ یک مبدل جریان متقاطع را نشان می‌دهد.

^۱ Cross flow



شکل ۶. مبدل حرارتی از نوع جریان متقاطع

تقسیم‌بندی مبدل‌های حرارتی از نقطه نظر مکانیسم انتقال حرارت بین سیال و انتقال حرارت بین سیال سرد و گرم

بر این اساس مبدل‌های حرارتی به دو دسته تقسیم می‌شوند :
 الف) مبدل‌های حرارتی که مکانیسم انتقال حرارت از نوع تشعشعی بوده و به آن‌ها مبدل‌های حرارتی آتشین^۱ ها^۱ گفته می‌شود از جمله این مبدل‌ها می‌توان به کوره ها و بویلرها اشاره کرد.
 ب) مبدل‌هاییکه مکانیسم انتقال حرارت بین سیال سرد و گرم بصورت ترکیبی از جابجایی و هدایت است. از جمله این مبدل‌ها می‌توان به مبدل‌های پوسته و لوله که در صنعت از کاربرد بسیار زیادی نیز برخوردار هستند، اشاره کرد.

تقسیم‌بندی مبدل‌های حرارتی از نقطه نظر نوع کاربرد بر اساس استاندارد TEMA^۲

بر این اساس مبدل‌های حرارتی به سه دسته اساسی به شرح زیر تقسیم‌بندی می‌شوند
 الف) گروه «R» مبدل‌هایی که در صنایع نفت به کار می‌روند.
 ب) گروه «C» مبدل‌هایی که کاربرد عمومی و تجاری دارند.
 ج) گروه «B» مبدل‌هایی که در صنایع شیمیایی استفاده می‌شوند.

تقسیم‌بندی مبدل‌های حرارتی از نقطه نظر ساختمان مکانیکی آن‌ها

الف) مبدل‌های حرارتی از نوع دو لوله ای^۳
 از جمله این مبدل‌ها می‌توان به انواع پوسته و لوله - کولر هوایی^۴، لوله ای دوبل و مبدل حرارتی از نوع تماس مستقیم^۵ اشاره نمود.

ب) مبدل‌های حرارتی دارای صفحه^۶

مانند Plate-Fin, Lamella, Spiral, Gasketless, Gasketed

پ) مبدل‌های مقاوم در برابر خوردگی

این دسته از مبدل‌های حرارتی را بر اساس نوع پوشش دهی^۷ که در آن‌ها به کار گرفته شده است به سه دسته شیشه ای^۸، گرافیتی^۹ و تفلون^{۱۰} دسته بندی می‌کنند باید توجه داشت که انواع مبدل‌های حرارتی ذکر شده می‌توانند بر اساس شرایط عملیاتی استفاده شوند.

ت) مبدل‌های حرارتی با کاربردهای ویژه

¹ Fired Heat Exchangers

² Tubular Exchanger manufacturers Association

³ Tubular

⁴ Aircooler

⁵ Heat Pipe

⁶ Plate

⁷ Coating

⁸ Glass

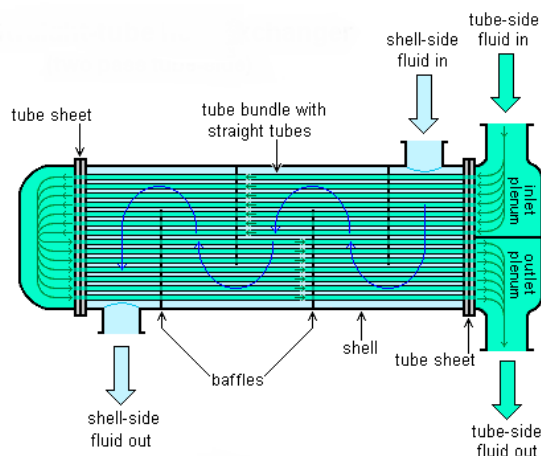
⁹ Graphite

¹⁰ Teflon

مانند احیا کننده دوار^۱ و گرمایش الکتریکی^۲

قطعات و اجزاء مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله

مبدل‌های پوسته و لوله به عنوان متداول‌ترین و رایج‌ترین مبدل‌های حرارتی که در صنایع کوچک و بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرند، دارای اجزاء و قطعاتی می‌باشند که در زیر به آن‌ها پرداخته می‌شود. یک مبدل حرارتی پوسته و لوله در واقع شامل دسته‌ای لوله فولادی محصور شده در یک مخزن که در شکل ۷ نشان داده شده است، می‌باشد.



