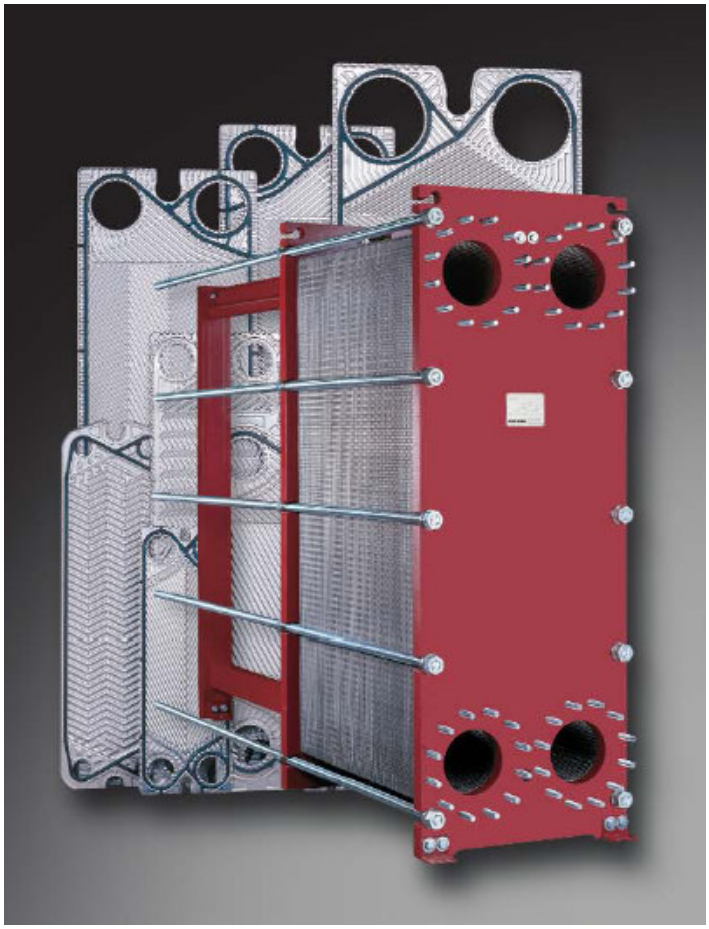
شرکت ملی گاز ایران



مبدل های صفحه ای

Plate heat exchangers

آموزش و تجهیز نیروی انسانی

نام کتاب : آشنایی با مبدلهای صفحه ای

تالیف : محمدصادق یوسف‌زادگان

ترجمه : سید مهدی میر محمد، علیرضا ساعتچی، ساقی صالحی، سید احسان امام جمعه

ویرایش : خلیل قنادی

چاپ: بهار ۱۳۸۹

ناشر: آموزش و تجهیز نیروی انسانی شرکت ملی گاز ایران (آموزش فنی و تخصصی)

چاپ و صحافی : چاپخانه شرکت ملی گاز ایران

کلیه حقوق برای ناشر محفوظ میباشد.

تهران – میدان هفتم تیر – خیابان مفتح جنوبی – خیابان شیرودی – پلاک ۸ – اداره آموزش و تجهیز نیروی انسانی – آموزش فنی و تخصصی

عنوان دوره: آشنایی با مبدلهای صفحه ای		**مدت**: ۱۸ ساعت
شرایط شرکت کنندگان: کارشناسان و سرپرستان واحدهای عملیاتی شرکتهای پالایش گاز		
نوع پودمان: دوره آموزشی	**سطح**: کارشناسی	**پیش نیاز:** آشنایی با اصول انتقال حرارت
امکانات اجرایی: کلاس، کتاب، جزوه، فیلم و CD		
اهداف آموزشی: شرکت کنندگان پس از پایان دوره قادر خواهند بود: ساختارو اجزای اصلی مبدلهای صفحه ای و نقش هر بخش را بیان کنند. مزایا و معایب مبدلهای صفحه ای را نسبت به مبدلهای پوسته و لوله بیان کنند. مشکلات عملیاتی اصلی و راههای کاهش و عدم مواجهه با این مشکلات را شناسایی کنند. نسبت به طراحی اولیه یک مبدل صفحه ای برای یک کاربرد به خصوص اقدام کنند.		

جزء پودمان	کد	محتوا	زمان
اصول کلی انتقال حرارت		مروری بر انواع روشهای انتقال حرارت آشنایی با ضرایب مورد کابرد در انتقال حرارت آشنایی با مبدلها و انواع آنها	۲ ساعت
آشنایی با مبدلهای صفحه ای		تاریخچه مبدلهای صفحه ای مزایا و معایب مبدلهای صفحه ای محدودیتهای عملیاتی مبدلهای صفحه ای مقایسه مبدلهای صفحه ای و مبدلهای پوسته و لوله کاربردهای صنعتی مبدلهای صفحه ای مطالعه موردی استفاده از مبدلهای صفحه ای	۴ ساعت
انواع مبدلهای صفحه ای		معرفی انواع مبدلهای صفحه ای شامل: مبدلهای صفحه ای قاب و صفحه مبدلهای صفحه ای نیمه جوشی مبدلهای صفحه ای لحیم شده مبدلهای صفحه ای دوگانه بَوِکس مبدلهای صفحه ای جوشی پلیتیولار مبدلهای صفحه ای جوشی کمپوبلاک مبدل‌های حلزونی (مارپیچی)	۲ ساعت

آشـنایی بـا سـاختار مبـدلهای صفحه ای		جنس و ساخت صفحات سایز صفحات شیارها جنس و ساخت گسکتها آشنایی با انواع چیدمانهای صفحات و توزیع سیال در مبدل	۳ ساعت
نکات کاربردی در بهره بـرداری از مبدلهای صفحه ای		نکات کاربردی ایمنی در مبدلهای صفحه ای	۱ ساعت
خـوردگی، رسـوب گرفتگـی و سائیدگی		مکانیزم و انواع رسوب گرفتگی مکانیزم و انواع خوردگی مکانیزم سائیدگی تاثیر رسوب گرفتگـی در انتقـال حـرارت و طراحـی مبدل	۲ ساعت
طراحی مبدلهای صفحه ای		آشنایی با پارمترهای موثر بر طراحی اختلاف درجه حرارت متوسط لگاریتمی روش ε-NTU طراحی مرحله به مرحله یک مبدل صفحه ای	۴ ساعت

پیشگفتار

امروزه در طراحی فرآیند پالایشگاههای جدید گاز، در مواردی که شرایط عملیاتی برای استفاده از مبدلهای صفحه ای ممکن باشد، این مبدلها جایگزین مبدلهای پوسته و لوله شده اند. از مزایای این مبدلها می توان بـه کمتـر بودن حداقل اختلاف دمای مورد نیاز، کاهش ابعاد، کم شدن رسوب و گرفتگی، امکان تغییر ظرفیت، سهولت تعمیر و نگهداری و افزایش راندمان این مبدلها به نسبت مبدلهای پوسته و لوله اشاره کرد. کاهش هزینه های جاری ناشـی از صرفه جویی در مصرف انرژی با استفاده از این مبدلها باعث می شود کـه هزینـه اولیـه نصـب و راه انـدازی در زمـان کوتاهی مستهلک گردد.

در سالهای اخیر استفاده از مبدلهای صفحه ای در پالایشگاههای گاز کشور رایج شده است و لـذا شـناخت دقیقتر از این نوع مبدل و مسائل مربوط به تعمیر و نگهداری آن، مورد توجه متخصصین و کارشناسـان صـنعت قـرار گرفته است.

در کتاب حاضر پس از مروری بر اصول اولیه انتقال حرارت، به تاریخچه این نـوع از مبـدلها و رونـد تکامـل فنآوری ساخت آنها اشاره میشود. سپس انواع مختلف مبدلهای صفحه ای معرفی، و مزایـا و معایـب آنهـا بـا یکـدیگر مقایسه میشوند. در فصول بعد با توجه به کاربرد بیشتر مبدلهای قاب و صفحه، ساختار و کاربردهای این نوع از مبدل بررسی شده و مشکلات عملیاتی مانند خوردگی، رسوب گرفتگی و ساییدگی در آنها مـورد مطالعـه قـرار میگیـرد. در فصل ۱۲ کتاب نیز برای درک دقیقتر از این نوع مبدل، اصول طراحی مبدلهای حرارتی و نمودارهـای طراحـی بـرای مبدل قاب و صفحه ارائه شده است.

همچنین یک مطالعه موردی در خصوص جایگزینی مبدلهای پوسته و لولـه بـا مبـدل صـفحه ای در یـک واحد شیرین سازی، در فصل آخر کتاب ارائه شده است که مزایای مبدلهای صفحه ای را به خوبی نشان میدهد.

در پایان ضمن سپاس از کلیه عزیزانی که در تهیه این کتاب همکاری کردند، در انتظار راهنماییها و پیشنهادهای ارزشمند کارشناسان و خوانندگان محترم در جهت رفع نواقص و بهبود هر چه بیشتر کتاب بوده و پیشاپیش تشکر مینمایم.

فهرست عناوین

۱ حرارت و انتقال حرارت ۱

۱-۱ رسانش ۱
۱-۲ جابجایی ۴
۱-۳ تابش ۵
۱-۴ ضریب کلی انتقال حرارت ۶
۱-۵ ماده و تغییر حالت آن از دیدگاه انتقال حرارت: ۷
۱-۶ مبدل حرارتی ۸
۱-۷ انواع مبدلهای حرارتی ۹

۲ تاریخچه مبدلهای حرارتی صفحه ای: ۱۰

۳ مزایا و محدودیتها: ۱۲

۴ مقایسه مبدلهای صفحهای با مبدلهای پوسته و لوله ۱۵

۵ معرفی انواع مبدلهای صفحه ای: ۱۶

۵-۱ مبدلهای صفحه ای نیمه جوشی ۱۷
۵-۲ مبدلهای صفحه ای لحیم شده ۱۸
۵-۳ مبدلهای صفحه ای دوگانه بَوِکس ۱۹
۵-۴ مبدلهای صفحه ای جوشی پلیتیولار ۲۱
۵-۵ مبدلهای صفحه ای جوشی کمپوبلاک ۲۳
۵-۶ مبدل‌های حلزونی (مارپیچی) ۲۶

۶ ساختار مبدل های صفحه ای : ۳۱

۶-۱ جنس و ساخت صفحات مبدل صفحه‌ای ۳۱
۶-۲ سایز صفحات: ۳۵
۶-۳ شیارها : ۳۵
۶-۴ وظیفه شیار ها : ۳۶
۶-۵ جنس گسکت ۳۹
۶-۶ بازرسی و تعمیر: ۴۲

۷ چیدمان و توزیع جریان : ۴۳

۷-۱ جهت جریان ۴۳
۷-۲ گذر ۴۳

۳-۷ تعداد مسیرهای عبور در هر گذر ۴۴
۴-۷ توزیع سیال در مبدل ۴۴
۵-۷ توزیع درون کانال‌ها ۴۵
۶-۷ تقسیم‌بندی چیدمان گذرها ۴۶
۸ کاربرد مبدلهای صفحهای: ۴۹
۱-۸ مواردی که استفاده از مبدلهای صفحهای مناسب نیست ۴۹
۲-۸ کاربرد در تأسیسات دریایی نفت و گاز ۵۰
۳-۸ کاربرد در فرآیندهای شیمیایی ۵۱
۹ خوردگی، سائیدگی و رسوب گرفتگی در مبدلهای صفحهای ۵۴
۱-۹ مکانیزم اصلی رسوب گرفتگی ۵۵
۲-۹ معادلات پایه رسوب گرفتگی ۵۷
۳-۹ در نظر گرفتن رسوب در طراحی ۵۹
۴-۹ روشهای کاهش میزان رسوب گرفتگی ۶۳
۱-۴-۹ روشهای غیر مستقیم ۶۳
۲-۴-۹ روشهای مستقیم ۶۴
۵-۹ مکانیزم اصلی خوردگی ۶۵
۶-۹ کنترل خوردگی در مبدلهای صفحه ای ۷۰
۷-۹ سائیدگی ۷۳
۱۰ نکات کاربردی در بهره برداری و نگهداری از مبدلهای صفحهای گسکتدار ۷۴
۱۱ ایمنی مبدلهای صفحه ای ۷۶
۱۲ طراحی مبدلهای حرارتی صفحه ای: ۷۸
۱-۱۲ اختلاف درجه حرارت متوسط لگاریتمی: ۷۸
۲-۱۲ روش $\varepsilon - NTU$ ۸۲
۳-۱۲ مراحل طراحی یک مبدل: ۸۳
۱۳ مطالعه موردی: ۹۰

فهرست شکلها

شکل ۱-۱ انتقال حرارت رسانشی در جهت کاهش دما ۲
شکل۲-۱ شمایی کلی از یک مبدل صفحه ای ۱۱
شکل۳-۱ نحوه قرار گرفتن گسکت ها ۱۲
شکل ۵-۱ مبدل صفحه ای نیمه جوشی ۱۷
شکل ۵-۲ مبدل صفحه ای BRAZED ۱۸
شکل ۵-۳ مبدل صفحه ای جوشیBAVEX ۲۰
شکل ۵-۴ مبدل صفحهای PLATULAR نوع X ۲۱
شکل ۵-۵ نمایش کانالهای عبوری در مبدل صفحه ایPLATULAR ۲۲
شکل ۵-۶ شمای کلی مبدل صفحه ای COMPABLOC ۲۵
شکل ۵-۷ فرآیند ساخت مبدل حلزونی ۲۷
شکل ۵-۸ جریان سیالات در مبدل حلزونی، نوع ۱ ..... ۲۸
شکل ۵-۹ جریان سیالات در مبدل حلزونی، نوع ۲ ..... ۲۸
شکل ۵-۱۰ جریان سیالات در مبدل حلزونی، نوع ۳ ..... ۲۹
شکل ۵-۱۱ مقایسه مبدلهای صفحه ای گسکت دار، حلزونی و پوسته و لوله ۳۱
شکل ۶-۱ مقایسه صفحات با ابعاد مختلف ۳۵
شکل ۶-۲ A- یک صفحه با شیارهای مدل واشبورد B- یک صفحه با شیارهای مدل هرینگبون ۳۶
شکل۶-۳ چگونگی تولید آشفتگی جریان در مدل واشبورد ۳۷
شکل۶-۴ چگونگی تولید آشفتگی جریان در مدل چورون ۳۷
شکل۶-۵ چگونگی قرارگیری صفحات نسبت به هم ۳۸
شکل۶-۶ گسکت در صفحه با عبور مورب ۴۰
شکل۷-۱ چیدمان گذرها در مبدلهای صفحه ای ۴۵
شکل ۷-۲ توزیع جریان و دما در کانالها ۴۶
شکل ۷-۳ شماره گذاری چیدمانهای مختلف مبدلهای صفحه ای ۴۸
شکل۸-۱ شمای کلی سیکل سیال خنک کننده در تجهیزات سکوی نفتی ۵۰
شکل۸-۲ شمای کلی فرآیند جذب و جداسازی مواد آلی ۵۲
شکل۸-۳ مبدل صفحه ای برای کنترل دمای راکتور ۵۳
شکل ۹-۱ نمونه تاثیر خوردگی بر مبدل صفحه ای ۵۴

شکل ۹-۲ نمونه رسوب گرفتگی در یک مبدل صفحه ای ۵۷
شکل ۹-۳ تاثیر ضریب کلی انتقال حرارت بر افزایش سطح مورد نیاز به علت رسوب گرفتگی ۵۹
شکل۹-۴ تاثیر سرعت و دما بر مقاومت انتقال حرارت ۶۲
شکل۹-۵ مقایسه میزان رسوب گرفتگی بین مبدلهای صفحه ای و پوسته و لوله ۶۲
شکل ۹-۶ ۱- شستشو با برس نرم و آب روان ۲ - شستشو با آب تحت فشار ۶۳
شکل ۹-۷ نمونه خوردگی در ورودی صفحات ۶۶
شکل ۹-۸ مکانیزم خوردگی آهن ۶۷
شکل۹-۹ فاکتورهای تاثیر گذار بر خوردگی ۶۹
شکل ۱۲-۱ تغییرات دما در طول مبدل برای جریان همسو ۷۹
شکل ۱۲-۲ تغییرات دما در طول مبدل برای جریان ناهمسو ۷۹
شکل ۱۲-۳ ضریب تصحیح برای چیدمان ۱-۱ در R=1 و NTU=1 ..... ۸۴
شکل ۱۲-۴ ضریب تصحیح برای چیدمان ۱-۲ در R=0.5 و NTU=2 ..... ۸۵
شکل ۱۲-۵ ضریب تصحیح برای چیدمان ۲-۲ در R=0.5 و NTU=1 ..... ۸۵
شکل ۱۲-۶ تاثیر تعداد صفحات در چیدمان شماره ۱۱۱ در R=1 ..... ۸۶
شکل ۱۲-۷ رابطه E و NTU در چیدمان شماره ۲۲۲ در R=1 ..... ۸۶
شکل ۱۲-۸ رابطه E و NTU در چیدمان شماره ۲۲۴ در R=1 ..... ۸۷
شکل ۱۲-۹ رابطه E و NTU در چیدمان شماره ۲۲۳ در R=1 ..... ۸۷
شکل ۱۲-۱۰ رابطه E و NTU در چیدمان شماره ۲۲۱ در R=1 ..... ۸۸
شکل ۱۲-۱۱ رابطه E و NTU در چیدمان شماره ۲۲۱ برای تعداد زیاد صفحات ۸۸
شکل ۱۲-۱۲ رابطه E و NTU در چیدمان شماره ۲۱۱ برای تعداد زیاد صفحات ۸۹
شکل ۱۲-۱۳ رابطه E و NTU در چیدمان شماره ۳۱۱ برای تعداد زیاد صفحات ۸۹
شکل ۱۳-۱ دیاگرام جریان فرآیند قبل و پس از تغییر ۹۲

فهرست جداول

جدول۳-۱ مشخصات مبدلهای صفحهای گسکت دار معمولی ۱۵
جدول۴-۱ مقایسه بین مبدلهای صفحهای گسکت دار و مبدلهای پوسته و لوله ۱۶
جدول ۶-۱ راهنمای انتخاب صفحات با توجه به سازگاری سیال ۳۴
جدول ۶-۲ ضرایب انتقال حرارت رسانایی برخی صفحات متداول ۳۴
جدول ۶-۳ مشخصات مواد متداول به کار رفته در گسکت‌ها و محدودیت‌های کاربردی آنها ۴۱
جدول ۹-۱ مقاومت ناشی از رسوب برای برخی سیالات رایج ۶۰
جدول ۹-۲ چگونگی تاثیر چیدمان صفحات در میزان رسوب ۶۱
جدول۹-۳ علت خوردگی صفحات پر کاربرد در مبدلهای صفحه ای ۷۲
جدول۱۳-۱ پروفایل دما قبل و بعد از اجرای پروژه ۹۲

۱ حرارت و انتقال حرارت

حرارت یا همان گرما صورتی از انرژی است که معرف مقدار انرژی درونی مولکولهای یک جسم (ماده) می‌باشد. انتقال حرارت هم یکی از سه پدیده اصلی انتقال است که به دلیل وجود اختلاف دما بین دو نقطه رخ می‌دهد. به عبارت دیگر اختلاف دمای بین دو نقطه، پتانسیل لازم برای پدیده انتقال حرارت است.

علم انتقال حرارت به بررسی مکانیزم ها و روشهای انتقال حرارت و نرخ حرارت منتقل شده بین دو نقطه می‌پردازد و نشان می‌دهد که حرارت بین دو نقطه به سه روش رسانش، همرفت (جابه-جایی) و تابش منتقل می‌شود. به کمک علم انتقال حرارت می‌توانیم نرخ حرارت منتقل شده در هر یک از مکانیزم‌های فوق را محاسبه نماییم و تابعیت این نرخ به شرایط مختلف مسئله را بیان کنیم. ولی آنچه نباید فراموش کرد این است که حرارت از هر نقطه‌ای به هر نقطه و با هر روش که منتقل شود، باز هم به دلیل اختلاف دمای بین دو نقطه منتقل شده است. در زیر به بررسی مکانیزم‌ها و روشهای انتقال حرارت می‌پردازیم:

۱-۱ رسانش[1]

بررسی های تجربی نشان داده‌اند ذرات هر جسم (مولکولهای هر جسم) در جای خود در حال ارتعاش هستند و برای یک جسم خاص مقدار این ارتعاشات با دمای آن نقطه متناسب است. هر چه دما بیشتر باشد، مقدار ارتعاشات نیز بیشتر است. انتقال حرارت هدایتی یا همان رسانش در اصل انتقال دادن همین لرزش در جای مولکولها به مولکولهای دیگر است. به این ترتیب اگر بین دو نقطه از جسمی اختلاف دما موجود باشد، جنبش بیشتر ذرات پر انرژی تر در نقطه با دمای بیشتر باعث افزایش جنبش

[1] Conduction

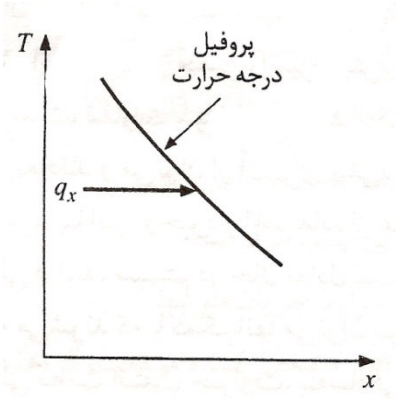
مولکول های مجاور شده و با افزایش جنبش مولکول های مجاور، مقدار انرژی درونی و بـه تبعیـت از آن دمای مولکولهای مجاور را افزایش می‌دهد. در این حالت می‌گوییم انرژی حرارتـی از طریـق رسـانش یـا همان هدایت انتقال یافته است[۷].

آزمایشات نشان داده‌اند که شار حرارت منتقله (مقدار گرمای منتقلـه در واحـد زمـان از واحـد سطح) با گرادیان درجه حرارت در راستای انتقال حرارت متناسب است.

$$\frac{q}{A} \approx \frac{\partial T}{\partial X}$$

برای تبدیل تناسب فوق به تساوی از ضرایب تناسب k استفاده می شود که برای هـر مـاده در شرایط ترمودینامیکی معلوم، مقدار ثابتی است. در نتیجه خواهیم داشت:

$$q = -kA\frac{\partial T}{\partial X}$$



شکل ۱-۱) انتقال حرارت رسانشی در جهت کاهش دما

k در هر دما ضریب ثابت و مثبتی است که ضریب هدایت حرارتی نامیده مـی شـود و از آنجـا که طبق قرارداد، علامت حرارت منتقل شده از نقطه ای با دمای بیشتر به نقطه‌ای با دمای کمتر، عددی

مثبت است و رسانش حرارتی در جهت کاهش دما رخ می‌دهد، این علامت منفی در رابطه فوق به کار گرفته شده تا تساوی علامتهای رابطه فوق حفظ شود.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} < 0\right)$$

در رابطه: $$q = -kA\frac{\partial T}{\partial x}$$

q : شدت گرمای انتقال داده شده و از جنس توان است و معمولاً بر حسب watt بیان می‌شود.

$\frac{dt}{dx}$: گرادیان (اختلاف) دما در جهت x است با واحد $\frac{^\circ K}{m}$.

A : سطح مقطع انتقال حرارت با واحد m^2 است

و k که همان ضریب انتقال حرارت هدایتی است از $\frac{watt}{m^\circ k}$ واحد خواهد بود.

مقدار عددی ضریب هدایت حرارتی بیانگر سرعت انتقال حرارت در یک ماده مشخص است. در مثالی ساده انتقال حرارت به روش رسانش مانند انتشار یک خبر در یک صف از نفرات است. بدیهی به نظر می‌رسد هر چه رابطه نفرات یک صف بر هم نزدیک‌تر باشند، خبر در صف با سرعت بیشتری منتشر می‌شود. این مثال در مقایسه مقدار k برای مواد مختلف نیز صادق است. بدین ترتیب که هر چه ذرات و مولکولهای یک ماده به همدیگر نزدیک‌تر باشند و رابطه آنها با همدیگر بیشتر باشد سرعت انتقال حرارت در آن ماده و در نتیجه مقدار عددی k بیشتر خواهد بود.

۱-۲ جابجایی[1]

اگر یک صفحه گرم در فضای آزاد قرار گیرد. هوای اطراف خود را گرم می‌کند و خود گرمایش را از دست می‌دهد. حال اگر این صفحه در مقابل یک فن قرار گیرد، در مدت زمان کمتری خنک می‌شود و هر چه سرعت هوای عبوری از سطح صفحه افزایش یابد، زمان خنک شدن صفحه کاهش می‌یابد یا به عبارتی دیگر مقدار انتقال حرارت افزایش می‌یابد. به این روش انتقال حرارت که در اثر حرکت سیال از کنار منبع گرما رخ می‌دهد. انتقال حرارت جابجایی (همرفتی) گویند[۷].

حرکت سیال به دو صورت باعث انتقال حرارت به روش جابه‌جایی می‌شود. یکی حرکت مولکول های سیال که آن را جابجایی طبیعی می‌گویند و دیگری حرکت توده‌ای مولکولهای سیال که آن را جابجای اجباری گویند. در هنگام انتقال حرارت به روش جابجایی، هر دو پدیده جابجایی آزاد و اجباری رخ می‌دهند. ولی با توجه به شرایط حاکم در مسئله (فیزیک و هندسه سطح ، سرعت و ویژگی های فیزیکی سیال، اختلاف دمای مبداء و مقصد گرما) مقدار گرمای منتقله از طریق جابجایی اجباری و جابجایی طبیعی متفاوت است و شاید در بعضی از مسائل بتوان به دلیل بزرگی یکی از مقدار دیگری صرفنظر کرد.

مقدار گرمای منتقل شده از طریق جابجایی با استفاده از قانون سرمایش نیوتن قابل محاسبه است.

$$q = hA(T_s - T_\infty)$$

که در آن:

q: مقدار گرمای منتقله در واحد زمان با واحد watt است.

A: سطح مقطع، سطح انتقال حرارت است با واحد m^2 .

T_s, T_∞، به ترتیب دمای محیط سیال و دمای سطح هستند با واحد $^\circ K$.

---

[1] Convection

h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی است با واحد $\frac{watt}{m^2 k}$

h در رابطه سرمایش نیوتن مجموع h برای جابجایی آزاد و جابجایی اجباری است و توسط رابطه‌های تجربی مختلف قابل محاسبه است.

$$h = h_{\text{free convection}} + h_{\text{forced convection}}$$

۱-۳ تابش[1]

علاوه بر مکانیزم رسانش و جابجایی که برای انتقال حرارت به محیط‌های مادی نیاز دارند. حرارت می‌تواند در محیطی که کاملا خلا است نیز ، منتشر شود. مکانیزم این حالت تشعشع الکترومغناطیسی است و در آن بسته‌های انرژی از طریق امواج الکترومغناطیس جابه جا می‌شوند. بازه کوچکی از امواج الکترومغناطیس که در نتیجه اختلاف حرارت ساطع می‌شوند به تشعشع حرارتی موسوم است. یک جسم سیاه که بیشترین مقدار تشعشع را در هر دمایی دارد، مقدار گرمایی برابر با $q = \sigma A T^4$ را در هر دما منتشر می‌کند که در این رابطه

q : مقدار گرمای منتقله در واحد زمان با واحد watt است.
A: مساحت سطح جسم سیاه با واحد m^2.
T: دمای جسم سیاه با واحد $°K$.
σ: ثابت استفان بولتزمن با مقدار $5.669\times10^{-8}\ \frac{watt}{m^2 \times °K^4}$

اغلب اجسامی که تابش حرارت دارند جسم سیاه نیستند و مقدار انرژی تابش شده از آنها از تابش جسم سیاه کمتر است. در این حالت معادله جسم سیاه با ضریب ε که همواره از ۱ کوچک‌تر است و ضریب نشر نامیده می‌شود تصحیح می‌گردد.

$$q = \varepsilon \sigma A T^4$$

[1] Radiation

۱-۴ ضریب کلی انتقال حرارت

همانگونه که ذکر شد، حرارت به سه روش رسانش، جابه‌جایی و تابش منتقل می‌شود و در تمام این روشها، اختلاف دما، پتانسیل لازم را برای انتقال حرارت تأمین می‌کند[۷].

