

مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای

طراحی | کاربرد | عملکرد

دکتر انوشیروان فرشیدیان فر | استاد دانشگاه فردوسی مشهد
دکتر اردشیر فرشیدیان فر | استاد دانشگاه آزاد اسلامی مشهد

چاپ ششم
ویرایش جدید

مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای (طراحی، کاربرد و عملکرد)

انوشیروان فرشیدیان فر
اردشیر فرشیدیان فر



TGT Co.

**نام کتاب: مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای
(طراحی، کاربرد و عملکرد)**

نویسندگان: انوشیروان فرشیدیان فر، اردشیر فرشیدیان فر

نوبت چاپ: ششم

تاریخ چاپ: ۱۳۹۷

طراحی جلد: داوود مرگان

ویراستار: مؤسسه گل‌واژه

ناشر: پرتو نگار توس

چاپ: آستان قدس رضوی

شمارگان: ۲۰۰۰ جلد

قیمت: ۲۰۰.۰۰۰ ریال

سرشناسه: فرشیدیانفر، انوشیروان، ۱۳۴۵
عنوان و نام پدیدآور: مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای (طراحی،
کاربرد و عملکرد) / انوشیروان فرشیدیان فر، اردشیر فرشیدیان فر
مشخصات نشر: مشهد: پرتو نگار توس، ۱۳۹۵
مشخصات ظاهری: ۲۷۹ص:، تصویر، جدول
شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۹۷۰۴۹-۴-۱
وضعیت فهرست نویسی: فیبا
یادداشت: کتاب حاضر در سالهای مختلف توسط ناشران متفاوت
منتشر شده است.

موضوع: گرما — انتقال — ابزار و وسایل

موضوع: Heat — Transmission — Instrumets

موضوع: مبدل‌های گرمایی — طرح و ساختمان

موضوع: Heat exchangers — Design and construction

شناسه افزوده: فرشیدیانفر، اردشیر، ۱۳۴۴ -

رده بندی کنگره: ۱۳۹۵ ۴م۲/ف۴۳۳ QC

رده بندی دیویی: ۶۲۱/۴۰۲۵

شماره کتابشناسی ملی: ۴۴۲۰۸۹۰

(حق چاپ محفوظ و مخصوص مؤلف است)

مرکز پخش: مشهد، شهرک صنعتی توس

فاز یک، انتهای بلوار صنعت، خیابان صنعت ۱۳

پلاک ۳۰۰، شرکت طاهاقالب توس

تلفن: ۰۵۱-۳۵۴۱۰۴۴۵



انتشارات
پرتو نگار توس

الله

پیشگفتار

مبدل‌های حرارتی تقریباً پرکاربردترین عضو در فرآیندهای شیمیایی‌اند و می‌توان آنها را در بیشتر واحدهای صنعتی دید. آنها وسایلی هستند که امکان انتقال انرژی گرمایی بین دو یا چند سیال در دماهای مختلف را فراهم می‌کنند. این عملیات می‌تواند بین مایع-مایع، گاز-گاز و یا گاز-مایع انجام شود. مبدل‌های حرارتی به منظور خنک کردن سیال گرم و یا گرم کردن سیال با دمای پایین‌تر و یا هر دو، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

مبدل‌های حرارتی در محدوده وسیعی از کاربردها استفاده می‌شوند؛ این کاربردها شامل نیروگاه‌ها، پالایشگاه‌ها، صنایع نفت و گاز و پتروشیمی، صنایع ساخت و تولید، صنایع فرآیندی، صنایع غذایی و دارویی، صنایع ذوب فلز، گرمایش، تهویه مطبوع، سیستم‌های تبرید و کاربردهای فضایی می‌باشند. مبدل‌های حرارتی در دستگاه‌های مختلف نظیر دیگ بخار، مولد بخار، کندانسور، اواپراتور، تبخیرکننده‌ها، برج خنک‌کن، پیش گرم کن فن کوئل، خنک‌کن و گرم‌کن روغن، رادیاتورها، کوره‌ها و ... کاربرد فراوان دارند.

امروزه انرژی یکی از مهمترین عوامل در پیشرفت و توسعه پایدار جوامع بشری است که این موضوع بهینه‌سازی در مصرف انرژی را بیش از پیش مورد توجه قرار می‌دهد. مبدل حرارتی صفحه‌ای، نسل نسبتاً جدیدی از مبدل‌های حرارتی هستند که در آن سیالات گرم و سرد بین صفحات شیاردار جریان دارند. اغتشاش زیاد به علت حرکت سیال در مجاری باریک و ناهموار در بین این صفحات باعث افزایش انتقال حرارت، کاهش انرژی مصرفی و در نهایت موجب افزایش بازده انرژی می‌شود.

از مهمترین ویژگی‌های این مبدل‌ها می‌توان به راندمان و ضریب انتقال حرارت بالا، اشغال فضای کمتر برای نصب، حجم کمتر سیال داخلی، سهولت سرویس و رسوب کمتر اشاره کرد. کتاب حاضر با توجه به این ویژگی‌ها به بحث و بررسی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای می‌پردازد که امروزه در صنعت کشورمان نیز جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است.

هدف کلی این کتاب تشریح جامع این نوع مبدل‌ها، مزایا و معایب آنها، طراحی هیدرولیکی و حرارتی کامل آنها و نیز آرایه پیشرفته‌ترین دستاوردها در خصوص این نوع مبدل‌ها می‌باشد.

این کتاب با معرفی کلی و سابقه تاریخی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای آغاز می‌شود

و سپس در مورد ساختار و کارکرد آنها و همچنین نمونه‌هایی از کاربرد این مبدل‌ها در صنعت می‌پردازد.

در ادامه موضوعات مربوط به اجزای این مبدل‌ها (خصوصاً صفحات و واشرها) و روش تولید آنها تشریح می‌شود. در فصل پنجم کتاب نیز به بررسی روش‌های مختلف طراحی هیدرولیکی و حرارتی این نوع مبدل‌ها می‌پردازیم و با آرایه مثال‌های گوناگون مراحل مختلف طراحی را گام به گام توضیح خواهیم داد. در فصل ششم و بخش پایانی کتاب نیز به بررسی یکی از مهمترین موضوع‌ها در بهره‌برداری از مبدل‌ها یعنی مسأله رسوب و جرمگیری خواهیم پرداخت.

با توجه به نبود کتاب جامعی در خصوص مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، کتاب حاضر می‌تواند مرجع خوبی برای دانشجویان رشته‌های مهندسی مکانیک و مهندسی شیمی باشد؛ همچنین مهندسین مشاور، ناظر و مجریان پروژه‌های صنعتی و ساختمانی که بایستی اطلاعات کافی از این نوع مبدل‌ها داشته باشند، می‌توانند در مباحث طراحی، نظارت، اجرای پروژه‌ها و موضوع بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات از آن استفاده کنند. تهیه کتاب حاضر حاصل تجربه، تدریس و تحقیق بیست ساله این‌جانب در مبحث مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای می‌باشد.

بجاست که از همه دست اندرکاران تهیه این کتاب تشکر نماییم، لذا از جناب آقای مهندس خسروی و خانم مهندس سمیعی که کار چاپ و نشر را به عهده داشته‌اند، آقای مهندس محمد سادات، خانم مهندس هدی پارسا، مدیر مهندسی شرکت پژوهشی صنعتی طلاها قالب توس و آقای مهندس محمد حسین فرشیدیان‌فر که در تهیه عکس‌ها و بازبینی متن اصلی همکاری کرده‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنم، اما قطعاً بدون همکاری همسر مریم عربی که صبورانه در تایپ و تصحیح و بازبینی متن این‌جانب را یاری نموده‌اند تهیه کتاب امکان‌پذیر نبوده، از این رو در اینجا فرصت را مغتنم می‌شمارم و از همکاری صمیمانه‌شان با وجود مشغله‌های فراوان کمال تشکر را دارم. این کتاب را به پیشگاه همه بزرگوارانی که به من کلامی آموختند تقدیم می‌کنم: پدرم، مادرم، برادرانم، همسر و تمامی سرورانی که به عنوان دانشجو، افتخار حضور در کلاس درسشان را داشته‌ام.

دکتر انوشیروان فرشیدیان‌فر
(استاد دانشگاه فردوسی مشهد)

تابستان ۱۳۹۳

۵۴	۲-۳- تهویه مطبوع و سیستم‌های سرمایشی
۵۶	۳-۳- استفاده از مبدل‌ها در گرمایش بخش‌های خدماتی و تولید همزمان
۵۸	۳-۴- استفاده از مبدل‌های صفحه‌ای در صنایع نفت و گاز فراساحلی
۶۰	۳-۵- کاربردهای دریایی
۶۱	۳-۶- فرآیندهای شیمیایی
۶۶	۳-۷- کاربرد در صنایع خمیر و کاغذسازی
۶۸	۳-۸- استفاده در سیستم‌های انرژی خورشیدی
۶۹	۳-۹- ملاحظات نهایی
۷۰	مراجع فصل ۳:

فصل ۴: اجزای مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای و اشردار و نحوه تولید آنها

۷۱	۴-۱- مقدمه
۷۳	۴-۲- اجزای مبدل صفحه‌ای
۷۵	۴-۲-۱- مجموعه چارچوب و صفحه
۷۷	۴-۲-۲- مجموعه صفحات و اشربندی شده
۷۹	۴-۳- انواع موج‌دهی:
۸۷	۴-۴- جنس صفحات
۹۳	۴-۵- واشرها
۹۶	۴-۵-۱- الاستومر (لاستیک)
۹۸	۴-۵-۲- ساختار مولکولی و ویژگی‌های لاستیک‌ها (الاستومرها)
۱۰۱	۴-۵-۳- افزودنی‌های لاستیک
۱۰۲	۴-۵-۳-۱- مواد پرکننده
۱۰۲	۴-۵-۳-۲- نرم‌کننده‌ها
۱۰۳	۴-۵-۳-۳- مواد ضد کهنگی
۱۰۴	۴-۵-۳-۴- کمک‌کننده‌های فرآیند
۱۰۴	۴-۵-۳-۵- شتاب‌دهنده‌ها، فعال‌کننده‌ها و رنگ‌ها
۱۰۴	۴-۵-۳-۶- گوگرد یا ماده ولگانیزکننده
۱۰۵	۴-۵-۴- انواع لاستیک‌ها:
۱۰۵	۴-۵-۴-۱- لاستیک پلی اورتان
۱۰۵	۴-۵-۴-۲- لاستیک طبیعی NR
۱۰۶	۴-۵-۴-۳- لاستیک ایزوپرن IR
۱۰۶	۴-۵-۴-۴- لاستیک استیرن-بوتادین
۱۰۷	۴-۵-۴-۵- لاستیک بوتیل IIR (لاستیک ایزوبوتیلن-ایزوپرن)

107	.....	1-3-4
108	.....	1-3-4
109	.....	1-3-4
110	.....	1-3-4
111	.....	1-3-4
112	.....	1-3-4
113	.....	1-3-4
114	.....	1-3-4
115	.....	1-3-4
116	.....	1-3-4
117	.....	1-3-4
118	.....	1-3-4
119	.....	1-3-4
120	.....	1-3-4
121	.....	1-3-4
122	.....	1-3-4
123	.....	1-3-4
124	.....	1-3-4
125	.....	1-3-4
126	.....	1-3-4
127	.....	1-3-4
128	.....	1-3-4
129	.....	1-3-4
130	.....	1-3-4
131	.....	1-3-4
132	.....	1-3-4
133	.....	1-3-4
134	.....	1-3-4
135	.....	1-3-4
136	.....	1-3-4
137	.....	1-3-4
138	.....	1-3-4
139	.....	1-3-4
140	.....	1-3-4
141	.....	1-3-4
142	.....	1-3-4
143	.....	1-3-4
144	.....	1-3-4
145	.....	1-3-4
146	.....	1-3-4
147	.....	1-3-4
148	.....	1-3-4
149	.....	1-3-4
150	.....	1-3-4
151	.....	1-3-4
152	.....	1-3-4
153	.....	1-3-4
154	.....	1-3-4
155	.....	1-3-4
156	.....	1-3-4
157	.....	1-3-4
158	.....	1-3-4
159	.....	1-3-4
160	.....	1-3-4
161	.....	1-3-4
162	.....	1-3-4
163	.....	1-3-4
164	.....	1-3-4
165	.....	1-3-4
166	.....	1-3-4
167	.....	1-3-4
168	.....	1-3-4
169	.....	1-3-4
170	.....	1-3-4
171	.....	1-3-4
172	.....	1-3-4
173	.....	1-3-4
174	.....	1-3-4
175	.....	1-3-4
176	.....	1-3-4
177	.....	1-3-4
178	.....	1-3-4
179	.....	1-3-4
180	.....	1-3-4
181	.....	1-3-4
182	.....	1-3-4
183	.....	1-3-4
184	.....	1-3-4
185	.....	1-3-4
186	.....	1-3-4
187	.....	1-3-4
188	.....	1-3-4
189	.....	1-3-4
190	.....	1-3-4
191	.....	1-3-4
192	.....	1-3-4
193	.....	1-3-4
194	.....	1-3-4
195	.....	1-3-4
196	.....	1-3-4
197	.....	1-3-4
198	.....	1-3-4
199	.....	1-3-4
200	.....	1-3-4

مراجع فصل ۴: ۱۴۶

فصل ۵: اصول طراحی مبدل‌های حرارتی

۱-۵- مقدمه	۱۴۷
۲-۵- تئوری انتقال حرارت	۱۴۹
۳-۵- روابط انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی	۱۵۳
۱-۳-۵- اختلاف دمای لگاریتمی LMTD در مبدل‌های حرارتی	۱۵۵
۲-۳-۵- ضریب انتقال حرارت کلی (OHTC) در مبدل‌های حرارتی	۱۶۰
۳-۳-۵- عملکرد حرارتی (طول حرارتی)	۱۶۲
۴-۵- ملاحظات طراحی	۱۶۴
۱-۴-۵- آرایش و توزیع جریان	۱۶۵
۲-۴-۵- جهت جریان	۱۶۵
۳-۴-۵- مسیر جریان (گذر)	۱۶۶
۴-۴-۵- تعداد مسیرها در یک گذر	۱۶۷
۵-۴-۵- توزیع جریان در مجاری ورودی و خروجی جریان	۱۶۷
۶-۴-۵- صفحات انتهایی مبدل حرارتی صفحه‌ای	۱۶۸
۷-۴-۵- طبقه‌بندی آرایش مسیرها	۱۶۹
۵-۵- طراحی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای	۱۷۷
۱-۵-۵- سطح انتقال حرارت صفحات	۱۷۸
۲-۵-۵- متوسط فاصله کانال جریان	۱۸۰
۳-۵-۵- قطر معادل کانال	۱۸۰
۴-۵-۵- ضریب انتقال گرما	۱۸۱
۵-۵-۵- افت فشار کانال	۱۸۳
۶-۵-۵- افت فشار دهانه‌های خروجی و ورودی	۱۸۵
۷-۵-۵- ضریب کلی انتقال حرارت	۱۸۶
۸-۵-۵- مساحت سطح انتقال گرما	۱۸۹
۶-۵- روش‌های طراحی حرارتی	۲۰۲
۱-۶-۵- روش اختلاف دمای متوسط لگاریتمی (روش LMTD)	۲۰۳
۲-۶-۵- روش ϵ - NTU	۲۰۷
۳-۶-۵- روش P-NTU	۲۱۱
۴-۶-۵- روند اندازه‌بندی و درجه‌بندی مبدل‌ها	۲۱۲
۷-۵- روش‌های طراحی هیدرودینامیکی	۲۱۴
۸-۵- ضریب انتقال حرارت کلی متغیر	۲۱۸

.....	۷۸۱
.....	۷۸۱
.....	۸۸۱
.....	۱۸۱
.....	۰۸۱
.....	۶۳۱
.....	۷۳۱
.....	۳۳۱
.....	۴۳۱
.....	۵۳۱
.....	۶۳۱
.....	۷۳۱
.....	۸۳۱
.....	۹۳۱
.....	۱۰۳۱
.....	۱۱۳۱
.....	۱۲۳۱
.....	۱۳۳۱
.....	۱۴۳۱
.....	۱۵۳۱
.....	۱۶۳۱
.....	۱۷۳۱
.....	۱۸۳۱
.....	۱۹۳۱
.....	۲۰۳۱
.....	۲۱۳۱
.....	۲۲۳۱
.....	۲۳۳۱
.....	۲۴۳۱
.....	۲۵۳۱
.....	۲۶۳۱
.....	۲۷۳۱
.....	۲۸۳۱
.....	۲۹۳۱
.....	۳۰۳۱

کتابخانه ملی و اسنادی و کتابخانه مرکزی

.....	۳۱۱
.....	۴۱۱





فصل ۱

مشخصات اصلی و پیشرفت مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای

۱-۱- مقدمه

فرآیند انتقال حرارت میان دو جریان یا تعداد بیشتر با دماهای متفاوت، کاربردهای گوناگون صنعتی، تجاری و خانگی دارد و معمولاً برای این کار از یک مبدل حرارتی استفاده می‌شود. مجموعه‌ای متنوع از مبدل‌های حرارتی از نظر شکل، اندازه، مکانیزم انتقال و سایر ویژگی‌ها را می‌توان در صنایعی همانند برق و قدرت، نفت، حمل و نقل، تهویه مطبوع، سرماسازی، تبرید و بیولوژی مشاهده کرد. این مبدل‌ها را می‌توان به شکلی گسترده، به دو گروه مبدل‌های حرارتی تماس مستقیم و تماس غیرمستقیم^۱ طبقه‌بندی کرد. در مبدل‌های حرارتی نوع تماس مستقیم، انتقال حرارت میان دو سیال که در تماس مستقیم با یکدیگر قرار دارند، اتفاق می‌افتد و این دو جریان توسط دیواره از هم جدا نمی‌شوند. به دلیل نبود دیواره‌ها، اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی بسیار اندک است و در اغلب اوقات انتقال حرارت همراه با انتقال جرم است. یک نمونه از مبدل‌های حرارتی نوع تماس مستقیم، برج خنک‌کن می‌باشد. در مبدل‌های حرارتی نوع تماس غیر مستقیم، از یک دیواره (لوله‌ای، صفحه‌ای یا انواع دیگر دارای هندسه غیردایروی) برای جدا کردن جریان‌های سیال گرم و سرد استفاده می‌شود و انتقال حرارت میان آنها در امتداد این مرز مشترک روی می‌دهد.

مبدل‌های پوسته-لوله و صفحه (یا نوع قاب و صفحه^۱) نمونه‌هایی از مبدل‌های حرارتی نوع تماس غیرمستقیم هستند؛ یک مولد دوار^۲ نیز نمونه دیگری از مبدل حرارتی نوع تماس غیرمستقیم است که در آن حرارت توسط یک روش گذرا منتقل می‌شود.