شکل ۷. قطعات و اجزاء مبدل حرارتی پوسته و لوله

مخزن نشان دهنده پوسته مبدل حرارتی بوده و از آن پر شده است حرارت از روغن گرم جاری در میان لوله‌ها به آب سرد اطراف لوله‌ها منتقل می‌شود. هادی حرارت دیواره لوله می‌باشد. فضای داخلی مبدل محوطه‌ای محصور بین لوله‌ها و پوسته است. سیال درون لوله‌ها، سیالی که بیرون لوله و داخل پوسته جریان دارد، آب می‌باشد شکل ۷ نشان دهنده مطالب پیش گفته می‌باشد. شکل ۸ ساختمان نمونه‌ای از مبدل حرارتی نوع لوله^۳ و پوسته^۴ را نشان می‌دهد.



شکل ۸. ساختمان مبدل حرارتی پوسته و لوله

لوله‌ها بین دو صفحه لوله‌ها نگهداری می‌شوند. ترکیب لوله‌ها، صفحه لوله‌ها و دسته لوله‌ها^۵ نامیده می‌شود.

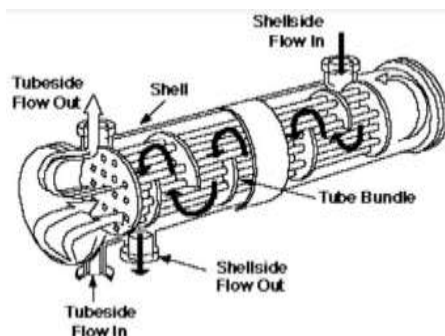
^۱ Rotary Regenerator

^۲Electrically Heated

^۳ Shell

^۴ Tube

^۵ Tube Bundle



شکل ۹. مسیر جریان در میان پوسته و لوله یک مبدل حرارتی

شکل ۹ مسیر جریان در میان پوسته و لوله های یک مبدل حرارتی را نشان می دهد. روغن گرم از درون لوله ها عبور کرده و سپس از طریق خروجی فضای لوله ها خارج می شود. آب سرد بدرون ورودی فضای پوسته و اطراف لوله ها جریان یافته و از طریق خروجی فضای پوسته خارج می گردد. در این مثال حرارت از سیالی که در داخل لوله ها جریان دارد به سیالی که در فضای پوسته جاری است، منتقل می شود.

انواع مبدل های دارای پوسته و لوله

مبدل های سر ثابت^۱

در مبدل های نوع سر ثابت، صفحه لوله ها به پوسته جوش خورده و دسته لوله ها بطور ثابت نصب شده اند. انبساط و انقباضی که بدلیل تغییرات درجه حرارت ایجاد می شود، کششی بر دسته لوله ها وارد می کند. چون در این نوع مبدل از انبساط در لوله ها ممانعت می شود، مبدل های سر ثابت مواقعی بکار می روند که تغییرات درجه حرارت محدود باشد.



شکل ۱۰. ساختمان یک اتصال انبساطی مبدل حرارتی

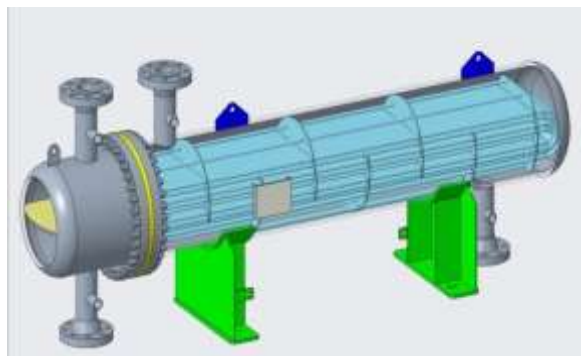
شکل ۱۰ ساختمان یک اتصال انبساطی^۲ را که در پوسته یک مبدل حرارتی سر ثابت بکار رفته نشان می دهد. وقتی که لوله ها داغ تر شوند، منبسط می گردند اتصال انبساطی به پوسته اجازه انبساط می دهد. وقتی که لوله و پوسته سرد شوند اتصال انبساطی و لوله ها منقبض شده، کشش وارده بر نقاط جوش خورده و لوله ها و پوسته کاهش می یابد. بدلیل مشکلاتی که در بازرسی و تمیز کردن مبدل های سر ثابت وجود دارد عموماً در جایی استفاده می گردند که احتمال کثیف شدن قسمت پوسته محدود باشد. بدلیل اینکه دسته لوله ها را از قسمت پوسته نمی توان خارج کرد فضای پوسته مبدل سر ثابت باید به وسیله مواد شیمیایی نیز تمیز گردد.