حال اگر فرآیند انتقال حرارت بین دو نقطه را مشابه انتقال بار الکتریکی بین دو نقطه در نظر بگیریم، می‌توان گفت که q،گرمای منتقل شده در واحد زمان از واحد سطح و I جریان الکتریکی (مقدار بار منتقل شده در واحد زمان از واحد سطح). مشابه همدیگرند و از طرفی ΔV اختلاف پتانسیل الکتریکی و ΔT اختلاف پتانسیل حرارتی نیز تعاریفی مشابه هم دارند. بنابراین همانگونه که در الکتریسیته تعریف می‌کنیم: $\Delta V = R_{overall}.I$ (به شرط آنکه $R_{overall}$، مجموع مقاومت های الکتریکی باشد.)

در انتقال حرارت نیز می توانیم تعریف نماییم: $\Delta T = R_{overall}.q''$

در نتیجه: $q''=\dfrac{\Delta T}{R_{overall}}$

که در آن $R_{overall}$ مجموع مقاومتهای حرارتی موجود در سیستم است.

حال ضریب کلی انتقال حرارت «U » را به صورت معکوس R تعریف می‌نماییم، بنابراین خواهیم داشت :

$$q''=U\times\Delta T$$

که در آن U بیانگر رسانش سیستم انتقال گرما و تابعی از تمام مقاومت های حرارتی، شامل مقاومت های رسانشی، جابجایی و مقاومت تابشی و از واحد $\dfrac{watt}{m^2\times°K}$ خواهد بود.

با بازنویسی رابطه فوق به رابطه پر کاربرد دیگری می‌رسیم که به شکل زیر است:

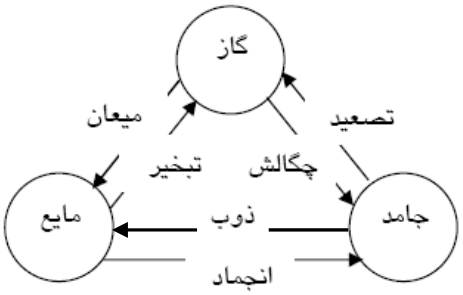
$$q'=U\times A\times\Delta T$$

در رابطه جدید، q' ، مقدار گرمای منتقله در واحد زمان است.

۱-۵ ماده و تغییر حالت آن از دیدگاه انتقال حرارت:

مواد در طبیعت به سه حالت جامد، مایع و گاز یافت می‌شوند. جامدات موادی هستندکه دارای شکل و حجم ثابت‌اند ولی مایعات تنها حجم ثابتی دارند و به شکل ظرف خود در می‌آیند در حالیکه گازها در حالت طبیعی نه حجم ثابت دارند و نه شکل ثابتی، از طرفی دیگر گازها موادی هستند که مولکولها و ذرات آن به راحتی و آزادانه در حجم آن ماده (ظرف حمل کننده آن ماده) حرکت می‌کنند. مایعات نیز حرکت مولکولی‌ای مشابه گازها دارند، ولی به دلیل پیوندهای مولکولی قوی تر بین مایعات، این حرکات محدودترند و در یک حجم از مایع تعدد مولکولهای بیشتری دارند. ولی در جامدات حرکت مولکولها تنها به لرزشهایی در جای خود و بدون جابجایی و انتقال به نقطه‌ای دیگر محدود می‌شود. آنچه بدیهی است این است که با افزایش دمای یک ماده، انرژی درونی تک تک ذرات آن ماده بیشتر شده و مقدار جنبش آن ها نیز افزایش می‌یابد[۷].

پس می‌توان یک جامد را با حرارت دادن به مایع تبدیل کرد و یک مایع را نیز با حرارت دادن به گاز تبدیل نمود. به نمودار زیر که نشان دهنده تغییرات حالات مواد به یکدیگر است توجه کنید:



از بین تغییرات بالا، ذوب و انجماد مواد خالص در یک دمای ثابت رخ می‌دهند که اصطلاحاً نقطه انجماد نامیده می‌شود. تبخیر و میعان نیز در یک دمای ثابت رخ می‌دهند که اصطلاحاً نقطه جوش نامیده می‌شود. نقطه جوش و انجماد برای مواد خالص در هر فشار، مقداری ثابت هستند و مقادیر آنها در جداول ترمودینامیکی موجودند. ولی برای مخلوط ها، هر یک از این تغییرات در یک محدوده دمایی که تابعی از فشار و درصد ترکیبات مواد خالص تشکیل دهنده مخلوط است، رخ می‌دهد.

مستقل از اینکه تغییرات فوق در یک ماده خالص (بدون تغییر دما) یا یک مخلوط رخ دهد، به مقدار گرمایی که جسمی دریافت می‌کند یا از دست می‌دهد تا به طور کامل فقط و فقط دچار تغییر حالت فیزیکی شود گرمای نهان "Latent Heat" گویند و به مقدار گرمایی که جسم جهت تغییر $1^{\circ}K$ $(1^{\circ}C)$ در دمای خود بدون هر گونه تغییر حالت مبادله می‌کند گرمای محسوس "Sensible Heat" می گویند. لازم به ذکر است که گرمای نهان از نظر عددی به مراتب بزرگتر از گرمای محسوس است.

۱-۶ مبدل حرارتی

اصطلاح مبدل حرارتی در حقیقت یکی از نمونه لغات غلط اما رایج است. در اصل این وسیله را تبادلگر گرمایی باید نامید، زیرا انرژی تبدیل نمی شود و فقط منتقل می گردد. مبدل‌های حرارتی از واحدهای عملیاتی بسیار پر کاربرد در صنعت علی الخصوص صنایع شیمیایی می‌باشند و وظیفه آماده سازی حرارتی سیالات و مواد فرآیندی را بر دوش می‌کشند. مبدلها با استفاده از سیال سرویس "Utility"، سیال فرآیند "Process" را از دمای اولیه خود به دمای مورد نیاز برای ادامه فرآیند می-رسانند و اصل کار آنها نیز بر اساس وجود اختلاف دما بین دو سیال سرویس و فرآیند در هر نقطه از مبدل است.

سایر دستگاههای انتقال حرارت، عبارتند از گرم کننده‌ها "Heaters" ، خنک کننده‌ها "Coolers" ، چگالنده‌ها "Condensers"، تغلیظ کننده‌ها "evaporators"، تبخیر کننده‌ها "Vaporizers"، جوش آورنده‌ها "Reboilers"، کوره‌ها "Furnaces" و برج های خنک کننده "Cooling Towers". در این میان تنها در برجهای خنک‌کننده، هر دو سیال فرآیند و سرویس مستقیماً با همدیگر در تماس‌اند و عمل انتقال جرم نیز تنها در برجهای خنک کننده رخ می-دهد.

۱-۷ انواع مبدلهای حرارتی

مبدلهای حرارتی از نظر مکانیزم انتقال حرارت به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند.

۱ - مبدلهای حرارتی آتشین"Fired" که در آنها شعله وجود دارد و انتقال حرارت با استفاده از مکانیزم های تابش و جابجایی رخ می‌دهد مانند کوره‌ها.

۲) مبدلهای حرارتی غیر آتشین "unfired" که در آنها دو سیال سرویس و فرآیند در دو سوی یک صفحه وجود دارند و حرارت غالباً به روشهای جابجایی منتقل می‌شود.

مبدلهای حرارتی نوع دوم "unfired" در هندسه های دو لوله‌ای، چندلوله‌ای، پوسته و لوله، صفحه‌ای و... قابل طراحی و ساختند.

مبدلهای حرارتی را از نظر کاربردی نیز تقسیم می‌کنند. بنابراین تقسیم بندی که بر اساس استاندارد "TEMA" صورت گرفته است، مبدل ها از نظر کاربرد به سه گروه زیر تقسیم بندی می-شوند:

۱) گروه R (Refinery Heat Exchangers) که در صنایع نفت، پالایش و پتروشیمی کاربرد دارند.

۲) گروه C ، مبدل هایی که کاربردهای عمومی دارند. مانند مبدلهای مورد استفاده در سیستمهای گرمایش و سرمایش منازل

۳) گروه B، مبدلهایی که در صنایع شیمیایی و تولید مواد شیمیایی و صنایع دارویی "Fine Chemicals" کاربرد دارند.

۲ تاریخچه مبدلهای حرارتی صفحه ای:

مبدل حرارتی صفحه‌ای، مبدلی است که در آن جریان‌های سیال از بین تعدادی صفحات فلزی نازک و موج دار عبور می‌کند. این صفحات در یک قاب به هم متصل شده‌اند و از نشت سیالات با استفاده از گسکت جلوگیری می‌شود. در هر صفحه معمولا چهار روزنه وجود دارد که به عنوان ورودی و خروجی جریان عمل می‌کنند و عبور سیال‌ها از کانالهای مختلف منجر به انتقال حرارت بین آنها می-شود. تعداد و ابعاد صفحات با توجه به میزان جریان و خواص فیزیکی سیال، افت فشار و تغییر دمای مورد نیاز تعیین می‌گردد[۱].

قاب مبدل، صفحات را به صورت فشرده به هم متصل می‌نماید و انتخاب گسکت مناسب از نشت سیال به خارج مبدل جلوگیری می‌کند. طراحی مبدل به گونه‌ای است که امکان نشت یک سیال به سیال دیگر ممکن نیست. قاب از یک صفحه ثابت، یک صفحه متحرک فشار دهنده و تجهیزاتی برای اعمال فشار و اتصال صفحات تشکیل شده است. نمای یک مبدل صفحه‌ای و قطعات آن در شکل ۲-۱ آمده است. موج دار بودن صفحات علاوه بر افزایش سطح تماس باعث افزایش تلاطم جریان و همچنین کاهش میزان رسوب می‌شود و در نتیجه میزان انتقال حرارت بین دو جریان تا حد زیادی افزایش می-یابد.

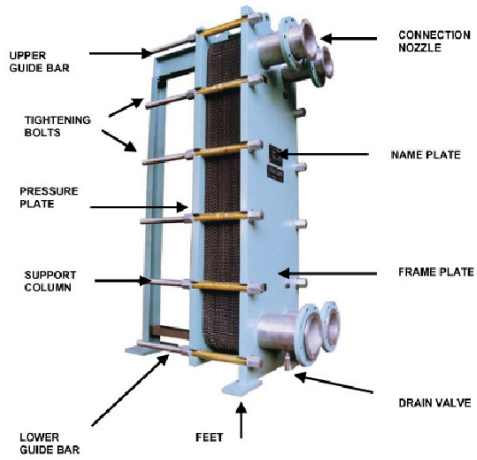
مبدلهای صفحه ای درحدود ۱۰۰ سال بعد از کاربرد و رواج مبدل های پوسته و لوله (Shell & Tube) پدید آمدند و مورد استفاده قرار گرفتند. در سال ۱۸۷۸ اولین Patent در این موضوع به نام آلبرت دریک[1] درGerman patent ثبت گردید. تا سال ها همچنان این ایده باقی ماند تا اینکه در سال ۱۹۲۳ دکتر ریچارد سالیگمن[2] توانست اولین نمونه صنعتی این وسیله را به طور موفقیت آمیز تست نموده و مورد بهره برداری قرار دهد.

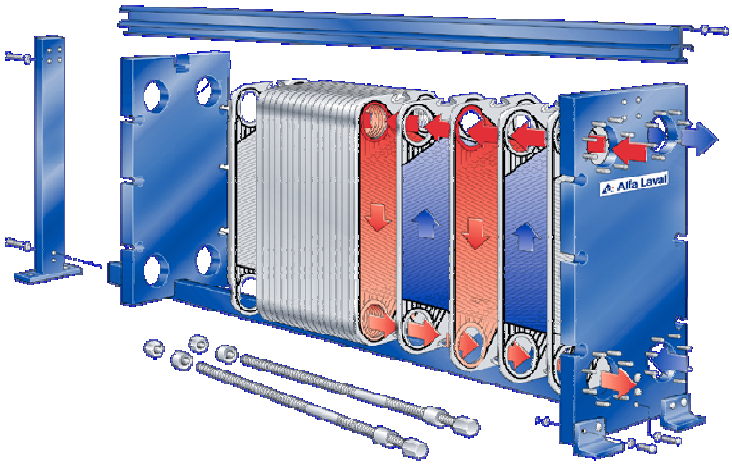
---

[1] Albrecht Derake

[2] Dr. Richard Seligman

در نمونه های اولیه که تا قبل از سال ۱۹۳۰ ساخته می شدند از جـنس مفـرغ (gunmetal) که آلیاژی از فلز قلع و مس و روی می باشد، در ساختن صفحات استفاده می گردید. به همین دلیل این مبدل ها دارای قابلیت های محدودی بودند و نتوانستند کاربرد گسـترده ای پیـدا کننـد. در سـال ۱۹۳۰ استفاده از آلیاژهای دیگری چون فولاد ضد زنگ (Stainless steel) نیز رایج گردیـده و زمینـه بـرای کاربردهای گسترده تر از این نوع مبدل مهیا گردید. محدوده‌ی عملیاتی مبدل های صفحه ای در مـدل-های اولیه در فشارهایی کمتر از ۲ بار و تا دمای ۶۰ درجه سانتیگراد بود.





شکل۲-۱) شمایی کلی از یک مبدل صفحه ای

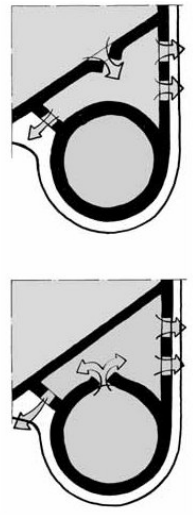
۳ مزایا و محدودیتها:

مزایای این مبدلها را می توان در عبارت " انعطاف پذیری سیستم " خلاصه نمود. برخی از مزایای مبدلهای صفحه‌ای در ادامه ذکر شده است[۴].

- **تلاطم و کارایی انتقال حرارت بالا**: وجود برآمدگی و موجدار بودن صفحات باعث می‌شود که حتی در سرعت‌های پایین سیال نیز، تلاطم زیادی وجود داشته باشد. شرکتهای مختلف سازنده برای طراحی الگوهای بهینه برآمدگی صفحات با هم رقابت می‌کنند به گونه‌ای که تغییر در الگوی این صفحات، میزان انتقال حرارت را در مبدلهای ساخته شده توسط سازندگان مختلف متفاوت می‌کند.

- **کاهش رسوب:** افزایش تلاطم، عدم وجود مناطق راکد، جریان سیال یکنواخت و سطح نرم و غیر زبر صفحات، میزان رسوب و در نتیجه تواتر زمانی تمیز کردن مبدل را کاهش می‌دهد.

- **عدم امکان نفوذ سیالات به یکدیگر:** در مبدلهای صفحه‌ای فضای بین گسکت‌ها با فضای بیرونی در تماس است. لذا حتی در صورت خراب بودن گسکت، دو سیال با هم تماس نخواهند داشت. این موضوع در شکل ۳-۱ نشان داده شده است.



شکل۳-۱: نحوه قرار گرفتن گسکت ها

- **جریان متقابل**: در مبدلهای صفحه‌ای می‌توان سیالات را به صورت متقابل از کنار هم عبور داد که این امر موجب افزایش کارایی اختلاف دمای دو سیال می‌شود.

- **دمای همگرایی[1] پایین:** در مبدلهای صفحه‌ای به علت جریان متقابل واقعی، رسیدن به دمای همگرایی $^{\circ}F$ ۲-۱ ممکن است.

- **قابلیت عبور چند جریان:** در مبدلهای صفحه‌ای می‌توان با اضافه کردن صفحات حائل، بیش از دو جریان را به صورت همزمان در یک مبدل، گرم یا سرد کرد.

- **قابلیت تغییر تعداد صفحات و افزایش ظرفیت:** با توجه به ساختمان چند قطعه‌ای مبدل صفحه‌ای، انعطاف‌پذیری در طراحی و افزایش ظرفیت از خصوصیات منحصر بفرد این مبدل است.

- **سهولت تعمیر و نگهداری، بازرسی و تمیز کردن** : در مبدلهای صفحه‌ای به راحتی می‌توان با باز کردن پیچ‌های گیرنده و خارج کردن قاب متحرک، کلیه صفحات را بازرسی، تعویض و یا تمیز کرد.

- **وزن سبک:** به علت نیاز به سطح تماس کمتر برای کاربرد یکسان، این مبدلها نسبت به دیگر انواع مبدل دارای وزن کمتری هستند.

- **کاربرد برای سیالات ویسکوز:** چون این نوع مبدل در سرعت کم سیالات، تلاطم زیادی ایجاد می‌کند، برای سیالات دارای ویسکوزیته بالا کاربرد دارد. باید توجه داشت که سیالاتی که درمبدلهای پوسته و لوله به علت ویسکوزیته بالا دارای جریان آرام هستند، در مبدلهای صفحه‌ای دارای جریان متلاطم خواهند بود.

- **کاهش فضای مورد نیاز:** مبدلهای صفحه‌ای به میزان یک پنجم تا نصف مبدلهای پوسته و لوله معادل خود فضا اشغال می‌کنند. همچنین برای تعمیرات آنها نیز نیاز به فضای اضافی نیست، در حالیکه در مبدلهای پوسته و لوله به میزان دو برابر طول لوله‌ها برای خارج کردن آنها فضا لازم است.

---

[1] Approach Temp

- **کاهش مشکلات عملیاتی:** در این مبدلها مشکلات ارتعاش ناشی از جریان، صدا، خوردگی و سائیدگی به نسبت مبدلهای پوسته و لوله بسیار کمتر است.

- **هزینه پایین‌تر:** مبدلهای صفحه‌ای به صورت عمومی به علت افزایش راندمان حرارتی و کاهش هزینه‌های ساخت به نسبت مبدلهای پوسته و لوله با انتقال حرارت یکسان، ارزانتر هستند.

- **کنترل فرآیند سریعتر:** به علت ضخامت کم کانالهای بین دو صفحه مجاور و حجم کم سیال عبوری بین دو صفحه، سرعت واکنش سیال به تغییرات فرآیند سریعتر خواهد بود که منجر به کنترل راحتتر فرآیند می‌شود.

-**محدودیتها** : در انواع مبدلهای صفحه ای گسکت دار حداکثر فشار قابل تحمل ۳۰ بار و حداکثر دما ۲۰۰ درجه سانتیگراد است. علت این امر ضخامت کم صفحات و عدم توانایی تحمل فشار زیاد نسبت به نوع پوسته و لوله، و همچنین عدم تحمل دمای بالا توسط واشر بین صفحات است. اگر هم از نوع جوشی این مبدل ها استفاده شود (عیب واشر رفع می شود)، تمام مزایای مربوط به باز و بسته شدن راحت را از دست می دهیم. البته امروزه با پیشرفت تکنولوژی محدودیتهای عملیاتی این مبدلها در حال کمتر شدن است و سازندگان سعی می کنند با تغییر در جنس صفحات و گسکتها کاربرد این مبدلها را تا فشار و دماهای بالاتر ممکن کنند. در جدول زیر به مشخصات مبدلهای صفحه ای گسکت دار استاندارد ساخت شرکت آلفالاوال اشاره شده است.

جدول۳-۱ : مشخصات مبدلهای صفحه‌ای گسکت دار معمولی

بیشترین فشار عملیاتی	25 bar
بیشترین فشار عملیاتی (با ساختمان ویژه مبدل)	30 bar
بیشترین دمای عملیاتی	160 °C
بیشترین دمای عملیاتی (با گسکت خاص)	200 °C
بیشترین دبی جریان	3600 m^3/hr
سطح انتقال حرارت	0.1 - 2200 m^2
ضریب انتقال حرارت	3500 - 7500 $W/m^2.^{\circ}C$
بیشترین سایز اتصالات	450 mm , 18 in
دمای همگرایی	1 °C
NTU	0/3 - 4
افت فشار	30 kPa در هر NTU

۴ مقایسه مبدلهای صفحه‌ای با مبدلهای پوسته و لوله

برای مقایسه بهتر، در جدول ۴-۱ برخی از مشخصات مبدلهای صفحه ای بررسی و با هم مقایسه شده‌اند[۴].

جدول۴-۱ :مقایسه بین مبدلهای صفحه‌ای گسکت دار و مبدلهای پوسته و لوله

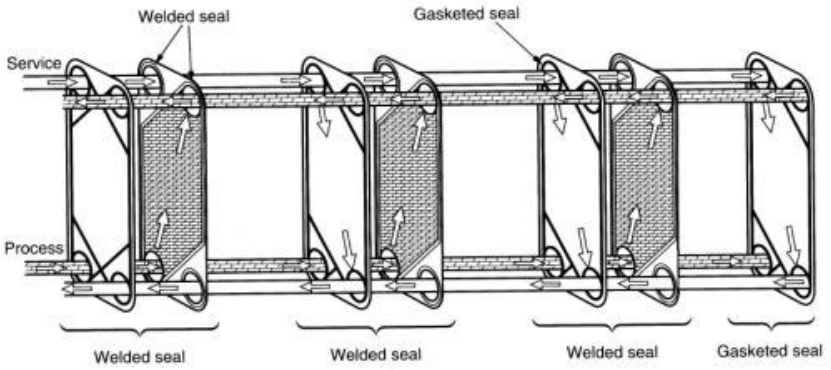
مشخصه	مبدلهای صفحه‌ای معمولی	مبدلهای پوسته و لوله
انجام همزمان انتقال حرارت برای چند جریان	ممکن	غیرممکن
اتصالات پایپینگ	در یک جهت (روی قاب)	در چندین جهت
نسبت انتقال حرارت	۳-۵	۱
نسبت وزن هنگام کار	۱	۳-۱۰
حجم سیال درگیر (hold-up)	کم	زیاد
نسبت فضای مورد نیاز	۱	۲-۵
جوشکاری	ندارد	دارد
حساسیت به ارتعاش	حساس نیست	حساس است
گسکت	بر روی تمام صفحات	بر روی تمام اتصالات فلنجی
دسترسی برای بازرسی	بر روی هر دو طرف صفحه	محدود
زمان لازم برای باز کردن	حدود ۱۵ دقیقه	۶۰ تا ۹۰ دقیقه
تعمیر	امکان جایگزینی صفحه و یا گسکت به راحتی	نیاز به خارج کردن لوله‌ها
تغییر ظرفیت	به راحتی با کم یا زیاد کردن تعداد صفحات	غیر ممکن
رسوب	۱۰ تا ۲۵ درصد مقدار مبدل پوسته و لوله	

۵) معرفی انواع مبدلهای صفحه ای:

علاوه بر مبدلهای صفحه ای گسکت دار، امروزه سازندگان، انواع مختلفی را از مبدلهای صفحه ای طراحی کرده اند که هر کدام در شرایط عملیاتی خاص کاربرد دارند. در این بخش برخی از انواع مبدلهای صفحه‌ای به صورت مختصر معرفی می شوند.

۵-۱) مبدلهای صفحه ای نیمه جوشی[1]

مزیت جوش دادن دو صفحه این است که لزوم استفاده از مواد دیگر از بین رفته و خوردگی اندکی کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل ۵-۱مشاهده می‌شود سیال فرآیندی درون زوج صفحه و سیال سرویس بین فریمها جریان دارد. این بدلیل آن است که سیال سرویس معمولاً سیال کثیف است و لذا برای تمیز کردن مبدل می‌بایست زوج صفحات از هم جدا شوند[۲].



شکل ۵-۱: مبدل صفحه ای نیمه جوشی

ساخت : تفاوت این نوع مبدل صفحه‌ای با مبدلهای صفحه ای گسکت دار معمولی دراین است که زوج صفحات به همدیگر جوش داده شده و واشرهای سوراخها نیز از مواد الاستومتر یا غیر الاستومتر با مقاومت بالا ساخته شده‌است که با روش بدون چسب به هم متصل شده‌اند.

محدوده عملیاتی: همانند مبدل صفحه‌ای گسکت دار معمولی

کاربردهای اصلی: همانند مبدل صفحه‌ای گسکت دار معمولی می‌باشد. همچنین این نوع مبدل برای تبخیر و میعان مایع تبرید استفاده می‌شود.

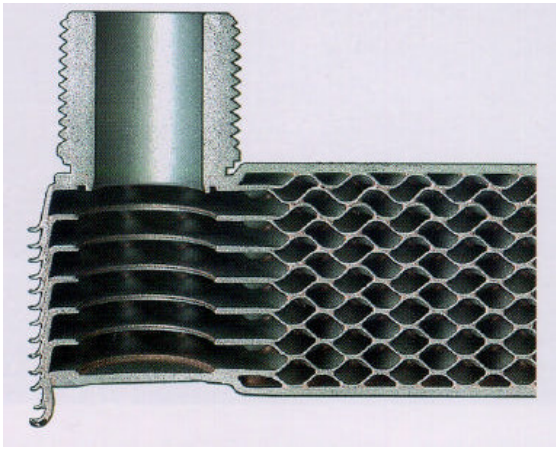
---

[1] Semi- Welded Plate Heat Exchangers

مقایسه با مبدل پوسته و لوله : مانند مبدل صفحه‌ای گسکت دار معمولی

۵-۲) مبدلهای صفحه ای لحیم شده[1]

این نوع مبدل صفحه‌ای از مجموعهٔ صفحات به هم فشرده که به هم دیگر لحیم شده‌اند تشکیل شده است. لذا دیگر نیازی به واشر نیست و فریم‌ها هم می‌توانند حذف شود. صفحات موج دار موجب چنان جریان متلاطمی می‌گردد که این جریان باعث کاهش رسوب‌گیری دراین نوع مبدل می‌گردد[۳].



شکل ۵-۲: مبدل صفحه ای Brazed

ساخت: از تعداد زیادی صفحات فولادی به هم فشرده که توسط مس به یکدیگر جوش داده شده‌اند، استفاده می‌شود. همچنین با توجه به نوع فرآیند ممکن است از نیکل، یا فلزهای دیگر برای جوشکاری استفاده شود. علاوه بر جوش کردن نقاط پیرامون هر صفحه، نقاط اتصال جناقی درونی هم جوش داده می‌شوند.

محدوده عملیاتی: این نوع مبدل تا دمای ۲۲۵ °C و فشار ۳۰bar را تحمل می‌کند. البته نوع لحیم‌کاری شده با نیکل تا دمای ۴۰۰°C و فشار ۱۶bar را تحمل می‌کند.