مبدل‌های حرارتی را می‌توان به صورت جزئی‌تر براساس مشخصات ساختاری، مکانیزم‌های انتقال، خصوصیات بار حرارتی و همچنین مشخصه‌های متفاوت بسیاری که توسط [۱] Walker، [۲] Sukhatme و Devotta، [۳] Hewitt و همکاران، [۴] Shah و Sekulic، [۵] Kuppan، [۶] Liu و Kakac و دیگران اشاره شده است، طبقه‌بندی کرد. ضرورت رقابت در تجارت جهانی و اهمیت روبه افزایش ذخیره‌سازی انرژی و کاهش آلودگی‌های محیطی به توجه بیشتر مهندسان در استفاده از مبدل‌های حرارتی با راندمان بالا انجامیده است. استفاده از مبدل‌های پوسته-لوله سنتی امروزه نیز در صنعت رایج است و کارایی آنها را می‌توان به کمک افزودن تجهیزات جدید [۷ و ۸] ارتقا بخشید. با این همه امروزه مهندسان به دنبال مبدل‌هایی هستند که نسبت قطر و سطح هیدرولیکی آن به حجم قابل ملاحظه باشند. شناخت این مشکل، مهندسان را به سوی طراحی مبدل‌های حرارتی با کارایی بالا و درجات مختلف فشردگی، که به صورت عملی در مراجع [۳، ۴، ۶، ۹، ۱۰] اشاره شده، هدایت کرده است.

یک مبدل حرارتی فشرده را می‌توان به عنوان مبدلی در نظر گرفت که دارای چگالی مساحت سطح انتقال حرارت بیشتر از $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ در دست کم یکی از طرفین سیال [۱۱] است. این نوع از مبدل‌ها نه تنها اندازه‌های کوچکتر دارند، بلکه ویژگی‌های خاص ساختاری آنها سبب افزایش کارایی‌های حرارتی-هیدرولیک و در نتیجه افزایش راندمان‌های انرژی با استفاده از مواد، سرمایه و صرفه‌جویی در هزینه‌های کاری خواهد شد.

اگرچه مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای در ردیف‌های پایین‌تر طبقه‌بندی مبدل‌ها براساس فشردگی قرار می‌گیرند [۱۱]، ولی نسبت به مبدل‌های حرارتی دیگر با فشردگی زیاد از فواید ممتاز بسیار و مشخصات کاربردی بی‌نظیری برخوردار هستند. از

1 Plate and Frame

2 Rotary Regenerator

جمله این خصوصیات می‌توان به ظرفیت حرارتی انعطاف‌پذیر (صفحات به آسانی قابل حذف شدن یا اضافه کردن هستند، در این صورت بارهای حرارتی مختلفی را می‌توان تأمین کرد)، تمیز شدن آسان برای تقویت شرایط بهداشتی (که جهت فرآیندهای تولید محصولات غذایی، دارویی و لبنی لازم است)، اختلاف دمای اپروچ^۱ (اختلاف دمای نزدیک سیال سرد و گرم خروجی) در هنگام استفاده در جریان کاملاً معکوس (که برای کاربردهای کرایوژنیک^۲ و تعدیل اختلاف دمای بعضی از سیالات فرایند نیاز است) و افزایش کارایی انتقال حرارت اشاره کرد؛ بنابراین، طراحی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای با توجه به گوناگونی صفحه‌ها و موج‌دهی آنها، آرایش‌های جریان، مشخصات عملکردی و ساختمان و خصوصیات کاربردی آنها اهمیت قابل ملاحظه‌ای دارند و در این کتاب توجه ویژه‌ای به این مباحث شده است.

۱-۲- پیشینه تاریخی

نخستین کاربرد و استفاده از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای با توجه به روند افزایشی قوانین لازم برای تولید مواد غذایی، بویژه محصولات شیر، در اواخر قرن نوزدهم صورت گرفت. در آغاز دهه ۱۸۸۰، آگاهی عمومی نسبت به بیماری‌هایی مانند سل و علت سرایت آنها که شیر خام یا نجوشیده است، افزایش یافت. از این رو نخستین تلاش‌ها برای پاستوریزه کردن شیر انجام شد. این روش گرم کردن شیر تا یک دمای خاص به طوری که مزه آن تغییر نکند و سپس نگه داشتن شیر در این دما برای مدت زمانی کوتاه و در نهایت سرد کردن سریع آن را در برمی‌گرفت. در این فرآیند نیاز است که تجهیزات انتقال حرارت از نظر دمایی بسیار مناسب و کارآمد بوده و مهمتر از آن به آسانی تمیز شوند، زیرا تمیز کردن تجهیزات باید هر روزه انجام گیرد. تحقق این نیازها در هنگام انجام فرآیند، در بسیاری از تجهیزات انتقال حرارت اولیه برای پاستوریزه کردن شیر، بسیار مشکل بوده است و در نتیجه مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای برای رسیدن به این اهداف طراحی شده‌اند.

1 Approach Temperature

2 Cryogenic

گویا نخستین ایده طراحی مبدل حرارتی صفحه‌ای از یک آلمانی به نام آلبرش دراک^۱ در سال ۱۸۷۸ می‌باشد [۱۲]. این ایده شامل سرد کردن یک سیال توسط سیال دیگر می‌باشد، که هر کدام در یک لایه در جهت‌های مخالف مجموعه‌ای از صفحات جریان یافته‌اند. در سال‌های بعدی، اواخر دهه ۱۸۰۰ و اوایل ۱۹۰۰، تلاش‌های چشمگیری در زمینه طراحی شکل‌های گوناگون مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای انجام گرفت. شکل ۱-۱، نمونه‌ای شماتیک از یک مبدل حرارتی صفحه‌ای و قاب آن را نشان می‌دهد که از سوی دو آلمانی (لانگن^۲ و هاندهاسن^۳ با شماره ثبت اختراع ۵۸۵۰۴) در پنجم آوریل ۱۸۹۰ ارایه شد و در آن نسبت به مدل‌های پیشین اصلاحاتی انجام گرفته بود [۱۳].

اما از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای به صورت تجاری تا دهه ۱۹۲۰ استفاده نشد، تا هنگامی که دکتر ریچارد سلیگمن^۴، مؤسس شرکت APV در انگلستان، نخستین مبدل حرارتی صفحه‌ای کاربردی را در سال ۱۹۲۳ ارایه کرد (شکل ۱-۲). این وسیله، پاستوریزه کننده صفحه‌ای^۵ نامیده شد که به عنوان یک جداساز مورد استفاده در صنایع لبنی، وظیفه فرآوری حرارتی لبنیات را انجام می‌داد. تقریباً یک دهه بعد، در حدود سال ۱۹۳۰، برگدورفر ایزنورک^۶ از کمپانی آلفا لاوال در سوئد (در آن زمان به این شرکت AB Separator گفته می‌شد) یک مبدل حرارتی صفحه‌ای تجاری مشابه را طراحی کرد که اولین محصول شرکت از این نوع محصول نیز بود (شکل ۱-۳) [۱۴]. اگرچه از آن زمان به بعد مفهوم پایه و کارکرد اصلی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای تغییر اندکی کرد، اما طراحی کلی و ساختمان این نوع از مبدل‌ها جهت تحمل ظرفیت‌های بالاتر، دماهای کاری بیشتر و فشارهای کاری بالاتر، نسبت به سایر موارد از پیشرفت قابل توجهی برخوردار بوده‌اند. این تغییرات، امکان گسترش کاربردهای مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای را در نیازهای مختلف صنعتی فراهم ساخته است. این درحالی است

1 Albercht Dracke

2 Langen

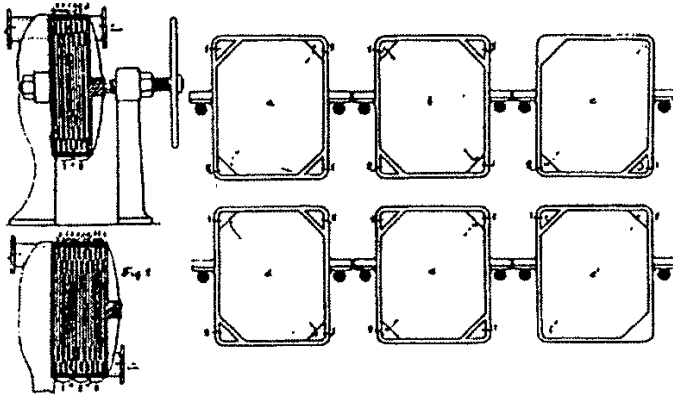
3 Hundhausen

4 Richard Seligman

5 Plate Pasteurizer

6 Bergedorfer Eisenwerk

که از این گونه مبدل‌ها در آغاز فقط برای پاستوریزه کردن شیر استفاده می‌شد.

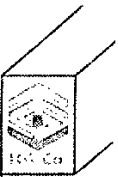


شکل ۱-۱: مدل ثبت شده با شماره ۵۸۵۰۴ برای یک مبدل حرارتی در تاریخ ۵ آوریل ۱۸۹۰ [۱۳]

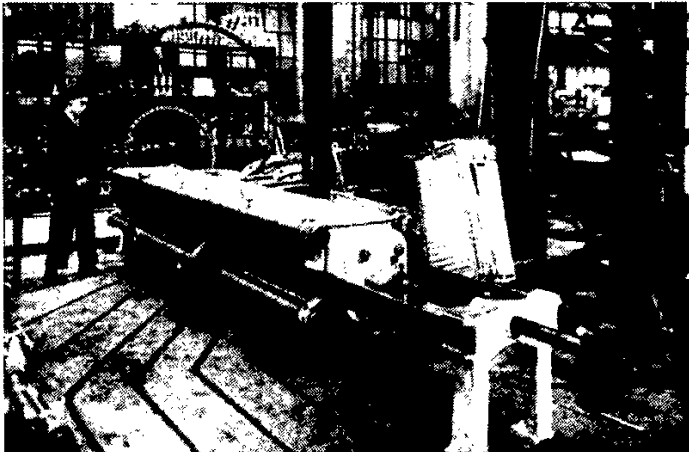
این فعالیت تا دهه ۱۹۷۰ ادامه پیدا کرد و پس از آن با توجه به بحران انرژی از اهمیت بیشتری برخوردار شد. طراحی‌های جدید فراوانی برای نقش‌های سطح صفحات و روش‌های ساخت آنها ارایه شد، نمایشی از شکل موج‌های صفحات در شکل ۴-۱ مشاهده می‌شود. یکی از اهداف مهم آن زمان، طراحی الگوی صفحات جدید جهت سرد و گرم کردن مؤثر سیالات فرآیند با در نظر گرفتن هزینه‌های قابل قبول برای فرآیندهای ساخت و یکپارچگی ساختاری بهتر بوده است. همچنین در اواخر دهه ۱۹۷۰ تلاش‌های قابل توجهی برای ذخیره‌سازی انرژی به کمک بهبود عملکرد حرارتی هیدرولیکی مبدل‌های حرارتی صورت گرفت. حاصل این تلاش‌ها در طراحی مبدل حرارتی صفحه‌ای ساخت صفحات موج‌دار مدل شورون^۱ بود که در آن آرایش جریان به صورت اختلاطی^۲ بوده و صفحات در آن به صورت ترکیبی از صفحات با زاویه شورون کوچک، متوسط یا بزرگ به کار می‌روند [۱۵]. چنانکه که در ادامه نشان داده خواهد شد؛ در این صورت راندمان حرارتی افزایش و افت فشار حاصل نیز کاهش می‌یابد. یکی از ایده‌های جدید این روش، تقسیم سطح صفحه به چهار قسمت می‌باشد، که هر کدام از قسمت‌ها دارای

1 Chevron-Type

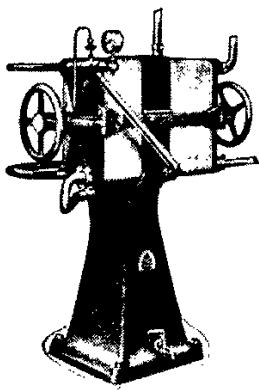
2 Mixed



شکل موج با زاویه شورون متفاوت است [۱۶]. در اینجا هماهنگ کردن محدودیت‌های افت فشار و نیز افزایش نرخ انتقال حرارت با وجود دو جریان سیال و همچنین کاهش توزیع نامناسب جریان و بهینه کردن سطح انتقال حرارت، هدف اصلی می‌باشد.



شکل ۱-۲: مبدل حرارتی صفحه‌ای اختراع شده توسط دکتر ریچارد سلیگمن (Richard Seligma)



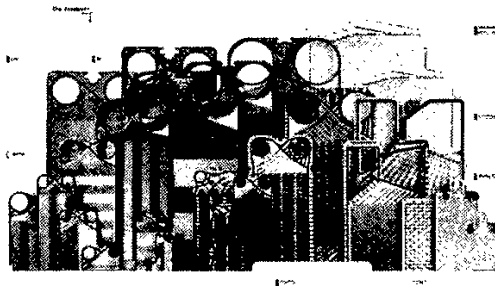
شکل ۱-۳: مبدل حرارتی ساخته شده توسط برگدورف^۱ (از شرکت آلفا لاوال)

امروزه، تولیدکننده‌های مشهور فراوانی در سطح جهان وجود دارند که مدل‌های گوناگون بسیاری را از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای جهت کاربردهای مختلف ارائه می‌دهند، از جمله این سازنده‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- 1- Alfa Laval Lund (www.alfalaval.com)
- 2- APV (www.apv.com)
- 3- SWEP (www.sweppe.com)
- 4- Tranter (www.tranterphe.com)
- 5- GEA Ecoflex (www.gea-ag.com)
- 6- Sondex A/S (www.sondex.com)
- 7- Hisaka Works (www.hisaka.co.jp)

این فهرست تمامی سازندگان جهانی مبدل‌های صفحه‌ای را در بر نمی‌گیرد و شرکت‌هایی همانند ABB LUMMUS هلند، شرکت Hunt Thermal انگلیس، شرکت Funke آلمان، شرکت Packinox فرانسه، شرکت Muller و شرکت API را نیز می‌توان در رده‌های بعدی افزود.

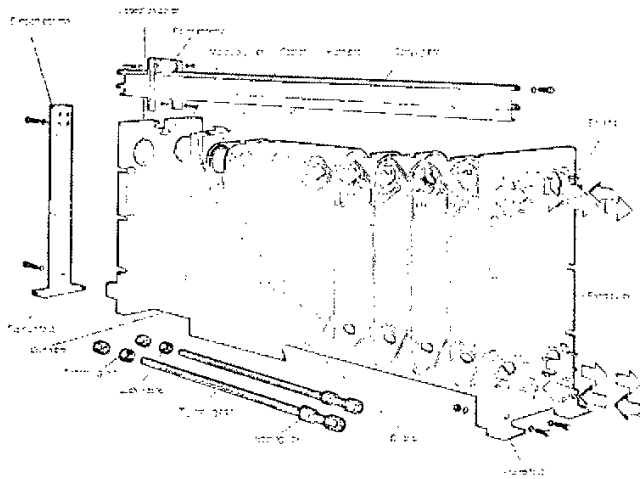
در کشور عزیزمان ایران نیز شماری از شرکت‌های صنعتی نسبت به وارد کرده صفحات اصلی مبدل‌های صفحه‌ای از خارج از کشور و مونتاژ مبدل در داخل کشور اقدام کرده‌اند. تنها شرکتی که در داخل کشور به طور کامل نسبت به طراحی، ساخت و مونتاژ مبدل‌های صفحه‌ای در سایزهای مختلف از اندازه‌های بسیار کوچک تا مبدل‌هایی به طول 4m اقدام نموده است، شرکت پژوهشی صنعتی طاه‌ها قالب توس است که توانسته با تولید مبدل‌های صفحه‌ای در ظرفیت‌های مختلف به بخشی از نیازهای این محصول در داخل کشور پاسخ دهد.



شکل ۱-۴: صفحات نمونه مبدل حرارتی صفحه‌ای با شکل موج‌ها و هندسه‌های متفاوت

۳-۱- اصول پایه

شکل ۱-۵ اجزای اصلی یک نمونه مبدل حرارتی صفحه‌ای امروزی را نشان می‌دهد. اجزای اصلی یک مبدل حرارتی صفحه‌ای شامل صفحات انتقال حرارت و جداکننده جریان، واشرها، قاب‌های نگه‌دارنده انتهایی (قاب ثابت و متحرک) که شامل نازل‌های مجاری ورودی و خروجی سیال است، میله‌های افقی راهنمای صفحات، ستون نگه‌دارنده و پیچ‌های فشاری، می‌باشد.



شکل ۱-۵: اجزای مختلف یک نمونه مبدل حرارتی صفحه‌ای

قسمت میانی یک مبدل حرارتی از صفحات نازک فلزی پرس شده مستطیلی تشکیل شده است که کاملاً توسط واشرها و جانبی احاطه شده‌اند و در یک مجموعه^۱ مونتاژ شده و به کمک پیچ‌های نگه‌دارنده میان دو قاب نگهداری می‌شوند. واشرها لبه‌ای موجود بین هر جفت از صفحات شیاردار، هر کدام از جریان‌های سیال را توسط کانال‌های جریان میان صفحات، محدود می‌کنند و بدین وسیله از مخلوط شدن و همچنین تشت سیال به خارج و محیط مجموعه صفحات جلوگیری می‌شود. صفحات، از میله حامل بالایی آویزان شده، و به صورت همتراز با میله پایینی قرار می‌گیرند.

بسیاری از واحدها، میله‌های حامل به صورت جداگانه در انتهای دیگر قاب توسط یک ستون نگه دارنده، ثابت می‌شوند. مجموعه صفحات که میان صفحه قاب ثابت و صفحه متحرک یا صفحه فشار فشرده شده‌اند، توسط پیچ‌های افقی که باید تا طول مشخصی سفت شوند، به یکدیگر متصل می‌باشند. شایان ذکر است که نخستین صفحه مبدل حرارتی که در تماس با قاب‌ها می‌باشد، دارای واشرهایی حول چهارسوراخ بوده تا از نشت سیال میان اولین صفحه و قاب هنگامی که سیال از طریق نازل به مبدل وارد یا خارج می‌شوند، جلوگیری کند.

چنانچه در شکل ۱-۵ نشان داده شده است، جریان‌های دو سیال گرم و سرد در کانال‌های متناوب، توسط یک صفحه موجدار یا طرحدار از یکدیگر جدا می‌شوند. هر جفت از صفحات مجاور در مبدل حرارتی صفحه‌ای، این کانال‌ها را تشکیل می‌دهند و سیال ورودی یا خروجی به کمک سیستم واشربندی صفحات در مسیر مورد نظر هدایت می‌شود. دو سیال در مبدل‌های صفحه‌ای می‌توانند هم‌سو^۱ (هم‌جهت) یا در خلاف جهت هم^۲ (معکوس) حرکت داشته باشند، که معمولاً جریان معکوس دارای راندمان بالاتری می‌باشد.