¹ Fixed Tube Sheet Exchangers

² Expansion - Joint

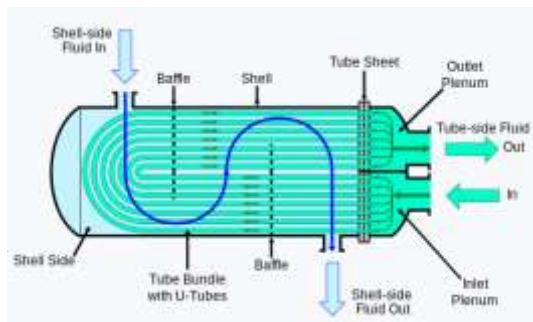
مبدل‌های U تیوب^۱

یک مبدل U تیوب فقط دارای یک صفحه لوله ها (Tube Sheet) می باشد. انحراف دهنده کانال بین صفحه لوله ها و سرپوش کانال پیچ و مهره شده است. صفحه لوله ها و دسته لوله ها یک واحد را تشکیل می دهند. با بازکردن پیچ و مهره ها کانال از پوسته جدا شده و صفحه لوله ها و دسته لوله ها را می توان از پوسته خارج نمود، بطوری که امکان تمیز کردن قسمت خارجی لوله ها فراهم شود. بهر حال وجود خم در لوله ها مانعی برای تمیز کردن و بازرسی قسمت داخلی لوله ها می باشد. چون در مبدل حرارتی (U - Tube) لوله ها تنها به یک صفحه محکم شده اند، لوله ها آزادند که انبساط حاصل کنند.



شکل ۱۱. نمایی از یک مبدل U - Tube

شکل شماره ۱۱ نمایی از یک مبدل و شکل ۱۲ مسیر جریان در مبدل U - Tube را نشان می دهد. انحراف دهنده ای که کانال را تقسیم کرده سیال ورودی به قسمت لوله ها را فقط به ورودی لوله های نیم فوقانی هدایت می کند. سیال قسمت لوله ها، درون لوله ها جریان می یابد و خم لوله ها را دور می زند و از میان بخش پایینی کانال خارج می شود. جریان قسمت لوله ها، در این حالت یک جریان دو مسیر^۲ و جریان قسمت پوسته در این مبدل یک جریان یک مسیر^۳ است.



شکل ۱۲. مسیر جریان در مبدل U - Tube

مبدل‌های سرشناور^۴

الف) نوع بیرون کشیدنی^۵

در این مبدل، صفحه لوله های سمت راست بین کانال و پوسته پیچ و مهره شده و در وضعیت ثابتی قرار دارد.