[1] Brazed Plate Heat Exchangers

کاربردهای اصلی: این نوع مبدل به منظور سردسازی در تبخیرکننده‌ها و کندانسورها استفاده می‌شود. همچنین برای گرم کردن آب فرآیندها، سیستم بازیابی حرارت و سیستم گرم کردن موضعی مناسب است. البته برای Desuperheat و Subcooled کردن هم مورد استفاده قرار می‌گیرند. از نوع لحیم نیکل برای خنک کردن آب بدون املاح و میعان حلال استفاده می‌شود.

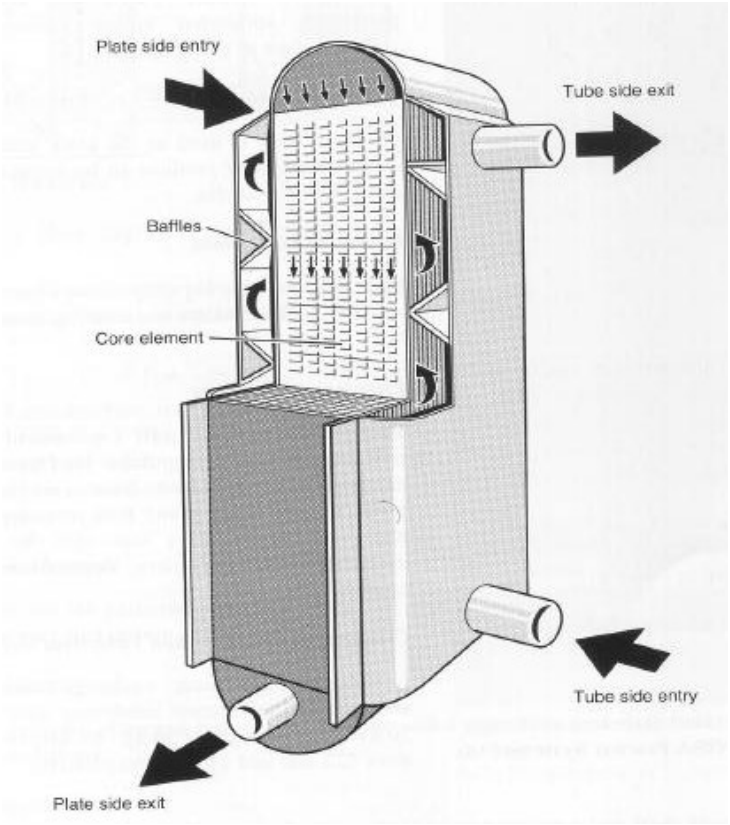
مقایسه با مبدل پوسته و لوله : در عملکرد یکسان وزن این نوع مبدل ٪۳۰-۲۰ مبدل پوسته و لوله است.

۵-۳) مبدلهای صفحه ای دوگانه بَوِکس[1]

این نوع مبدل هنگامی استفاده میشود که باتوجه به شرایط فرآیندی امکان بکارگیری مبدل نوع قاب و صفحه ممکن نبوده و با فشار بالا و محدوده گسترده دمایی مواجه باشیم. ویژگی منحصر به فرد این نوع مبدل، طراحی هندسه داخلی آن است[۳].

ساخت: این مبدل از دو بخش لوله و صفحه تشکیل می‌شود که بخش لوله دارای چندین گذر و بخش صفحه تنها دارای یک گذر می‌باشد.

[1] The Bavex Hybrid Welded Plate Heat Exchanger



شکل ۵-۳: مبدل صفحه ای جوشیBavex

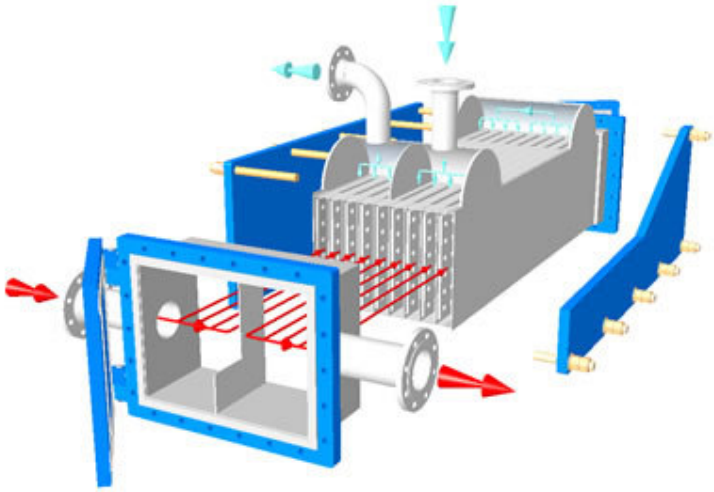
محدوده عملیاتی: با توجه به نوع فلز به کار رفته در آن، این نوع مبدل تـا دمـای $900^{\circ}C$ را تحمل می‌کند و در حالات برودتی تا دمای $-200^{\circ}C$ قابل سرد شدن است. فشار سمت صفحات نیـز تـا $60\,bar$ قابل افزایش خواهد بود که البته به ضخامت و سطح صفحات بستگی دارد.

کاربردهای اصلی: گستره استفاده از این نوع مبدل شامل بازیابی حرارت گـاز هـای سـوخته؛ کاربردهای برودتی، انتقال حرارت بین گازهای خورنده و کاربردهای با آب دریا می‌باشد.

مقایسه با مبدل پوسته و لوله : شرکت سازنده ادعا می‌کند که این نـوع مبـدل ٪۴۰ حجـم مبدل پوسته و لوله را در شرایط عملیاتی مشابه خواهـد داشـت، ضـریب انتقـال حـرارت در کاربردهـای مایع- مایع حدود $5000\ w/m^2k$ می‌باشد.

۵-۴) مبدلهای صفحه ای جوشی پلیتیولار[1]

این نوع مبدل تحت لیسانس شرکت Barriquand فرانسه ساخته می‌شود. در ایـن مبـدل از صفحاتی با ضخامت استاندارد استفاده میشود لذا قدرت و توانایی مبدل پوسته و لولـه بـا ضـریب انتقـال حرارت بالای مبدل صفحه‌ای ترکیب شده است. صفحات با هم جوش داده شده‌اند پس نیـازی بـه واشـر نیست[۲].

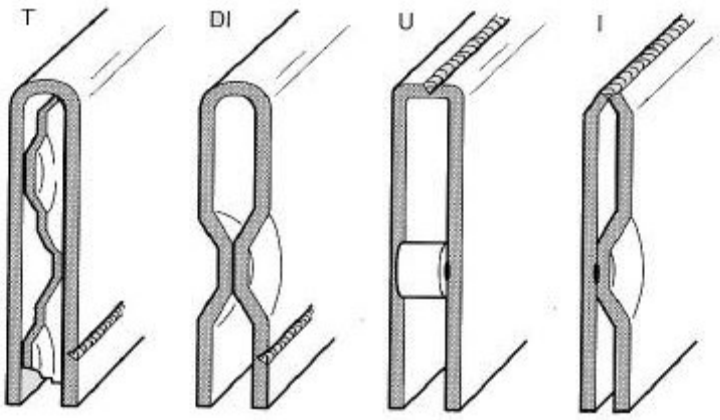


شکل ۵-۴ : مبدل صفحه‌ای Platular نوع X

دو مدل اصلی از این نوع مبدل وجود دارد .در نوع X پوسته حذف شده است درحالیکه نازلهـا و هدرها باقی مانده‌اند و صفحات به صورت طولی جوش داده شـده انـد. در نـوع S ، هسـته مرکـزی در مخزنی که یک صفحه جوش داده شده است و کارکرد پوسته را دارد، نگاه داشته میشود. لذا در این نوع، دسترسی به هسته مرکزی برای عملیـات نگهـداری دشـوارتر اسـت. هنگـامی کـه سـیال تمیـز اسـت و احتیاجی به باز کردن مداوم مبدل نیست، نوع S مقرون به صرفه تر خواهد بود.

[1] The Platular Welded Plate Heat Exchanger

ساخت: سه پارامتر اصلی فرم کانال‌ها، شکل جریان سیال و استفاده از پوسته، در ساخت این مبدل تاثیرگذار است. در نوع X صفحات موازی هم جریانات مختلف را در جهات متفاوت عبور میدهند (شکل ۵-۴). نوع S همانند یک مبدل پوسته و لوله است که به جای لوله صفحات موازی هم قرار دارند. نوع پوسته دار این مبدل برای زمانی که همهٔ سیال‌ها تمیز باشند مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر یکی یا بیشتر از سیال‌ها کثیف باشند لازم است تمام سازه‌های جوش داده شده مورد استفاده شامل درپوش‌های انتهایی، دارای امکان دسترسی برای تمیز کردن مکانیکی باشد. کانال‌های مورد استفاده دراین نوع مبدل اشکال گوناگون دارند که در شکل زیر مشاهده می‌کنید.



شکل ۵-۵ : نمایش کانالهای عبوری در مبدل صفحه‌ایPlatular

طراحی نوع T برای گازها و سیالات ویسکوز پیشنهاد می‌گردد، طراحی نوع I برای عملیات‌های با فشار بالا مناسب است و در طراحی‌های نوع DI و U فاصلهٔ بین دو صفحه بیشتر شده است که از این نوع برای عملیات‌های با فشار بالا و شرایطی که نیاز به تمیز کردن مکانیکی باشد، استفاده می‌شود.

محدوده عملیاتی: این نوع مبدل برای استفاده در شرایط دمـایی ۱۸۰°C- تـا ۷۰۰°C و از فشار خلاء کامل تا bar ۴۰ مناسب است. انتقال حرارتهای چند جریانه تـا ۴ جریـان نیـز قابـل سـاخت است.

کاربردهای اصلی: وظایف تبادل حرارتی به طور کلی در این مبدل شامل موارد زیر است:

گاز- گاز / گاز - مایع / مایع - مایع / کندانسورها / تبخیرکننده‌ها

از این نوع مبدل در صنایع شیمیایی، غذایی، نوشـیدنی، کاغـذ، سـیمان و صـنایع سردسـازی استفاده می‌شود و وظیفه شاخص این مبدل بازیابی حرارت در جعبه‌های سرد (cold box) که از چنـد گذر و چند جریان استفاده می‌کنند، می‌باشد.

مقایسه با مبدل پوسته و لوله: بسته به‌اطلاعات سازنده، ضریب کلی انتقـال حـرارت درایـن مبدل‌ها ۲ تا ۴ برابر بیشتر از مبدل پوسته و لوله مشابه خواهد بود. در نتیجه حجم این مبـدل ٪۹۰-۷۵ کاهش می‌یابد، بنابراین فضای مورد نیاز به شدت کاهش می‌یابـد و حتـی فضـای اضـافی دیگـری بـرای عملیات خارج کردنtube bundle نیاز نیست.

۵-۵) مبدلهای صفحه ای جوشی کمپوبلاک[1]

این نوع مبدل بر پایهٔ کاربردهای مبدل‌های پوسته و لوله، مارپیچی و صفحه‌ای طراحی شـده و همچنین مشکلات کاربرد گسکت را ندارد.

نبودن گسکت، این امکان را به ما می‌دهد تا از سیالات با دماهای بالا و مواد شیمیایی آسـیب‌زا در آن استفاده کنیم. همچنین طراحی پیچ‌ومهره‌ای این نوع مبدل‌ها، امکـان جـدا کـردن سـریع قـاب و دسترس به محفظهٔ صفحات را برای تمیز کردن و تعمیرات می‌دهد[۲].

[1] The Compabloc Welded Plate Heat Exchanger

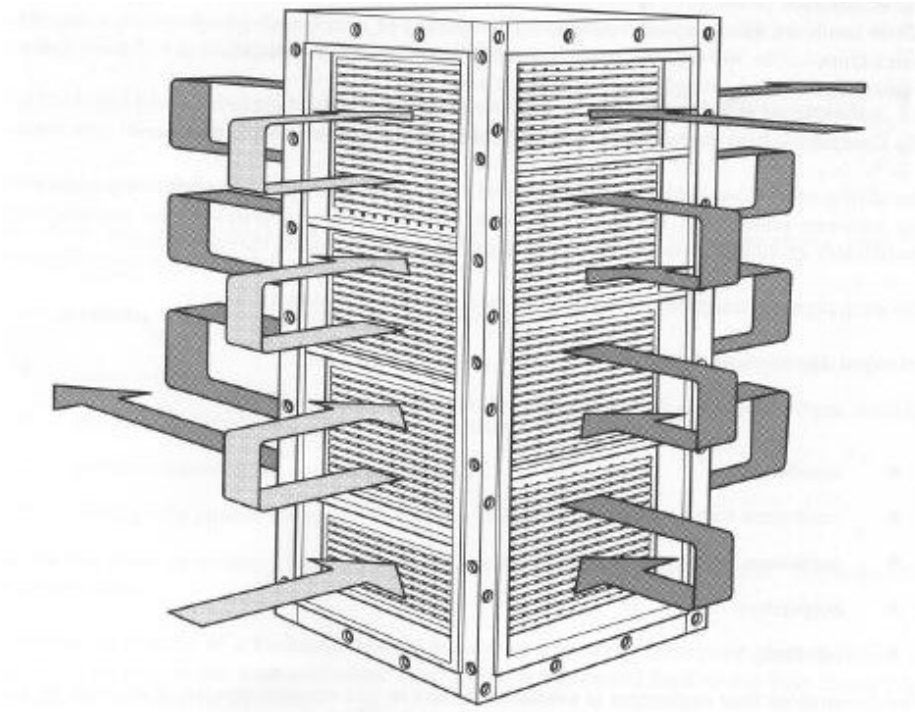
ساخت: در طراحی تک‌گذر مجموعه صفحات به هم فشرده، به گونه‌ای به هم جوش خورده‌اند تا جریان متقاطع باشد. در طراحی‌های با چند گذر، درحالت کلی جریان ناهمسو است. معمولاً فاصله میان صفحات ۵mm می‌باشد.

محدوده عملیاتی: این نوع مبدل برای تحمل شرایط عملیات تا دمای ۳۰۰°C و فشار ۳۲bar طراحی شده‌است. میزان سطح انتقال حرارت دراین مبدل از ۱/۵ تا ۳۰۰ m^2 متغیر می‌باشد. در حالت تک‌گذر با جریان متقاطع این مبدل توانایی بکارگیری بارهای حرارتی با NTU پایین را داراست.

کاربردهای اصلی: کاربردهای عمومی آن شامل سیستم‌های مایع و دو فازی مانند موارد زیر است:

مایع- مایع / کندانسورها (با یا بدون Subcooling) / کندانسورها (با یا بدون inserts) / تبخیرکننده‌ها / جوش آورها

این نوع مبدل قابل استفاده در سرویس‌های خلاء کامل می‌باشد و همچنین امکان استفاده از مایعات تبرید را داراست.



شکل ۵-۶ : شمای کلی مبدل صفحه ای Compabloc

۵-۶) مبدل‌های حلزونی (مارپیچی)[1]

طراحی این مبدل برای نیل به حالت ایده‌ال در تجهیزات انتقال حرارت با حصول شرایط جریانی یکسان برای هر دو سیال انتقال حرارت می‌باشد. مدل کلاسیک این نوع مبدل ساده است، این حالت از دو نوار فلزی پیچیده شده دور یک هستهٔ مرکزی شکل‌دهنده به دو کانال مارپیچی متحدالمرکز ساخته می‌شود. در حالت عادی این کانال‌ها متناوباً جوش داده شده‌اند تا این اطمینان حاصل گردد که سیال‌های سرد و گرم با هم مخلوط نمی‌شوند[۳].

یک مبدل حرارتی می‌تواند برای فرآیندهای مختلفی که در آن کانال‌ها عرض‌های متفاوتی دارند، بهینه گردد. عرض کانال‌های مبدل معمولاً در بازه ۵ تا ۳۰ میلیمتر می‌باشد. عرض صفحه در طول محورهای مبدل می‌تواند ۲ متر باشد و این قطر می‌تواند تا سطح انتقال حرارتی حدود $۶۰۰\ m^2$ را برای ما تامین کند.

پوشش‌های صاف واشری منطبق با سمت باز کانال‌ها موجب دسترسی آسان و کاهش هزینه تعمیرات می‌شود. این مبدل‌ها قابلیت این را دارند که خودشان را تمیز کنند. کانال صاف و خمیده باعث کاهش تمایل به رسوب‌دهی با سیالات مختلف می‌شود. هر سیال تنها در یک کانال عبور می‌کند، پس اگر درون کانال رسوب بگیرد، باعث می‌شود تا سرعت سیال درکانال افزایش یابد و در نتیجه باعث کنده شدن رسوبات از دیواره می‌شود. این عمل خودشستشوی مبدل‌های مارپیچی هزینه‌های عملیات را هنگامی که از واحدهای نصب شده به صورت عمودی استفاده می‌شود به شدت کاهش می‌دهد.

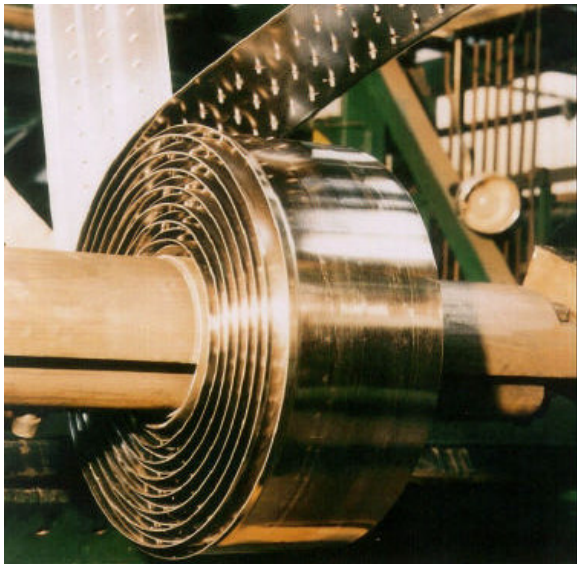
استفاده از حالت نصب عمودی هنگامی ضروری است که از سیالات الیافی، ویسکوز، دارای ذره یا دارای ناخالصی استفاده می‌کنیم. به این صورت تمام ذرات در اثر گرانش در انحنای پائین کانال ته‌نشین می‌گردند.

---

[1] Spiral Heat Exchangers

ساخت: مبدل‌های حلزونی می‌توانند به صورت سفارشی برای بارهای حرارتی مختلف، با تمام فلزاتی که توانایی شکل دهی سرد و جوش دادن را دارند، مانند کربن استیل، فولاد ضدزنگ و تیتانیوم، ساخته شود.

در بعضی موارد از فاصله گذاری دوبل استفاده می‌شود که دراین حالت از ۴ نوار برای مبدل که در آن هر سیال از دو کانال عبور می‌کند، استفاده می‌شود. از حالت دوبل برای مواقعی که دبی جریان بالا یا افت فشار کمی‌داریم، بهره می بریم اما این حالت نباید برای سیالات رسوب‌زا یا دارای ذرات جامد استفاده شود.

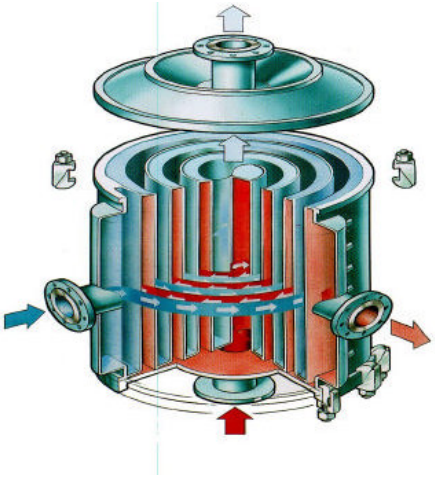


شکل ۵-۷ : فرآیند ساخت مبدل حلزونی

استفاده از مبدل‌های حلزونی به سرویس‌های مایع-مایع محدود نمی‌شود. تنوع در طراحی اولیه آن امکان استفاده برای سرویس‌های مایع-بخار و مایع-گاز را نیز می‌دهد. به طور کلی مبدل‌های حلزونی در سه مدل چیدمان موجودند:

نوع ۱ : جریان سیالات کاملا متقابل

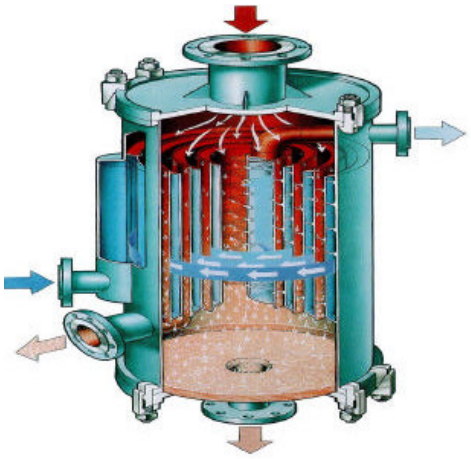
سیال گرم به وسط مبدل وارد می‌شود و از داخل به بیرون جریان می‌یابد. سیال سرد از محیط وارد و به سمت مرکز جریان می‌یابد.



شکل ۵-۸ : جریان سیالات در مبدل حلزونی، نوع ۱

نوع ۲ : یک سیال جریان متقاطع و سیال دیگر جریان مارپیچی

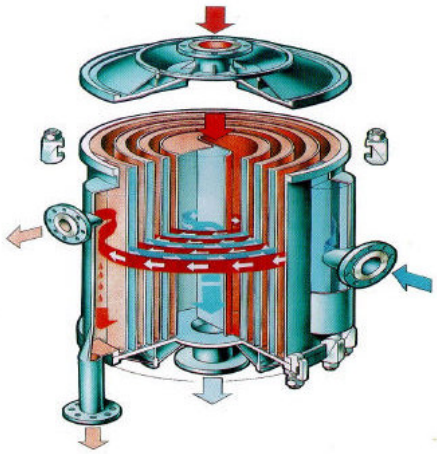
سیال در جریان متقاطع از کانال‌های باز عبور کرده و عموماً در جهت عمودی می‌باشد. سیال سرویس به صورت مارپیچی در کانال دیگر جریان می‌یابد. (مانند شکل ۵-۹) ازاین طراحی می‌توان هم برای کندانسور و هم برای تبخیر کننده استفاده کرد.



شکل ۵-۹ : جریان سیالات در مبدل حلزونی، نوع ۲

نوع ۳ : طراحی ترکیبی

در این نوع مبدل، گاز یا مخلوط بخارومایع به صورت ترکیبی از دو حالت قبلی از کنار هم عبور داده می‌شوند. جریان داغ از بالا وارد و به صورت مماس از محل تعبیه شده روی مبدل خارج می‌شود.



شکل ۵-۱۰: جریان سیالات در مبدل حلزونی، نوع ۳

محدوده عملیاتی: معمولاً، حداکثر دمای طراحی با توجه به محدودیت مواد سازندهٔ گسکت تا ۴۰۰°C می‌باشد. در طراحی بدون گسکت، این دما تا ۸۵۰°C قابل افزایش است. معمولاً حداکثر فشار طراحی ۱۵bar می‌باشد که در طراحی‌های خاص تا ۳۰ bar نیز قابل دستیابی است.

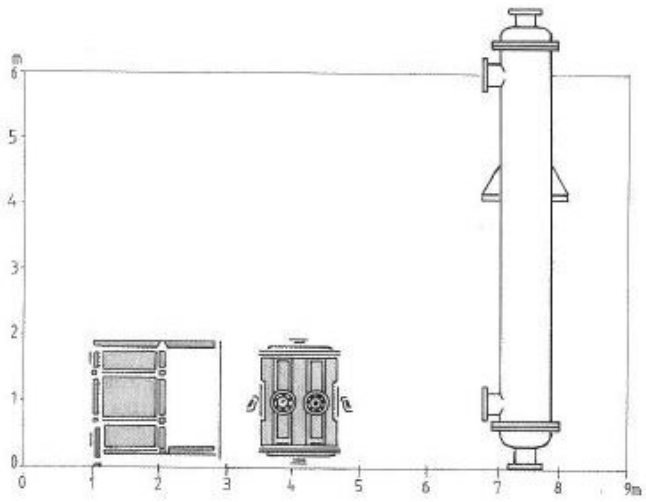
کاربردهای اصلی: این نوع مبدل برای سیالاتی که تمایل به رسوب‌دهی دارند یا آلوده به ذرات هستند، مناسب است که علت این امر بزرگی نسبی عرض کانال است. از این رو، این مبدل برای صنایع غذایی مناسب است. این مبدل‌ها کاربردهای بسیار دارند. در صنایع شیمیایی می توان به انتقال حرارت دوغاب PVC، و بازیابی حرارتی در بسیاری از فرآیندها اشاره کرد. این مبدل‌ها همچنین می‌توانند کنترل دمایی رسوبات فاضلابی را انجام دهند.

مبدل‌های حلزونی از آنجا که دارای جریان متقابل کامل می‌باشند، بهترین امکان را برای کاربرد در بازیابی حرارتی دارا هستند. اگرچه ممکن است ساخت آنها از دیگر انواع مبدلهای صفحه‌ای گران تر باشد.

مقایسه با مبدل پوسته و لوله: مبدل حلزونی نسبت به مبدل پوسته و لوله مزایای بسیاری دارد، مانند :

- شرایط جریان بهینه در دو سوی مبدل
- توزیع متقارن سرعت بدون نقاط مرده در سیال
- توزیع متقارن دما بدون نقاط گرم و سرد
- کارایی حرارتی بیشتر با بازدهی حرارتی بالا
- سازگاری با مشکل تقاطع دمایی در حالیکه در مبدل‌های پوسته و لوله برای کاهش این مشکل، می‌بایست چند پوسته سری شوند.
- زمان اقامت و حجم کم
- قابلت جدا کردن سرپوشی که در معرض جریان قرار دارد، به منظور تمیز کردن و تعمیرات.

برای بار حرارتی یکسان، سطح انتقال حرارت مبدل حلزونی در مقایسه با یک مبدل صفحه‌ای گسکت دار $۹۰m^2$ به $۶۰m^2$ و در مقایسه با پوسته و لوله $۹۰m^2$ به m^2 ۱۲۵ می‌باشد، مقایسه اندازه فیزیکی این سه مبدل با هم در شکل زیر نمایان است.



شکل ۵-۱۱ : مقایسه مبدل‌های صفحه ای گسکت دار، حلزونی و پوسته و لوله

۶) ساختار مبدل های صفحه ای :

به علت وجود انواع مختلف مبدل‌های صفحه‌ای، انتخاب مواد و روش ساخت این مبدل‌ها نیز با هم متفاوت است و به پارامترهایی مانند ظرفیت حرارتی، نوع سیال و کاربرد انتقال حرارت (با ۱ عبور، جوش‌آور، کندانسور و ...) بستگی دارد. اجزای اصلی یک مبدل صفحه‌ای که انتخاب صحیح آنها بسیار حائز اهمیت است صفحات موج‌دار، گسکت‌ها و صفحات انتهایی هستند.