۱-۴- مشخصات عمومی

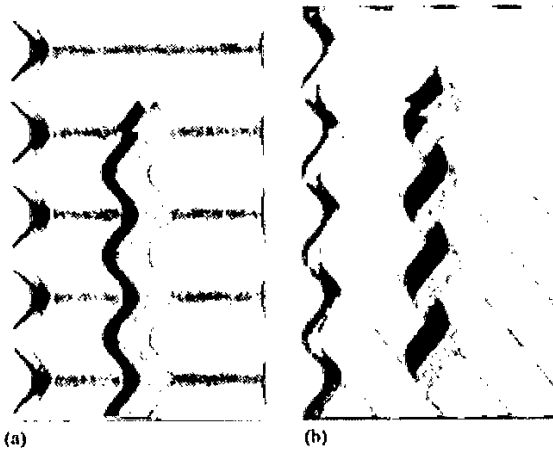
مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای به دلیل مشخصات ساختاری منحصر به فرد، نسبت به مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله از مزایای بیشتری برخوردار هستند، از جمله این مزایا می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- موجدار بودن سطح صفحه سبب می‌شود که انتقال حرارت به کمک مکانیزم‌های بسیاری که عبارتند از جریان‌های گردابه‌ای یا چرخشی، شکستن و دوباره به هم پیوستن لایه‌های مرزی، مسیرهای عبور جریان با قطر هیدرولیکی کوچک و افزایش سطح انتقال حرارت مؤثر، افزایش یابد. در نتیجه ضرایب انتقال حرارت مبدل‌های صفحه‌ای نسبت به مبدل‌های حرارتی پوسته لوله برای شرایط سیال یکسان، بزرگتر

1 Co - Current Flow

2 Counter - Current Flow

هستند. عامل اصلی برتری این مبدل‌ها، تولید گردابه‌های^۱ جانبی در فضاهاى میان موج‌ها یا جریان‌های چرخشی مارپیچ در امتداد طول صفحه می‌باشد، که با توجه به آرایش موج‌های صفحه (شیارهای موازی هم‌فاز یا شیارهای عرضی) چنانکه در شکل ۱-۶ نشان داده شده است، سبب مخلوط شدن کامل جریان‌ها می‌شود و ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی را نیز افزایش می‌دهد.



شکل ۱-۶: نمایش شماتیک گردش مجدد و حرکت چرخشی سیال به علت موج‌های سطح صفحه.

(a) کانال‌های صفحه‌ای واش‌بورده^۲ (شیارهای موازی هم‌فاز) همراه با چرخش جانبی در گودی‌های سطح؛
 (b) کانال‌های جریان صفحه شورون^۳ یا جناغی^۴ (شیارهای عرضی) همراه با چرخش مارپیچ طولی^۵

۲- اندازه حرارتی (و فیزیکی) مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای با توجه به ضرایب انتقال حرارت بزرگ این نوع از مبدل‌ها، بسیار کوچک است. با در نظر گرفتن سطح انتقال حرارت یکسان، وزن و حجم مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای تقریباً به ترتیب 30 درصد و 20 درصد وزن و حجم مبدل‌های پوسته و لوله می‌باشد. شکل ۱-۷ برای نمونه، تفاوت

- 1 Vortices
- 2 Washboard
- 3 Chevron
- 4 Herringbone
- 5 Helical

اندازه یک مبدل حرارتی صفحه‌ای و مبدل حرارتی پوسته-لوله به ازای یک بار حرارتی یکسان را نشان می‌دهد و همین امر از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای برای استفاده در سکوه‌های حفاری نفت و گاز فراساحلی^۱ و صنایع مختلف دریایی گزینه‌ای مناسب ساخته است.

۳- به دلیل ضرایب انتقال حرارت بالا و آرایش جریان خلاف جهت (معکوس)، از مبدل‌های صفحه‌ای می‌توان در شرایطی استفاده نمود که دمای اپروچ بسیار کم (1°C) باشد، بنابراین این نوع مبدل‌ها دارای بازیافت حرارتی^۲ 90 درصد می‌باشند که نسبت به بازیافت حرارتی 50 درصد در مبدل‌های پوسته-لوله، بسیار بالاتر است. از این رو مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای برای بازیافت حرارت از منابع حرارتی درجه پایین بسیار مناسب خواهند بود.

۴- در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، هر کدام از سیالات داخل کانال‌هایی میان صفحات و اشردار، محدود می‌شوند. در محل‌های ورود و خروج سیال نیز واشرها به صورت دوپل استفاده می‌شود بنابراین در این مبدل‌ها امکان مخلوط شدن متقابل سیال^۳ وجود ندارد.

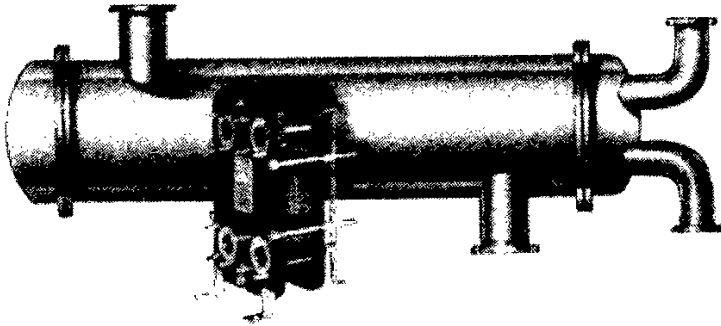
۵- مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای به علت ایجاد جریان‌های گردابه‌ای و مختلط برای سیالات با لزجت زیاد بسیار مناسب هستند؛ این در حالی است که در بیشتر مبدل‌های حرارتی به دلیل وجود لزجت زیاد سیال در ناحیه آرام جریان می‌یابند؛ همچنین گردابه‌های ماریچ^۴ معمولاً در اعداد رینولدز پایین‌تر در مسیرهای عبور جریان با شیارهای عرضی، تولید می‌شوند که این امر به خودی خود در بسیاری از موارد، سبب کاهش رسوب‌گذاری در مبدل می‌شود.

1 Offshore

2 Heat Recovery

3 Cross - Contamination of Fluids

4 Helical Vortices



شکل ۱-۷: تصویری از تفاوت اندازه میان یک مبدل حرارتی صفحه‌ای و یک مبدل حرارتی پوسته و لوله در یک بار حرارتی معین (از شرکت آلفالاول)

۶- مجموعه صفحات در یک مبدل صفحه‌ای واشردار به آسانی قابل دمونتاز کردن^۱ و مونتاژ مجدد^۲ می‌باشد. در نتیجه بازرسی، تمیزکاری و تعویض واشرها به آسانی انجام می‌شود و بویژه شرایط بهداشتی بالایی را می‌توان برای صنایع فرآوری محصولات غذایی و لبنی، فراهم ساخت. افزون بر این به علت آسان بودن دمونتاز و مونتاژ مجدد قطعات، این گونه از مبدل‌ها از انعطاف‌پذیری خوبی برخوردار هستند، به صورتی که می‌توان ظرفیت حرارتی آنها را بسادگی با کاستن یا افزودن صفحات تغییر داد.

۷- به دلیل وجود کانال‌های باریک میان دو صفحه مجاور، حجم سیال داخل مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای بسیار کم است. در نتیجه، سیال در جریان، در برابر تغییرات شرایط فرآیند، در مدت زمان بسیار کوتاهی واکنش نشان می‌دهد و در این صورت کنترل آن بسیار آسانتر است.

۸- گرم یا سرد کردن بیشتر از دو سیال در یک مبدل حرارتی صفحه‌ای با نصب قسمت‌های تقسیم‌کننده میانی بین صفحات انتقال حرارت امکان‌پذیر است، در این صورت پیچیدگی ساختاری تجهیزات فرآیند نیز کاهش می‌یابد.

۹- در یک مبدل حرارتی صفحه‌ای می‌توان صفحات با الگوی سطح متفاوت را همراه با یکدیگر قرار داد. آرایش‌های متفاوت چندگذر^۳ را نیز می‌توان ایجاد کرد. این

1 Disassembled

2 Reassembled

3 Multi - Pass

انعطاف‌پذیری امکان بهینه‌سازی بهتر شرایط کاری را در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای فراهم می‌سازد.

۱۰- با توجه به اینکه مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای حجم کمتری را اشغال می‌کنند و وزنشان نیز کمتر می‌باشد، هزینه‌های کمتری برای نگهداری، انتقال و فونداسیون آنها نیاز است.

۱۱- ارتعاشات ناشی از جریان سیال، صدای مزاحم و نویز، و ساییدگی - خوردگی و فرسایش به علت برخورد سیال با سطح انتقال حرارت، در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای مشاهده نمی‌شود.

۱۲- تنها لبه‌های صفحات با هوای آزاد تماس دارند، در نتیجه، اتلاف حرارت ناچیز است و در حالت کلی نیاز به عایق کاری نیست.

افزون بر ویژگی‌های نام برده شده و امتیازهای دیگر یک مبدل حرارتی صفحه‌ای واشردار در مقایسه با مبدل حرارتی صفحه‌ای پوسته-لوله، در جدول ۱-۱ خلاصه شده است. این ویژگی‌ها سبب شده است که مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای در مقایسه با انواع دیگر مبدل‌های حرارتی فشرده و غیرفشرده در کاربردهای مختلف، مناسبتر باشند.

جدول ۱-۱: مقایسه بین مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای و مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله

مبدل حرارتی پوسته و لوله	مبدل حرارتی صفحه‌ای واشردار	
امکان‌پذیر	غیرممکن	تقاطع دمایی
حدود 5°C	حدود 1°C	تفاوت دمایی ورودی و خروجی (دمای ابروج)
غیرممکن	امکان‌پذیر	انجام چند وظیفه
از چند جهت	از یک جهت	اتصالات لوله‌کشی
۱	حدود 3 تا 5	ضریب انتقال حرارت
حدود 3 تا 10	۱	نسبت وزنی کاری
زیاد	پایین	حجم سیال داخلی

نسبت فضایی	۱	حدود 2 تا 5
حساسیت به ارتعاشات	عدم حساسیت	حساس
واشرها	در هر صفحه وجود دارد	در هر درپوش وجود دارد
تشخیص نشتی	تشخیص آسان	تشخیص دشوار
امکان دسترسی جهت بازرسی	در هر طرف صفحه	محدود است
زمان دمونتاژ	حدود ۱۵ دقیقه	حدود ۶۰ تا ۹۰ دقیقه
تعمیرات	تعویض صفحات و واشرها آسان است	نیازمند انسداد لوله است، پس ظرفیت کاهش می‌یابد
اصلاح ظرفیت حرارتی	به راحتی با اضافه یا کم کردن صفحات انجام می‌شود	دشوار است
ضریب رسوب	حدود 0.1 تا 0.25	۱

با این همه مهمترین ایراد مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای این است که این نوع از مبدل‌ها فقط محدود به کاربردهایی می‌باشند که در آنها سیالات در شرایط فشاری و دمایی پایین قرار دارند؛ علت اصلی این محدودیت وجود واشرهاست، زیرا ماده تشکیل‌دهنده آنها قادر به تحمل دماها یا فشارهای بالا و همچنین خوردگی سیال نخواهند بود و بنابراین مشکلات نشتی ایجاد می‌شود. ضخامت نازک جنس صفحه نیز محدودیت‌هایی را برای فشارکاری اعمال می‌کند. در کاربردهای متداول، مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای واشردار استاندارد در فشارهای کاری حدود 25 bar استفاده می‌شوند، به کارگیری قاب‌های قوی‌تر، امکان ایجاد فشارهای بالاتر را فراهم می‌سازد؛ همچنین حد بالای دما در بیشتر کاربردهای مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای 160°C است، با وجود این واشرهای ساخته شده از موادی خاص، می‌توانند دماهایی تا حدود 400°C را تحمل کنند [۱۷ و ۱۸]. برای از میان بردن این محدودیت‌ها، انواع مختلفی از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای طراحی شده‌اند که در فصل بعدی تقدیم خواهد شد.

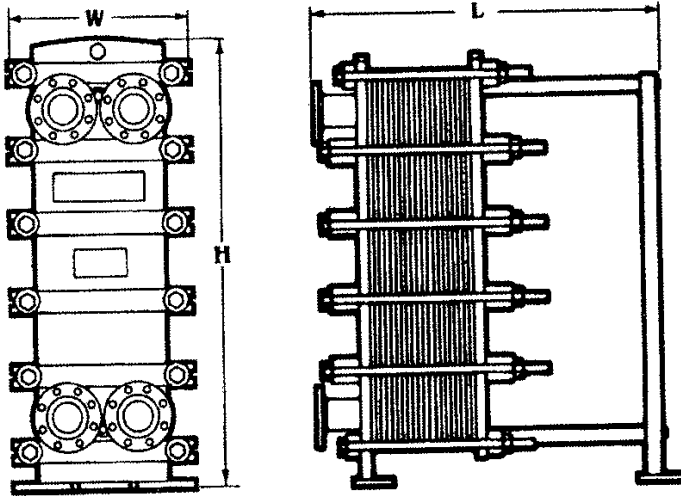
مراجع فصل ۱:

- [1] Walker, G., Industrial Heat Exchangers, 2nd edition, Hemisphere, New York, NY, 1990.
- [2] Sukhatme, S.P. and Devotta, S., Classification of Heat Transfer Equipment, in Heat Transfer Equipment Design, ed. R.k. Shah, E.C. Subbarao, and R.A. Mashelkar, Hemisphere, New York, NY, pp. 7-22, 1988.
- [3] Hewitt, G.F., Shires, G.L., and Bott, T.R., Process Heat Transfer, Begell CRC Press, Boca Raton, FL, 1994.
- [4] Shah, R.K. and Sekulic, D.P., Heat Exchangers, in handbook of Heat Transfer, 3rd edition, ed. W.M. Rohsenow, J.P. Hartnett, and Y.I. Cho, McGrawhill, New York, NY, chapter 17, 1998.
- [5] Kuppan, K., Heat Exchangers Design Handbook, Marcel Dekker, New York, NY, 2000.
- [6] Kakac, S. and Liu, H., Heat Exchangers: Selection, Rating and Thermal Design, 2nd edition, ed. W.M. Rohsenow, J.P. Hartnett, and Y.I. Cho,
- [7] Bergles, A.E., Techniques to Enhance Heat Transfer, in Handbook of Heat Transfer, 3rd edition, ed. W.M. Rohsenow, J.P. Hartnett, and Y.I. Cho, McGraw-Hill, New York, NY, chapter 11, 1998.
- [8] Manglik, R.M., Heat Transfer Enhancement, in Heat Transfer Handbook, ed. A. Bejan and A.D. Kraus, Wiley, New York, NY, chapter 11, 2002.
- [9] Kays, W.M. and London, A.L., Compact Heat Exchangers, 3rd edition, McGraw-Hill, New York, NY, 1984.
- [10] Shah, R.K., Kraus, A.D., and Metzger, D., Compact Heat Exchangers: A Festschrift for A. L. London, Hemisphere, New York, NY, 1990.
- [11] Shah, R.K., Classification of Heat Exchangers, in Heat Exchangers Thermo-Hydraulic Fundamentals and Design, ed. S. Kakac, A.E. Bergles, and F. Mayinger, Wiley, New York, 1981.
- [12] Magnusson, B. and Samuelson, B., The Story of the Alfa Laval Plate Heat Exchanger and the Spiral Heat Exchanger, Norstedts Tryckeri, Stockholm, 1985
- [13] Clark, D.F., Plate Heat Exchangers, The Chemical Engineer, no. 285, PP. 275-285, May 1974.
- [14] Magnusson, B., The Origins and Evolution of the Alfa Laval Plate Heat Exchanger, Norstedts Tryckeri, Stockholm, Sweden, 1985.
- [15] Marriot, J., Performance of an Alfaflex Plate Heat Exchanger, chemical Engineering Progress, Vol. 73, no. 2, PP. 73-78, 1973.
- [16] Moon, M.G., Invention Paves Way for Third Generation Heat Exchangers, Australian Refrigeration, Air Conditioning and Heating, Vol. 43, no. 9. PP. 21-25, 1989.
- [17] Wadekar, V.V., Improving Industrial Heat Transfer - Compact and Notso-Compact Heat Exchangers, Journal of Enhanced Heat Transfer, Vol. 5, PP. 53-69, 1998.
- [18] Manglik, R.M. and Muley, A., Heat Transfer and pressure Drop Characteristics of Plate-and-Frame Heat Exchangers: A Literature Review, Report No. TFL-Int-1, University of Cincinnati, Cincinnati, OH, 1993.



۲-۱- مبدل حرارتی واشربندی‌شده

با تکیه بر مطالبی که به صورت خلاصه در فصل قبل بیان شد، یک مبدل حرارتی صفحه‌ای اساساً مجموعه‌ای از صفحات فلزی پرس‌شده نازک و مستطیلی می‌باشد که میان واشرهای جانبی قرار گرفته و در یک قاب به یکدیگر متصل شده‌اند (شکل ۱-۵). قاب این نوع مبدل از یک صفحه ثابت انتهایی که مجاری اتصال به آن نصب شده‌اند و یک صفحه متحرک تشکیل شده است که صفحات میان این دو صفحه انتهایی توسط پیچ‌های فشاری به هم متصل شده و صفحات شیاردار اصلی مبدل نیز میان این دو صفحه قرار می‌گیرند. میله‌های حامل فوقانی و تحتانی مبدل امکان تنظیم صحیح مجموعه صفحات را فراهم می‌کنند. در شکل (۱-۲) نمای جانبی و جلویی مبدل‌هایی که کاملاً مونتاژ شده‌اند و همچنین مجاری ورودی و خروجی قرار گرفته در صفحه ثابت انتهایی برای هر دو جریان سیال، مشاهده می‌شود. این نوع ترکیب را آرایش U شکل می‌نامند که همراه آرایش Z شکل، در تصویر (۲-۲) نمایش داده شده‌اند.