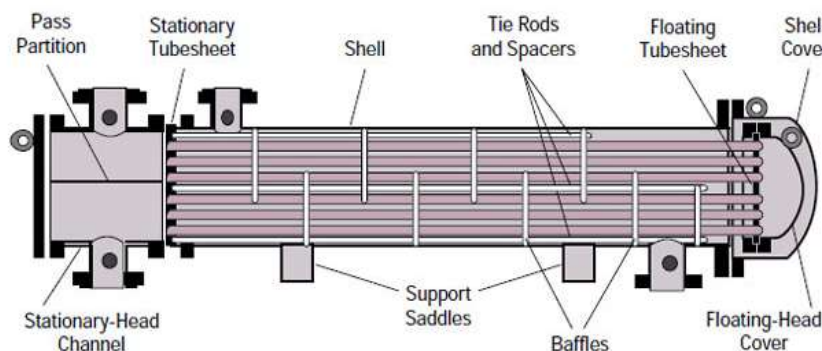
¹ U - Tube or u - Ben Exchangers

² Two Pass

³ One Pass

⁴ Floating Head Exchangers

⁵ Pull Through Type



شکل ۱۳. اجزا مبدل حرارتی سر شناور

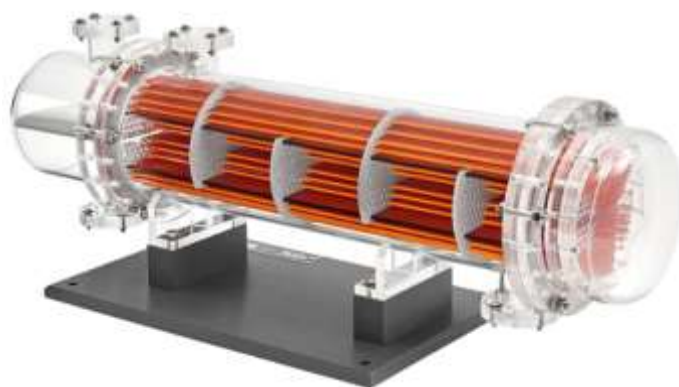
اما صفحه لوله های سمت چپ با سرپوش مربوط به آن درون پوسته شناور است و می تواند بطور افقی حرکت کند. بدلیل وزن دسته لوله ها حرکت عمودی در این قسمت وجود ندارد اما چون دسته لوله ها و سر شناور می توانند بطور افقی حرکت کنند، لوله ها برای انقباض و انبساط آزادند بعد از باز کردن پیچ و مهره فلنج کانال و صفحه ثابت لوله ها دسته لوله ها و سر شناور را می توان به عنوان واحدی یکپارچه بیرون کشید. بدین طریق امکان تمیز کردن و بازرسی قسمت خارجی لوله ها میسر می گردد.

در نتیجه امکان دسترسی به دو صفحه لوله ها و قسمت داخلی لوله ها فراهم می شود. با برداشتن سرپوش سر شناور و سرپوش، کانال بازرسی و تمیز کردن قسمت داخلی لوله ها امکان پذیر می گردد. در یک مبدل حرارتی سر شناور (نوع بیرون کشیدنی) تمام قسمتهای مبدل را می توان بازرسی و تمیز کرد.

یک اشکال این نوع مبدل دارد و آن اینکه فاصله موجود بین پوسته و لوله ها زیاد است. این فاصله برای تطبیق صفحه شناور لوله ها با پوسته می باشد. چون در این فضا نمی توان لوله ای بکار برد، این فضا بلا استفاده می ماند. علاوه بر این احتمال عبور سیال از درون فضای خالی نسبت به دسته لوله ها بیشتر است به این دلیل فضای خالی بین پوسته و دسته لوله ها بازده کار مبدل نوع بیرون کشیدنی را کاهش می دهد. شکل ۱۳ اجزا یک مبدل سر شناور را نشان می دهد.

(ب) مبدل حرارتی سر شناور با دو نیم حلقه^۱

یکی دیگر از مبدل های سر شناور دارای دو نیم حلقه می باشد که قطر سرپوش پوسته^۲ از قطر بقیه پوسته که لوله ها در آن جای دارند، بزرگتر است. لوله ها و صفحه لوله ها و سرپوش سر شناور را بصورت یکپارچه نمیتوان از درون پوسته بیرون کشید. شکل ۱۴ یک مبدل حرارتی سر شناور با دو نیم حلقه را نشان می دهد.



شکل ۱۴. مبدل حرارتی سر شناور با دو نیم حلقه

در این جا نوع مبدل دارای دو نیم حلقه و نوع بیرون کشیدنی را با هم مقایسه خواهیم نمود.

^۱ Split Backing- Ring

^۲ Shell Cover

از مزایای نوع بیرون کشیدنی این است که دسته لوله ها و سرشناور را می توان از طریق پوسته بصورت یکپارچه بیرون کشید. برای بیرون کشیدن دسته لوله ها در مبدل دارای دو نیم حلقه ابتدا بایستی سرپوش سر شناور و دو نیم حلقه برداشته شوند. در ضمن فاصله آزاد^۱ بین دسته لوله ها و پوسته در مبدل دارای دو نیم حلقه کمتر است. اگر فضای پوسته برای دو مبدل یکسان باشد، در مبدل، سرشناور از لوله های بیشتری استفاده می شود. پس مبدل دارای دو نیم حلقه راندمان بیشتری دارد. مبدل دارای دو نیم حلقه دارای قطعات بیشتر می باشد، لذا برای ساختن آن هزینه بیشتری مصرف می شود. پیاده کردن اجزاء مبدل دارای دو نیم حلقه مشکل تر است. ابتدا پیچ و مهره بین سرپوش کانال و پوسته را باز می کنیم، سپس سرپوش سرشناور و دو نیم حلقه را با باز کردن پیچ و مهره های مربوطه از صفحه شناور لوله ها جدا می نماییم. آنگاه کانال از انتهای دیگر پوسته باز و سرانجام دسته لوله از انتهای کانال بیرون کشیده می شود. بدلیل پیاده کردن اجزا مبدل زمان بیشتری تلف شده و در نتیجه هزینه زیادتری مورد نیاز است.