۶-۱) جنس و ساخت صفحات مبدل صفحه‌ای

صفحات موج‌دار که در مبدل‌های حرارتی به کار می‌روند، می‌توانند از فلزات و آلیاژهایی که قابلیت شکل‌دهی سرد و جوش دادن را داشته باشند، ساخته شوند. فولاد زنگ نزن، تیتانیوم، نیکل، آلومینیوم، incoloy، hastelloy و مونل نمونه‌ای از این آلیاژها هستند. انتخاب جنس صفحه با در

نظر گرفتن سازگاری سیال و ظرفیت حرارتی انجام می‌شود. البته فاکتورهایی مانند بهینه کردن طراحی حرارتی و دیگر اولویت‌های سازندگان نیز در این انتخاب نقش دارند[۴].

علت نیاز به فلزات چکش خوار را می توان اینگونه توجیه نمود که در هر مرحله ساخت صفحات برای ایجاد شیار های مناسب بر روی صفحات و همچنین برای ایجاد مکان مناسب برای نصب گسکت ها ما مجبوریم تا صفحات را تحت پرس قرار دهیم و این عمل همراه با ایجاد تنش های مکانیکی جبران ناپذیری در فلز خواهد بود. ایجاد تنش باعث بهم ریختگی ساختار مولکولی فلز گردیده و مقاومت های ثانویه در برابر تنشهای حرارتی و مکانیکی فلز را به شدت کاهش خواهد داد. همچنین باعث کاهش شدید مقاومت در برابر خوردگی فلز خواهد گشت. پس ما مجبوریم برای به حداقل رساندن این آسیب ها از گروهی از آلیاژ استفاده کنیم که آسیب کمتری در طی این فرآیند متحمل می گردند. همچنین علت حذف کربن استیل از فلزات قابل استفاده در ساخت صفحات در حقیقت اثر پرس بر صفحات و بهم ریختگی شدید مولکولی است که در این فلز ایجاد شده و باعث کاهش قابل ملاحظه مقاومت در مقابل خوردگی در این فلز می شود و این فلز را در مبدل های صفحه‌ای غیر قابل استفاده می نماید.

جنس صفحات به صورت کلی به ۴ گروه زیر تقسیم می‌شود:

- فولادهای زنگ‌نزن که شامل آلیاژهایی مانند، 304، 316، 316Ti، 254SMO، 904L، 317، 317LN و 6-XN می شود.
- آلیاژهای نیکل مانند، C-276، C-22، C-2000، G30، D-205، 59، 31، 28، 3033، 825، 686، 625، 400، Nickel 200/201.
- تیتانیوم و آلیاژهای تیتانیوم مانند ASTM Gr1 و Grll.
- دیگر فلزات و آلیاژها و همچنین مواد غیر فلزی مانند گرافیت، مس و آلیاژهای مس، تانتالیوم و آلومینیوم

از آنجا که ضخامت صفحات بسیار کم است، جنس صفحات از مواد با آلیاژهای با گرید بالا انتخاب می‌شود تا خوردگی کاهش یابد. به عنوان مثال در حالیکه در یک مبدل پوسته و لوله برای جریان سیال اسیدی از لوله‌های با جنس فولاد زنگ نزن 316 استفاده می‌شود، برای همین جریان در مبدل صفحه‌ای از آلیاژهای شامل 25Ni، 20Cr، 40Mo، 2Cu و یا Incoloy 825 استفاده می‌شود.

در جدول ۶-۱، یک راهنمای عمومی تجربی برای انتخاب جنس صفحه با توجه به سازگاری سیال ارائه شده است. همچنین از آنجا که در طراحی حرارتی مبدل صفحه‌ای، مقاومت حرارتی صفحات بسیار مهم است، مقادیر اسمی ضریب رسانایی انتقال حرارت (K) برای صفحات رایج و پرکاربرد در جدول ۶-۲ ارائه شده است.

جدول ۶-۱ : راهنمای انتخاب صفحات با توجه به سازگاری سیال

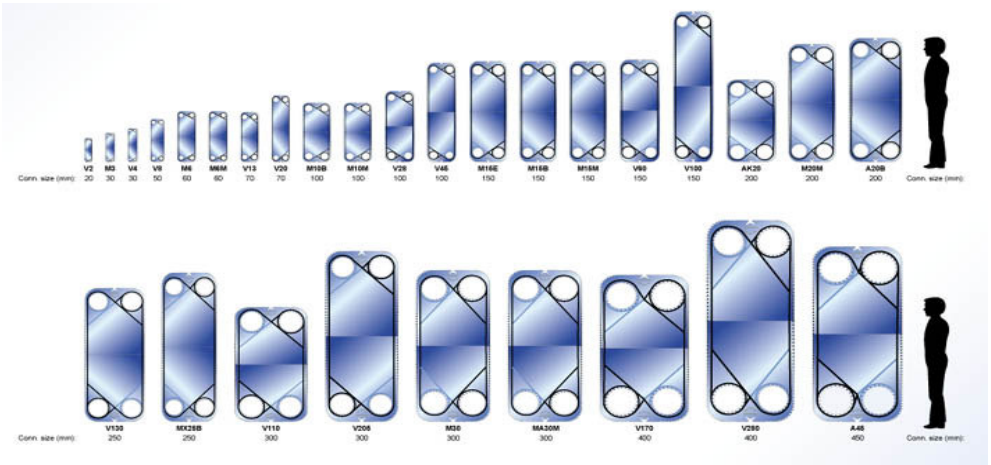
جنس صفحه	سیال
فولاد زنگ نزن (SS)	آب، آب خنک کننده، محلول‌های رقیق کلراید (200 ppm>)، محلول‌های سولفات مس، محصولات غذایی، سیالات دارویی
نیکل	محلول‌های کاستیک (50-70%)
Incoloy	گاز هیدروژن و بخار آب حاوی مس و اسیدها ($70 \leq ^{\circ}C$)
Hastelloy	اسید سولفوریک و اسید نیتریک
تیتانیونم	آب دریا و آب شور، اسیدهای رقیق ($70 \leq ^{\circ}C$)، محلول‌های کلراید (200 ppm>)
آلیاژهای تیتانیوم – پالادیوم	اسیدهای نیتریک و سولفوریک رقیق (غلظت ۱۰٪ و دمای کمتر از $۷۰ ^{\circ}C$)

جدول ۶-۲ : ضرایب انتقال حرارت رسانایی برخی صفحات متداول

فلز	ضریب انتقال حرارت (W/m.k) در 300k
فولاد زنگ نزن (304)	14.9
فولاد زنگ نزن (316)	13.4
آلیاژ 254SMo	13.0
آلیاژ C-276	10.6
نیکل	90.0
آلیاژ نیکل	11.7
Hastelloy	10.6
تیتانیوم	21.9
گرافیت	5.7

۶-۲) سایز صفحات:

سایز رایج برای مساحت صفحات بین ۰/۰۱ تا m^2 ۳/۶ مـی باشـد. معمـولا حـداکثر تـا ۷۰۰ صفحه را می توان در کنار یکدیگر قـرار داد. همچنـین سـاخت مبـدل هـایی بـا مسـاحت کـل بـیش از $۲۵۰۰m^2$ رایج نیست. برای تنظیم آشفتگی جریان و جلوگیری از کم شدن آشفتگی حداقل نسبت طول به عرض ۱/۸ باید در نظر گرفته شود. ضـخامت صـفحات معمـولا حـدود۱/۲mm تـا ۰/۵mm در نظـر گرفته می شود و فاصله صفحات نیز معمولا بین ۵-۲ mm خواهد بود تا سیسـتم در شـرایطی مناسـب بتواند عمل نماید[۴] .



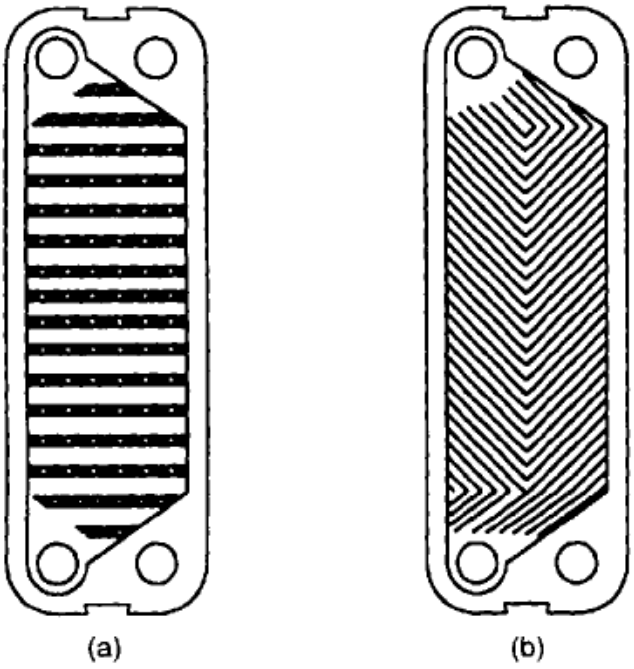
شکل ۶-۱) مقایسه صفحات با ابعاد مختلف

۶-۳) شیارها[1] :

انواع مختلفی از شیارها با شکل ها و الگوهای هندسی متفاوتی در دسترس مـی باشـند، مـدل های رایج تر شیارها عبارتند از :۱- مدل واشـبورد [1] (شـکل ۶-۲ a) ۲- مـدل هرینگبـون یـا چـورون[2] (شکل ۶-۲ b)

[1] Corrugation

اسامی این مدل ها از روی شکل ظاهری آن گرفته شده است. مدل اول شبیه تخته شستشوی لباس بوده و مدل دوم شبیه ساختار تیغ ماهی است .



شکل ۶-۲) a- یک صفحه با شیارهای مدل واشبورد b- یک صفحه با شیارهای مدل هرینگبون

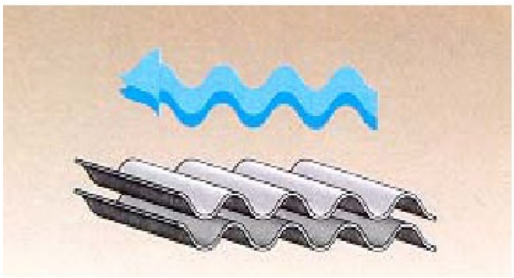
۶-۴) وظیفه شیار ها :

وظیفه شیارها افزایش اثر سطح صفحه و همچنین مقدار سطح و ایجاد آشفتگی مناسب و کافی در کل مبدل می باشد. چگونگی تولید آشفتگی جریان در هر مدل در حقیقت وجه تمایز آن را حاصل می نماید. در مدل واشبورد با ایجاد تغییر مسیر جریان و ایجاد اختلاف سرعت در سیال سعی در ایجاد آشفتگی داریم. در این مدل صفحات مجاور در کنار هم جفت می شوند و با توجه به همشکل

[1] washboard

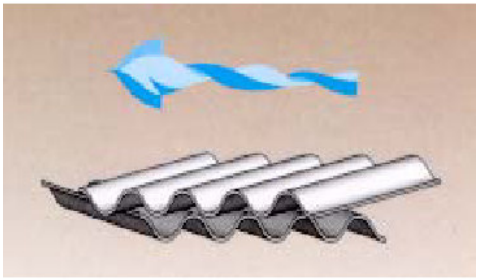
[2] herringbone

بودن صفحات کنار هم می توانیم مجاری جریان مشترکی ایجاد نماییم که جریان در آن حالت چرخشی پیدا نماید. برای این مدل افت فشار قابل قبول با توجه به سایز و مشخصات مبدل بین ۱۰ تـا ۲۵ بـار در نظر گرفته می‌شود[۴].



شکل۶-۳) چگونگی تولید آشفتگی جریان در مدل واشبورد

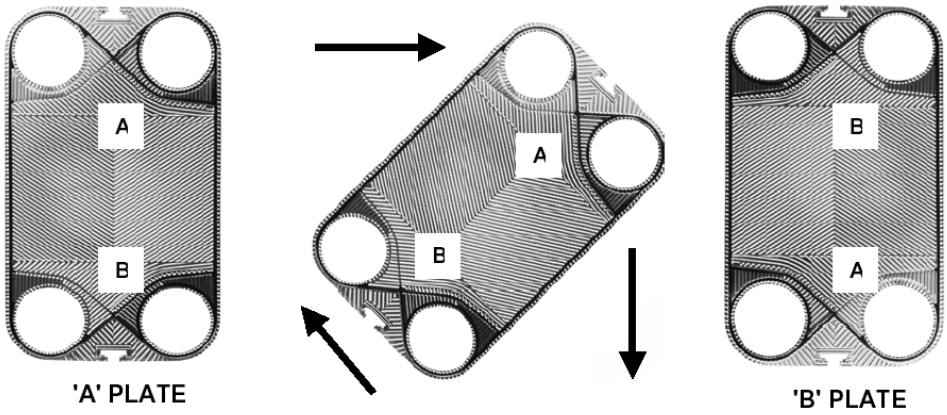
در مدل واشبورد نقاط تقاطع کمتری نسبت به مدل چورون وجود دارد و عمق شیار ها دقیقـا برابر با فاصله صفحات خواهد بود (به دلیل مشابه بودن صفحات، فاصله تمام قسمت ها با هم برابر اسـت) اما در مدل چورون (شکل ۶-۴) به دلیل عکس بودن صفحات نسبت به یکدیگر دقیقا عکس این نکته را مشاهده خواهیم نمود.



شکل۶-۴) چگونگی تولید آشفتگی جریان در مدل چورون

در مدل چورون زاویه ای که از تقاطع خطوط پرس شده روی صفحه پدید می آید نقش بسیار مهمی در ایجاد آشفتگی بر عهده دارد. در این مدل صفحات مشابه به هم پرس شده اما به صورت عکس

هم نصب می گردند .در شکل ۶-۵ چگونگی قرارگیری صفحات نسبت به هم نمایش داده شده است. با این حربه زمینه ایجاد پیچش را در جریان فراهم نموده ایم و باعث ایجاد آشفتگی بیشتر و بهتری می شویم .



شکل۶-۵) چگونگی قرارگیری صفحات نسبت به هم

همچنین در این حالت فاصله بین صفحات در نقاط مختلف متغیر بوده و با توجه به عمق شیارهای ایجاد شده حتی ممکن است از فاصله اسمی صفحات نیز بیشتر گردد. به همین علت، تغییرات سرعت و در حقیقت توزیع سرعت در نقاط مختلف صفحه بهبود یافته که خود باعث افزایش آشفتگی جریان می گردد.

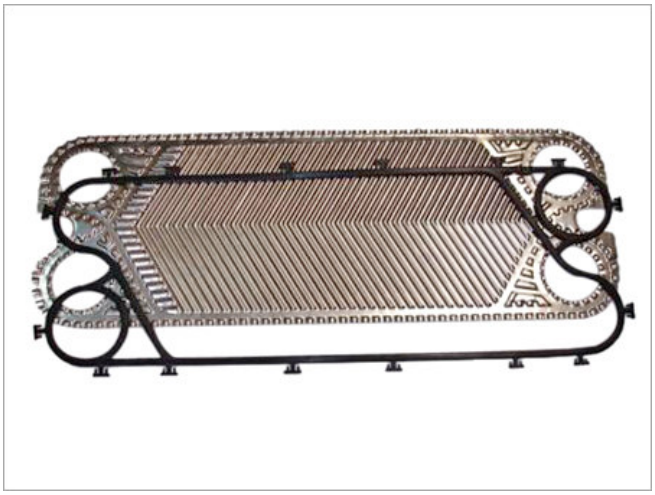
مدل چورون مقاومت بیشتری را در مقابل جریان نسبت به مدل واشبورد از خود نشان می دهد. همچنین این مدل به خوردگی نیز به دلیل تنش های وارده در هنگام ساخت حساس تر خواهد بود. پس مجبوریم برای تحمل فشار بالاتر از فلزات مقاوم تری در ساخت صفحات با این مدل استفاده کنیم و بنابراین هزینه ساخت آن بالاتر می رود.

با توجه به تمام موارد ذکر شده مثل ضریب انتقال حرارت و هزینه های ساخت صفحات و دیگر موارد، محاسبات اقتصادی انجام شده و شیار مناسب انتخاب می شود. تجربه نشان داده است که معمولا مدل چورون مناسب تر خواهد بود .

۶-۵) جنس گسکت

کارایی (ایمنی و اطمینان‌پذیری از آب بندی سیستم) یک مبدل صفحه‌ای قاب و صفحه تا حد زیادی به گسکت‌های به کار رفته در آن بستگی دارد. گسکت‌ها معمولاً قطعات الاستومری هستند و جنس آنها با توجه به سازگاری سیال و دما و فشار عملیاتی، انتخاب می‌شود. گسکت‌ها در شیارهایی که در محیط پیرامونی صفحات طراحی شده است قرار می‌گیرند. هدف این شیارها افزایش سطح تماس صفحه و گسکت است. در قدیم گسکت‌ها به سطح صفحات با چسب‌هایی چسبانده می‌شدند، اما با پیشرفت تکنولوژی ساخت مواد الاستومر، امروزه ساندگان این مبدل‌ها از گسکت‌های فاقد چسب استفاده می‌کنند[۱].

علاوه بر شرایط عملیاتی، قابلیت فشرده شدن گسکت برای مقاومت در مقابل فشار و استرس وارد شده از طرف جریان سیال نیز بسیار مهم است. در جدول ۶-۳ کاربردهای متداول انواع اصلی گسکت‌ها و شرایط دمایی قابل قبول آنها آمده است.



شکل۶-۶) گسکت در صفحه با عبور مورب

جدول ۶-۳ : مشخصات مواد متداول به کار رفته در گسکت‌ها و محدودیت‌های دمایی و کاربردی آنها

نوع ماده	حداکثر دمای عملیاتی [°C]	کاربرد متداول
لاستیک (Rubber)	70	حلال‌های اکسیژن‌دار، اسیدها، الکل‌ها
نئوپرن (Neoprene)	70	الکل‌ها، مواد قلیایی، اسیدها، حلال‌های هیدروکربنی
SBR	85	محلول‌های آبی، مواد قلیایی، اسیدها، حلال‌های اکسیژن‌دار
نیتریل (Nitrile)	135	محصولات لبنی، نوشیدنی‌ها، سیالات دارویی و بیوشیمی، بنزین، روغن‌ها، مواد قلیایی و حلال‌های آبی
Fluoro – elastomer	150	روغن‌ها
بوتیل (Butyl)	155	مواد قلیایی، اسیدها، روغن‌ها، آلدهیدها، کتون‌ها، فنول‌ها، استر
Ethylene propylene Rubber (EPFM)	155	الکل‌ها، هیدروکلرید سدیم، محدوده وسیعی از مواد شیمیایی
Fluorinated rubber	180	روغن‌ها، بنزین، محلول‌های آبی، حلال‌های آلی
سلیکون (Silicone)	180	سیال‌های خورنده

به طور کلی، قیمت مواد گسکت‌ها، متناسب با محدودیت‌های دما، فشار و مقاومت در مقابل خورندگی آن می‌باشد. به طور معمول گسکت‌ها حداقل برای یک سال، در صورتیکه در حداکثر دمای مجاز قید شده در جدول کار کنند، قابل استفاده هستند، اما عمر آنها با ضریب ۲ به ازای هر ۱۰ درجه کاهش دمای عملیاتی از حداکثر دمای قابل قبول گسکت، افزایش می‌یابد.

لازم به ذکر است که امروزه سازندگان از برخی گسکت‌ها که دارای شرایط قابل قبول دمـایی و فشاری بهتری هستند استفاده می‌کنند. در این گسکت‌ها به جای بهبود خواص گسکت با اضـافه کـردن گوگرد، از پراکساید استفاده شده است.

۶-۶) بازرسی و تعمیر:

از خصوصیات صفحات این مبدل ها سهولت در باز و بسته کردن مبدل حرارتی اسـت. در هـر باز و بسته کردن، می توان تمام رسوب ها را تمیز نمود که این مزیت برای سیالات رسـوب گـذار بسـیار حائز اهمیت است. همچنین می توان تمامی قطعات را بازرسی کـرد و در صـورت لـزوم هـر قطعـه و یـا صفحه ای را تعویض نمود. از مشخصات بارز مبدلهای صفحه ای این است که در صورت لـزوم مـی تـوان میزان حرارت تبادل شده با سیال را به میزان مورد نظر تغییر داد. چون مـی تـوان بـه راحتـی تعـدادی صفحه را از مبدل کم کرد و یا تعدادی صفحه به آن اضافه کرد. همچنین با تغییر ترتیب گذر ها نیز مـی توان در میزان حرارت منتقله تغییر ایجاد نمود.

۷)چیدمان و توزیع جریان :

یکی از مزایای مبدل‌های صفحه‌ای، انعطاف‌پذیری آنها در ایجاد چیدمان‌های گوناگون جریان‌های سیال است. این انعطاف‌پذیری با فاکتورهای مختلفی مانند جهت جریان، تعدادگذرها، تعداد عبور در هر گذر، توزیع جریان در کانالها و ورود و خروج بدست می‌آید[۱].

مسیری را که سیال برای انتقال در طول دستگاه (از بالای یک صفحه به پایین یک صفحه یا بالعکس) طی می کند، یک گذر می نامند. در یک مبدل صفحه‌ای با تغییرات مسیر جریان انواع الگوهای جریان می‌تواند وجود داشته باشد که به آن اشاره می شود.

۷-۱)جهت جریان

هنگامی که سیال‌ها در دو طرف یک صفحه در یک جهت جریان دارند، جریان را موازی و وقتی که جهت حرکت سیال‌ها مخالف هم است، جریان را متقابل می‌گویند. معمولاً جریان متقابل به خاطر کارایی حرارتی بالاتر ترجیح داده می‌شود. جریان موازی در شرایط خاص که محدودیت‌هایی مانع چیدمان متقابل می‌شود، استفاده می‌گردد.

۷-۲) گذر

یک چیدمان تک گذر هنگامی به وجود می‌آید که تمامی جریان‌های سیال در کانال‌ها در یک جهت باشد. هنگامی که از یک صفحه با کمتر از ۴ سوراخ برای تغییر مسیر جریان در بخشی از مبدل استفاده می‌کنیم چیدمان دو گذر خواهد بود. در صورت استفاده از ۲ صفحه با سوراخ‌های کور شده، چیدمان ۳ گذر می‌شود و به همین ترتیب تعداد گذرها را می توان افزایش داد. افزایش تعداد گذرها باعث می شود که سیال عملیات انتقال حرارت را در زمان و مسیر بیشتر طی کند.

دو سیال موجود در یک مبدل صفحه‌ای می‌توانند تعداد گذرهای مساوی یا نامساوی داشته باشند. عموماً چیدمان‌های با چند گذر هنگامی که به مقادیر NTU، بالاتر از مقداری که با یک گذر بدست می‌آید، مورد نیاز است، استفاده می‌شود. هنگامی که نسبت میزان جریان‌ها تفاوت زیادی دارد، و یا دلیل خاصی برای کم کردن افت فشار در یک جریان وجود دارد، گذرهای نامساوی با تعداد گذر کمتر برای سیال با افت فشار کمتر، کاربرد دارد.

علاوه بر افت فشار بیشتر، از معایب چیدمان‌های چند گذره نسبت به چیدمان تک گذر، کارایی پایین‌تر به علت موازی شدن جریان‌ها حداقل برای دو صفحه مجاور است، که در چیدمان‌های چند گذر اجتناب‌ناپذیر است.

۷-۳) تعداد مسیرهای عبور در هر گذر

تعداد کانال‌هایی که در هر گذر، سیال در آن جریان دارد تعداد عبور هر گذر گفته می‌شود. به عنوان مثال در شکل ۷-۱-c تعداد عبور در هر گذر برای هر دو سیال ۴ است. این تعداد با توجه به سرعت سیال در کانال‌های جریان انتخاب می‌شود. سرعت‌های بسیار بالا منجر به ناپایداری سیال و سرعت‌های بسیار پایین موجب انتقال حرارت پایین و افزایش رسوب گرفتگی می‌شود. لذا تعداد عبور در هر گذر با توجه به سرعت سیال و سطح انتقال حرارت مورد نیاز انتخاب می‌شود.

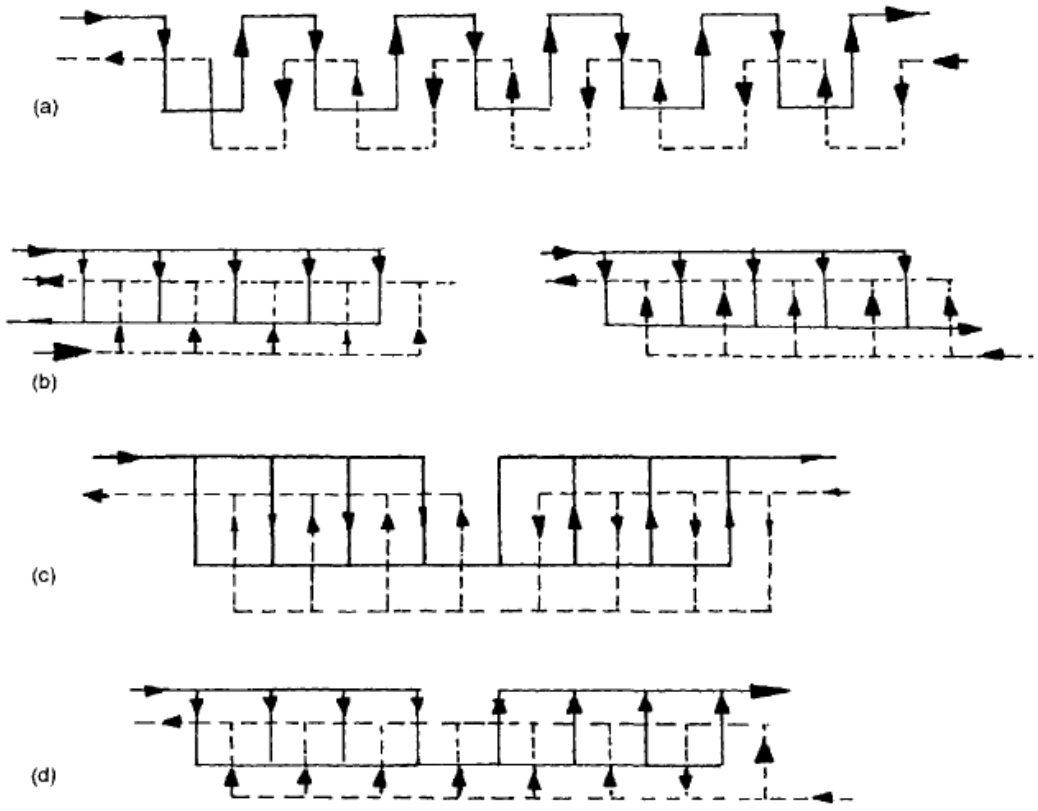
۷-۴) توزیع سیال در مبدل

در مبدلهای صفحه ای دو نوع اصلی توزیع سیال در مبدل که اصطلاحاً چیدمان‌های U شکل و Z شکل گفته می‌شوند وجود دارد. این دو چیدمان در شکل ۷-۱-b نشان داده شده‌اند.

با توجه به اینکه در چیدمان U شکل، اتصالات ورودی و خروجی تنها در یک طرف (سمت قاب مبدل) وجود دارد، در این چیدمان تنها امکان استفاده از یک گذر وجود دارد.