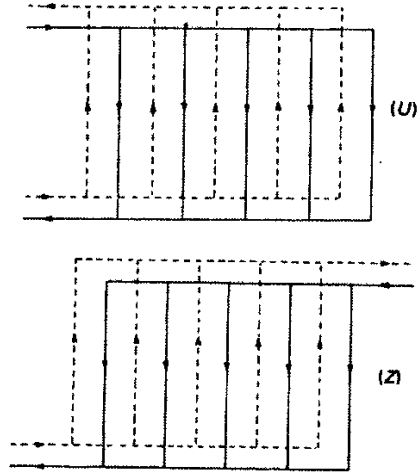


شکل ۱-۲: نماهای جلویی و جانبی یک مبدل حرارتی صفحه‌ای با آرایش جریان L شکل (از شرکت Tranter)

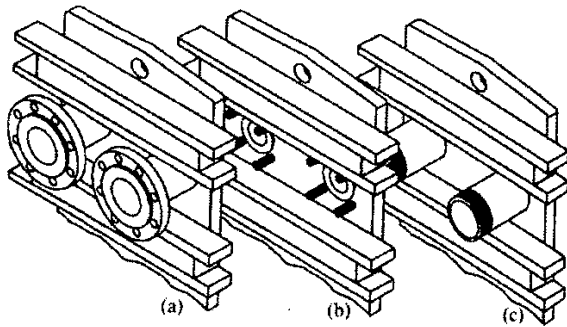
مجاری موجود در قاب‌های انتهایی، اتصالات متفاوت دارند؛ سه نازل بسیار رایج در شکل (۲-۳) نشان داده شده‌اند. مجاری خروجی و ورودی سیال در گوشه‌های صفحات شیاردار قرار دارند. واش‌های جانبی طوری هستند که فضای لازم را برای جریان یافتن سیالات سرد و گرم در کانال‌های متناوب ایجاد می‌کنند.

۲-۱-۱- الگوهای صفحات شیاردار

عملکرد حرارتی- هیدرولیکی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای به شکل چشمگیری به الگوی شیارهای سطح صفحات بستگی دارد.



شکل ۲-۲: آرایش‌های جریان نمونه برای دو سیال گرم و سرد در میبدل‌های حرارتی صفحه‌ای با اتصالات مجاری نوع U و Z



شکل ۲-۳: اتصالات متداول مجاری

(a) اتصالات فلانچ شده^۱ (استاندارد) (b) اتصالات ایجاد شده با پیچ‌های دو سر در فواصل معین^۲ (c) لوله‌های رزوه‌دار^۳

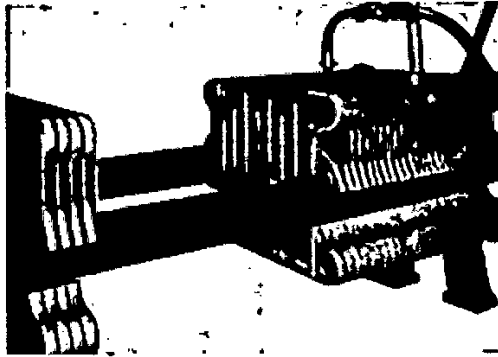
- 1 Flanged
- 2 Studded
- 3 Threaded Pipe

صفحه معمولاً یک ورق فلزی می‌باشد که شیارها یا موج‌های روی آن را می‌توان به روش‌های گوناگون به وجود آورد. گفتنی است که در یک طرف هر کدام از صفحات نقشدار، شیارهای خاصی برای واشرها وجود دارند که این شیارها در امتداد لبه‌های صفحه و اطراف مجاری مشاهده می‌شوند. به کمک این واشرها، صفحات آب‌بندی شده و همچنین ورودی‌های مننوب برای ورود و خروج سیال ایجاد خواهد شد. الگوهای سطح صفحات بسیار متنوع بوده که نمونه‌هایی از آنها در شکل ۱-۴ نشان داده شده است [۱ و ۲]. مبدل‌های موجود در بازار دارای صفحاتی با سطوح حرارتی متفاوت می‌باشند که کارایی حرارتی هیدرولیکی آنها متفاوت است. شیارهای تمامی صفحات مجاور در یک مبدل با هم مسیرهای جریان باریک و منقطعی تشکیل می‌دهند و این مسیرهای جریان میان صفحه‌ای به علت ویژگی‌های هندسی (برجستگی و فرورفتگی صفحه) سبب تلاطم جریان سیال و ایجاد توربولانس در آن می‌شوند، از این رو ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی یا همرفتی^۱ در آن افزایش و از سوی دیگر مقدار رسوب^۲ تشکیل شده در صفحه نیز کاهش می‌یابد. این شیارها گذشته از افزایش سطح مؤثر برای انتقال حرارت، صلبیت صفحه را نیز افزایش می‌دهد و همچنین نقاط اتصال متعدد فلز با فلز که میان صفحات مجاور به وجود می‌آید، سبب افزایش تکیه‌گاه مکانیکی برای مجموعه صفحات مبدل می‌شود.

هندسه جدید صفحات از دهه ۱۹۴۰ رایج شده است. صفحات انتقال حرارت اولیه بسیار متفاوت بودند، شکل‌های ۲-۴ و ۲-۵ دو الگوی صفحه را که در دهه ۱۹۳۰ متداول بوده‌اند، نشان می‌دهد [۳]. در دهه ۱۹۴۰، سازندگان بیشتری و همچنین صفحات با ابعاد و شکل‌های مختلف و خصوصیات منحصر به فرد، در بازار موجود بودند. در شکل ۲-۶ چهار صفحه ساخته شده توسط سازنده‌های متفاوت در دوره مذکور مشاهده می‌شود.

1 Convective Heat Transfer Coefficient

2 Fouling



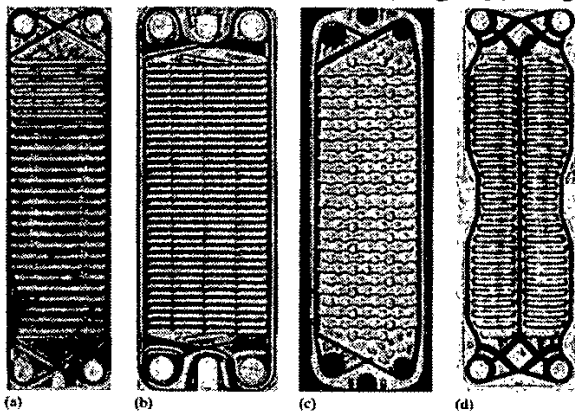
شکل ۲-۴: مبدل‌های حرارتی ساخت شرکت Vintage Paraflow با صفحه مفرغی (از شرکت APV)



شکل ۲-۵: صفحه استنلس استیل نوع Vintage P3 (از شرکت آلفالوال)

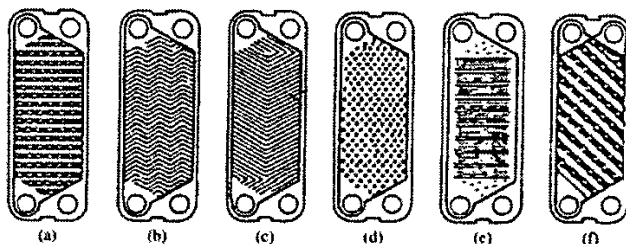
همان گونه توسط Shah و Focke اشاره شده است [۴]، افزون بر ۶۰ الگوی متفاوت شیار برای سطح صفحات در قرن گذشته در سراسر جهان به وجود آمده‌اند. نمایشی از انواع مختلف موج‌های صفحات که در کاربردهای امروزی استفاده می‌شوند، در شکل ۲-۷ نشان داده شده است. از این میان صفحات دارای الگوی شورون تقریباً متداول‌تر می‌باشند [۵ و ۲] و خصوصیات الگوی سطح این نوع از صفحات و کانال‌های جریان میان صفحه‌ای و دارای موج‌های عرضی این صفحات در شکل ۲-۸ نمایش داده شده است. این مسیرهای جریان با افزایش مساحت سطح مؤثر، منقطع کردن لایه‌های مرزی و

گسترش جریان‌های چرخشی، ضریب انتقال حرارت را افزایش می‌دهند.



شکل ۲-۶: صفحات دارای الگوهای شیار سطحی متفاوت که در دهه ۱۹۴۰ و توسط سازنده‌های مختلف ساخته شده‌اند:

APV HM (a), Alfa Laval P12 (b), Schimdt Sigma 20 (c), و Ahlborn (d)



شکل ۲-۷: انواع الگوهای شیار سطحی [۴]:

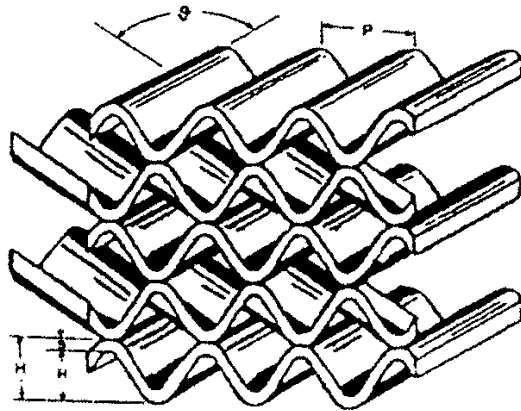
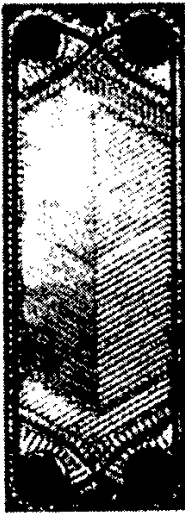
(a) الگوی واشبوردها، (b) الگوی جناغی^۱ یا زیگزآگ، (c) الگوی شورون^۲، (d) الگوی برآمدگی و فرورفتگی، (e) الگوی واشبوردها با شیارهای ثانویه و (f) الگوی واشبوردها مورب

همچنین افزایش جریان‌های گردابه‌ای و اختلاط سیال، مقاومت رسوب در مبدل را کاهش می‌دهد، اگر چه این امر خود سبب افزایش افت فشار مبدل نیز می‌شود.

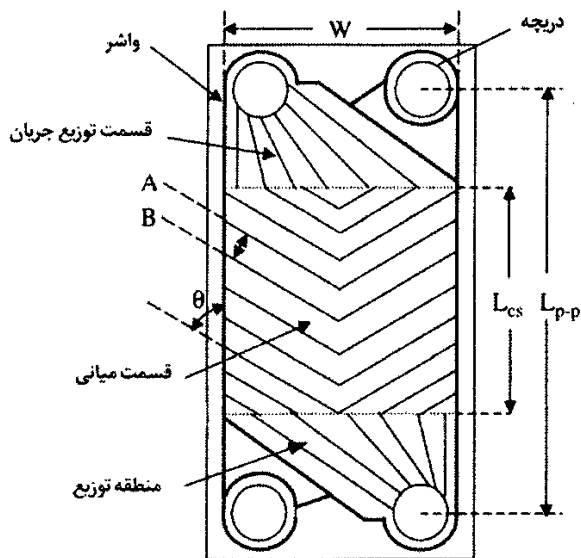
- 1 Washboard
- 2 Herring Bone
- 3 Chevron

۲-۱-۲- مشخصات هندسی صفحات با الگوی شورون

در دهه گذشته کاربرد صفحات با الگوی شورون از گسترش قابل ملاحظه‌ای برخوردار بوده است [۱-۲ و ۵] و تقریباً می‌توان این نوع الگوی صفحه را به عنوان موفق‌ترین طراحی ارایه شده از سوی سازندگان، بیان کرد [۸ تا ۱۲]. جزئیات ابعاد هندسی مهم الگوی شورون در شکل (۲-۹) مشاهده می‌شود. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، سطح صفحه به دو ناحیه بالایی و پایینی توزیع کننده جریان و بخش مرکزی انتقال حرارت (LCS) تقسیم می‌شوند. دو منطقه توزیع برای پخش جریان سیال از مجرای ورودی به سمت ناحیه مرکزی و سپس جمع‌آوری و هدایت آن به طرف مجرای خروجی، طراحی شده‌اند. این دو ناحیه توزیع به گونه‌ای طراحی می‌شوند که آثار توزیع نامناسب جریان در ناحیه مرکزی انتقال حرارت به کمترین اندازه می‌رسد و از این رو کارایی حرارتی و هیدرولیکی کاهش نمی‌یابد، اما هر دو نواحی مرکزی و توزیع کننده جریان، سطوح فعال انتقال حرارت^۱ هستند.



شکل ۲-۸: صفحه مبدل با الگوی شیار شورون و کانال‌های داخل صفحه‌ای متناظر [۶]



شکل ۲-۹: مشخصات هندسی موج‌های سطح صفحه در الگوی شورون

۲-۲- تکامل مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای

با آغاز کاربرد تجاری مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای معمولی در دهه ۱۹۲۰ که بیشتر در صنایع لبنی استفاده می‌شد، روند رشد و تکامل این مبدل‌ها در مدل‌های مختلف آغاز شد. اگرچه برخی از این اصلاحات در پرتو استراتژی‌های جدید برای ساختن تجهیزات فشرده‌تر انجام شده‌اند، اما بقیه آنها برای از میان بردن مشکلات گفته شده در فصل قبل و گسترش کاربردهای مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای اختصاص یافته‌اند. این‌گونه از روند توسعه و تکامل به صورت تغییر در ساختار داخلی مبدل حرارتی صفحه‌ای یا به صورت تغییرات در الگوهای سطح صفحات بوده است. تغییرات ساختاری که طی چند دهه اخیر روی این مبدل‌ها انجام شده به ساخت مبدل‌های جدید انجامیده که می‌توان به مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای از نوع لحیم شده^۱، نیمه جوش کاری شده^۲، کاملاً

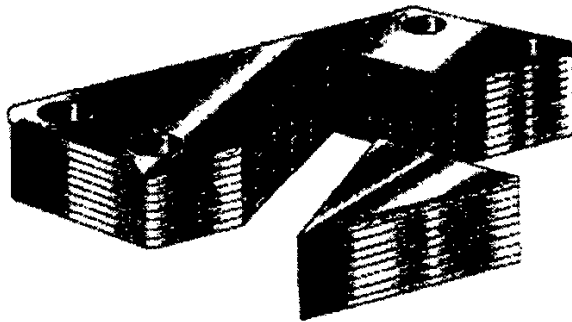
1 Brazed

2 Semi - welded

جوشکاری شده^۱، دارای شکاف عریض^۲ و دو دیواره‌ای^۳ اشاره نمود که در همه آنها واشربندی حذف شده است.

۲-۲-۱- مبدل حرارتی صفحه‌ای لحیم شده (BPHE)

مبدل حرارتی صفحه‌ای لحیم شده، چنانکه به صورت شماتیک در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است، از تعدادی صفحه با جنس استنلس استیل تشکیل شده که با استفاده از مس به عنوان ماده لحیم به یکدیگر لحیم می‌شوند تا بدین طریق یک مجموعه واحد ساخته شود. با وجود لحیم‌کاری نیازی به استفاده از قاب یا واشر نیست، بنابراین یک مبدل صفحه‌ای، بسیار فشرده می‌باشد. همچنین، می‌توان به جای مس، که استفاده از آن سبب ایجاد مشکل سازگاری با سیال فرآیند (مثلاً آمونیاک^۴) می‌شود، نیکل یا ماده لحیم دیگری را به کار برد.



شکل ۲-۱۰: مبدل حرارتی صفحه‌ای لحیم شده (از شرکت آلفا لاوال)

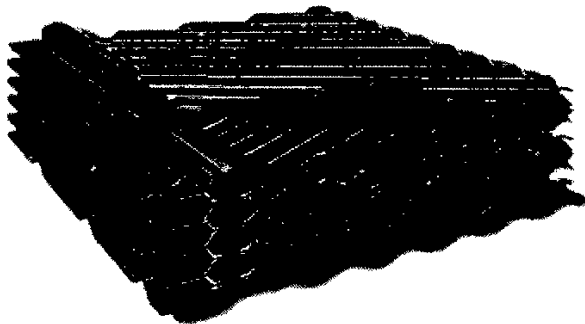
به دلیل اینکه صفحات به یکدیگر لحیم می‌شوند و هیچ‌گونه قاب و واشری وجود ندارد، مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای لحیم شده قادر به تحمل فشار و دماهای بالاتری نسبت به مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای قابدار هستند، برای نمونه در موقعیت‌هایی تا فشار

-
- 1 Welded
 - 2 Wide gap
 - 3 Double wall
 - 4 Ammonia

حدود 30 bar و تا دمای حدود 400°C می‌توان از این نوع مبدل صفحه‌ای استفاده کرد. همچنین این گونه از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای به دلیل نداشتن قاب از وزن کمتری برخوردار می‌باشند. اما طول مبدل معمولاً به علت محدودیت‌های اندازه کوره لحیم‌کاری کمتر از 1 m است، زیرا ظرفیت آنها محدود به یک مبدل حرارتی صفحه‌ای لحیم شده می‌باشد. از این نوع مبدل‌ها می‌توان در سیستم‌های سرمایش و گرمایش (محسوس یا با تغییر فاز) در صنایع فرآیندی، تبخیر و کندانس در سیستم‌های تبرید و در تأسیسات HVAC استفاده کرد.

۲-۲-۲- مبدل حرارتی صفحه‌ای نیمه جوشکاری شده

با جوشکاری صفحات مبدل حرارتی به صورت جفت، برای ساخت صفحات موسوم به صفحات دوقلو، می‌توان یک مبدل حرارتی صفحه‌ای نیمه جوشکاری شده ساخت. به مونتاژ این صفحات دو قلو در یک مجموعه صفحه و قاب همراه با واشرهایی که تنها در کانال‌های صفحه بوده و جریان سیال فرعی را کنترل می‌کنند، می‌توان این گونه مبدل‌ها را ساخت. (شکل ۲-۱۱)



شکل ۲-۱۱: مبدل حرارتی صفحه‌ای نیمه جوش کاری شده (از شرکت آلفا لاوال)

این طراحی بویژه برای کنترل و هدایت سیالاتی که نسبتاً خورنده هستند، مناسب است که در این نوع مبدل‌ها ماده خورنده مذکور در کانال‌های صفحات دوقلو که به یکدیگر جوش شده‌اند، جریان می‌یابد. تنها واشرهای در تماس با این ماده، دو واشر دایروی دریچه‌ای هستند که بین جفت صفحات جوشکاری شده قرار گرفته و بیشتر از گونه‌ای الاستومرهای با مقاومت بالا و مواد غیرالاستومری تشکیل شده‌اند. کانال‌های

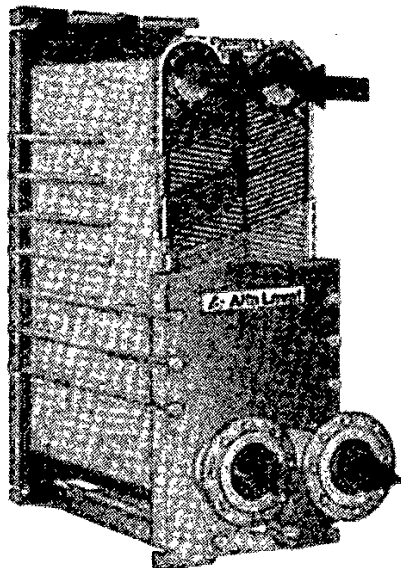
دربرگیرنده جریان‌های سیال گرم کننده یا سردکننده غیر خورنده و غیرمتلاطم ثانویه به صورت سنتی به وسیله واشرهای الاستومری آب‌بندی می‌شوند.

مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای نیمه جوشکاری شده توان مقاومت در برابر فشارهای حدود 30 bar را که به سوی صفحه دوقلوی جوش شده اعمال می‌شود، دارا می‌باشند. با این همه در این صورت نیز نیاز به قاب‌هایی برای نگه داشتن مجموعه صفحات می‌باشد. از جمله کاربردهای فشار بالاتر که از این نوع مبدل‌ها استفاده می‌شود، می‌توان به تبخیر و کندانس در سرماسازی و سیستم‌های تهویه مطبوع اشاره کرد.

۲-۲-۳- مبدل حرارتی صفحه‌ای کاملاً جوشکاری شده

مبدل حرارتی صفحه‌ای کاملاً جوشکاری شده نشان داده شده در شکل ۲-۱۲ از نوع بدون واشر است، که در آن یک مجموعه صفحه کاملاً جوشکاری شده میان دو صفحه انتهایی در یک قاب معمولی پیچ شده است. با اتصال صفحات در لبه‌ها و حذف واشرها، انسجام سازه‌ای مجموعه صفحات و همچنین دمای کاری و محدودیت‌های فشار مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. از جوش لیزر در دو بعد در امتداد لبه‌های صفحات استفاده می‌شود و به این ترتیب می‌توان هنگام تغییرات دما و فشار مجموعه صفحه را در جهت طولش گسترش یا کاهش داد و در نتیجه مقاومت خستگی مجموعه افزایش خواهد یافت؛ همچنین این نوع از مبدل‌ها برای کاربردهایی که در آنها انتقال حرارت یا فرآیندهای گرمایی تحت تأثیر تغییرات سریع دمایی و فشاری قرار می‌گیرند، بسیار مناسب هستند. اما، مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای کاملاً جوشکاری شده برخلاف مدل‌های نیمه جوشکاری شده و واشردار، از قابلیت انعطاف‌پذیری و کاهش یا افزایش مساحت سطح توسط اضافه یا کم کردن صفحات برخوردار نیستند که در این صورت نمی‌توان در حالتی که بار حرارتی تغییر می‌کند از آنها استفاده کرد. همچنین، نمی‌توان آنها را به آسانی با روش مکانیکی تمیز کرد و برای این منظور تنها می‌توان روش‌های شیمیایی را به کار برد. مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای کاملاً جوشکاری شده برای فرآیندهای گرمایی که دارای بار حرارتی بسیاری می‌باشند، مناسب هستند که معمولاً شامل کنترل سیالات دارای خورندگی زیاد یا متلاطم می‌باشند. آنها دارای توانایی مقاومت در برابر دماهای حدود 350°C و فشارهای حدود

40 bar هستند. از جمله کاربردهای این نمونه می‌توان به مبدل‌های مورد استفاده برای سوپرهیت کردن در سیستم‌های بازیافت حرارتی، مبدل‌های تبرید و گرم کننده‌های مواد شیمیایی آلی مانند حلال‌ها، روغن گیاهی، بخار و راکتورهای دسته‌ای^۱ اشاره کرد.



شکل ۲-۱۲: مقطع یک مبدل صفحه‌ای کاملاً جوش شده (از شرکت آلفالاوال)

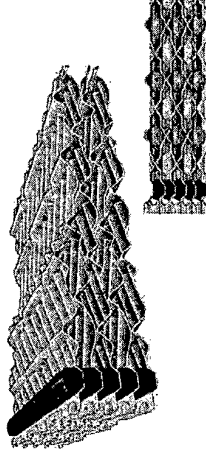
۲-۲-۴- مبدل حرارتی صفحه‌ای دارای شکاف عریض

مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای که دارای مجموعه صفحات شکاف عریض^۲ می‌باشند (شکل ۲-۱۳)، دارای کانال‌های بزرگتر با سطح جریان آزاد هستند که برای کنترل سیالات حاوی الیاف یا ذرات درشت و سیالات با ویسکوزیته بالا استفاده می‌شود. این در حالی است که در مبدل‌های معمولی صفحه‌ای وجود این گونه سیالات سبب بسته شدن کانال‌های مبدل می‌شود و این سیالات بخوبی هدایت نخواهند شد. موج‌های سطح صفحات و واشرها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که در کانال‌های داخل صفحه‌ای، مقطع

1 Batch reactors

2 wide-gap

عرضی جریان دارای بیشترین شکاف حدود 16 mm باشد، اما همچنان موج‌های صفحه‌سبب بزرگ شدن سطح مؤثر و ایجاد جریان گردابه‌ای می‌شوند که در این صورت ضرایب انتقال حرارت بزرگ خواهند شد و عرضی‌تر شدن شکاف جریان، اکت فشار را کاهش نمی‌دهد. از جمله کاربردهای این نوع از مبدل‌ها می‌توان به گرم کردن شیر خام، آهک‌دار و مخلوط در کارخانه شکرسازی، سرد کردن و سفید کردن، رنگ‌زدایی از خمیر کاغذ و کاغذ در کارخانه‌های کاغذسازی و بهداشتی کردن محصولات غذایی فیبری اشاره کرد.



شکل ۲-۱۳: مقطع مجاری داخل صفحه‌ای در یک مبدل حرارتی صفحه‌ای با شکاف عرضی (از شرکت آفالرال)

۲-۵-۲- مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای دو جداره‌ای

هدف از طراحی مبدل حرارتی صفحه‌ای دو جداره استفاده از آن برای مواد واکنش‌پذیر می‌باشد تا از آلودگی محصول میان دو جریان سیال جلوگیری کند. دو صفحه که توسط واشرهای مرسوم آب‌بندی شده‌اند، جایگزین تک صفحه‌ای می‌شود که به صورت معمول دو جریان سیال را از یکدیگر جدا می‌کند. در حالتی که سیال مورد نظر با سطح صفحات دو جداره واکنش نشان دهد و آنها را دچار خوردگی کند، نشتی به سوی مسیرهای میان دو صفحه هدایت می‌شود (شکل ۲-۱۴). در این صورت امکان

آلودگی میان سیالی بسیار کم می‌شود و می‌توان نشتی را بسادگی خارج از مبدل حرارتی مشاهده کرد. متداول‌ترین کاربردهای این گونه از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای شامل سرمایش و گرمایش آب آشامیدنی، مواد دارویی، روغن روان‌کاری و روغن مبدل می‌باشد.

۲-۲-۶- مبدل حرارتی صفحه‌ای گرافیت دیابون

مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای نوع گرافیت دیابون^۱ از صفحات گرافیتی استفاده می‌کنند. چنانکه در شکل ۲-۱۵ نشان داده شده است، این نوع از مبدل‌ها برای گرمایش موادی مناسب هستند که در حالت عادی برای صفحات از جنس فلزات نادر و آلیاژها بسیار خورنده می‌باشند.

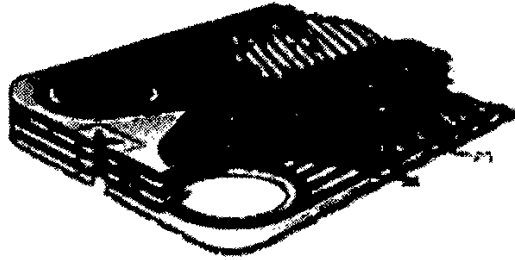
دیابون F100 یا گرافیت NSI، یک ماده کامپوزیت ساخته شده از گرافیت و فلوروپلاستیک^۲ می‌باشد. این ماده به شکل صفحات شیاردار در می‌آید و این صفحات در میان واشرهای مقاوم به خوردگی تخت و نازک نصب می‌شوند. همچنین مقاوم بودن در برابر خوردگی و قابلیت تحمل دماهای بالا سبب شده است که صفحات گرافیتی از مشخصات انتقال حرارت خوبی در کنار انبساط حرارتی کم و امکان کار در شرایط فشار بالا، برخوردار باشند.

از جمله کاربردهای متداول مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای با صفحات گرافیتی می‌توان به گرمایش حمام‌های اسیدشویی، شکل‌دهی سطح (روکش‌کاری) فلزات، تولید اسید هیدروکلریک^۳ و بازیافت گرمای هدر شده گاز سوخته اشاره کرد.

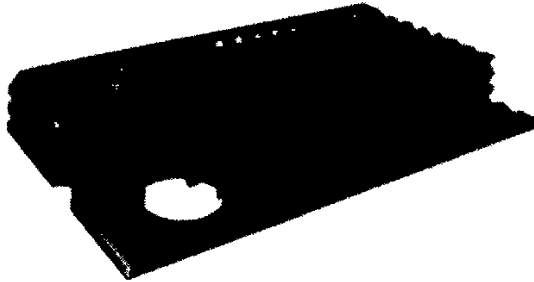
1 Diabon Graphite

2 Fluoroplastics

3 Hydrochloric Acid



شکل ۲-۱۴: سطح مقطع مجموعه صفحات دو جداره (از شرکت آلفالاوال)



شکل ۲-۱۵: سطح مقطع یک مبدل حرارتی صفحه‌ای گرافیت Diabon F100 (از شرکت آلفالاوال)

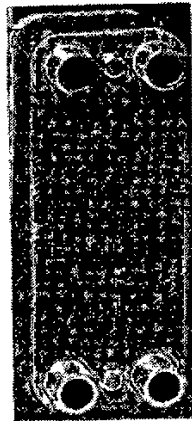
۲-۲-۷- مبدل حرارتی صفحه‌ای مینکس^۱

این مبدل نشان داده شده در شکل ۲-۱۶، در واقع طرح کوچک‌سازی شده مبدل حرارتی صفحه‌ای معمولی است. قاب‌های انتهایی و میله‌های حامل یا هادی حذف شده‌اند و پیچ‌های کششی در ابعاد خارجی صفحات انتقال حرارت قرار گرفته‌اند. این ترکیب این امکان را فراهم می‌سازد که گذشته از یک طراحی فشرده، از گزینه‌های انعطاف‌پذیری مبدل حرارتی صفحه‌ای مانند تمیز کردن دستی و آسانی افزایش یا کاهش تعداد صفحات نیز بهره برد.

اما با توجه به اینکه پیچ‌های کششی فقط برای نگه داشتن مجموعه صفحه‌ها و اشردار

به کار می‌روند، مبدل حرارتی صفحه‌ای نوع مینکس که فشرده و کوچک است فقط در وظایف حرارتی که ظرفیت مورد نیاز خیلی کم است، استفاده می‌شود. این گونه از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای کاربرد عمومی دارد و در مواردی با بار حرارتی ثابت (مثلاً در گرم کردن آب بهداشتی) مناسب هستند و جایگزین خوبی برای مبدل‌های بزرگ می‌باشند.

در بازار انواع مختلفی از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای و نمونه‌های اصلاح شده آنها وجود دارد که موارد فوق از جمله موارد بسیار مشهور می‌باشند. با اینکه در این مدل‌های جدید بسیاری از ایرادهای مبدل‌های رایج حذف شده است، اما انواع بدون واشر امتیاز تمیزکاری راحت یا انعطاف‌پذیر بودن در تنظیم یا تغییر سطح انتقال حرارت را از دست می‌دهند. با این وجود این مبدل‌ها با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته بشدت در صنعت مدرن گسترش یافته‌اند، اما در کنار آن هزینه‌هایی را نیز به مصرف کننده تحمیل می‌کنند.



شکل ۲-۱۶: مبدل حرارتی صفحه‌ای مینکس

۲-۳- راه‌اندازی و انتخاب مبدل حرارتی صفحه‌ای

شیوه راه‌اندازی یک مبدل حرارتی صفحه‌ای تفاوت زیادی با دیگر مبدل‌ها ندارد. هر دو حالت گذار و پایدار به اندازه، حجم نگهداری و شرایط کاری بستگی دارند (دبی‌ها و

تفاوت دمای به هم رسیدن (اپروچ) دو جریان سیال). اساساً یک مبدل یک‌گذر، مبدلی با جریان معکوس است که افزون بر فشرده بودن نسبی و بالا بودن خصوصیات جابه‌جایی، امکان کار در دمای به هم رسیدن (اپروچ) بسیار کوچک را دارد. مبدل حرارتی صفحه‌ای بویژه برای سیالاتی مناسب است که به دما حساس بوده یا تحت شرایط افت حرارتی قرار می‌گیرند. اگرچه این نوع از مبدل‌ها با توجه به عملکرد بهترشان و فشرده‌تر بودن نسبت به مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله، جایگزین خوبی برای مبدل‌های قدیمی هستند، ولی فقط در بازده دمایی تقریبی (160°C - 250°C) و فشار تقریبی (25 bar-30 bar) به کار گرفته می‌شوند [۱۳ تا ۱۵]. همچنین، نگهداری واکثر در شیارهای آن و تغییر شکل صفحات، حاصل از فشارهای بالای جریان‌های سیال نیز در انتخاب مبدل باید در نظر گرفته شود. عوامل دیگری نیز وجود دارند که بر شرایط کاری تأثیر گذاشته و در انتخاب مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای باید به آنها توجه کرد که برای نمونه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- کانال‌های سیال داخل صفحه‌ای پیچیده معمولاً سرعت‌های برشی بزرگ را ایجاد می‌کنند و از این رو سیالات حساس به برش ممکن است دچار افت شوند.
 - ۲- امکان توزیع نامناسب جریان در حالت وجود سیالات با ویسکوزیته بالا یا دبی‌های پایین جریان وجود دارد.
 - ۳- تولید و ساخت صفحات مبدل نیز می‌تواند محدودیت‌هایی را از نظر سایز صفحه ایجاد کند (براساس تناژ پرس‌های ایجاد کننده موج روی سطح صفحات)، بویژه در کاربردهایی که نیاز به دبی‌های بسیار بالا داریم (معمولاً در صنعت فرآیند) که معمولاً با افزایش افت فشار مواجه است.
 - ۴- افت فشار بالا همچنین سبب می‌شود که این نوع از مبدل‌ها برای سرمایش هوا، مبدل حرارتی گاز به گاز و کاربردهای تقطیر در فشار کاری کم مناسب نباشند.
- البته، بدون توجه به این عوامل و همان‌طور که در فصل ۱ اشاره شد، مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای گزینه مناسبی نسبت به انواع دیگر مبدل‌ها می‌باشند؛ ساختار فشرده‌ی آنها، آسان بودن تمیزکاری (بویژه در مکان‌هایی که به شرایط بهداشتی بالایی

نیاز است)، جریان سیال کاملاً مخالف جهت معکوس، و عملکرد حرارتی بهتر این نوع از مبدل‌ها.

به دلیل اینکه انواع مختلفی از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای و همچنین سازنده‌های بی‌شمار وجود دارند، خلاصه کردن دقیق محدودیت‌های کاری مشکل است. در اینجا هدف ارایه یک مرور کلی می‌باشد، بنابراین خلاصه‌ای از دامنه‌های کاری نمونه برای مبدل‌های صفحه‌ای قابداری و لحیم‌شده در جدول ۲،۱ داده شده است. این اطلاعات بر اساس فهرست محصول شرکت‌های سازنده آلفا لاول^۱ [۸]، SWEP [۹]، Tranter [۱۰] و APV [۱۱] می‌باشند، اما این به معنی تأیید این سازنده‌ها نیست و تجهیزات دیگری با عملکرد، قابلیت اعتماد و قدرت رقابت اقتصادی مشابه نیز وجود دارند.

همچنین، براساس اطلاعات داده شده توسط یک سازنده (آلفا لاول)، راهنمای کلی برای انتخاب انواع مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای و مناسب بودن آنها برای شرایط مختلف کاری، در جدول ۲-۲ ارایه شده است. گفتنی است که جدول ۲-۲ فقط یک فهرست نمونه می‌باشد و صرفاً اطلاعات یک سازنده می‌باشد و به معنی تأیید کامل آنها نیست.

جدول ۲-۱: دامنه فعالیت مبدل حرارتی صفحه‌ای واشردار و لحیم شده

مبدل‌های صفحه‌ای واشردار	مبدل‌های صفحه‌ای لحیم شده	
25 bar (30 bar در صورت داشتن ساختار خاص)	30 bar	حداکثر فشار کاری
160°C (200°C در صورت داشتن واشره‌ای خاص)	225°C (حداقل در حدود 195°C)	حداکثر دمای کاری
3600 m ³ /hr	140 m ³ /hr	حداکثر دبی
تا 7500 W/m ² .K	تا 7500 W/m ² .K	ضریب انتقال حرارت

0.1 – 2200 m ²	0.02 – 60 m ²	سطح انتقال حرارت
450 mm	100 mm	حداکثر اندازه اتصال
تا 1°C	تا 1°C	اختلاف دمای به هم رسیدن (اپروچ)
93 درصد	93 درصد	بازیافت حرارت
0.3 – 0.6	0.3 – 0.6	NTU
100 kPa به ازای هر متر طول کانال	100 kPa به ازای هر متر طول کانال	افت فشار
تا 700		تعداد صفحات
در حدود 435 mm		اندازه پورت (مجرای ورودی و خروجی)
0.4 – 1.2 mm		ضخامت صفحه
0.3 – 3.5 m		اندازه صفحه
1.5 – 5.4 mm		فاصله صفحه
1.5 – 5.4 mm		عمق شیار

جدول ۲-۴: راهنمای کلی برای انتخاب انواع مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای برای شرایط کاری و خدماتی مختلف

مبدل واش‌رندی شده	مبدل لحیم‌شده	مبدل نیمه جوشکاری‌شده	مبدل کاملاً جوشکاری‌شده	مبدل شکاف عریض	مبدل دوچاره	گرافیت دیابون	
							شرایط کاری
2.5	3.0	2.5	4.0	0.9	2.5	0.6	فشار
30-200	195- 225	30-200	200-350	30-200	30-200	0-140	دما
							نوع کاربری
E	E	E	E	E	E	E	مایع-مایع
G-P ^a	E	E-P	E-P	G-P	G-P	E-P	گاز- مایع
M-P	G-P	G-P	G-P	M-P	M-P	E-M	گاز- گاز
G-P	E	E-M	E-M	E-M	E-M	E-M	چگالی
G-P	E	E-M	E-M	E-M	E-M	E-M	تبخیر
							ماهیت یا نوع سیال
M-P	M-P	E	E	M	M	E	خورنده
E	M-P	E	G-M	E	E	M	لزوج
E	E	E	E	E	E	E	حساس به حرارت
M-P	M	G	G	M-P	E	G-M	قدرت واکنش شدید
P	P	P	P	E	P	P	فیبری
M-P	P	M	M	G	M	M	دوغایی
G-M	M	M	M	G	M	M	رسوبی
							انعطاف در نگهداری
B	N	O	N	B	B	B	تمیز کاری مکانیک
B	N	O	N	B	B	B	تمعیر
B	N	O	N	B	B	B	اصلاحات

نکته‌ها:

O = یک طرف صفحه. B = دو طرف صفحه. P = ضعیف. M = متوسط. G = خوب. E = عالی.