پدیده های گرفتگی^۲ و مسدود شدن حرکت بخار^۳ گرفتگی (Fouling)



شکل ۱۵. گرفتگی در یک مبدل

به هر رسوب نامطلوب روی سطوح انتقال حرارت که منجر به افزایش مقاومت حرارتی و کاهش میزان انتقال حرارت بین سیال سرد و گرم می شود، گرفتگی اطلاق می شود. (شکل ۱۵) آقای سومر اسکالس^۴ در سال ۱۹۸۰ عوامل ایجاد گرفتگی در لوله های مبدل حرارتی را در ۶ گروه زیر خلاصه نمود:

الف) رسوب های مواد نامحلول

رسوب مواد نامحلول روی سطح انتقال حرارت باعث تشکیل مقاومت های حرارتی می شود سولفات کلسیم، سیلیکات منیزیم و کربنات لیتیم نمونه ای از این مواد هستند که با افزایش درجه حرارت میزان انحلال آن ها کم می شود.

ب) رسوب های ویژه

زمانی که ذرات معلق جامد مانند (ماسه غبار و ...) در سیال وجود دارند، تجمع آن ها باعث تشکیل رسوب و نتیجه آن افزایش میزان مقاومت در مقابل انتقال حرارت می باشد.

پ) رسوب های تشکیل دهنده ناشی از واکنش های شیمیایی

این رسوب ها با انجام واکنش شیمیایی روی سطوح انتقال حرارت تشکیل می شود. نمونه ای از این واکنش ها عبارتند از پلیمریزاسیون، کراکینگ، کک سازی و هیدروکربن ها.

ت) رسوب های تشکیل شده در اثر خوردگی

¹ Clearance

² Fouling

³ Vapor Locking

⁴ Somer Scales

در این مورد سطح انتقال حرارت لوله ها در یک واکنش شیمیایی شرکت می کند و خود به عنوان یک ماده اولیه عمل کرده و در طول واکنش خورده می شود.

ث) رسوب های بیولوژیکی

در اثر وجود میکروارگانیسم ها و مجاورت آن ها در کنار سطوح انتقال حرارت تشکیل می شود.

ج) رسوب های ناشی از سرد شدن^۱ مایعات

این رسوب ها در نتیجه عمل انجماد مایعات و سرد کردن مذاب ها در مبدل های حرارتی تشکیل می شود.

نکاتی در ارتباط با مبدل های حرارتی پوسته و لوله

در این بخش بطور اختصار به نکاتی اشاره خواهد شد که در حین کار کردن با مبدل های حرارتی باید مورد توجه قرار گیرند.

نوع سیال و مبدل حرارتی

الف) اگر دو سیال تمیز، پاک و بدون رسوب باشند انتخاب محل جریان آن ها در لوله با پوسته اشکالی ایجاد نمی کند و تمام انواع مبدل های حرارتی در این مورد قابل استفاده می باشند.

ب) اگر یکی از دو سیال کثیف باشد، بهتر است در لوله ها جریان پیدا کند چون تمیز کردن لوله ها آسان تر است و در این صورت دسته لوله ها باید از نوع مستقیم باشد و نوع U - تیوب نامناسب است.

پ) اگر یکی از دو سیال گازی و یا گاز همراه با مایع باشد، بهتر است که در پوسته جریان داشته باشد.

ث) اگر نگهداری سرما یا گرمای یکی از دو سیال از نظر اقتصادی مهم باشد، بهتر است در لوله ها جریان داشته باشد.

ج) اگر سرما و یا گرمای سیالی که در پوسته جریان دارد، زیاد باشد و نیز اگر کنترل درجه حرارت دو سیال مهم باشد در این صورت مبدل حرارتی باید عایق بندی شود.

ح) اگر اختلاف درجه حرارت در سیال زیاد باشد از مبدل حرارتی نوع U-Tube یا Floating Head باید استفاده نمود. استفاده از مبدل حرارتی نوع Fixed Head وقتی ممکن است که پوسته این مبدل حرارتی دارای اتصال انبساطی^۲ باشد.

خ) اگر هدف مایع کردن بخار^۳ باشد در این صورت آن بخار باید وارد پوسته مبدل حرارتی شود.

د) اگر یکی از دو سیال آب باشد درجه حرارت آن نباید از (۱۲۰ درجه فارنهایت یا ۵۰ درجه سانتیگراد) تجاوز نماید چون در غیر این صورت در داخل مبدل حرارتی تشکیل رسوب کربنات کلسیم خواهد داد.