۷-۵) توزیع درون کانال‌ها

از آنجا که قطر ورودی‌های هر صفحه از عرض محدوده انتقال حـرارت کمتـر اسـت، چگـونگی توزیع سیال در درون هر کانال اهمیت پیدا می‌کند. ورودی‌ها می‌توانند به صورت مـورب (ورود و خـروج در دو سمت مخالف صفحه باشند) و یا عمودی (ورودی و خروجی در یک سمت صـفحه) تنظـیم شـوند. این دو نوع توزیع جریان در کانال‌ها در شکل ۷-۲ نشان داده شده است. توزیع دما بر روی صفحات نیـز در این شکل مشخص شده است.



شکل۷-۱) چیدمان گذرها در مبدلهای صفحه ای. a) چیدمان به صورت سری، b) چیدمان به صورت یک گذرU شکل و Z شکل، c) چند گذر با عبورهای مساوی، d) چند گذر با عبورهای نامساوی

۷-۶) تقسیم‌بندی چیدمان گذرها

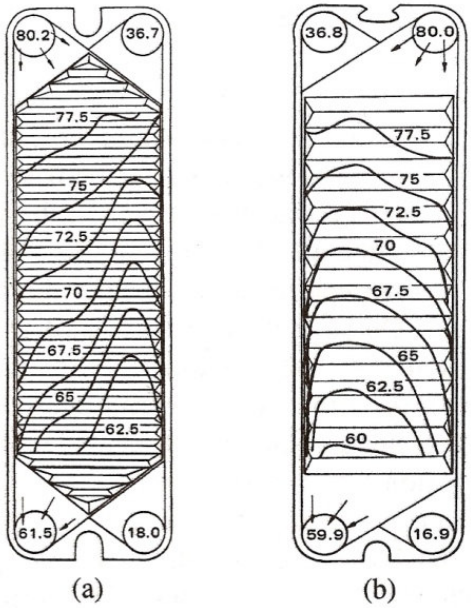
بر پایه چیدمان گسکت‌ها، ترکیب‌های مختلفی از انواع گذرها برای عبور سیالات در مبدل‌های صفحه‌ای ممکن است.

الف- جریان به صورت سری که تمامی جریان از هر صفحه عبور می‌کند و پس از هر عبور تغییر جهت می‌دهد. این چیدمان در جریان‌های سیال با مقادیر کم اقتصادی است و به ندرت استفاده می‌شود[۱].

ب- چیدمان حلقه‌ای که جریان‌ها به چند زیر جریان تقسیم شده، و بیش از خروج از مبدل دوباره با هم ترکیب می‌شوند.

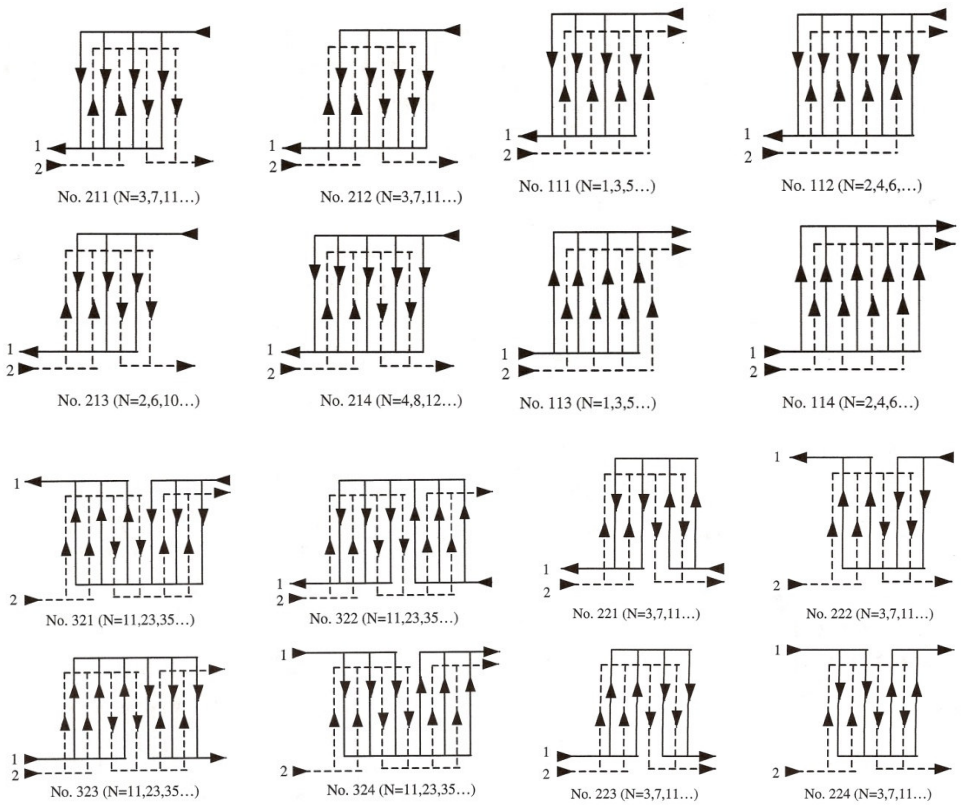
ج- چیدمان‌های پیچیده که از ترکیب چیدمان سری و حلقه‌ای بوجود می‌آیند.

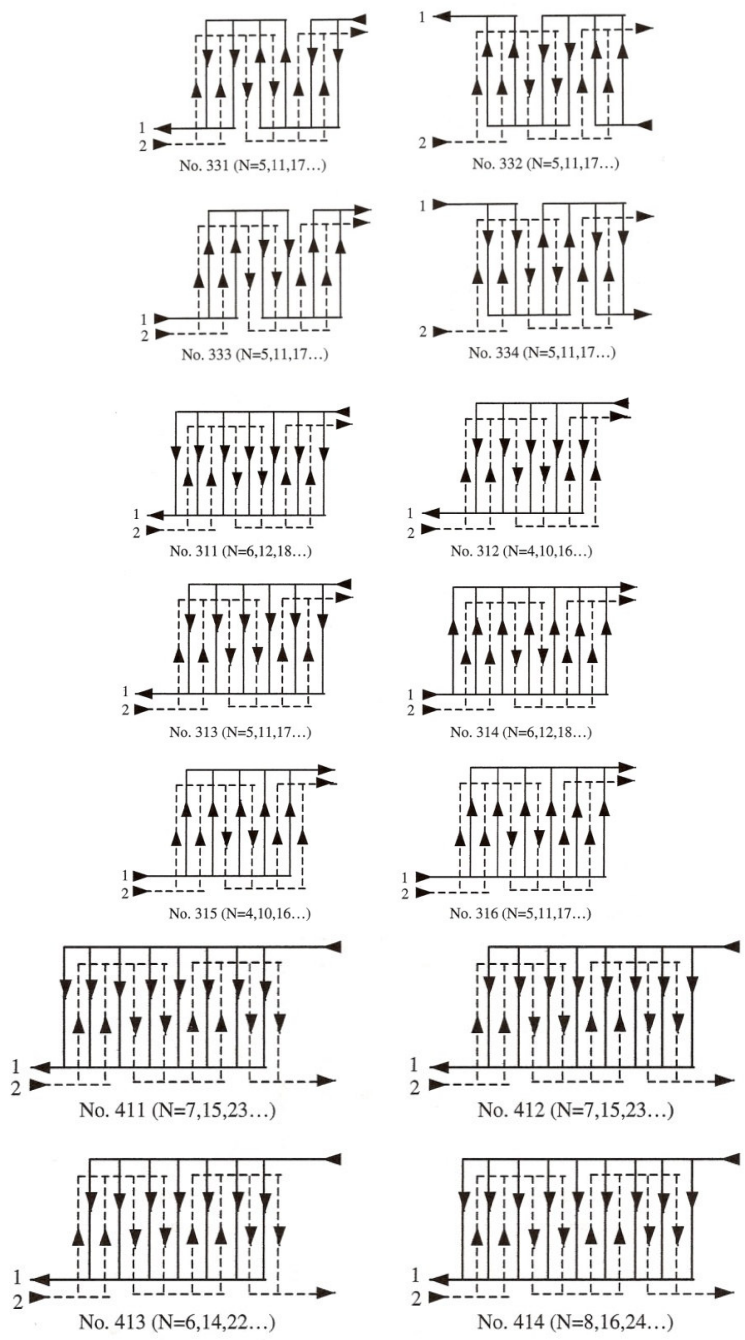
این چیدمان‌ها در شکل ۷-۱ نشان داده شده‌اند.



شکل ۷-۲: توزیع جریان و دما در کانالها

برای شماره گذاری و تقسیم بندی مبدلهای صفحه‌ای روشهای مختلفی وجود دارد که متداولترین آنها روش کاندلیکار و شاه است. در این روش با توجه به تعداد گذرها در هر یک از سیالات برای هر مبدل شماره‌ای اختصاص می یابد. البته برای تعداد مشخص عبور نیز چیدمانهای مختلفی ممکن است که برای هر حالت رسم شده است. با توجه به اینکه در فصل طراحی این کتاب از این تقسیم بندی استفاده شده است، اشکال مربوطه در ادامه آمده است.





شکل ۷-۳ : شماره گذاری چیدمان‌های مختلف مبدلهای صفحه‌ای

۸) کاربرد مبدلهای صفحه‌ای:

ساختار مبدلهای حرارتی صفحه‌ای به گونه‌ای است که این مبدلها برای کاربردهای مایع- مایع و در جریان متلاطم مناسب هستند. اگر چه جریانی که در مبدل پوسته و لوله به صورت آرام است، احتمالاً در مبدل صفحه‌ای دارای جریان متلاطم خواهد بود. تا چندی پیش به خاطر شرایط عملیاتی محدود مبدل های صفحه ای، کاربرد آن ها عمدتا به صنایع غذایی و نوشیدنی محدود می گردید. امروزه با پیشرفت فن آوریهای ساخت، کاربرد آنها به این طیف خاص از صنایع محدود نبوده و هر کجا که نیاز به استفاده از مزایای این نوع از مبدل ها باشد، از آن ها استفاده می گردد. صنایع تهویه مطبوع، صنایع غذایی، دارویی و بهداشتی، صنایع نفتی و شیمیایی، نیروگاه‌ها، تأسیسات دریایی نفت و گاز، کشتی‌ها و صنایع چوب و کاغذ نمونه از موارد مورد استفاده مبدلهای صفحه‌ای است. از میان صنایع فوق، کاربرد در تأسیسات دریایی و صنایع شیمیایی و همچنین مواردی که استفاده از مبدلهای صفحه‌ای مناسب نیست، بررسی می‌شود.

۸-۱) مواردی که استفاده از مبدلهای صفحه‌ای مناسب نیست

در برخی از موارد به شرح زیر استفاده از مبدلهای صفحه‌ای مناسب نیست و پیشنهاد نمی شود[۴].

الف) کاربردهای گاز-گاز

ب) سیالات با ویسکوزیته بسیار بالا. به خصوص هنگام استفاده برای سرد کردن سیال ویسکوز، ممکن است منجر به مشکلات توزیع جریان گردد. لذا برای سرعتهای کمتر از $۰/۱\ m/s$ به علت ضریب انتقال حرارت پایین و کاهش راندمان از این مبدلها استفاده نمی‌شود.

ج) این مبدلها برای شرایطی که بخار در شرایط خلأ، مایع می‌شود مناسب نیستند.

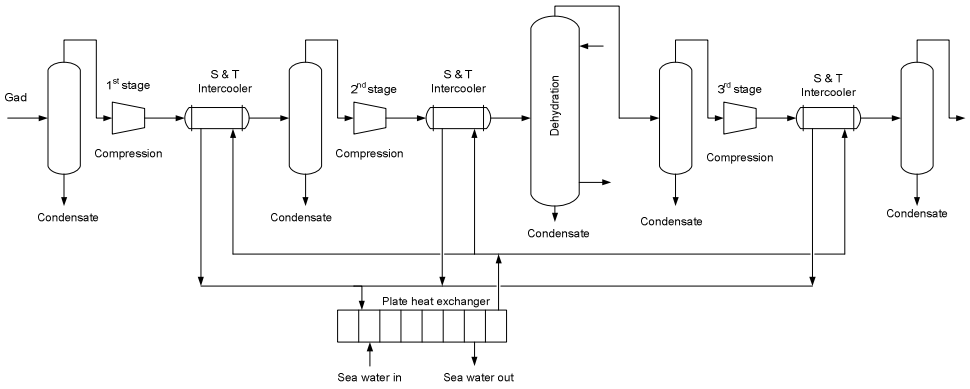
۸-۲) کاربرد در تأسیسات دریایی نفت و گاز

صرفنظر از مکان سکوی دریایی تولید نفت و گاز و نوع چاه محصول استحصالی، نیازهای گرمایشی و سرمایشی از ضروریات تأسیسات دریایی هستند. نیاز به تجهیزات انتقال حرارت، به عوامل مختلفی مانند وجود تأسیسات افزایش فشار گاز و یا تصفیه نفت خام بر روی سکو وابسته است. محدودیت اصلی در انتخاب این تجهیزات، مقاومت نسبت به شرایط خورنده محیط، ابعاد کوچک و وزن کم می‌باشد. مبدلهای صفحه‌ای علاوه بر نداشتن محدودیت‌های عملیاتی فوق، توانایی تغییر ظرفیت حرارتی با توجه به تغییرات نیازهای حرارتی را دارند[۱].

یکی از کاربردهای متداول مبدلهای صفحه‌ای، در تجهیزات افزایش فشار گاز بر روی سکوهای نفتی است. فشرده کردن گاز طبیعی یک فرآیند چند مرحله‌ای گرمازاست که لازم است حرارت تولید شده توسط مبدلهایی که با آب خنک کار می‌کنند، در بین مراحل فشرده سازی دفع شود. این مبدلها که با یک سیکل بسته آب خنک کار می‌کنند، حرارت خود را از طریق یک مبدل صفحه‌ای از جنس تیتانیوم که با آب دریا خنک می‌شود، از دست می‌دهند. شکل ۸-۱ نمای جریان فرآیند را برای فشرده-سازی سه مرحله‌ای نشان می‌دهد.

مبدلهای صفحه‌ای همچنین در رطوبت زدایی از سیالات نفتی، سرمایش سیستم‌های روانکاری و هیدرولیک، سیستم‌های تهویه مطبوع[1] و ..... بر روی سکوهای دریایی کاربرد دارند.

[1] Heating, Ventilating, and Air Conditioning (HVAC)

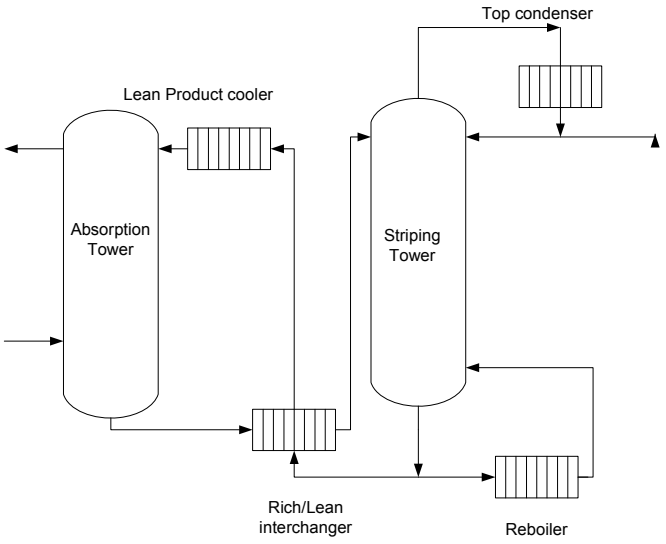


شکل۸-۱) شمای کلی سیکل سیال خنک کننده در تجهیزات سکوی نفتی

۸-۳) کاربرد در فرآیندهای شیمیایی

در فرآیندهای شیمیایی، انتقال حرارت نقش کلیدی در راندمان فرآیند و در کل اقتصاد فرآیند دارد و لذا انتخاب مبدلهای حرارتی بهینه بسیار حیاتی است. برای بررسی بهتر چند نمونه از عملیاتهای رایج حرارتی شامل جذب و دفع، تقطیر و کنترل دمای راکتور بررسی می‌شود[۱].

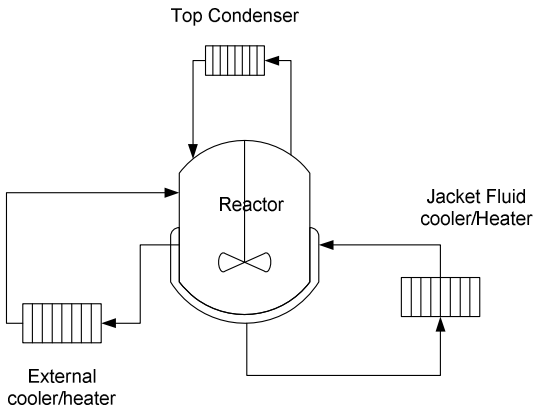
سیستمهای جذب و جداسازی: یک نمونه از فرآیند جذب و جداسازی مواد آلی در شکل ۸-۲ نشان داده شده است. یکی از اهداف اقتصادی واحدهای جذب، کاهش میزان مصرف حلال است. همچنین کاهش مصرف حلال علاوه بر صرفه جویی اقتصادی، یکی از اهداف مورد نیاز برای تطبیق با قوانین حفاظت از محیط زیست میباشد. راندمان مبدل در راندمان کل سیستم جذب و دفع بیشترین تأثیر را دارد. در این فرآیند سیال رقیق (عاری از مواد آلی فرار) باید پیش از ورود به برج جذب خنک شود و سیال غنی (حاوی مواد فرار) نیز باید بیش از ورود به برج جداسازی، پیش گرم شود. افزایش راندمان فرآیند نیازمند افزایش بازیابی حرارتی و کاهش مصرف سیستمهای گرمایش و سرمایش است.



شکل۸-۲) شمای کلی فرآیند جذب و جداسازی مواد آلی

قابلیت فعالیت در دمای همگرایی کم (Approach Temp.)، که مبدلهای صفحه‌ای دارند، کاربرد آنها را بدین منظور منطقی می‌کند. همچنین به علت جریان متقابل در مبدلهای صفحه‌ای، مشکل تقاطع دمایی (Temperature Cross) وجود ندارد.

واحد تقطیر: در یک برج تقطیر یک کندانسور و یک جوش آور به ترتیب در بالا و پایین برج وجود دارند. مبدلهای صفحه‌ای به علت حجم و وزن کم و امکان نصب آسان در بالای برج برای استفاده به عنوان کندانسور مناسب هستند و هزینه‌های نصب را نیز کاهش می‌دهند. همچنین با نصب این مبدلها در بالای برج به علت بازگشت جریان با کمک جاذبه، نیازی به استفاده از پمپ نیست. همچنین می‌توان مبدلهای صفحه‌ای را با جوش آورهای معمولی جایگزین کرد که حجم کم و سادگی سیستم Piping از مزایای آن خواهد بود.

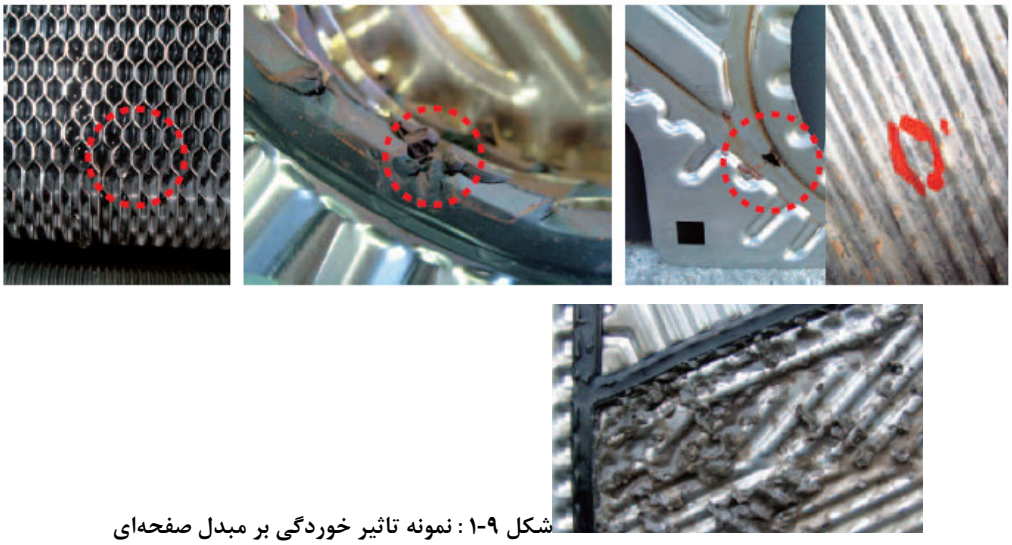


شکل۸-۳)مبدل صفحه ای برای کنترل دمای راکتور

کنترل دمای راکتور: در فرآیندهای جدید شیمیایی کنترل صحیح دمای راکتور تأثیر بسیار زیادی در راندمان تولید محصول دارد. با عدم کنترل صحیح دمای راکتور با مشکلاتی مانند طولانی شدن زمان واکنش، کیفیت پایین محصول، دور ریز مواد اولیه، مصرف بیش از حد انرژی و اضافه شدن زمان جابه‌جایی در فرآیندهای بچ، مواجه می‌شویم. نتیجه نهایی این مشکلات افزایش هزینه‌های تولید و از دست دادن قدرت رقابتی خواهد بود. انتقال حرارت مؤثر از ایجاد این مشکلات پیشگیری خواهد کرد. رایج‌ترین راه کنترل دمای راکتور استفاده از ژاکت برای راکتور است. (شکل۸-۳)مبدل صفحه ای برای کنترل دمای راکتور). این روش به علت کم بودن سطح تماس روش مؤثری نیست. یک روش بهتر، استفاده از یک سیکل گرمایش و یا سرمایش خاص و استفاده از مبدلهای مخصوص برای هر راکتور است. مبدلهای فشرده صفحه‌ای برای این منظور مناسبند. علاوه بر این به علت تغییر متناوب سیکلهای گرمایشی و سرمایشی در فرآیندهای بچ، مبدلهای معمولی به خصوص هنگامی که تغییرات دمایی زیاد است مناسب نیستند. مبدلهای صفحه‌ای به علت توانایی تغییر ظرفیت بالا این مشکل را حل می‌کنند.

۹) خوردگی، سائیدگی و رسوب گرفتگی در مبدلهای صفحه‌ای

اصلی ترین عامل عدم کارکرد مناسب مبدلهای صفحه‌ای رسوب گرفتگی و همچنین خوردگی و سائیدگی صفحات مبدل است. در رسوب گرفتگی به علت باریکتر شدن مسیر جریان، سرعت افزایش یافته و در نتیجه افت فشار سیال و مصرف انرژی پمپ افزایش می‌یابد. اگر چه به علت افزایش سرعت، ضریب انتقال حرارت جابجایی اندکی افزایش می‌یابد اما چون مقاومت صفحات انتقال حرارت افزایش یافته است، میزان انتقال حرارت نهایی کاهش می‌یابد.



شکل ۹-۱ : نمونه تاثیر خوردگی بر مبدل صفحه‌ای

خوردگی به دلیل تغییر ماهیت فلز پس از واکنش با محیط اطراف بوجود می‌آید و می‌تواند منجر به از کار افتادن مبدل و اختلال در فرآیند شود. سائیدگی نیز بدلیل از دست رفتن سطح صفحه به علت سرعت بالای سیال و یا ذرات معلق در سیال بوجود می‌آید. در مبدلهای صفحه‌ای خوردگی و سائیدگی باید در حداقل ممکن کنترل شوند تا ضخامت کم صفحات حفظ شود. میزان خورنده بودن سیال در انتخاب نوع صفحه مؤثر است. در مبدلهای صفحه‌ای معمولاً جنس صفحات از فلزات ضد خوردگی است. باید توجه داشت که خوردگی، سائیدگی و رسوب گرفتگی به صورت مستقل عمل نمی-کند و هر یک بر دیگری مؤثر است.

۹-۱) مکانیزم اصلی رسوب گرفتگی

رسوب گیری یک فرآیند وابسته به زمان است. یک مبدل حرارتی تازه نصب شده پس از مدت زمان مشخصی با ضریب ثابت رسوب گرفتگی طراحی شده مواجه میشود. رسوب گرفتگی به طور معمول از ۵ مرحله زمانی تشکیل شده است. این مراحل بـه ترتیـب مرحلـه آغـازین[۱]، انتقـال جـرم[۲]، رسـوب[۳]، جداشدن[۴]، رشد و استحکام[۵] میباشند. این مراحل به اختصار معرفی میشوند:

مرحله آغازین: پس از راه اندازی اولیه یک مبدل حرارتی تمیز، به منظور ثبت مقادیر رسوب گرفتگی نیاز به گذر دوره زمانی مشخصی میباشد. این دوره زمانی با عنوان دوره اولیه و یا دوره نهفتگـی شناخته میشود. در طول این مرحله زمانی، سطح برای رسوب گرفتگی آماده میشود. دمای سـطح، مـاده عبوری، زبری و سایر موارد بر تاخیر مرحله اولیه تاثیر گذار است.

انتقال جرم: در طول مرحله انتقال جرم، شرایط لازم برای رسوب مواد فراهم می آیـد و مـواد رسوبی از جریان عبوری به سطح انتقال حرارت منتقل میشوند. این انتقال با استفاده از پاره ای از پدیده های انتقال مانند نفوذ و ته نشینی صورت میگیرد.

رسوب: در طول این دوره زمانی ذرات رسوب یافته به سطح انتقال حرارت میچسبند. سـرعت رسوب به سرعت نفوذ و انتقال جرم و همچنین سرعت واکنش شیمیایی در سطح انتقال حرارت وابسـته است.

---

[1] Initiation

[2] Mass Transport

[3] Deposition

[4] Removal

[5] Ageing

جداشدن: برخی از مواد بلافاصله پس از رسوب از سطح کنده میشوند. در حالیکه جداسازی بقیه ذرات با تاخیر صورت میگیرد. نرخ کنده شدن به قدرت رسوب و نیروهای تنشی سیال بستگی دارد. انحلال، ساییدگی و خرد شدن از جمله مهمترین مکانیسمهای جداشدن هستند.

رشد: پس از اینکه رسوب تشکیل شد، براثر تغییرات فیزیکی و شیمیایی در این مرحله ممکن است رسوب تقویت و یا سست تر شود.

در مبدلهای صفحه ای، فاکتورهای موثر بر تشکیل رسوب عبارتند از شرایط عملیاتی، خواص سیال، طراحی صفحه و غیره. به طور معمول، شش نوع متفاوت از رسوب گرفتگی شناسایی شده اند. رسوب گرفتگی را می‌توان به انواع زیر تقسیم کرد:

۱- رسوب حاصل از ذرات معلق

۲- رسوب به علت تبلور (کریستالیزاسیون)

۳- رسوبهای زیستی (بیولوژیک)

۴- رسوب ناشی از خوردگی

۵- رسوب ناشی از واکنش شیمیایی

۶- رسوب به علت جامد شدن اجزای سیال

شکل ۹-۲- نمونه رسوب گرفتگی در یک مبدل صفحه ای

تاثیر فاکتورهای موثر بر رسوب گرفتگی برای انواع مختلف رسوب متفاوت است، اگرچه انواع مختلف رسوب به طور همزمان اتفاق می افتند و گاهی تشخیص و جداکردن آنها از هم غیر ممکن است. به همین دلیل در برخی از مطالعات صورت گرفته، رسوب گرفتگی بدون تعیین نوع مشخصی از آن بررسی میشود.