N = هیچ کدام از طرفین صفحه

a به فشار کار و چگالی گاز و بخار بستگی دارد.

مراجع فصل ۲:

- [1] Manglik, R.M. and Muley, A., Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Plate-and-Frame Heat Exchangers: A Literature Review, Report No. TFL-Int-1, University of Cincinnati, Cincinnati, OH, September 1993.
- [2] Manglik, R.M., Plate Heat Exchanger for Process Industry Applications: Enhanced Thermal-Hydraulic Characteristics of Chevron Plates, in Process, Enhanced and Multiphase Heat Transfer, ed. R.M. Manglik and A.D. Kraus, Begell House, New York, NY, PP. 267-276, 1996.
- [3] Clark, D.F., Plate Heat Exchanger Design and Development, The Chemical Engineer, no. 285, PP. 275-279, May 1974.
- [4] Shah, R.k. and Focke, W.W., Plate Heat Exchangers and Their Design Theory, in Heat Transfer Equipment Design, ed. R.K. Shah, E.C. Subbarao, and R.M. Mashelkar, Hemisphere, Washington, DC, PP. 913-932, 1983.
- [5] Martin, H.A., Theoretical Approach to predict The Performance of Chevrontype Plare Heat Exchangers, Chemical Engineering and Processing, Vol. 35, PP.301-310. 1996.
- [6] Ciofalo, M., Stasiek, J., and Collins, M.W., Investigation of Flow and Heat transfer Corrugated Passages – II, Numerical Simulations, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 39, no. 1, PP. 165-192, 1996.
- [7] Muley, A., Manglik, R.M., and Metwally, H.M., Enhanced Heat transfer Characteristics of Viscous Liquid Low Reynolds Number Flows in a Chevron Plate Heat Exchanger, Journal of Heat Transfer, vol. 121, no. 4, PP. 1011-1017, 1999.
- [8] Alfa laval , Product Catalogue, Sweden (<http://www.alfalaval.com>).
- [9] SWEP International, Product Catalouge, Sweden (<http://www.sweppe.com>).
- [10] Tranter Inc., Product Catalouge, USA (<http://www.tranterphe.com>).
- [11] APV, Product Catalouge, UK (<http://www.apv.com>).
- [12] GAE Ahlborn, Product Catalogue, Epsom, Surrey, UK.
- [13] Kakac, S. and Liu, H., Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design, 2nd edition, CRC Press, Boca raton, FL, 2002.
- [14] Cooper, A. and Usher, J.D., Plate Heat Exchangers, in Heat Exchanger Design Handbook, ed. E.U. Schlunder, Hemisphere, Washington, DC, chapter 3, 1988.
- [15] Gupta, J.P., Fundamentals of Heat Exchanger and Pressure Vessel Technology, Hemisphere, Washington, DC, 1986.



TGT Co.

فصل ۳

کاربردهای صنعتی

همانطور که پیشتر گفته شد، از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، در آغاز فقط در صنایع لبنی برای پاستوریزه کردن استفاده می‌شد، در حالی که امروزه این گونه از مبدل‌ها در صنایع و فرآیندهای مختلفی به کار گرفته می‌شوند. بخش بزرگی از افزایش کاربرد مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای به دلیل اهمیت صرفه‌جویی در مصرف انرژی در سال‌های پایانی قرن بیستم روی داد، بدین منظور استفاده از مبدل‌های حرارتی بسیار کوچکتر، مدنظر قرار گرفت [۱-۳]. مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای افزون بر فشردگی و عملکرد حرارتی- هیدرولیکی مناسبتر نسبت به انواع دیگر مبدل‌ها، از انعطاف‌پذیری مطلوبی در سایز حرارتی^۱ (به آسانی می‌توان صفحات مبدل را اضافه یا کم کرد) برخوردار هستند. دامنه گسترده کاربرد این نوع از مبدل‌های حرارتی امروزه سرمایه‌ش و تهویه مطبوع، صنایع نیروگاهی، زبردربایی‌ها، کاغذسازی، صنایع غذایی و سیستم‌های پالایشگاهی و پتروشیمی را در برمی‌گیرد. در این فصل، ابتدا کاربرد اولیه مبدل‌های حرارتی در صنایع لبنی بررسی خواهد شد.

۳-۱- صنایع غذایی

صنایع غذایی بخش‌های مختلفی دارد که از جمله می‌توان به فرآورده‌های لبنی (برای نمونه شیر، ماست، خامه و بستنی)، محصولات تخمیری و آبجوسازی (به عنوان

مثال مخمر آبجو، آبجو، شراب و الکل)، نوشیدنی‌ها (برای نمونه آمبیوه، نوشیدنی‌های گازی، چای و قهوه) و میوه‌ها و سبزیجات عمل‌آور شده، اشاره کرد یکی از مهمترین فرآیندها، پاستوریزه کردن است. اصطلاح پاستوریزه از اسم کاشف این روش، لوئییز پاستور^۱، دانشمند فرانسوی، گرفته شده است. او دریافت ترکیبات فاسد و میکروشراب‌ها با حرارت دادن تا دمای زیر نقطه جوش غیرفعال می‌شوند و همین شیوه را در مورد شیر نیز به کار برد.

پاستوریزه کردن یعنی گرمایش سیال تا یک دمای مشخص برای یک مدت زمان خاص و جلوگیری از آلودگی مجدد آن در طول فرآیند گرم کردن. کنترل این روند در بازده پاستوریزه کردن (حفظ بهداشت عمومی محصول) و کیفیت محصول نهایی (مزه، بو، ظاهر و سایر ویژگی‌ها) از اهمیت چشمگیری برخوردار می‌باشد. غیرفعال کردن میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا به دما و زمان نگهداری در این دما بستگی دارد که این دو پارامتر باید به دقت تنظیم شوند. برای نمونه شیر را باید به دمای 72°C برسانیم و مدت زمانی که در این دما نگه داشته می‌شود کمتر از شانزده ثانیه نباشد. پاستوریزه کردن مداوم^۲ تقریباً شایعترین روش است که در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای از آن به شکلی گسترده استفاده می‌شود.

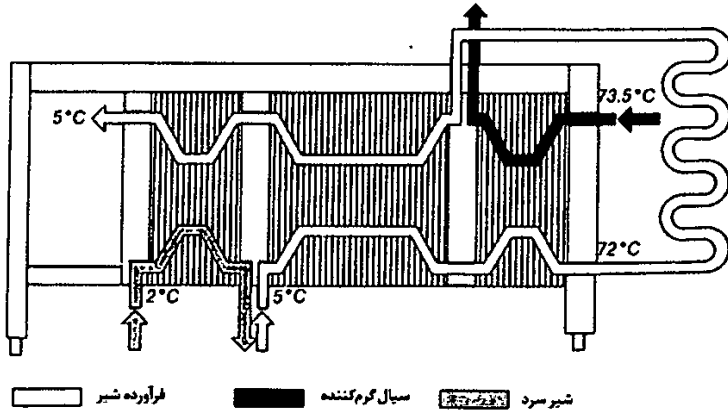
در شکل ۳-۱ آرایش جریان سیالات نشان داده شده که در آن یک مبدل حرارتی صفحه‌ای سه قسمتی بزرگ با قاب‌های تقسیم‌کننده استفاده شده است. شیر سرد خام در دمای حدود 5°C از یک مخزن با سطح ثابت (در شکل نشان داده نشده است) به قسمت احیاکننده^۳ مبدل (بخش میانی) منتقل می‌شود. در این مرحله به کمک تبادل حرارت با جریان شیر پاستوریزه شده گرم در کانال‌های مجاور به دمای $57-68^{\circ}\text{C}$ می‌رسد، سپس شیر گرم خام در قسمت راست مبدل به صورت پیوسته به دمای حداقل 72°C توسط بخار خلأ یا آب گرم، داغ خواهد شد. شیر در دمای پاستوریزه شدن و تحت فشار به سمت لوله‌ای هدایت می‌شود که قرار است در آن حداقل به مدت زمان شانزده ثانیه نگهداری شود. پس از آن، شیری که کاملاً پاستوریزه شده به قسمت

1 Louis Pasteur

2 Continuous PastORIZATION

3 Regenerative Part

احیاکننده (بخش میانی) جریان می‌یابد و در این مرحله حرارت از آن به شیر خام ورودی منتقل می‌شود و در نتیجه تقریباً تا دمای $32-9^{\circ}\text{C}$ سرد خواهد شد و در نهایت به بخش سردکننده‌ی مبدل (قسمت چپ) رفته که در این مرحله تا دمای 5°C یا کمتر به کمک آب خنک سرد می‌شود و سپس برای بسته‌بندی آماده می‌شود.



شکل ۳-۱: آرایش جریان در یک مبدل صفحه‌ای چند راهه برای پاستوریزه کردن شیر

به دلایل بسیاری مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای به صورت گسترده در گذشته و امروزه برای پاستوریزه کردن شیر استفاده می‌شود که از آن میان به دو مورد بسیار مهم اشاره می‌شود:

مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای به آسانی باز و بسته‌سازی کاملاً تمیز می‌شوند و با توجه به جنس صفحات که استنلس استیل با کیفیت بالا می‌باشند، می‌توان شرایط بهداشتی بسیار مناسبی را فراهم آورد.

ضرایب انتقال حرارت بزرگ که به وسیله‌ی کانال‌های داخل صفحه‌ای موجدار ایجاد می‌شوند، باعث خواهند شد که اختلاف دمای به هم رسیدن بسیار کم (تا حد 1°C) باشد.

همچنین به این دلیل که می‌توان سه قسمت را داخل یک مبدل حرارتی صفحه‌ای مونتاژ کرد، دستگاه مبدل نهایی بسیار فشرده بوده و در کنار نیاز به فضای کوچکی برای نصب از هزینه‌های کمتری نسبت به سایر مبدل‌های حرارتی برخوردار می‌باشد.



امروزه پاستوریزه کردن در اغلب فرآیندهای تولید محصولات در صنایع غذایی و نوشیدنی‌های مختلف از مهمترین بخش‌های این‌گونه فرآیندها می‌باشد که در تولید محصولاتی همچون آبمیوه، رب گوجه، خامه، آب پنیر، بستنی، آبجو، مشروب و غیره استفاده می‌شود و در بسیاری از این سیستم‌ها به صورت فزاینده از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای استفاده می‌شود؛ هم چنین امروزه مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای در کاربردهای غذایی دیگر به کار می‌روند. برای نمونه می‌توان به گرم کردن و سرد کردن محسوس در فرآیندهای پیش‌فراوری^۱ و تخمیر^۲، خشک کردن، مخلوط کردن، منجمد کردن، استریلیزه کردن^۳ و همچنین تغییر فاز (جوشیدن / تبخیر) در پخت و پز، خمیرمایه سازی^۴، کریستالیزه کردن و پلیمریزه کردن اشاره کرد.

۳-۲- تهویه مطبوع و سیستم‌های سرمایشی

در دهه‌های گذشته با توجه به اهمیت آسایش در فضاهای مسکونی، کنترل هوای مکان‌های تجاری و نگهداری صنایع غذایی و بیولوژیکی استفاده از سیستم‌های گرمایش، تجدید هوا، تهویه مطبوع و سرمایش (HVAC & R)^۵ افزایش یافت. امروزه، دستگاه‌های تهویه مطبوع در بسیاری از هتل‌ها، ساختمان‌های اداری، ساختمان‌های صنعتی، بیمارستان‌ها و مراکز ورزشی به کار می‌روند. در واقع به کارگیری آنها برای کنترل دما در فرآیندهای مختلف تولیدی و صنعتی گسترش یافته است.

برای نمونه به شکل ۳-۲ توجه کنید که نشان دهنده نمای کلی یک سیستم مرکزی تهویه مطبوع ساختمان می‌باشد. بخش خنک‌کننده اصلی (چیلر) اساساً یک واحد سیکل تبرید بخار-تراکم است که در آن بخار میرد متراکم، به داخل کندانسور جریان می‌یابد، سپس میرد مایع خروجی داخل شیر گلوبی منبسط می‌شود؛ در این مرحله سیال سردکننده کم فشار به داخل اواپراتور می‌رود (منبع حرارت) و در نهایت بخار خروجی دوباره به سمت کمپرسور هدایت خواهد شد تا چرخه تکمیل شود. واحدهای

1 Pre- Treatment

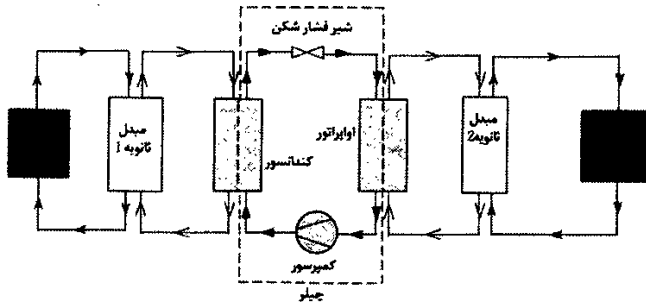
2 Fermentation

3 Sterilization

4 Forming Pastes

5 Heating, Ventilation, Airconditioning, and Refrigeration

انتقال حرارت ثانویه، در هر دو بخش کندانسور و اواپراتور، معمولاً از آب سرد یا حلال‌های آب-گلیکول به عنوان سیال‌های کاری^۱، استفاده می‌کنند.



شکل ۲-۳: طرح‌واره جریان در یک سیستم تهویه مطبوع رایج در ساختمان‌ها

یک عامل مهم و مؤثر در عملکرد مناسب واحدهای خنک‌کننده بزرگ، حذف نرخ انتقال حرارت بسیار بالا در کندانسور است. یکی از سه راهکار اصلی زیر برای رسیدن به این هدف در نظر گرفته می‌شود: سیستم خنک‌شونده توسط هوا، سیستم خنک‌کن باز با منابع سردکننده آزاد مانند آب دریا یا رودخانه. سردکننده‌های هوایی و برج‌های خنک‌کن مدار بسته، بزرگ و گران هستند. برج‌های خنک‌کن باز، همواره نیاز به منبع آب دارند و هنگامی که آب تمیز در دسترس نباشد، چون مستعد رسوب‌گیری هستند از کار خواهند افتاد. به این ترتیب به استفاده از سردکننده‌های مدار بسته یا سردکننده‌های هوایی^۲ نیاز بیشتری احساس می‌شود. اما به کارگیری یک سیستم غیرمستقیم با یک مدار مبدل حرارتی ثانویه به صورت تقسیم‌کننده^۳ یا فیلتر میان دو سیستم، پیشنهاد مناسبی را ارائه خواهد کرد. در این حالت بسیاری از مشکلات در سیستم‌های سردکننده مستقیم حذف می‌شود. مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، معمولاً بهترین انتخاب برای مبدل‌های ثانویه هستند. از جمله فواید مختلف سیستم‌های سردکننده ثانویه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

1 Working Fluid

2 Air coolers

3 Divider

- ۱- هزینه پایین و مدت زمان نسبتاً کم برای برگشت سرمایه
 - ۲- صرفه‌جویی در مصرف ماده در کندانسور^۱ به صورتی که مواد گرانیقیمت کمتری استفاده می‌شوند.
 - ۳- نیاز به تعمیر و نگهداری کمتر
 - ۴- با استفاده از یک مبدل حرارتی میانی، سردکننده‌ها (چیلرها) نیز مانند برج‌های خنک کن در دماهای بهینه کار می‌کنند.
 - ۵- به کارگیری مبدل حرارتی میانی هدر رفتن آب را کاهش می‌دهد.
 - ۶- جداسازی واحد سردکننده اصلی بخار تراکمی از منبع آلودگی آب خام^۲
 - ۷- بازیافت حرارت میانی باعث کاهش آلودگی گرمایی محیط خواهد شد.
- همانطور که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است، از این مبدل حرارتی ثانویه نیز می‌توان در بخش اواپراتور استفاده کرد. در این سیستم نیز به کارگیری یک مبدل حرارتی صفحه‌ای برای جداسازی دو مدار بخش سرد، سبب بازده حرارتی بالاتر و اختلاف دمای به هم رسیدن بسیار کم (تا حدود 0.5°C) خواهد شد. همچنین مدارهای ثانویه از ایجاد فشارهای بالا جلوگیری می‌کنند و افزون بر آن استفاده از سیستم‌های ذخیره انرژی حرارتی غیرمؤثر و گران و نیز احتمال نشتی را کاهش می‌دهند و در نهایت می‌توان گفت که باعث کنترل بهتر و لوله‌کشی مناسبتر سیال سردکننده در ساختمان می‌شوند.
- امروزه، مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای (بویژه انواع جوش خورده یا لحیم‌کاری شده آنها) به صورت فزاینده به طور مستقیم به صورت کندانسور یا اواپراتور در واحدهای سرد کننده استفاده می‌شوند، چرا که آنها نسبت به مبدل‌های حرارتی نوع لوله و پره^۳ سنتی دارای کارایی بیشتری می‌باشند [۴-۷].