ذ) اگر یکی از دو سیال در حین تبادل حرارت درجه حرارتش به حدی برسد که امکان تبخیر داشته باشد (مایع) بهتر است که از قسمت پایین مبدل وارد و از بالای آن خارج گردد.

ر) اگر حجم دو سیال (سرعت $\times$ قطر جریان) کم و اختلاف درجه حرارت آن ها زیاد باشد در این صورت از مبدل های حرارتی چند مسیر و یا مبدل حرارتی دو لوله ای^۴ استفاده می شود.

^۱ Freezing

^۲ Expansion Joint

^۳ Condensation

^۴ Double Pipe

منابع

- [1] Z.Y. Guo a, W.Q. Tao b, R.K. Shah,” The field synergy (coordination) principle and its applications in enhancing single phase convective heat transfer”, 26 January 2005, International Journal of Heat and Mass Trans-fer 48 (2005) 1797–1807
- [2] Xiang-hui Tan, Dong-sheng Zhu, Guo-yan Zhou, Li-ding Zeng, “Heat transfer and pressure drop performance of twisted oval tube heat ex-changer”, 29 June 2012, Applied Thermal Engineering 50 (2013) 374e383
- [3] Xiang-hui Tan, Dong-sheng Zhu, Guo-yan Zhou, Li-ding Zeng,” Ex-perimental and numerical study of convective heat transfer and fluid flow in twisted oval tubes”, 14 May 2012, International Journal of Heat and Mass Transfer 55 (2012) 4701–4710
- [4] Sheng Yang, Li Zhang, Hong Xu,” Experimental study on convective heat transfer and flow resistance characteristics of water flow in twisted elliptical tubes”, 30 May 2011, Applied Thermal Engineering 31 (2011) 2981e2991
- [5] ÖzdenAğra, HakanDemir, Ş. ÖzgürAtayılmaz, FatihKantaş, AhmetSelimDalkılıç,” Numerical investigation of heat transfer and pressure drop in enhanced tubes”, 9 August 2011, International Communications in Heat and Mass Transfer 38 (2011) 1384–1391
- [6] Gh.S. Jahanmir, F. Farhadi, “Twisted bundle heat exchangers perfor-mance evaluation by CFD (CJ12/5054)”, 14 September 2012, International Communications in Heat and Mass Transfer 39 (2012) 1654–1660
- [7] Luai M. Al-Hadhrami, Aftab Ahmad & Abdullah Al-Qahtani,” Exper-imental Study of Fouling Resistance in Twisted Tube Heat Exchanger”, 11 Apr 2012, Heat Transfer Engineering, 33(12):1024–1032, 2012
- [8] Li Zhang, Sheng Yang, Hong Xu,” Experimental study on condensa-tion heat transfer characteristics of steam on horizontal twisted elliptical tubes”, 23 December 2011, Applied Energy 97 (2012) 881–887
- [9] Smith Eiamsa-ard a, PongjetPromvonge,” Performance assessment in a heat exchanger tube with alternate clockwise and counter-clockwise twisted-tape inserts”, 8 January 2010, International Journal of Heat and Mass Transfer 53 (2010) 1364–1372
- [10] BlazoLjubicic”, testing of twisted Tube Exchangers in Transition Flow Regime”, Brown fin tube company, 12602 FM 529, Houston, TX 77041
- [11] R. Donald Morgan,” TWISTED TUBE HEAT EXCHANGER TECH-NOLOGY”, Brown Fintube Company.
- [12] Dr. D.S. Kumar, “Heat and Mass Transfer”, Katson books, 7thEdition: 2007-2008.
- [13] T.S. Wang and Y.S. Chen, 1993, “Unified Navier–Stokes flow field and performance analysis of liquid rocket engines,” AIAA Journal, vol. 9, pp. 678–685.
- [14] C. X. Lin and M. A. Ebadian, 1997, “Developing turbulent convective heat transfer in helical pipes,” International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.40, 3861-3873.
- [15] Timothy J. Rennie and Vijaya G.S. Raghavan, 2005, “Experimental studies of a double-pipe helical heat exchanger,” Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 29, pp. 919–924.
- [16] Timothy J. Rennie and Vijaya G.S. Raghavan, 2006, “Numerical studies of a double-pipe helical heat exchanger,” Applied Thermal Engineering, vol. 26, 1266–1273.
- [17] I. Conte and X.F. Peng, 2008, “Numerical investigations of laminar flow in coiled pipes,” Applied Thermal Engineering, vol.28, 423–432.