۹-۲) معادلات پایه رسوب گرفتگی

در یک مبدل حرارتی، فرآیند انتقال حرارت از بخشهای مختلف رسانایی و همرفتی تشکیل شده است. هر بخش را می‌توان با یک مقاومت انتقال حرارت نشان داد و مجموع آنها مقاومت حرارتی کل را نشان می‌دهد. معکوس این مقاومت، ضریب کلی انتقال حرارت «U» خواهد بود. در مبدلهای صفحه‌ای این ضریب از فرمول زیر محاسبه می‌شود[۱].

$$\frac{1}{U}=\frac{1}{h_1}+\frac{1}{h_2}+\frac{\delta_p}{k_p}+R_{f,1}+R_{f,2}$$

در عبارت فوق h_1 و h_2 ضرایب انتقال حرارت در دو سیال جاری در سیستم، و واحد آن $\frac{w}{(m^2.k)}$ است. δ_p ضخامت صفحه با واحد متر و k_p ضریب انتقال حرارت رسانایی صفحه با واحد $\frac{w}{(m.k)}$ است. $R_{f.1}$ و $R_{f.2}$ ، مقاومت رسوب صفحه در دو سمت جریانهای ۱ و ۲ می‌باشد که با واحد $\frac{m^2.k}{w}$ مشخص می‌گردد. هنگامی که مبدل جدید است، این مقاومت صفر در نظر گرفته می‌شود. در این شرایط ضریب کلی انتقال حرارت را U_c می‌نامند. با توجه به اینکه مقاومت کل رسوب در مبدل مجموع مقاومت رسوب در دو طرف صفحه است، می‌توان معادله زیر را برای محاسبه سطح انتقال حرارت در حالت رسوب دار و حالت تمیز استفاده کرد.

$$\frac{A_f}{A_c}=1+U_cR_f$$

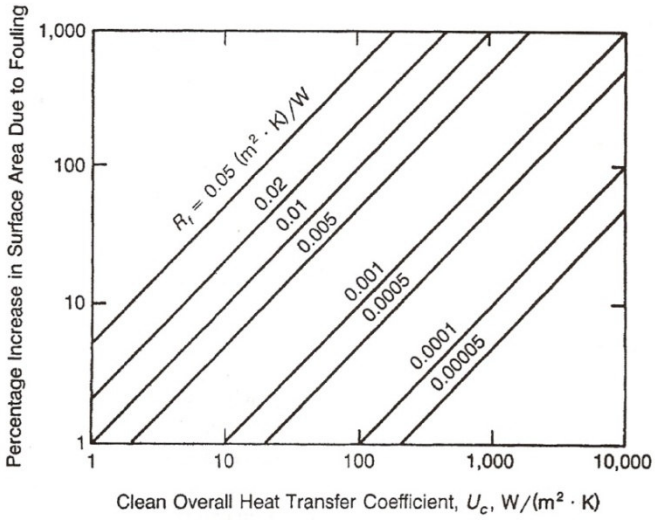
در این معادله A_f با واحد m^2 نشان دهنده سطح انتقال حرارت در حالت صفحات رسوب دار و A_c نشان دهنده سطح انتقال حرارت با صفحات تمیز است. همچنین R_f نشاندهنده مجموع مقاومت رسوب میباشد.

$$R_f = R_{f1} + R_{f2}$$

همانطور که در شکل ۹-۳ مشخص است، تأثیر ضریب انتقال حرارت کل بر افزایش سطح انتقال حرارت مورد نیاز بسیار زیاد است. بدین صورت که هر چه ضریب انتقال حرارت کل در حالت تمیز بیشتر باشد، وجود رسوب، سطح مورد نیاز را بسیار بیشتر افزایش خواهد داد.

به عنوان مثال در صورتیکه ضریب کلی انتقال حرارت را برابر ۱۰۰ $\frac{w}{(m^2.k)}$ در نظر بگیـریم و مقاومت انتقال حرارت ناشی از رسوب گرفتگـی ۰/۰۰۰۱ $\frac{m^2.k}{w}$ باشـد، میـزان سـطح مـورد نیـاز ۱ درصد بیشتر از سطح اولیه خواهد بود در حالیکه همـین میـزان مقاومـت انتقـال حـرارت بـرای شـرایط ضریب انتقال حرارت ۱۰۰۰۰ $\frac{w}{(m^2.k)}$، به مقدار صد درصد افزایش در سطح مورد نیـاز ایجـاد خواهـد کرد.

از این منظر، تاثیر رسوب گرفتگی بر عملکرد مبدلهای صفحه ای به نسبت مبـدلهای پوسـته و لوله بسیار شدیدتر است، زیرا ضریب انتقال حرارت در این مبدلها بالاست.



شکل ۹-۳ : تاثیر ضریب کلی انتقال حرارت بر افزایش سطح مورد نیاز به علت رسوب‌گرفتگی

۹-۳) در نظر گرفتن رسوب در طراحی

از آنجا که ایجاد رسوب در مبدلها امری اجتناب ناپذیر است، باید در طراحی اولیه مبدل بـا در نظر گرفتن میزان رسوب ممکن، تعداد و سطح صفحات را به گونه‌ای انتخاب کرد تا اثر رسوب در انتقـال

حرارت دیده شود. مبدلهای صفحه‌ای نسبت به مبدلهای پوسته و لوله تأثیر کمتری از رسوب می‌پذیرند و ضریب رسوب آنها ۲۰ تا ٪۲۵ ضریب رسوب مبدلهای پوسته و لوله مشابه است. در جدول ۹-۱ مقاومت رسوب برای برخی از سیالات، که می‌بایست در طراحی مبدل مورد توجه قرار گیرد، آمده است[۱].

جدول ۹-۱ : مقاومت ناشی از رسوب برای برخی سیالات رایج

سیال	مقاومت ناشی از رسوب ($\frac{m^2.k}{w}$)
آب بدون املاح	0.000009
آب شهر (با سختی کم)	0.000017
آب شهر (با سختی زیاد)	0.000043
آب خنک کننده (تصفیه شده)	0.000034
آب دریا (اقیانوس)	0.000026
آب رودخانه	0.000043
روغن‌های روان‌کننده	0.000017-0.000043
روغن‌های گیاهی	0.000017-0.000052
حلالهای آلی	0.000009-0.000026
بخار	0.000009
سیالهای فرآیندی، عمومی	0.000009-0.000052

علاوه بر در نظر گرفتن مقدار مقاومت رسوب، در مبدلهای صفحه‌ای چگونگی افزایش سطح انتقال حرارت نیز مهم است، زیرا چگونگی تغییر این چیدمان، سرعت جریان و دمای سطح صفحه را تحت تأثیر قرار داده و در نتیجه میزان رسوب را تغییر می‌دهد. این تأثیر در جدول شماره ۹-۲ اشاره شده است.

جدول ۹-۲ : چگونگی تاثیر چیدمان صفحات در میزان رسوب

	تاثیر مورد انتظار بر		
روش تغییر طراحی	**سرعت سیال**	**دمای دیواره**	**میزان رسوب**
صفحات بلندتر	↑	↓	↑
صفحات عریض‌تر	↑	↑	↑
صفحات بزرگتر با نسبت طول و عرض مشابه صفحات قبلی	→	→	→
افزایش تعداد صفحات	↓	↑	↑
افزایش صفحات با دو گذره کردن صفحات اصلی	↑	↓	↓

برای کمتر کردن میزان رسوب، اولویت روش‌های افزایش سطح انتقال حرارت به شرح زیر است:

۱- افزایش سطح با دو گذره کردن چیدمان صفحه‌های اصلی

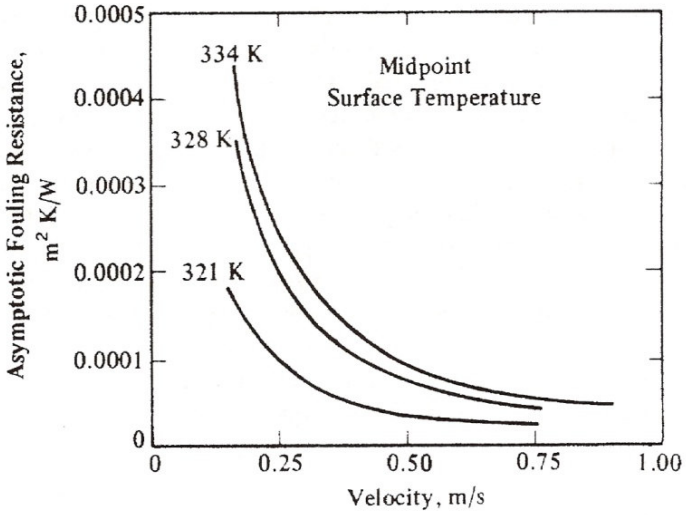
۲- استفاده از صفحاتی با عرض مشابه صفحات اصلی اما طول بیشتر

۳- استفاده از صفحات بزرگتر با نسبت طول به عرض استاندارد

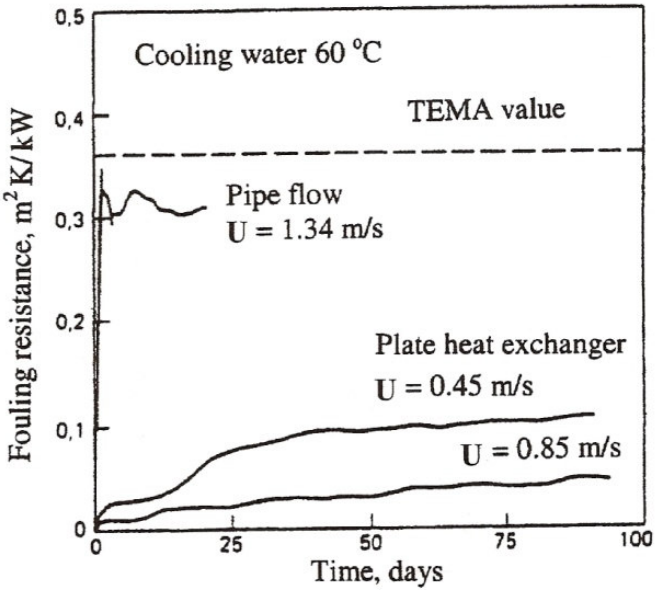
۴- بدترین نتیجه با اضافه کردن صفحه جدید بدست می‌آید.

رسوب گرفتگی در مبدلهای صفحه ای بسیار کمتر از مبدلهای پوسته و لوله است، اگر چه مانند مبدلهای پوسته و لوله با افزایش سرعت، میزان مقاومت حرارتی ناشی از رسوب گرفتگی کاهش می یابد. همچنین با افزایش دما این مقاومت افزایش خواهد یافت. در شکل ۹-۴ تأثیر این دو پارامتر نشان داده شده است. این شکل نتیجه مطالعاتی است که بر روی مبدل صفحه ای مدل APV R405 صورت گرفته است. در این مطالعات از آب خنکی که پیش از ورود به مبدل به صورت شیمیایی تصفیه

شده، استفاده گردیده است. همچنین شکل ۹-۵ مقایسه میزان رسوب گرفتگی بین مبدل‌های صفحه‌ای و پوسته و لوله را برای عبور آب خنک کننده نشان می‌دهد.



شکل۹-۴) تاثیر سرعت و دما بر مقاومت انتقال حرارت



شکل۹-۵) مقایسه میزان رسوب گرفتگی بین مبدل‌های صفحه‌ای و پوسته و لوله

۹-۴) روش‌های کاهش میزان رسوب گرفتگی

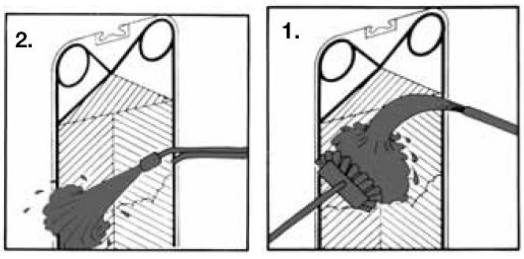
برای حذف و کاهش رسوبات از مبدل، روشهای مستقیم و غیرمستقیم وجود دارد. در روشهای غیرمستقیم باید مبدل از فرآیند خارج گردد. لذا این روش‌ها در مواقع تعمیرات استفاده می‌شوند. در روشهای مستقیم، بدون خارج کردن مبدل از فرآیند از تشکیل رسوب جلوگیری می‌کنیم.

۹-۴-۱) روشهای غیر مستقیم

دو روش غیرمستقیم برای تمیز کردن صفحات وجود دارد.

الف) روش با جابجایی

در این روش صفحات از مبدل جدا شده و در خارج از مبدل بصورت شیمیایی و یا مکانیکی تمیز می شوند. در این روش باید مبدل را باز کرد و لذا تنها در مبدلهای قاب و صفحه ممکن است. برای شستشوی مکانیکی از برسهای غیرفلزی و یا سیال با فشار بالا استفاده می‌شود. در روش شیمیایی با توجه به میزان و نوع رسوب از مواد مختلفی استفاده می‌شود. رایج‌ترین این مواد، آب داغ، اسید نیتریک، اسید سولفوریک، اسید سولفامیک، اسید سیتریک، اسید فسفریک و پلی فسفات سدیم است. برای رسوبهای زیستی و لجنی مواد قلیایی مانند سود و کربنات سدیم مؤثر است. برای تمیز کردن باقیمانده روغنها، آسفالتها و چربیها باید از حلالهای آلی مانند نفت سفید استفاده کرد. حلالهای خانواده های کتون، استر، هیدروکربنهای هالوژنه و آروماتیک برای این منظور مناسب نیستند. همچنین از آب با بیش از ۳۰۰ ppm کلر نباید برای تهیه محلول تمیز کننده استفاده کرد.



شکل ۹-۶ : ۱- شستشو با برس نرم و آب روان ۲ - شستشو با آب تحت فشار

ب) روش بدون جابجایی

در این روش نیازی به باز کردن صفحات نیست و در تمام انواع مبدلهای صفحه‌ای کاربرد دارد. در این روش یک حلال شیمیایی را برای حل کردن و خارج کردن رسوبات در مبدل به جریان می‌اندازند. این روش برای نگهداری کارآیی مبدل در مقدار بهینه، مقرون به صرفه است. انتخاب ماده شیمیایی به نوع رسوب و جنس صفحات وابسته است. به هیچ وجه نباید از اسید کلریدریک برای تمیز کردن صفحات استینلس استیل و یا از اسید هیدروفلوریک برای تمیز کردن صفحات تیتانیومی استفاده کرد.

مواد حاوی آمونیاک و اسیدهای اکسید کننده مانند اسید نیتریک نباید برای تمیز کردن صفحاتی از جنس نیکل، مونل، hastalloy B و مبدلهای مس – برنج استفاده شوند.

باید توجه کرد که در صورت استفاده از ماده شیمیایی غیرصحیح برای شستشو، صفحات خورده شده و باید تعویض گردند.

۹-۴-۲) روشهای مستقیم

برای تمیز کردن مستقیم مبدلها در جریان فرآیند روشهای مختلفی از جمله استفاده از صافی، استفاده از جریان مخالف و یا تزریق مواد شیمیایی وجود دارد[۱].

- استفاده از صافی‌ها

صافی‌ها هنگامی که سیستم باز است (مانند برج خنک کننده) و مقادیر زیادی از مواد زائد به صورت معلق در سیال وجود دارد، استفاده می‌شود. این تجهیزات از مسدود شدن مبدلها هنگامی که از آب با کیفیت پایین استفاده می‌شود، جلوگیری می‌کنند. صافی‌های اتوماتیک به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که در بازه‌های زمانی مشخصی با عکس شدن مسیر جریان، مواد زائد جمع شده را خارج می‌کنند.

- معکوس کردن جریان

در این روش مسیر حرکت سیال را برای مدت کوتاهی عکس می‌کنند تا ناخالصیها و ذرات تجمع یافته در مبدل خارج شود. این روش همانند روش قبل برای ذرات با قطر نسبتاً بزرگ استفاده می‌شود.

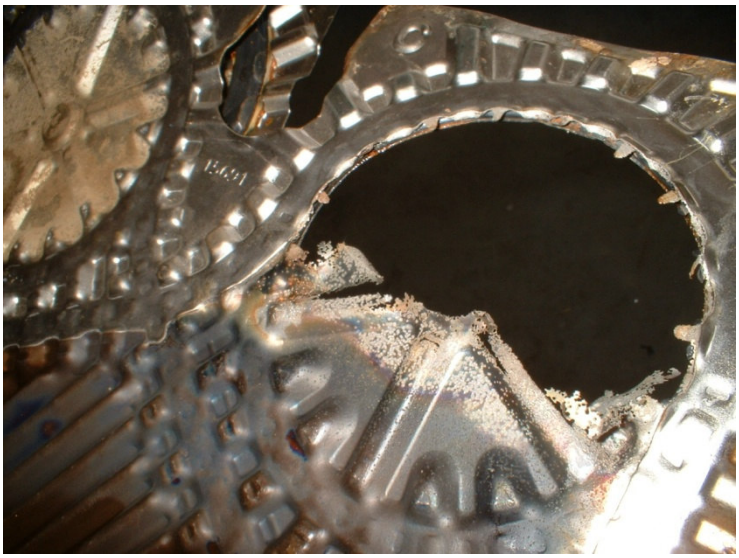
- تزریق مواد شیمیایی

در این روش از مواد شیمیایی به عنوان اضافه شونده به سیال برای کاهش میزان رسوب استفاده می- شود. انتخاب ماده شیمیایی به نوع رسوب بستگی دارد. یک مثال از این روش اضافه کردن کلر برای جلوگیری از رسوبات زیستی است.

۹-۵ مکانیزم اصلی خوردگی

خوردگی از عوامل طبیعی غیر قابل حذف در طبیعت است. مخازن، کشتیهای جنگی و اتومبیلهای امروزی، آهن پاره های فردا هستند. اگرچه خوردگی عموماً فرآیندی نامطلوب میباشد، نباید فراموش کرد که روشی طبیعی برای تجزیه و بازیافت زباله هاست. بدون این فرآیند، منازل ما به محیطی از ابزار شکسته و قدیمی تبدیل میشد که خلاص شدن از آنها کاری دشوار میبود. از این نقطه نظر، خوردگی فرآیندی مناسب و در حقیقت ضروری است. البته باید به خاطر داشت که خوردگی منجر به خرابی تجهیزات و پیرو آن عملکرد نادرست سیستمهای مهندسی میگردد. هزینه سالیانه خوردگی در آمریکا در سال ۱۹۷۷ قریب به ۳۰ میلیارد دلار تخمین زده شده است. شایان ذکر است این محاسبات مربوط به خوردگی عمومی (تمامی تجهیزات و نه فقط مبدلهای حرارتی) است، و شامل ارقام مربوط به از بین رفتن محصولات، استهلاک واحد صنعتی و غیره نمی شود. بنابراین، درک اصول خوردگی و کنترل آن همواره یکی از مسائل مورد توجه صنعت و عموم مردم بوده است.

در مبدلهای حرارتی، خوردگی از اهمیت ویژه ای برخوردار است و در طراحی مد نظر قرار میگیرد. در مبدلهای پوسته و لوله به دلیل ضخامت دیواره لوله ها، خوردگی تا حدودی مجاز است، ولی در مبدلهای صفحه ای این موضوع صادق نیست چرا که دیواره صفحات بسیار نازک میباشد و بنابراین عملا خوردگی غیر قابل قبول است. توزیع خوردگی در صفحات مبدل نیز یکسان نیست. خوردگی در یک سوم بالایی صفحات که محل ورود سیال گرم و خروج سیال سرد است، اتفاق می‌افتد.

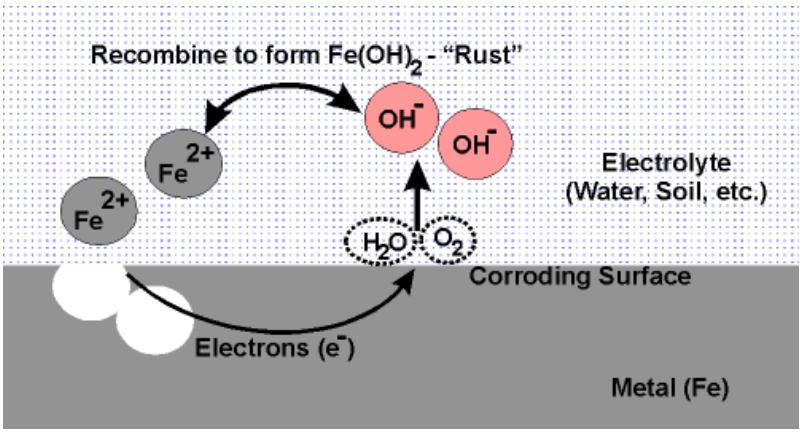


شکل ۹-۷- نمونه خوردگی در ورودی صفحات

در مبدلهای صفحه ای، صفحات از حواشی جداره خود با روشهای مختلفی از جمله جوشکاری، لحیم کاری و یا استفاده از گسکت، آب بندی میشوند، در نتیجه پارگی (شکاف ناشی از خوردگی) در زیر گسکتها و یا محل جوش ها امکان پذیر است. خوردگی محلی میتواند به علت لیچینگ ذرات یونی حاصل از گسکتهای پلیمری آغاز و یا تشدید شود. برای مثال یونهای کلراید میتواند منجر به خورده شدن آلیاژ های فولادی ضد زنگ و نیکل شود و یون های فلوئورید عامل خوردگی تیتانیوم است. در مبدلهای صفحه ای نقایص ناشی از خوردگی تنشی به ویژه در ورقهای آهن فرم داده شده در شرایط سرد، نیز مد نظر قرار میگیرد. بنابراین در طراحی مبدلهای حرارتی از نوع صفحه ای، خوردگی از اهمیت بسیار ویژه ای برخوردار است.

خوردگی یک فرآیند الکتروشیمیایی است که از طریق آن فلزات به حالت طبیعی خود بازگردانده میشوند. یک سل خوردگی شامل آند، کاتد و الکترولیت میباشد. یونهای فلزی به عنوان آند در الکترولیت (محلولهای آبی) حل میشوند. ذرات دارای بار الکتریکی (الکترونها) در طول فلز از سمت آند به سمت کاتد جابه جا میشوند و در آنجا واکنشهایی که منجر به مصرف الکترونها میشود اتفاق می افتد. در نتیجه، عمل خورده شدن فلز از سمت آند که غالباً به شکل تشکیل رسوب است اتفاق می افتد. هدایت الکتریکی الکترولیت در تسریع عمل خوردگی نقش کلیدی دارد، به طوریکه مخلوطی با ثابت هدایت الکتریکی پایین، منتج به واکنش کند خوردگی شده و مخلوط با ثابت هدایت بالا، خوردگی سریع را به دنبال دارد. در غیاب الکترولیت، خوردگی یا اصلاً اتفاق نمی افتد و یا به میزان ناچیز به وقوع می پیوندد. مثالی ساده از این حالت، حضور آهن در محیطی با هوای خشک است که به علت عدم حضور رطوبت مورد نیاز برای زنگ زدن، آهن به مدت طولانی به صورت براق و بدون مشاهده علائم خوردگی باقی میماند. مبدلهای صفحه ای در تبادل حرارت مایعات کاربردی فراوان دارند و بنابراین محیط اصلی برای خوردگی یعنی رطوبت همواره فراهم است.

مکانیسم خوردگی با مثال غوطه ور شدن آهن در آب به سادگی مطابق شکل ۹-۸ قابل نمایش میباشد. واکنشهای شیمیایی موجود به ترتیب زیر است:



شکل ۹-۸- مکانیزم خوردگی آهن

در بخش آند، فلز بدون بار حل شده و به فلز باردار و الکترون تبدیل میشود:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$$

در قسمت کاتد، الکترونها در واکنش کاهش اکسیژن محلول به یونهای هیدروکسیل مصرف میشوند:

$$0.5O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$$

در ادامه واکنش زیر را خواهیم داشت:

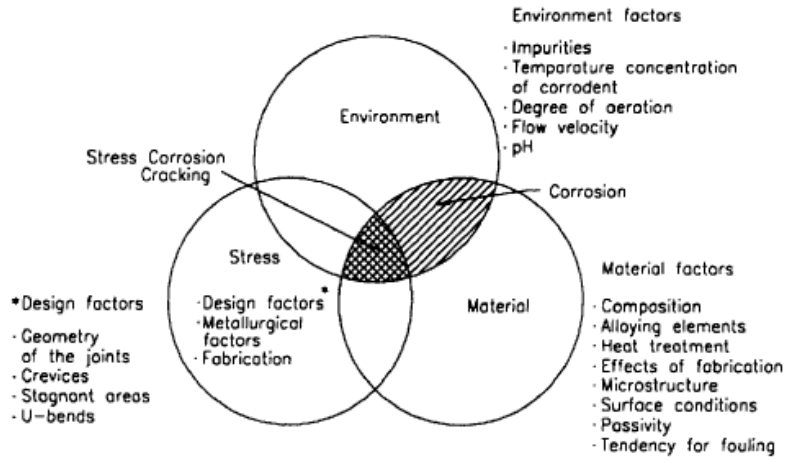
$$Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$$

باید توجه داشت که در عمل این واکنشهای الکتروشیمیایی از پیچیدگی بیشتری برخوردارند و از پارامترهای موثری تاثیر میپذیرند. برخی از این عوامل عبارتند از:

فاکتورهای محیطی: از جمله غلظت ذرات خورنده (H^+, O_2, Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, Ca^{2+}) ، مقادیر pH، سرعت، میزان ناخالصی، تشکیل فیلمهای حفاظتی، رسوب و دمای محیط.

فاکتور مواد: از جمله ترکیب آلیاژ، ساختار آلیاژ (تک فازی، چند فازی، حضور رسوب)، حالت مکانیکی آلیاژ (میزان کار سرد، حضور سیستمهای حفاظتی)، میل به خوردگی و غیره

فاکتورهای عملیاتی: از جمله حضور مواد غیر مشابه، نوع طراحی تجهیزات (وجود لبه های تیز و مناطق راکد و ...) ، وجود انواع تنشها (کششی و یا فشاری، استاتیک و یا دینامیک، کاربردی و یا باقیمانده)، تاریخچه حرارتی و مکانیکی.



شکل۹-۹- فاکتورهای تاثیر گذار بر خوردگی

این فاکتورهای موثر بر تشکیل خوردگی در شکل۹-۹ نمایش داده شده اند. همانطور که به وضوح دیده میشود، خوردگی نتیجه ترکیبی از اثرات محیطی و مواد میباشد. باتوجه به اینکه، انواع متفاوتی از خوردگی با مکانیسم منحصر به فرد و خاص وجود دارند، بنابراین، این فاکتورها بر حسب نوع خاص خوردگی، متفاوت خواهند بود.

براساس نظر متخصصین، خوردگی را میتوان در هشت گروه طبقه بندی کرد. این گروه ها عبارتند از:

- خوردگی عمومی
- خوردگی از طریق ایجاد منفذ
- خوردگی از طریق پارگی
- خوردگی تنشی / فشاری
- خوردگی به علت ساییدگی
- خوردگی بین ذرات
- خوردگی گالوانیکی
- خوردگی انتخابی بر اثر لیچینگ

خوردگی عمومی به صورت یکپارچه در تمامی سطح گسترده میشود، در حالیکه سایر انواع خوردگی محلی بوده و توزیع یکنواختی ندارند.