۳-۳- استفاده از مبدل‌ها در گرمایش بخش‌های خدماتی و تولید همزمان^۴

گرمایش در بسیاری از موارد، برای ایجاد یک محیط داخلی مطلوب در

1 Material saving in the condenser

2 Raw water

3 Tube- fin

4 Cogeneration

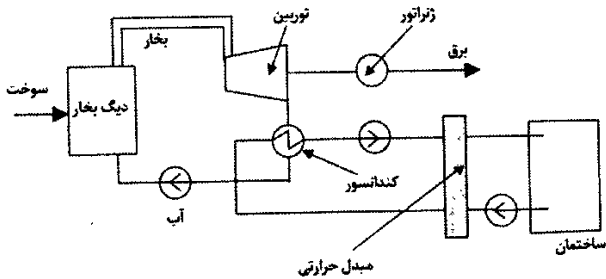
ساختمان‌های مسکونی، تجاری، اداری و فضاهای عمومی مورد نیاز است، اما امروزه گرمایش برای بسیاری از خدمات دیگر از جمله گرم کردن آب شیر، استخرهای شنا و گلخانه‌ها نیز لازم می‌باشد. تمام کاربردهای گرمایشی حرارتی را می‌توان به دو دسته‌ی گرمایش برای بخش‌های خدماتی^۱ و گرمایش منطقه‌ای یا ناحیه‌ای^۲ که با یکدیگر تفاوت‌های عمده بسیاری دارند، تقسیم کرد. در سیستم‌های گرمایشی خدماتی معمولاً منبع گرمایش داخلی بوده و فقط در یک ساختمان استفاده می‌شوند و منبع حرارت معمولاً نه تنها می‌تواند یک بویلر باشد، بلکه می‌توان حرارت را با استفاده از پمپ‌های حرارتی و پنل‌های (صفحات) خورشیدی فراهم کرد. دمای کاری عادی برای این سیستم‌ها زیر 100°C بوده و فشار 6 bar یا کمتر می‌باشد. در حالی که در سیستم‌های گرمایشی ناحیه‌ای، آب داغ یا بخار را در چند ساختمان و در برخی موارد در کل یک شهر تقسیم می‌کنند. در این سیستم‌ها از منابع حرارتی متنوعی می‌توان استفاده کرد که از جمله می‌توان به حرارت مرکزی زمین، نیروگاه‌های بخار و حرارت بازیافتی از سیستم‌های صنعتی اشاره کرد. دماهای کاری معمول و فشار این سیستم‌ها، به ترتیب $100-150^{\circ}\text{C}$ و 16 bar می‌باشد. مبدل‌های حرارتی با توجه به کاربردهای متنوع و شکل‌های متفاوتشان، در این سیستم‌ها از نقش مهمی برخوردارند و مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای پیشنهاد مناسبتری نسبت به مبدل‌های سنتی هستند، زیرا از کارایی، قابلیت اطمینان و ایمنی بالاتری برخوردار می‌باشند.

برای نمونه یک نیروگاه ترکیبی برق و حرارت (برای گرمایش ناحیه‌ای) یا یک سیستم تولید همزمان را در نظر بگیرید، در شکل ۳-۳، توضیحات اصلی ترمودینامیک مسأله ارائه شده است. این سیستم دو محصول نهایی تولید می‌کند: گرما و برق، و در نتیجه بیشتر از 80 درصد محتوای انرژی سوخت را مصرف می‌کند. در این گونه نیروگاه‌ها، دمای آب ورودی برای منبع آب گرمایش ناحیه‌ای، معمولاً بین 75°C و 135°C (بسته به فصل سال و شرایط آب و هوایی) تغییر می‌کند و دمای آب بازگشتی معمولاً بین 40°C و 70°C متغییر است. در برخی دیگر از سیستم‌ها از جریان بخار فشار

1 Service Heating

2 District Heating

پایین خارج شده از توربین به جای آب سردکننده خارج شده از کندانسور برای گرمایش استفاده می‌شود. این بخار ممکن است به طور مستقیم استفاده شده یا به سمت یک سیستم مبدل حرارتی ثانویه برای تولید آب داغ هدایت شود. در هر دو نوع سیستم می‌توان از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای به عنوان کندانسور یا مبدل حرارتی ثانویه استفاده کرد. اختلاف دمای به هم رسیدن کم در این نوع از مبدل‌ها سبب افزایش بازده آنها می‌شود و این انگیزه محرک اقتصادی همراه با فضای کوچکتری که مبدل حرارتی صفحه‌ای در مقایسه با مبدل حرارتی پوسته و لوله اشغال می‌کند، سبب می‌شود که تمایل به استفاده از این مبدل‌ها دو چندان شود [۴-۷].



شکل ۳-۳: طرح‌واره یک فرایند نیروگاه تولید همزمان یا نیروگاه ترکیبی برق و حرارت

۴-۳- استفاده از مبدل‌های صفحه‌ای در صنایع نفت و گاز فراساحلی

گذشته از مکان سکوی فراساحلی^۱ تولید نفت و گاز و نوع سیال موجود در چاه، سیستم‌های گرمایش و سرمایش رکن اصلی در این تأسیسات هستند. نیاز به تجهیزات انتقال حرارت در این تأسیسات به عوامل مختلفی بستگی دارد که از آن جمله می‌توان به تجهیزات تصفیه نفت خام یا متراکم‌سازی گاز در سکو اشاره کرد. وسایل مورد استفاده علاوه بر اینکه باید در مقابل مواد خورنده مقاومت داشته باشند، بهتر است فشرده و سبک وزن نیز باشند. مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای نه تنها این محدودیت‌های کاری را می‌توانند رعایت کنند، بلکه به دلیل انعطاف‌پذیری قابل ملاحظه‌ای که دارند و

می‌توان قدرت حرارتی آنها را با افزودن و کاستن صفحات افزایش یا کاهش داد به آسانی می‌توانند شرایط بار حرارتی متغیر را برآورده کنند.

یکی از کاربردهای رایج مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای در سکوهای تولید فراساحلی فشرده‌سازی گاز است که به دلیل نیاز به دبی حجمی پیش از پمپاژ گاز در لوله‌ها، استفاده از این مبدل‌ها ضرورت بسیاری دارد. فشرده‌سازی معمولاً شامل چند مرحله بوده و مقدار حرارت زیادی در طول این فرآیند تولید می‌شود. به منظور اتلاف حرارت ایجاد شده، از یک سیستم سردکننده مدار بسته استفاده می‌شود که در آن مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای ساخته شده از صفحات تیتانیوم بوده و آب دریا را به عنوان ماده خنک‌کننده در آن به کار می‌گیرند. شکل ۳-۴ نشان‌دهنده دیاگرام خط فرآیند برای یک زنجیره تراکم سه مرحله‌ای است که در آن میان سردکن‌های گازی^۱ توسط آب سردکننده در مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله خنک می‌شوند و این آب سردکننده را نیز به کمک یک مبدل صفحه‌ای با آب دریا خنک می‌کنند. این سیستم خنک‌کاری به نوبه‌ی خود مشکلات متالورژیکی و مکانیکی در مبدل‌های حرارتی را با استفاده از یک مبدل پوسته و لوله برای گاز پر فشار و یک مبدل صفحه‌ای برای آب خورنده دریا بسادگی حل می‌کند. از دیگر سو در چنین سیستمی افت اختلاف دما به خاطر عملکرد مدار بسته در سیستم با اختلاف دمای اپروچ کوچک و بازدهی بالای مبدل‌های صفحه‌ای به کمترین اندازه‌ی خود می‌رسد.

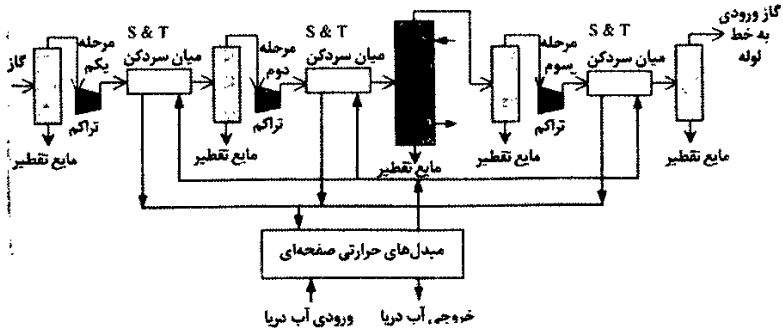
مبدل‌های صفحه‌ای در تاسیسات فراساحلی در فرآیند آبیگیری یا نمک‌زدایی^۲ نفت خام نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند، به گونه‌ای که این مبدل حرارتی وظیفه بازیافت حرارت تلف شده یا تبادل از نفت خام، گرم کردن امولسیون خام^۳، خنک کردن نهایی نفت خام تصفیه شده، و بازیافت یا تبادل حرارت از آب تغذیه (ورودی) را انجام می‌دهد. همچنین از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای در انواع کارهای کمکی کوچک در این سکوها استفاده می‌شود که از جمله می‌توان به خنک کردن نفت، خنک کردن روغن هیدرولیک، خنک کردن آب شیرین یا آب دریا در هنگام حفاری، متراکم کردن هوا در

1 Gas intercoolers

2 Dehydration or Desalting

3 Crude Emulsion

سیستم‌های تهویه مطبوع و در پمپ‌ها و موتورهای دیزل اشاره کرد [۴-۷].



شکل ۳-۴: طرح خنک کاری مدار بسته در یک نیروگاه متراکم سازی گاز فراساحلی

۳-۵- کاربردهای دریایی^۱

مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای نقش مهمی در ایمنی عمومی، کارایی و صرفه‌جویی در هزینه انواع مختلف کشتی‌ها از جمله قایق‌های تفریحی بزرگ یا کوچک، ناوهای جنگی، کشتی‌های یدک‌کش و نفت‌کش‌های بسیار بزرگ ایفا می‌کنند، در این گونه سیستم‌های حمل و نقل دریایی، سرمایه‌ش و گرمایش قابل توجهی نیاز است که برای رسیدن به این هدف باید از مبدل‌های حرارتی استفاده کرد. برای نمونه موتورهای چهار زمانه در انواع مختلفی از کشتی‌های کوچک و بزرگ با سیستم‌های هیدرولیکی الکتریکی یا دیزلی بسیار استفاده می‌شوند که در آنها خنک‌کاری موتور و خنک‌کاری روغن جعبه دنده، به صورت مداوم لازم می‌باشد. از جمله دیگر کاربردهای مبدل‌های صفحه‌ای در صنایع دریایی می‌توان به پیش‌گرم‌کن‌ها برای نفت سیاه سنگین (که معمولاً کثیف‌تر بوده و حتی شامل مقداری آب چگالیده نیز می‌باشد)، سردکننده‌های آب دریایی برای سیستم خنک‌کننده موتور و اواپراتورها و کندانسورها در سیستم شیرین مرکزی اشاره کرد.

با توجه به فشردگی نسبی، فضای کوچک برای نصب و کارایی حرارتی-هیدرولیکی بالای مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، این گونه از مبدل‌ها انتخاب مناسبی برای کاربردهای

دریایی نسبت به مبدل‌های پوسته و لوله می‌باشند؛ همچنین برای کاهش احتمال خوردگی حاصل از استفاده از آب دریا برای خنک‌سازی، مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای با اختلاف دمای به هم رسیدن بسیار کم، مجموعه مدار بسته ثانویه مناسبی را ارائه می‌دهند. روش کار مبدل‌های مذکور، مشابه انواعی است که در کاربردهای سکوه‌های گازی و نفتی فراساحلی استفاده می‌شوند، که در بخش قبل به آن پرداختیم.

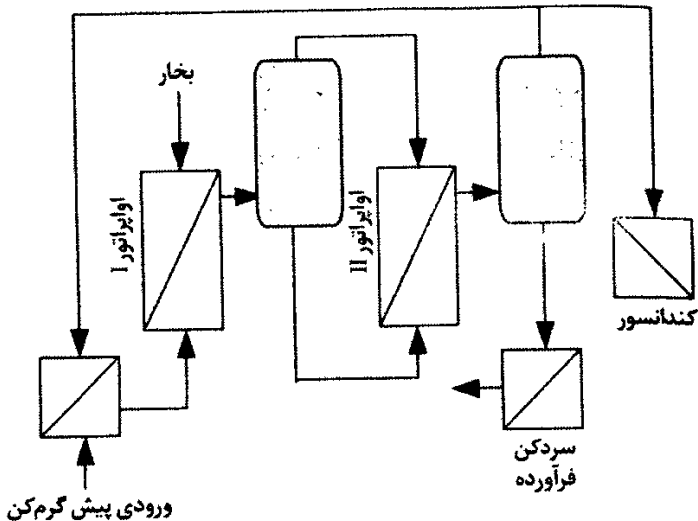
۳-۶- فرآیندهای شیمیایی

انواع مختلف فرآیندهای شیمیایی در صنایع مختلفی همچون پتروشیمی، دارویی، نفت و گاز و تولید مواد شیمیایی آلی و غیر آلی استفاده می‌شوند. در تمام این کاربردها، انتقال حرارت نقش مهم و اصلی را بازی می‌کند و تأثیر بسزایی را روی کارایی فرآیند، محصول نهایی، قابلیت اطمینان و هزینه‌های تولید دارا می‌باشد، بنابراین لذا انتخاب مناسب مبدل‌های حرارتی اهمیت قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت.

برای نشان دادن نقش مبدل‌های حرارتی و بویژه مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، چهار فرآیند حرارتی رایج در این بخش توصیف می‌شوند که عبارتند از: تبخیر، جذب و رنگ‌گیری^۱، تقطیر و کنترل دمای راکتور. این فرآیندها به طور کلی در صنایع شیمیایی مشاهده می‌شوند اما بطور مشخص برای نشان دادن فواید انتخاب مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای بسیار مناسب هستند.

دیگرام فرآیند نمونه برای واحد تبخیر در شکل ۳-۵ مشاهده می‌شود. اگرچه در دهه‌های گذشته بیشتر سیستم‌های تبخیر از مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله استفاده می‌کردند، اما امروزه مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای انتخاب بسیار مناسب‌تری هستند. دلایل مختلفی برای به کارگیری اواپراتورهای مبدل حرارتی صفحه‌ای وجود دارد. این گونه از اواپراتورها نسبت به اواپراتورهای لوله‌ای سنتی که ارتفاعشان 10 m تا 12 m است، کوچکتر می‌باشند، به طوری که ابعادشان تا حد یک چهارم ابعاد مبدل‌های قدیمی‌تر است؛ در این صورت هزینه‌های کمتری صرف فونداسیون‌های سیستم و لوله‌کشی خواهد شد. سایز کوچک‌تر مبدل‌های صفحه‌ای همچنین سبب می‌شود که

حجم نگهداری و زمان رسیدن به حالت پایدار کاهش یافته و در این صورت سیستم اواپراتور می‌تواند به سرعت خاموش و روشن شده و در بازه زمانی کوتاهی به حالت پایدار برسد. این عوامل کیفیت محصول را افزایش داده و بویژه برای موادی که به دما حساس می‌باشند، بسیار مناسب هستند. فضای کمی که این نوع از مبدل‌ها اشغال می‌کنند و همچنین انعطاف‌پذیری آنها برای تغییر ظرفیت حرارتی - با اضافه کردن یا حذف صفحات باعث شده که به کارگیری آنها به منظور تقویت‌کننده که موازی با سیستم‌های تبخیر موجود کار می‌کند تا تولید را افزایش دهند، کاملاً مؤثر باشد. فایده دیگر طراحی اواپراتورهای صفحه‌ای، راندمان انتقال حرارت بالاتر آنهاست. درحالی که اواپراتورهای لوله‌ای معمولاً با اختلاف دمای 5°C تا 10°C بین دو ماده‌ی سیال کار می‌کنند، اواپراتورهای صفحه‌ای با اختلاف دمای فقط 3°C تا 5°C نیز می‌توانند مناسب باشند. در این صورت اواپراتورهای سری برای افزایش غلظت‌های محصول نهایی و در عین حال استفاده از بخار کمتر و صرفه‌جویی در مصرف انرژی، مفید واقع می‌شوند. گذشته از این هزینه‌های تولید نسبت به مبدل‌های لوله‌ای با ظرفیت حرارتی برابر کمتر خواهد بود بویژه اگر از مواد خاصی برای مقابله با سیالات خورنده استفاده شود.



شکل ۳-۵: طرحواره یک واحد تبخیر در یک نیروگاه شیمیایی

امروزه اواپراتورهای صفحه‌ای در کارخانه‌های شکر، کارخانه‌های تقطیر^۱ (آب شیرین کن)، کاغذسازی، صنعت مواد قلیائی^۲ آلومینا^۳، تولید دارو و تولید انواع نمک‌های معدنی و مواد شیمیایی آلی مانند اتیلن گلیکول، شویندها و محصولات بهداشتی و مواد قلیایی و گلیسرین استفاده می‌شوند.

جذب و رنگ‌گیری، که نمودار جریان فرآیند آن به عنوان نمونه در شکل ۳-۶ نشان داده شده است، یک روش اصلی برای بازیافت ترکیبات آلی فرار و بخار شدنی^۴ می‌باشد. اگرچه هدف اقتصادی این فرآیند کاهش مصرف حلال بوده، اما با توجه به قوانین محیط زیست نیز، استفاده از آن افزایش یافته است. بازده انتقال حرارت در بازده کاری کل سیستم جذب و رنگ‌گیری مؤثر می‌باشد. در این فرآیند ابتدا باید ماده جذب رقیق^۵ قبل از ورود به قسمت بالای برج جذب، سرد شده و ماده جذب غنی^۶ قبل از عبور از قسمت رنگ‌گیری، گرم شود. افزایش بازده سیستم نیازمند حداکثر کردن بازیافت حرارت و حداقل کردن نیاز به گرمایش و سرمایش خارجی می‌باشد. اختلاف دمای به هم رسیدن (پروچ) نزدیک، این هدف را امکان‌پذیر ساخته و از این رو مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای نسبت به مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله سنتی بسیار مؤثرتر خواهند بود. به علاوه با داشتن جریان معکوس در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای می‌توان شکل تقاطع دمایی^۷ را که یک مشکل عمومی در واحدهای پوسته و لوله قدیمی بوده است، از میان برد. مشکل مواد خورنده را نیز می‌توان به آسانی با استفاده از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای حل کرد، اما هنگامی که از مبدل‌های صفحه‌ای نیمه جوشکاری یا تمام جوشکاری شده که از مواد مناسب ساخته شده اند استفاده می‌کنیم، انعطاف‌پذیری سیستم کاهش می‌یابد.