۹-۶ کنترل خوردگی در مبدلهای صفحه ای

باتوجه به نازک بودن صفحات در مبدلهای صفحه ای ، خوردگی در آنها مجاز نمیباشد. بنابراین، کنترل خوردگی در این مبدلها از اهمیت زیادی برخوردار است. بدین منظور روشهای متعددی که به صورت عمومی برای انواع مبدلهای حرارتی قابل کاربرد است وجود دارد. در این بخش روشهایی که برای کنترل خوردگی در مبدلهای صفحه ای به کار میرود، معرفی میشوند.

به طور عمومی دو دسته روش اساسی برای کنترل خوردگی وجود دارد. اولین دسته استفاده از فلزات مقاوم در برابر خوردگی میباشد و دسته دوم ایزوله کردن فلز خورده شونده از محیط اطراف و یا کنترل محیط به گونه ای است که واکنش ها در کاتد و آند تحت کنترل باشند. روشهای معمول در دسته دوم عبارتند از:

کاهش واکنش آندیک: چنانچه واکنش آندیک کاهش یابد، میزان خوردگی نیز کاهش یافته و یا از بین میرود. به همین منظور از روشهایی برای تبدیل شدن فلز به کاتد استفاده میکنند. یک روش تبدیل فلز به کاتد، اتصال یک جریان الکتریکی و یا یک فلز با خاصیت آندی بیشتر (فداشونده) است. همچنین میتوان با تشکیل یک فیلم بر سطح فلز از رسیدن یونهای خورنده به سطح فلز جلوگیری کرد.

کاهش واکنش کاتدیک: جلوگیری از واکنش کاتدیک میتواند با استفاده از تغییر محیط خورنده حاصل گردد. به عنوان مثال میتوان به کاهش غلظت اکسیژن، کاهش یونهای هیدروژن (افزایش pH) و تشکیل رسوبات حفاظتی اشاره کرد. بدین منظور باید آب با استفاده از مواد شیمیایی مخصوص تصفیه گردد.

کاهش واکنشهای کاتدیک و آندیک: پوششها[1]، لایه های نازکی هستند که از تماس فلز با محیط جلوگیری میکنند و درنتیجه هر دو نوع واکنش را از بین میبرند. پوشش میتوانند فلزی، غیر آلی و یا رنگ باشد.

در دسته دیگر از روشهای کنترل خوردگی، برای تعیین نوع فلز مقاوم در برابر خوردگی باید به انواع خوردگی که فلز با آن مواجه است و همچنین شرایط خوردگی توجه کرد. جدول ۹-۳ فهرستی از انواع خوردگی و علل آن را برای فولاد ضد زنگ، تیتانیوم و نیکل که از فلزات متداول در مبدلهای صفحه ای هستند، ارائه میکند.

[1] Coating

جدول۹-۳- علت خوردگی صفحات پر کاربرد در مبدلهای صفحه ای

علت خوردگی	عامل تشدید کننده	نوع خوردگی
خوردگی فولاد زنگ نزن		
مواد هالوژن (کلر، برم)	اکسید کننده ها، pH پایین، دما	C, P, SCC
اسیدهای غیر آلی قوی	مواد هالوژن، دما	G
اسیدهای آلی قوی	مواد هالوژن، اکسید کننده ها، دما	G, P, C
باز قوی (مانند سود یا پتاس)	دما، تنش	G, SCC
حساس بودن به HAZ (کربید کرم)	اسیدها، اکسیدکننده ها، دما	SCC, IG
تاثیر میکروارگانیزم ها	راکد بودن سیال	C, P
خوردگی تیتانیوم و آلیاژهای آن		
اسید هیدروفلوریک	به هیچ وجه مطلوب نیست	G
فلورایدها	محیط اسیدی، دما	G, C, SCC
باز قوی (مانند سود یا پتاس)	غلظت ، سرعت ، دما	G, EC
اسیدهای غیر آلی غیر اکسید کننده	غلظت ، سرعت ، دما	G
اسیدهای آلی قوی	عدم حضور اکسیدکننده	G
هیدروژن (تازه تولید شده)	بقیه انواع خوردگی	HE
خوردگی آلیاژهای نیکل		
اسیدهای غیرآلی قوی(مانند سولفوریک، فسفریک)	مواد هالوژن، دما	G, EC
کلر، برم، فلراید، (آب خنک کننده)	اکسید کننده ها، pH پایین، دما	C, P, G
باز قوی	دما، اکسید کننده ها	G, S

نکته: در جدول فوق علائم اختصاری معرف موارد زیر است:

C: خوردگی شکافی، G : خوردگی عمومی، IG : خوردگی بین ذرات، S : خوردگی انتخابی، EC : خوردگی بر اثر ساییدگی، HE: به علت سست شدن بوسیله هیدروژن، P: از طریق ایجاد منفذ، SCC: خوردگی به علت تنش

۹-۷ سائیدگی

ساییدگی، کنده شدن جرم از سطح به علت عبور جریان حاوی ذرات ریز است. معمولاً علت اصلی ساییدگی سرعتهای بالاست و سد کردن جریان منجر به تولید این سرعتهای بالای محلی میگردد. در مبدلهای حرارتی پوسته و لوله، بیشترین میزان ساییدگی در ورودی لوله ها و سطح خارجی آنها در زیر نازلهای سمت پوسته اتفاق می افتد.

در مبدلهای صفحه ای، سائیدگی بیشتر در دهانه ورودی و محلهای توزیع جریان اتفاق می افتد. در بدترین موارد روزنه ورودی به صفحه سائیده شده و منجر به نشتی میگردد. سائیدگی در جریانهای دو فازی بیشتر است زیرا که کاهش دانسیته منجر به افزایش سرعت میشود. غالباً سائیدگی تابعی از سرعت سیال (در حالت جریان تک فاز و یا دو فازی)، مشخصات سیال، جنس فلز مبدل و استحکام آن است.

علاوه بر این، سائیدگی معمولاً به همراه خوردگی اتفاق می افتد و این دو پدیده برهم تاثیر گذارند. به این پدیده خوردگی – ساییدگی میگویند که ترکیبی از واکنشهای الکتروشیمیایی و کنده شدن مکانیکی فلز است. برخلاف سائیدگی معمولی، سائیدگی – خوردگی تنها به نقاط با سرعت بالا محدود نمی شود و میتواند مناطق کم سرعت که دستخوش خوردگی میشود را نیز شامل شود.

یکی از روشهای معمول برای جلوگیری از ساییدگی، حذف جامدات از سیال انتقال حرارت است. بدین منظور میتوان از فیلتراسیون و یا غربال کردن سیالها با هدف حذف ذرات جامد بزرگ که منجر به توزیع نامناسب می گردند، استفاده نمود. همچنین در مرحله طراحی مبدل صفحه ای باید دقت کرد که سرعت سیال در مقاطع ورودی و گردنه صفحات کنترل گردد. در برخی موارد به منظور کاهش سرعت در نقاط با سرعت بالا، نیاز به تنظیماتی میباشد که با کاهش دبی جریان و یا افزایش تعداد صفحات مبدل قابل دستیابی است.

۱۰) نکات کاربردی در بهره‌برداری و نگهداری از مبدلهای صفحه‌ای گسکت‌دار

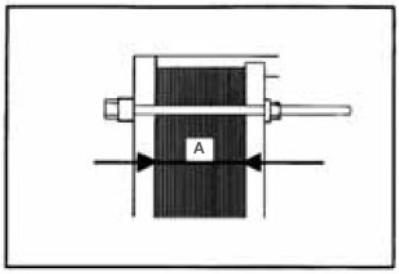
- از شرایطی که امکان افزایش ناگهانی فشار وجود دارد، اجتناب کنید. اگر چه سازندگان، در طراحی‌ها و محاسبات خود مقادیری را برای خطا و افزایش فشار در نظر می‌گیرند، اما لازم است مبدل در شرایط عملیاتی همواره در محدوده فشار مورد تأیید باشد[۵].

-اگر به عللی همچون بسته شدن ناگهانی شیرها، یا اثر ضربه قوچی، امکان تغییرات فشاری در مبدل وجود دارد، باید استفاده از مبدل با احتیاط‌های لازم انجام شود، زیرا در این شرایط ممکن است گسکت‌ها خارج شده و مواد به بیرون نشست پیدا کنند. همواره باید از تغییر فشار بیشتر از $۱۵۰\ psig/\min$ و تغییر دما بیش از $۲۰\ ^\circ F/\min$ یا $۱۱\ ^\circ C/\min$ اجتناب کرد. از راه کارهای مقابله با چنین شرایطی می‌توان به استفاده از شیر اطمینان و یا تجهیزات از بین برنده و یا یکنواخت کننده ضربان‌ها اشاره کرد.

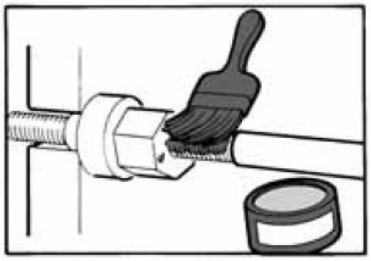
- استفاده از صافی و یا جریان انحرافی (bypass) در هنگام راه‌اندازی. از آنجا که معمولاً در مرحله ساخت واحدهای صنعتی، ذرات اضافه، ذرات باقیمانده از جوشکاری و دیگر ذرات ممکن است به همراه سیال در فرآیند جریان پیدا کنند، برای جلوگیری از افت فشار و کاهش راندمان حرارتی ناشی از گیر کردن این ذرات در مبدلهای صفحه‌ای، پیشنهاد می‌شود در هنگام راه‌اندازی برای هر دو سیال از صافی یا جریان انحرافی استفاده شود. همچنین باید توجه کرد که در شرایط عملیاتی نیز امکان عبور ذرات بزرگتر از $0.0625"$ از اکثر مبدلهای صفحه‌ای وجود ندارد. لذا در صورتیکه امکان وجود چنین ذراتی در سیال وجود داشته باشد، حتماً باید بیش از ورود به مبدل از صافی استفاده شود.

-بازدید دوره‌ای صفحات و ابعاد آنها. بطور کلی جلوگیری یک مبدل از نشت کردن راحتتر از متوقف کردن نشت، هنگام بوجود آمدن آن است. باید توجه کرد که بین هر دو صفحه، گسکت‌های

الاستومری وجود دارند که هنگامی که فشرده می‌شوند، از نشت سیال به بیرون جلوگیری مـی‌کننـد. بـا سفت کردن پیچ‌ها و میله‌های اصلی، حجم صفحات تا حد زیادی کم و فشرده می‌شود. فاصله بـین قـاب اصلی تا آخرین صفحه متحرک، با توجه به تعداد صفحات و ضخامت آنها توسط سازنده تعیین می‌گـردد. (شکل ...) پیشنهاد می‌شود که این فاصله حداقل هر سال یک بار چک شود و در صورت لزوم نسـبت بـه سفت کردن پیچ‌ها اقدام گردد[۶].

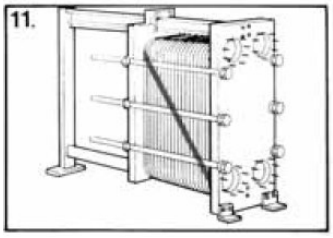


- دنده های پیچ های سفت کننده باید با پوشش های ضد زنگ محافظت شوند.



- اگر از مبدل برای مدت زیادی استفاده نمی شود لازم است سـیال تخلیـه، و مبـدل تمیـز و خشک گردد.

- برای شناسایی صفحه ها پس از باز کردن مبدل، بهتر است که صفحه ها را با یک نوار رنگـی مورب مشخص کرد تا در هنگام نصب مجدد با استفاده از این نوار محل هر صفحه مشخص شود.



۱۱) ایمنی مبدلهای صفحه ای

اگرچه موارد ایمنی تا حد امکان توسط سازندگان رعایت می شود، اما آگاهی از شرایط و بخشهایی که به صورت بالقوه امکان آسیب رساندن به افراد و یا محیط زیست را دارند لازم است[۵].

در صورت وجود سیال خطرناک (اسید یا سیالات مشابه)، فشار بالا، و درجه حرارت بسیار بالا یا بسیار پایین در مبدل صفحه ای، خطر آسیب دیدگی هنگام تعمیر و نگهداری یا در مواقع نشتی وجود دارد. در این صورت مبدل باید دارای حفاظ مناسب باشد. این حفاظ تنها در هنگامی که مبدل به فشار یا دمای محیط برسد و یا از هرگونه سیال خطرناک خالی باشد، از دستگاه جدا می شود.

متصدی دستگاه باید مطمئن باشد که هیچگونه پوسیدگی و یا شرایط غیر طبیعی بر روی دستگاه به علت شرایط نامطلوب محیط اطراف بوجود نیامده باشد. برخی شرایط نامطلوب محیط اطراف عبارتند از:

گسکت ها	-گازهای فعال(خورنده) و یا گرد و غبار در هوای اطراف - تاثیرات امواج ماوراء بنفش مانند نور خورشید -دمای بسیار زیاد اطراف
صفحات و قطعات فلزی	-گازهای فعال (خورنده) و یا گرد و غبار در هوای اطراف -رطوبت

صفحات و بدنه مبدل:

صفحات مبدلهای گرمایی، نازک و دارای لبه های تیز می باشند. همچنین بر روی لبه ها، شیارها، و قسمتهای مشابه، خطر آسیب دیدگی وجود دارد. هنگام جابجایی صفحات، همواره از دستکشهای محافظ استفاده کنید.

سیالات خطرناک:

سیالات خطرناک دارای پتانسیل ایجاد حوادثی از قبیل سوختگی توسط مواد شیمیایی، اشتعال یا سمی بودن می باشند. همواره هنگام کار با مبدلهایی که حاوی سیالات خطرناک هستند، لباسهای محافظ به تن داشته باشید.

باز کردن:

هنگام باز کردن مبدل صفحه ای، مطمئن شوید که دستگاه تحت فشار نیست و خالی می باشد. قبل از باز کردن مبدل صفحه ای همواره مطمئن شوید که صفحات مبدلها بطور ناخواسته از قاب خارج نشوند. همچنین مطمئن شوید که صفحات از لغزشهای ناخواسته (مانند شرایط کشتی) در امان هستند.

حمل:

همواره مطمئن شوید که دستگاه های بالا برنده و حمل کننده دارای توانایی مناسب بوده و به صورت ایمن به تجهیز متصل شده باشند. هیچگاه زیر بار معلق قرار نگیرید.

۱۲) طراحی مبدلهای حرارتی صفحه‌ای:

در این فصل با توجه به آشنایی با اصول اولیه انتقال حرارت، می‌خواهیم به نکات اصلی طراحی مبدلهای حرارتی بپردازیم تا بتوانیم، با استفاده از همین روش کلی و توسعه تعاریف در گام بعدی مبدل‌های صفحه‌ای را طراحی کنیم.

برای طراحی یک مبدل از رابطه کلی انتقال حرارت بین دو سیال، که مبداء و مقصد گرما هستند، به صورت زیر استفاده می‌کنیم[۷].

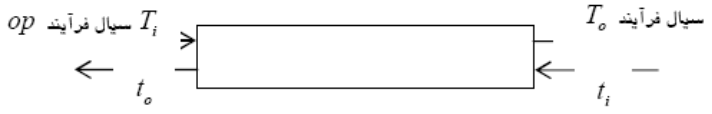
$$q' = U \times A \times \Delta T$$

معادله ۱۲-۱

در رابطه فوق q مقداری گرمای مورد نیاز است که با استفاده از شرایط اولیه سیال فرآیند و شرایط ثانویه آن و دبی این سیال قابل محاسبه است.

$$Q = mcp(T_e - T_i)$$

معادله ۱۲-۲

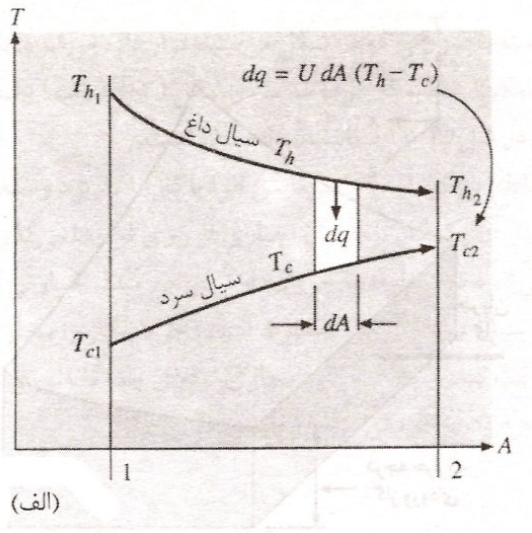


ΔT نیز اختلاف پتانسیل لازم برای انتقال گرما بین دو سیال گرم و سرد است، ولی به دلیل آنکه در حین انجام عملیات انتقال گرما، دمای هر دو سیال بصورت پیوسته تغییر می‌کند، باید از تعریف ΔT_{lm} که این مقدار میانگین اختلاف دماست استفاده نمود.

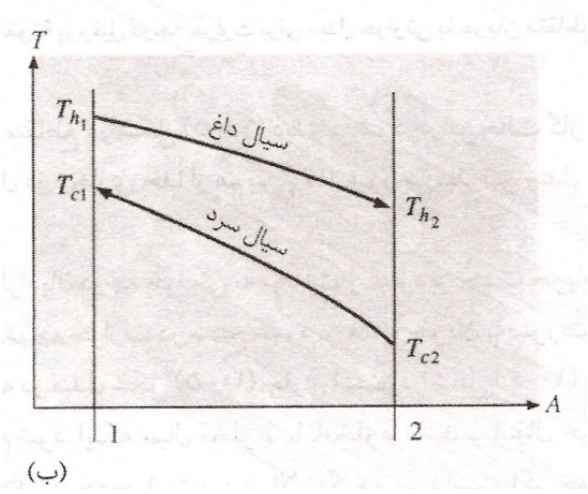
۱۲-۱) اختلاف درجه حرارت متوسط لگاریتمی: (LMTD)

دمای سیال گرم و سرد وارد شده به یک مبدل حرارتی، در حین گذر از مبدل در حال تغییر است. پس در طراحی یک مبدل حرارتی در مکان های مختلف مبدل، اختلاف دماهای متفاوت یا همان

پتانسیل های مختلف انتقال حرارت را داریم. برای حل مشکل از یک اختلاف حرارت متوسط حـاکم بـر دو سیال گرم و سرد استفاده می‌کنیم[۷].



شکل ۱۲-۱ : تغییرات دما در طول مبدل برایجریان همسو



شکل ۱۲-۲ : تغییرات دما در طول مبدل برای جریان ناهمسو

شمای انتقال حرارت برای جریان موازی در شکل (۱۲-۱ و ۱۲-۲) دیده می‌شود. انتقال حرارت در سطح جزئی dA را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$dq = m_h c_h dT_h = m_c c_c dT_c$$ **معادله ۱۲-۳**

اندیس‌های h و c به ترتیب مشخص کننده سیالات گرم و سرد هستند.

$$dq = U(T_h - T_c)dA$$ **معادله ۱۲-۴**

انتقال حرارت را به شکل زیر نیز می‌توان بیان نمود:

از معادله (۱۲-۳) داریم:

$$dT_h = \frac{-dq}{m_h c_h}$$ **معادله ۱۲-۵**

$$dT_c = \frac{-dq}{m_h c_h}$$ **معادله ۱۲-۶**

بنابراین:

$$dT_h - dT_c = d(T_h - T_c) = -dq(\frac{1}{m_h c_h} + \frac{1}{m_h c_h})$$ **معادله ۱۲-۷**

با حل معادله (۱۲-۷) برای dq و جایگزین کردن آن در معادله (۱۲-۴) و انتگرال گیری به نتیجه زیر می‌رسیم.

$$\ln \frac{T_{h2} - T_{c2}}{T_{h1} - T_{c1}} = -UA(\frac{1}{m_h c_h} + \frac{1}{m_c c_c})$$ **معادله ۱۲-۸**

که با توجه به معادله (۱۲-۳) و نتایج آن خواهیم داشت:

$$q = UA \frac{(T_{h2} - T_{c2}) - (T_{h1} - T_{c1})}{\ln(\frac{T_{h2} - T_{c2}}{T_{h1} - T_{c1}})}$$ **معادله ۱۲-۹**

از مقایسه عبارت فوق با تعریف اصلی انتقالی حرارت ($q=UA\Delta T$) به تعریف مقدار متوسط لگاریتمی اختلاف دما می‌رسیم.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h2} - T_{c2}) - (T_{h1} - T_{c1})}{\ln(\frac{T_{h2} - T_{c2}}{T_{h1} - T_{c1}})}$$ **معادله ۱۲-۱۰**

روابط فوق برای دو جریان موازی و همسو اثبات شدند و با همین استدلال برای دو جریان موازی و غیر همسو نیز به نتایجی مشابه می‌رسیم.

به عبارتی دیگر اختلاف درجه حرارت لگاریتمی (LMTD) برابر است با اختلاف درجه حرارت در یک انتهای مبدل منتهای اختلاف درجه حرارت در انتهای دیگر مبدل تقسیم بر لگاریتم نپری نسبت این دو اختلاف دما.

رابطه بدست آمده برای LMTD به شرط برقراری دو فرض صادق است. فرض اول: گرمای ویژه سیال‌ها با تغییر دما تغییر نکند و فرض دوم آنکه: ضریب‌های انتقال حرارت جابه‌جایی در سراسر مبدل ثابت باشند.

با توجه به اینکه در واقعیت جریان به صورت کامل متقابل نیست، برای در نظر گرفتن میزان دقیق اختلاف دما از ضریب تصحیح F استفاده می شود. این ضریب نشان دهنده نسبت اختلاف دما در هر چیدمان به اختلاف دما در حالت کاملا متقابل است. بنابراین طراحی اولیه بر اساس جریان موازی ناهمسو صورت می‌گیرد و برای تصحیح فرض جریان ناهمسو در مبدل، از یک ضریب تصحیح F به شکل زیر استفاده می‌کنند.

$$Q = FU.A.\Delta T_{lm}$$ **معادله ۱۲-۱۱**

F تابعی از هندسه مبدل و دماهای ورودی و خروجی است و همواره مقداری کوچکتر از ۱ را اختیار می‌کند.

۱۲-۲) روش $\varepsilon - NTU$

هر چند کهLMTD (همان ΔT_m) یک روش مناسب و کاربردی برای طراحی مبدلهای حرارتی است، ولی ΔT_m تنها هنگامی قابل محاسبه است که هر چهار دمای ورودی و خروجی معلوم باشند. اگر یکی از داده‌های لازم برای محاسبه ΔT_m موجود نباشد، مجبور به انجام محاسبات بازگشتی برای طراحی مبدل خواهیم بود که به دلیل وجود تابع لگاریتمی ΔT_m. این محاسبات بسیار پیچیده می‌باشند. روش $\varepsilon - NTU$ ، راه حل زیرکانه‌ای برای گریز از این مشکل است که در طراحی مبدلها مورد استفاده قرار می‌گیرد[۱].

برای استفاده از روش $\varepsilon - NTU$، ابتدا باید یک سری متغیر معرفی کنیم:

"Heat exchanger effectiveness" یا همان ضریب مؤثر انتقال حرارت، که به صورت نسبت مقدار واقعی گرمای منتقله و حداکثر مقدار انتقال حرارت ممکن تعریف می‌شود و همواره کوچکتر یا مساوی ۱ است.

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} \le 1$$ **معادله ۱۲-۱۲**

$$\varepsilon = \frac{C_h(t_{h,i} - t_{h,o})}{C_{\min}(t_{h,i} - t_{c,i})} = \frac{C_c(t_{c,i} - t_{c,o})}{C_{\min}(t_{h,i} - t_{c,i})}$$ **معادله ۱۲-۱۳**

NTU "Number of heat transfer unit" که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}}$$ **معادله ۱۲-۱۴**

و به صورت تئوری تعداد مراحل لازم برای انتقال حرارت را نشان می‌دهد.

R نسبت ظرفیت حرارتی دو سیال که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$R = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}$$ **معادله ۱۲-۱۵**

در طراحی مبدلهای حرارتی، جهت ساده‌سازی محاسبات از یک سری فرضیات استفاده می‌کنند که از نظر فیزیکی خطای بسیار کمی در حل مسئله ایجاد می‌کند. فرضهای ساده کننده به شرح زیر می‌باشند :

۱- مبدلهای حرارتی در شرایط پایا steady- state عمل می‌کنند.

۲- تمام ویژگیهای فیزیکی در حین انجام فرآیند انتقال حرارت ثابت در نظر گرفته می‌شوند. این بدان معنی است که از تأثیر دما و وابستگی ویژگیهای فیزیکی صرفنظر می‌نماییم و مقدار ضریب کلی انتقال حرارت و تعداد واحدهای انتقال حرارت را در طی عمل طراحی ثابت فرض می‌کنیم.

۳- برای هر گذر از مبدل حرارتی یک شکل ثابت و یکنواخت از توزیع جریان و دما وجود دارد.

۴- افت و اتلاف حرارتی و انتقال حرارت به بیرون صفر در نظر گرفته می‌شود.

۵- هر چند در مبدل هیچ یک از سیالات دچار تغییر حالت فیزیکی نمی‌شوند ولی اگر یکی از سیال‌ها نیز دچار تغییر فیزیکی شد، این تغییر در شرایط دمای اشباع (فشار ثابت) و ثابت بودن ضریب کلی انتقال حرارت رخ می‌دهد. در این حالت ظرفیت حرارتی مؤثر بسیار بالا خواهد بود.

۳-۱۲) مراحل طراحی یک مبدل:

در یک مسئله طراحی، معمولاً مقادیر دبی جرمی هر دو جریان، دماهای ورودی هر دو جریان و دمای خروجی یکی از جریان‌ها معلوم است. هدف این گونه مسائل محاسبه مقدار سطح مورد نیاز برای انتقال حرارت و در نتیجه طراحی و ساخت مبدل در اندازه لازم است. بدین منظور از مراحل زیر پیروی می‌کنند[۱].

۱- محاسبه گرمای منتقل شده با استفاده از اطلاعات سیالی که هر دو دمای آن معلوم است.

$$Q = C_p(T_i - T_o)$$

۲- تعیین و پیشنهاد یک رژیم جریانی

۳- محاسبه دمای خروجی مجهول با استفاده از روش $\varepsilon - NTU$

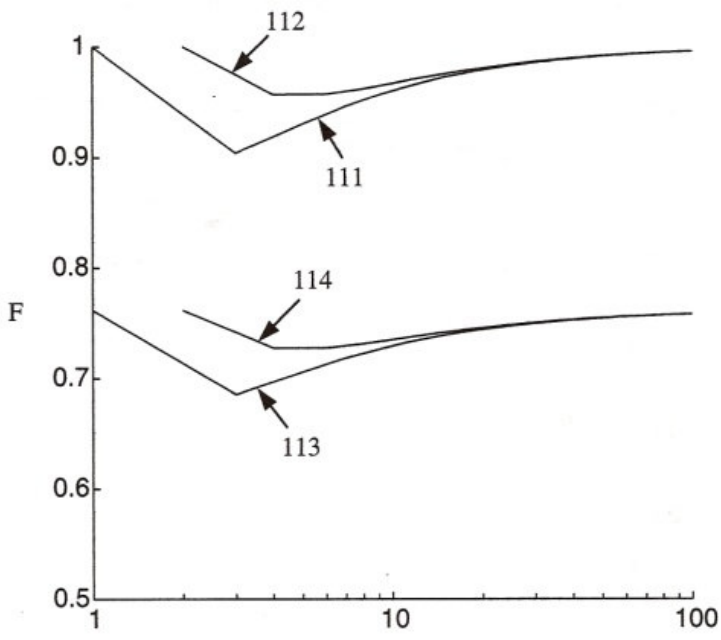
۴- محاسبه ΔT_{lm} برای جریان موازی ناهمسو

۵- محاسبه F با توجه به نوع چیدمان سیال انتخاب شده و فرضهای ارائه شـده در مرحلـه ۳. برای این منظور از نمودارهای آخر این فصل استفاده می‌شود.

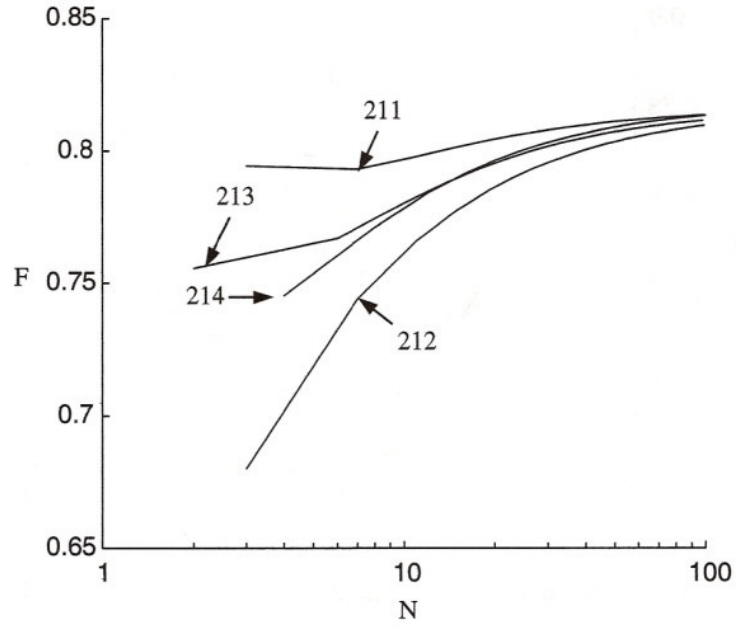
۶- محاسبه U بر اساس ضرایب انتقال حرارت در دو طرف سیال سرد و گرم و ضرایب رسوب-گیری

۷- محاسبه A مساحت مبدل با استفاده از رابطه $Q = UFA\Delta T_{lm}$

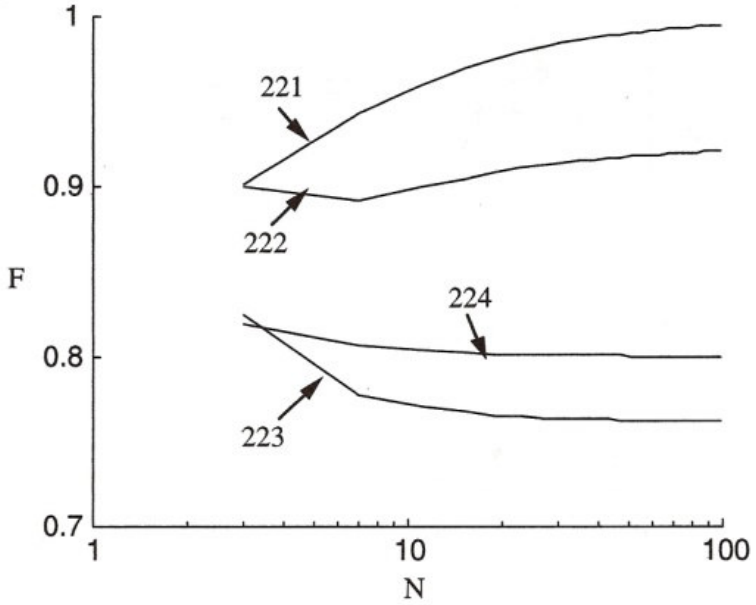
۸- مراحل ۶ و ۷ را آنقدر تکرار می‌کنیم تا دقت مورد نظر برای محاسبه مساحت حاصل مـی-شود.



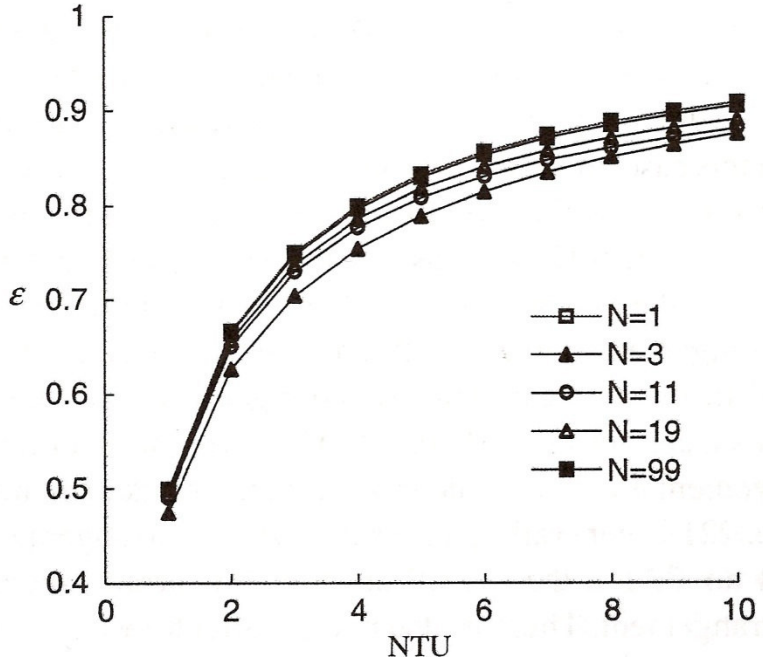
شکل ۱۲-۳: ضریب تصحیح برای چیدمان ۱-۱ در R=1 و NTU=1



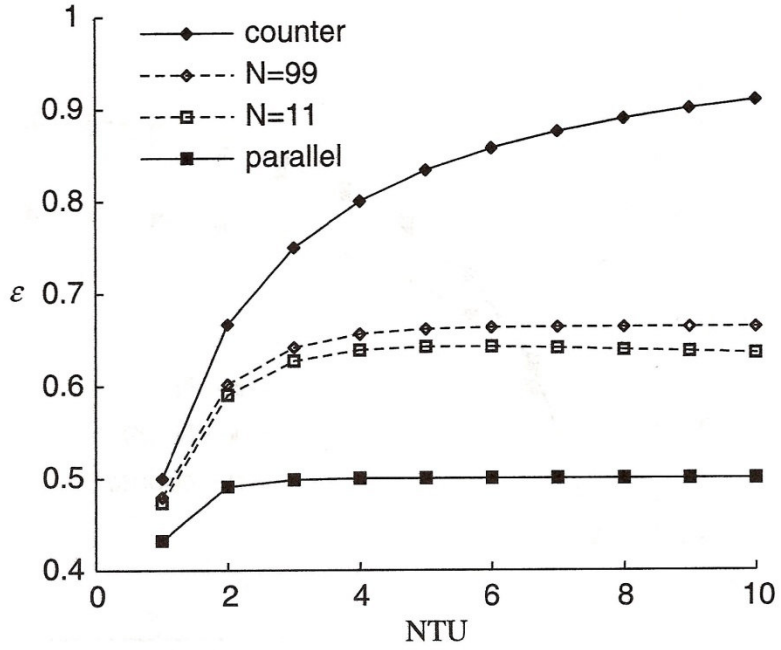
شکل ۱۲-۴ : ضریب تصحیح برای چیدمان ۱-۲ در R=0.5 و NTU=2



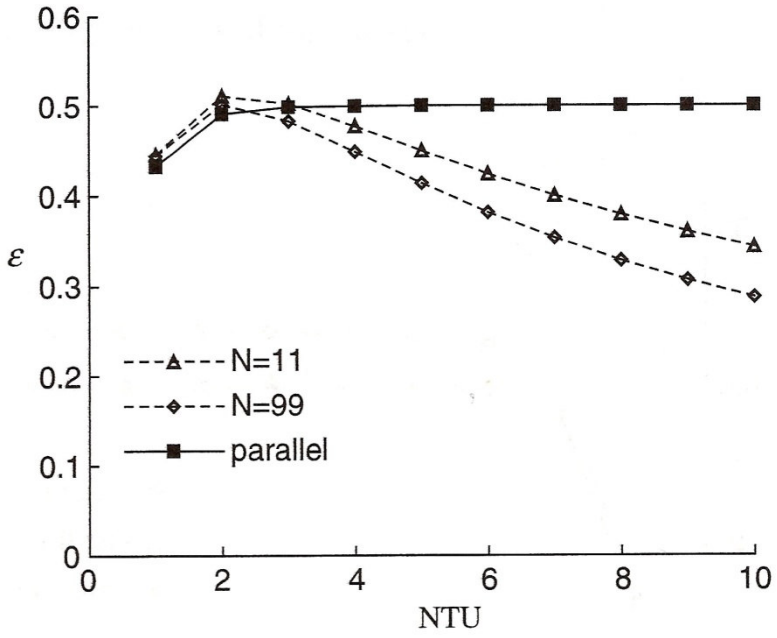
شکل ۱۲-۵ : ضریب تصحیح برای چیدمان ۲-۲ در R=0.5 و NTU=1



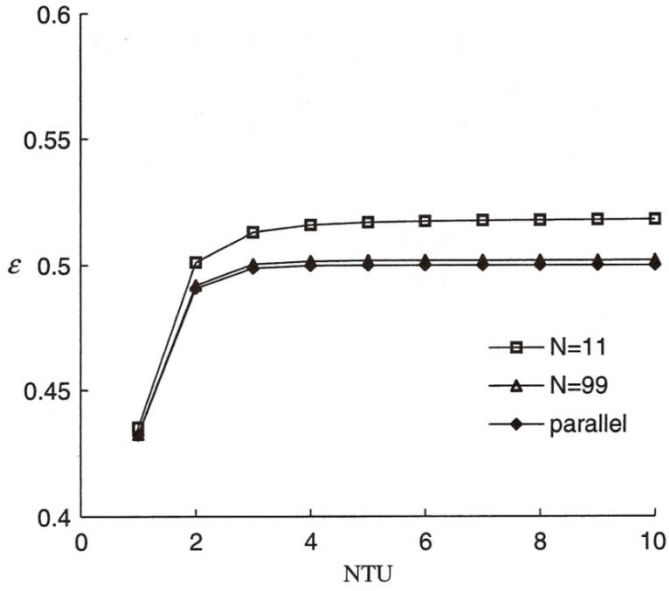
شکل ۱۲-۶ : تاثیر تعداد صفحات در چیدمان شماره ۱۱۱ در R=1



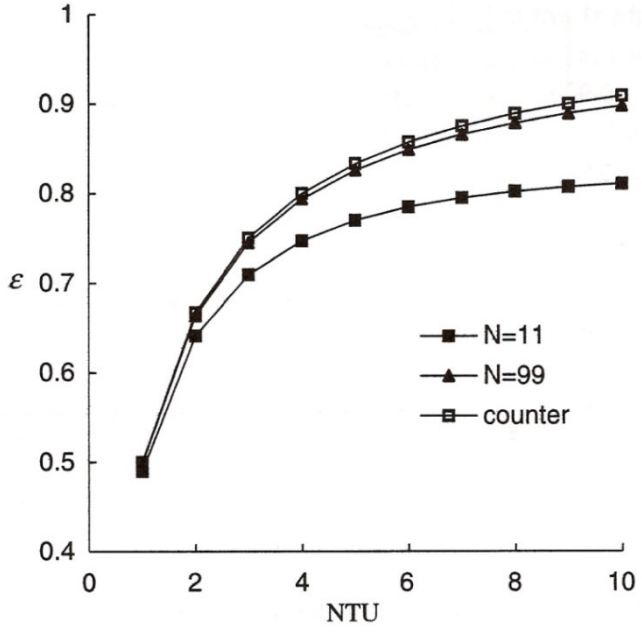
شکل ۱۲-۷ : رابطه ε و NTU در چیدمان شماره ۲۲۲ در R=1



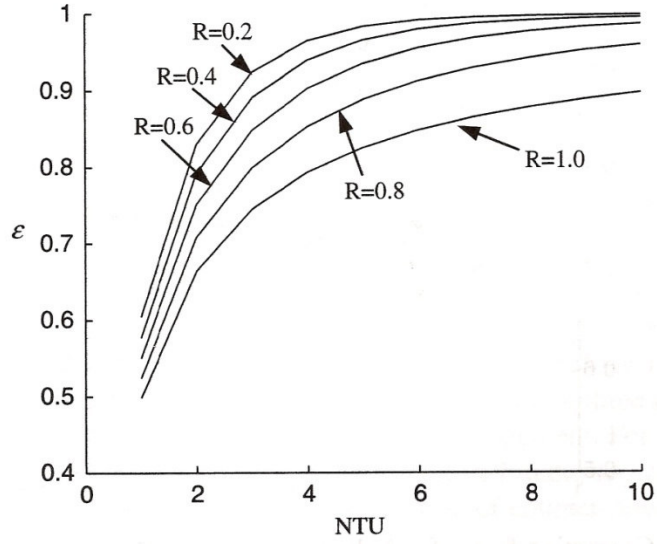
شکل ۱۲-۸ : رابطه ε و NTU در چیدمان شماره ۲۲۴ در R=1



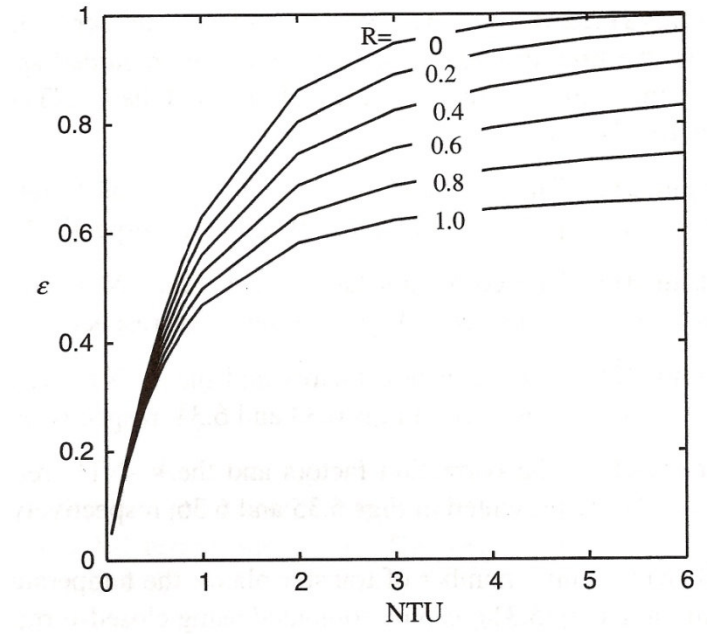
شکل ۱۲-۹ : رابطه ε و NTU در چیدمان شماره ۲۲۳ در R=1



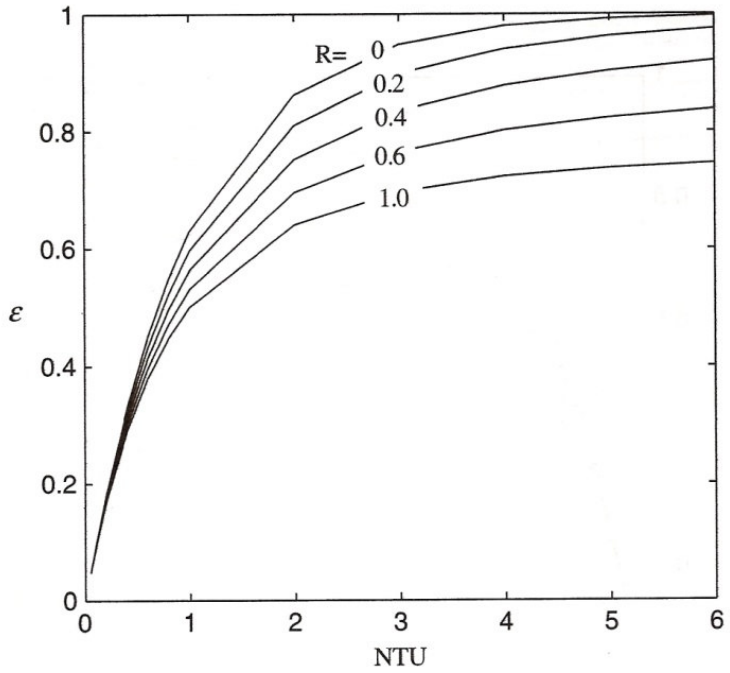
شکل ۱۲-۱۰ : رابطه ε و NTU در چیدمان شماره ۲۲۱ در R=1



شکل ۱۲-۱۱ : رابطه ε و NTU در چیدمان شماره ۲۲۱ برای تعداد زیاد صفحات



شکل ۱۲-۱۲ : رابطه ε و NTU در چیدمان شماره ۲۱۱ برای تعداد زیاد صفحات



شکل ۱۲-۱۳ : رابطه ε و NTU در چیدمان شماره ۳۱۱ برای تعداد زیاد صفحات

۱۳ مطالعه موردی[1]:

برای بررسی بیشتر و شناخت دقیقتر مبدلهای صفحه ای، یک نمونه از کاربرد ایـن مبـدلها در پالایشگاه جامناگار هندوستان را که به کاهش میزان بخار مصرفی در ریبویلر برج احیای آمین انجامیـده است، بررسی میکنیم.

توضیح اجمالی پروژه:

این پروژه در دو واحد از چهار واحد احیای آمین مجتمع پالایشـگاهی جامناگـار انجـام گرفتـه است. اولین مرحله عملیاتی در تصفیه گاز به وسیله آمین، حذف سولفید هیدروژن و دی اکسید کربن از گاز طبیعی در برج جذب و سپس احیای آمین در واحد دفع می باشد. پروژه مورد بررسی، نصـب مبـدل حرارتی قاب وصفحه ای است که می تواند دمای خوراک برج دفـع (آمـین ناخـالص) را از دمـای ۸۳ تـا حدود ۱۰۴ درجه سانتی گراد افزایش دهد. در ریبویلر برج جذب به منظـور گـرم کـردن بخـش پـایینی برج، از بخار استفاده می شود.

شرح پروژه:

اولین مرحله عملیاتی در واحد تصفیه گاز به وسیله آمین، حذف سولفید هیدروژن از گاز ترش در واحد جذب و سپس احیا کردن آمین ناخالص در واحد دفع مـی باشـد. آمـین عـاری از ناخالصـیهای حاصل از عملیات دفع، به منظور جذب سولفید هیدروژن از گاز ترش موجود در واحد تصفیه پالایشـگاه گاز مجددا مورد استفاده قرار می گیرد. فرآیند شامل عملیات پیوسته جذب/ احیا بـا اسـتفاده از محلـول آبی آلکانول آمین می باشد. مخزن تقطیر ناگهانی، برج جذب و برج دفع آمین سه تجهیـز بسـیار مهـم و کاربردی در یک واحد شیرین سازی گاز می باشند. فرآیند اصلی برج دفع آمین، احیای آمین ناخـالص و تهیه آمین با خلوص بالا و قابل کاربرد در برج جذب اسـت. ابتـدا گرمـایش آمـین ناخـالص همزمـان بـا

[1] Case Study

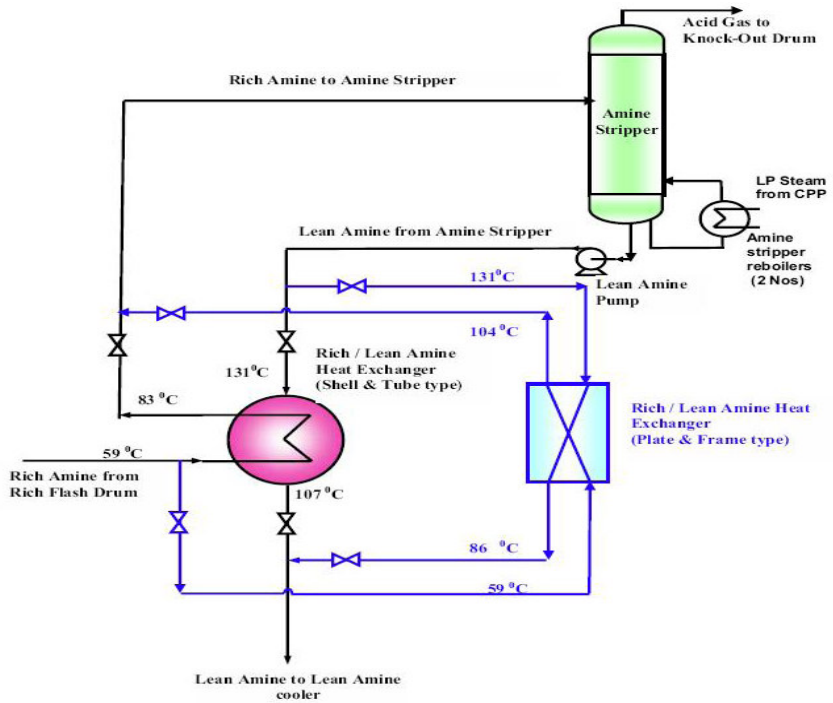
سرمایش آمین نسبتا خالص صورت میگیرد تا میزان مصرف انرژی و نیز ابعاد ریبویلر و سرد کن مورد نیاز کاهش یابد. مخلوط مایع آمین ناخالص در حین پایین آمدن در برج تا نقطه جوش خود گرم شده و در تماس با بخار تولید شده در ریبویلر، سولفید هیدروژن از آن جدا/ دفع می گردد. آمین احیا شده در قسمت پایینی برج جمع آوری شده و در مبدل های این بخش خنک و مجددا به واحد جذب ارسال می شود. در طراحی استاندارد اولیه ارائه شده، آمین نسبتا خالص خروجی از پایین برج دفع از میان یک مبدل حرارتی پوسته و لوله می گذرد که در آن دمای آمین خالص کاهش می یابد در حالیکه آمین ناخالص، که خوراک برج دفع است، گرم می شود (سیال موجود در پوسته، آمین نسبتا خالص و سیال سمت لوله آمین ناخالص می باشد). دماهای ورودی و خروجی پوسته به ترتیب ۱۳۱ و ۱۰۷ درجه سانتی گراد و سمت لوله به ترتیب ۵۹ و ۸۳ درجه سانتی گراد گزارش شده است. در این واحد، دمای همگرایی[1] در مبدل پوسته و لوله ۴۸ درجه سانتی گراد میباشد در حالیکه با استفاده از مبدل های قاب وصفحه ای این عدد تا ۲۷ درجه سانتی گراد نیز کاهش می یابد و بنابراین مقدار حرارت بیشتری از مخلوط آمین نسبتا خالص به آمین ورودی برج دفع انتقال یافته و بازیابی می شود. جزییات پروفایل دمای قبل و بعد از انجام این پروژه در جدول ۱۳-۱ خلاصه شده است:

[1] Approach Temperature

جدول ۱۳-۱- پروفایل دما قبل و بعد از اجرای پروژه

ردیف	جریان فرآیند	دمای ورودی ^{o}C	دمای خروجی ^{o}C
پروفایل دمایی در مبدل پوسته و لوله (پیش از انجام و بررسی پروژه مذکور)			
۱	آمین با درصد خلوص بالا، خروجی از پایین برج دفع (سیال پوسته)	۱۳۱	۱۰۷
۲	آمین ناخالص به عنوان خوراک برج دفع (سیال لوله)	۵۹	۸۳
۳	دمای همگرایی	۴۸	
پروفایل دمایی در مبدل قاب و صفحه ای (پس از انجام و بررسی پروژه مذکور)			
۴	آمین با درصد خلوص بالا، خروجی از پایین برج دفع	۱۳۱	۸۶
۵	آمین ناخالص به عنوان خوراک برج دفع	۵۹	۱۰۴
۶	دمای همگرایی	۲۷	

در زیر نقشه شماتیکی از برج دفع موجود در واحد تصفیه گاز بوسیله آمین و تغییرات بوجود آمده با اصلاح نوع مبدل نمایش داده شده است:



شکل ۱۳-۱- دیاگرام جریان فرآیند قبل و پس از تغییر

این تغییر منجر به کاهش بار حرارتی ریبویلر برج دفع و در نتیجه کاهش میزان بخار مصرفی با فشار کم تا ۴۸ TPH در چهار واحد مذکور شده است. کاهش مصرف بخار در ریبویلرها، علاوه بر صرفه جویی در مصرف سوخت، منتج به کاهش تولید گازهای گلخانه ای به ویژه دی اکسید کربن در محیط می شود.

همچنین مبدلهای آمین خالص/ آمین ناخالص به ویژه در سمت آمین ناخالص همواره دچار کثیفی و گرفتگی میگردند. رسوب موجود، ماده ای پارافینی و سیاهرنگ میباشد که بسیار شبیه به واکس کفش است. این رسوب مخلوطی از ذرات بسیار ریز سولفید آهن (که به علت حمله سولفید هیدروژن به لوله ها و مخازن تشکیل میشود.) و هیدروکربنهایی است که در آمین جذب شده و یا نفوذ میکنند. استفاده از نوع خاصی از فیلتر با اندازه مش های ۵ میکرونی میتواند به میزان قابل توجهی مواد مذکور را کاهش دهد، اگرچه امکان نیاز به تعویض روزانه فیلتر وجود دارد. باوجود مشکلات تعویض روزانه فیلتر توسط اپراتور این روش میتواند مسائل مربوط به رسوب گرفتگی و تعمیر ونگهداری را صرف نظر از نوع مبدل حرارتی مورد استفاده به میزان قابل توجهی کاهش دهد.

از راه های غلبه بر این مشکل طراحی سیستم به گونه ای است که تنشی بیشتر از ۵۰ Pa در محل عبور سیال وجود داشته باشد. رسیدن به این میزان تنش در مبدلهای پوسته و لوله ممکن نیست در صورتیکه در مبدلهای صفحه ای به دلیل تلاطم زیاد جریان ، که به علت صفحات موجدار بوجود می آید ممکن میشود. اگر چه باید به این نکته نیز توجه کرد که این تغییر موجب افت ۱۰ تا ۱۵ Psi در فشار میشود که باید با تغییراتی در طراحی هیدرولیکی سیستم این مشکل را رفع کرد.

فهرست منابع

1. Plate Heat Exchangers: Design, Application and Performance- L.Wang, B.Sunden- WIT press- 2007
2. Compact Heat Exchangers: Selection, Design and Operaion- J.E.Hesselgreaves - Pergamon- 2001
3. Guide to compact heat exchangers- Energy Technology Support Unit & WS Atkins Consultants Ltd.
4. Heat Exchanger Design handbook- T.Kuppan- Marcel Dekker- 2000
5. Alfa laval- Plate heat exchanger operational and maintenance manual
6. GEA- Plate Heat Exchangers general operation manual
7. Heat transfer, 9th ed.- J.P.Holman- McGrawHill- 2002