1 Distillery

2 Alkali

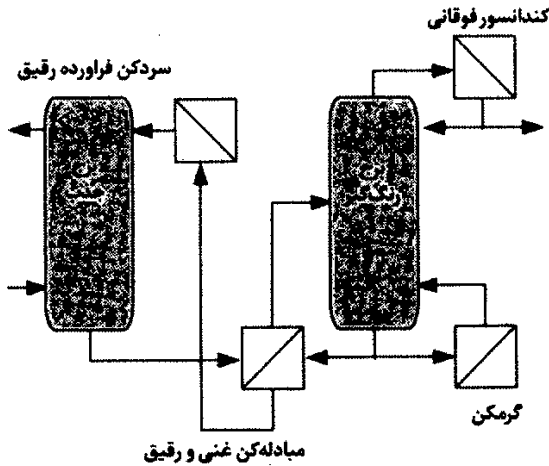
3 Alumina

4 Volatile

5 Lean Absorption

6 Rich Absorption

7 Temperature Cross

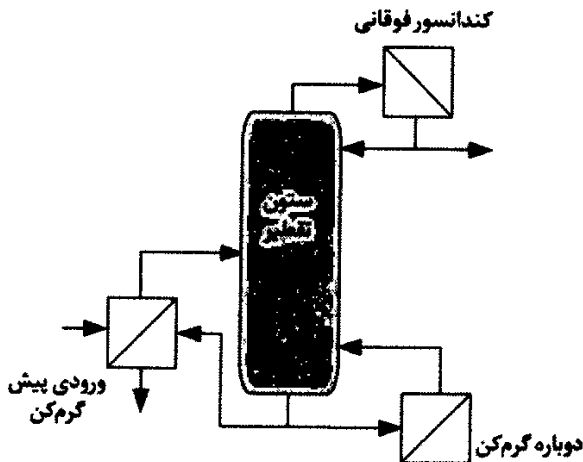


شکل ۳-۶: یک واحد جذب و رنگ‌گیری

شکل ۳-۷ یک واحد نمونه تقطیر (آب شیرین‌کن) را نشان می‌دهد. این سیستم شامل یک کندانسور و دوباره گرم‌کن^۱ می‌باشد که به ترتیب در بالا و پایین ستون تقطیر قرار گرفته‌اند. مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای برای کندانسورها بسیار مفید هستند، زیرا کوچک و سبک بوده و در نتیجه به آسانی در بالای ستون تقطیر نصب می‌شوند که در این صورت علاوه بر صرفه‌جویی در فضا، هزینه‌های نصب نیز کاهش خواهند یافت. همچنین نصب مبدل در قسمت بالایی سبب برگشت سیال به کمک جاذبه می‌شود و از این رو هیچ پمپی نیاز نبوده و از سوی دیگر افت فشار نیز به دلیل طول کوتاه جریان، کم است، بنابراین چگالش در خلا^۲ امکان‌پذیر خواهد بود. مشابه کندانسور، مبدل حرارتی صفحه‌ای برای دوباره گرم‌کن قرار گرفته در پایین نیز بسیار مناسب است، در این حالت به فضا و به دنبال آن لوله‌کشی کمتری نیاز می‌باشد. افزون بر این استفاده از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای به صورت کندانسور و دوباره گرم‌کن (ری بویلر)، امکان کنترل فرآیند تقطیر را آسانتر کرده و نگهداری آن را نیز ساده‌تر می‌کند.

1 Reboiler

2 Vacuum Condensation



شکل ۳-۷: نمودار فرایند یک سیستم تقطیر

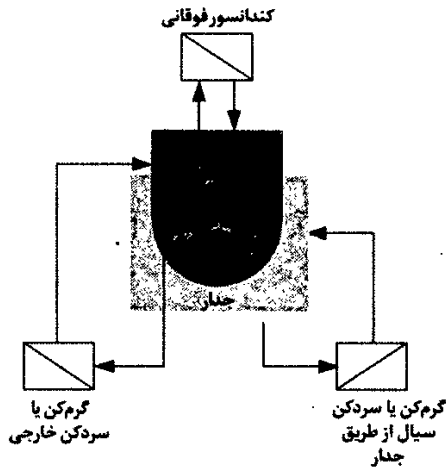
در کارخانه‌های شیمیایی مدرن، فرآیند کنترل دمای راکتور (نشان داده شده در شکل ۳-۸)، باعث ایجاد مشکلات جدی در سیستم می‌شود که از جمله می‌توان به زمان‌های واکنش کند، کیفیت پایین محصول، هدر دادن مواد خام، مصرف بالای انرژی، تغییرات^۱ کند میان دسته فرآیندهای مختلف و موارد دیگر اشاره کرد. در نتیجه هزینه‌های تولید افزایش و امکان رقابت برای محصول خروجی کاهش می‌یابد، اما انتقال حرارت مؤثر، به صورت قابل اطمینانی این مشکلات را حل خواهد کرد. گرمایش و سرمایش از طریق جدار^۲ نشان داده شده در شکل ۳-۸، متداول‌ترین روش برای کنترل دماهای راکتور در هر دو نوع واکنش‌های منقطع و پیوسته^۳ می‌باشند، اما این روش چندان مؤثر نیست، زیرا سطح انتقال حرارت نسبتاً کوچک می‌باشد. روش مناسب‌تر برای انجام گرمایش و سرمایش از طریق جدار این است که برای هر مخزن راکتور، مدار جداگانه برای سیالات گرم‌کننده و سردکننده و مبدل حرارتی مخصوص به هر مدار را در نظر بگیریم. فضای کمی که مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای اشغال می‌کنند و همچنین

1 Change Over

2 Jacketed Heating and Cooling

3 Continuous

فشرده‌گی آنها، سبب شده است که انتخاب مناسبی برای این شرایط باشند. به علاوه، وجود سیکل‌های متناوب حرارتی گرمایش و سرمایش در سیستم‌های مبدل‌های حرارتی سنتی بویژه هنگامی که نوسانات دمایی شدید باشند، موجب می‌شود کارایی لازم را از دست بدهند. به این ترتیب دیگر بار مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای به عنوان یک راهکار مناسب برای حل این مشکل مطرح می‌شوند، چرا که این نوع مبدل‌ها بخوبی می‌توانند در برابر انبساط و انقباض حرارتی اعمال شده در مدت زمان پیش‌بینی شده جهت کارکرد خود، مقاومت کنند.



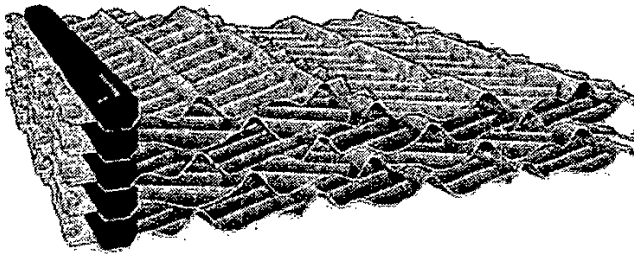
شکل ۳-۸: سیستم کنترل دمای یک واکنش

۳-۷- کاربرد در صنایع خمیر و کاغذسازی^۱

با توجه به اینکه صنایع کاغذ و خمیر کاغذسازی از سیستم‌های سیکل آب بسته استفاده می‌کنند، در این کارخانه‌ها تمرکز روی مدیریت انرژی و آب از اهمیت زیادی برخوردار است. با استفاده از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای در این صنعت از یک سو پاسخگوی این‌گونه نیازها خواهیم بود، و از دیگر سو به قوانین زیست محیطی نیز توجه می‌شود. از دیگر عواملی که هنگام انتخاب مبدل‌های حرارتی برای کاغذسازی باید آنها

را در نظر گرفت، می‌توان به وجود الیاف‌ها در یک یا هر دو جریان، بازده حرارتی بالا یا اختلاف دمای به هم رسیدن کم، محدودیت‌های فضایی و سادگی دمونتاژ برای تعمیر و نگهداری منظم اشاره کرد. مبدل‌های حرارتی استاندارد به آسانی همه این شرایط را بجز کنترل سیالات الیاف‌دار فراهم می‌کنند. برای کاربردهایی که یکی از سیالات مورد استفاده‌ی آن شامل الیاف می‌باشد نیز مبدل حرارتی صفحه‌ای یک طرفه دارای شکاف عریض^۱ (شکل ۲-۴ را ببینید) را می‌توان استفاده کرد. مجموعه صفحه‌ای شکاف عریض دو طرفه^۲ نشان داده شده در شکل ۳-۹ در مواردی به کار می‌رود که هر دو جریان سیال حاوی الیاف هستند.

از جمله کاربردهای نمونه در صنعت کاغذسازی که از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای استفاده می‌کنند، می‌توان به سردکن صفحه‌ای رنگ‌بر^۳ اشاره کرد که با گرم کردن آب فرآیند (بازیافت گرمای اتلافی)، فیلتر و بالایش می‌شود؛ همچنین از مبدل حرارتی صفحه‌ای می‌توان در گرمایش محلول سیاه میانی با سرد کردن سیال چگال حاصل از تبخیر، گرمایش آب سفید موجود در حفره سیمی مشبک به کمک تقطیر کردن بخار و گرم کردن محصول تقطیر آلوده قبل از رنگ‌گیری و سرد کردن محصول تمیز تقطیر بعد از رنگ‌گیری استفاده کرد.

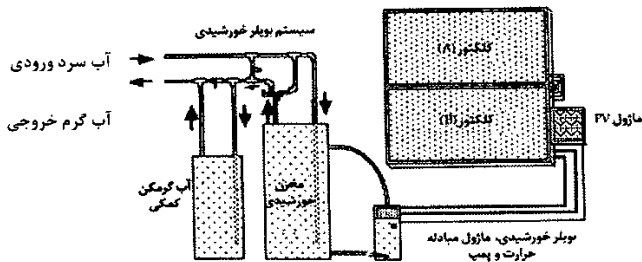


شکل ۳-۹: مجموعه صفحات مبدل صفحه‌ای دو طرفه با شکاف پهنا

-
- 1 Single-Side Wide-Gap
 - 2 Double-Sided Wide-Gap
 - 3 Bleaching Plate

۳-۸- استفاده در سیستم‌های انرژی خورشیدی

انرژی خورشیدی یک منبع انرژی تمیز و تجدیدپذیر می‌باشد که از دهه ۱۹۷۰ با توجه به بحران تحریم نفتی خاورمیانه و اهمیت آن در توسعه پایدار، مورد توجه قرار گرفته است [۱۰-۸]. یکی از طرح‌های گرمایش خورشیدی اولیه، سیستم تک-مدار بوده که در آن یک مبدل حرارتی داخلی در مخزن نصب شده بود. در این سیستم جذب انرژی حرارتی اندک است و استفاده از آن را نیز فقط به تولید آب گرم برای شیرها محدود می‌شود که از این مورد باید به عنوان ایرادی اساسی یاد کرد، اما یک سیستم اصلاح شده را می‌توان با قراردادن مبدل حرارتی خارجی چنانکه به صورت شماتیک در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است، ایجاد کرد. در ساعت‌های تابش نور خورشید، ماژول فوتوولتائیک^۱ (قدرت‌زای نوری)، توانی را تولید می‌کند که یک پمپ گردش (سیرکوله) را می‌گرداند. ضدیخ به وسیله پمپ به سمت کلکتورهای خورشیدی هدایت و در آنجا گرم می‌شود و سپس به مخزنی در قسمت مبدل حرارتی می‌رود. کویل‌های آب در مخزن، حرارت را از سیال گرم شده با نور خورشید جذب کرده و بدین وسیله مخزن آب خانگی را گرم می‌کنند که این آب قبلاً به کمک فرآیند ترموسیفون^۲ طبیعی به سمت این کویل‌های مبدل حرارتی جریان یافته است. این فرآیند بدین گونه شکل می‌گیرد که با گرم شدن آب، آب به سمت بالا رفته و به بخش فوقانی مخزن باز می‌گردد و آب سرد را از بخش پایینی مخزن به داخل مبدل حرارتی هدایت می‌کند.



شکل ۳-۱۰: یک سیستم انرژی خورشیدی (از شرکت Solar-works)

1 Photovoltaic (PV) module

2 Thermo- siphon

با انجام مقایسه‌ای میان سیستم جدید (شکل ۳-۱۰) و سیستم تک-مدار اولیه، به فواید بسیاری پی می‌بریم. نخست آنکه کارایی سیستم به طور قابل توجهی افزایش یافته است. با استفاده از مبدل‌های حرارتی خارجی، آب شرب به کمک جابه‌جایی طبیعی یا فرآیند ترموسیفون گردش می‌کند که در این صورت لایه دمایی فوق‌العاده‌ای در مخزن ذخیره تشکیل خواهد شد. با آب گرم باقی مانده در بخش فوقانی مخزن، ذخیره آب قابل استفاده بسادگی و به سرعت آماده می‌شود. دوم اینکه کارایی ترمودینامیکی سیستم با به کارگیری مبدل حرارتی خارجی افزایش می‌یابد. نرخ انتقال حرارت به طور مستقیم متناسب با اختلاف دما میان آب شربی که قرار است گرم شود و ضدیخ حاصل از کلکتورهای خورشیدی، می‌باشد. در صورت استفاده از مبدل حرارتی خارجی، کویل مخزن ذخیره همیشه با آب سرد احاطه شده که تفاوت‌های دمایی بالاتری را سبب می‌شود و کارایی حرارتی را بهبود می‌بخشد. سوم اینکه هزینه کلی سیستم جدید به علت عمر طولانی مبدل حرارتی خارجی در مقایسه با مخزن خورشیدی کمتر است. هنگامی که مخزن خورشیدی دچار نشستی می‌شود و نیاز به تعویض دارد، می‌توان مبدل حرارتی خارجی را همچنان حفظ کرد.

بدیهی است که برای این نوع سیستم، به دلیل وجود مدار انتقال حرارت ثانویه اضافی، مبدل‌های حرارتی خارجی باید قادر به کار تحت شرایط اختلاف دمای به هم رسیدن (اپروچ) بسیار نزدیک باشند. در نتیجه مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای با فواید بسیاری از جمله فشردگی، تعمیر و نگهداری آسان و هزینه اندک، انتخاب مناسبی برای این گونه کاربرد هستند.

۳-۹- ملاحظات نهایی

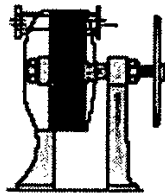
در پایان، گفتنی است که کاربرد مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای نسبت به مواردی که در این فصل اشاره شد بسیار گسترده‌تر می‌باشند. در این فصل مثال‌هایی برای معرفی نسل جدید این مبدل‌ها به شکلی گذرا ارائه شد، همچنین صنایع مختلف دیگری از جمله دارویی، الکترونیک و تجهیزات الکتریکی، صنعت فولاد، صنایع وسایل نقلیه موتوری و خودرو از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای استفاده می‌کنند، اما در برخی از این موارد، به مبدل‌های خاص نیاز می‌باشد.

مراجع فصل ۳:

- [1] Bergles, A.E., Techniques to Enhance Heat Transfer, in Handbook of Heat Transfer, ed. W.M. Rohsenow, J.p. Hartnett, and Y.I. Cho, 3rd edition, MacGraw-Hill, New York, chapter 11, 1998.
- [2] Manglik, R.M., Heat Transfer Enhancement, in Heat Transfer Handbook, ed. A. Bejan and A.D. Kraus, Wiley, New York, chapter 14, 2003.
- [3] Manglik, R.M. and Muley, A., Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Plate-and-Frame Heat Exchangers: A Literature Review, Report No. TFL-Int-1, University of Cincinnati, Cincinnati, OH, September 1993.
- [4] Alfa Laval Lund AB, Product Catalogue, Lund, Sweden.
- [5] SWEP International, Product Catalogue; landskrona, Sweden.
- [6] Tranter, Product catalogue, USA.
- [7] APV, Product Catalogue, UK.
- [8] Saha, P.C., Sustainable Energy Development: A Challenge for Asia and the Pacific Region in the 21st Century, Energy policy, Vol. 31, no. 11, PP. 1051-1059, 2003.
- [9] Darmstadter, j., Landsberg, H.H., Morton, H.C., and Coda, M.J., Energy, Today and Tomorrow: Living Living with Uncertainty, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1983.
- [10] Long, R.E., Energy and Conservation, H.W. Wilson, New York, 1989.

۴-۱- مقدمه

همان‌گونه که در فصل اول بیان شد، دست کم ۸۰ سال از عمر مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای می‌گذرد، در حالی که امروزه هنوز برای بسیاری از مهندسان ناشناخته مانده است، اما ایده اولیه آن از سوی یک آلمانی به نام آلبرت دراک^۱ در سال ۱۸۷۸ به ثبت رسید. در سال ۱۸۹۰ دو مخترع آلمانی دیگر به نام‌های لانگن^۲ و هاندهاسن^۳ طرح اولیه را تکمیل کردند. (شکل ۴-۱)، و سرانجام در سال ۱۹۳۱ اولین مبدل حرارتی صفحه‌ای ساخته شد. این مبدل حرارتی از ورق‌های استنلس استیل (فولاد ضد زنگ) با ضخامت ۵ mm تا ۱۰ mm ساخته شده بود و سطح حرارتی آن تا ۵ m² قابل گسترش بود (شکل ۴-۲) و اساساً برای سادگی در تمیزکاری در صنایع غذایی استفاده گردید.

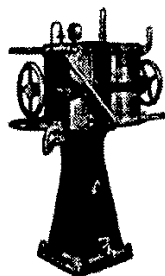


شکل ۴-۱: طرح اولیه مبدل حرارتی صفحه‌ای دو مخترع آلمانی، لانگن و هاندهاسن

1 Albert Dracke

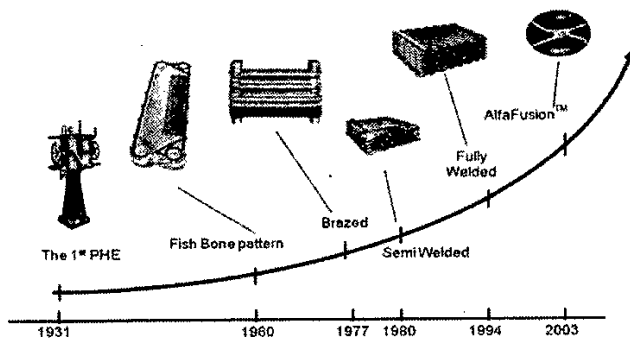
2 Langen

3 Hundhausen



شکل ۴-۲: اولین مبدل حرارتی صفحه‌ای به شکل امروزی

با تکامل مؤثر هندسه صفحات و آرایه الگوهای استخوان ماهی^۱ برای صفحات و استفاده از مواد بهبود یافته برای واشرها در دهه ۱۹۶۰ تولید این گونه مبدل‌ها وارد مرحله جدیدی شد. در سال ۱۹۷۷ نیز نوع لحیم کاری شده آن به بازار عرضه گردید. در سال ۱۹۸۰ و ۱۹۹۴ نیز به ترتیب نوع نیمه جوشکاری شده و کاملاً جوشکاری شده آنها معرفی گردید و سرانجام در سال ۲۰۰۳ نیز فناوری جدید آلفا فیوژن^۲ به بازار معرفی شد (شکل ۴-۳). امروزه مبدل‌های حرارتی از ورق‌های با جنس‌های متنوع و با ضخامت تا 0.4 mm ساخته شده‌اند که می‌توانند در یک واحد مبدل تا سطح حرارتی برابر 2000 m² را ایجاد کنند.



شکل ۴-۳: سیر تکاملی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای [شرکت آلفالاول]

1 Fish bone pattern

2 Alfa Fusion

این نوع مبدل‌ها محدوده بسیار وسیعی از وظایف گرمایی در صنایع گوناگون را انجام می‌دهند و برای کاربردهای انتقال گرمایی مایع-مایع در فشارهای کم و متوسط می‌توانند جایگزین مناسبی برای مبدل‌های حرارتی نوع پوسته و لوله باشند.

تنوع طراحی در این مبدل‌ها برای صفحات و آرایش‌های مختلف که می‌توانند برای وظایف گرمایی متفاوتی مناسب باشند، روشن می‌سازد که طراحی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای بسیار تخصصی است. بر خلاف مبدل‌های حرارتی لوله‌ای که برای آنها داده‌ها و روش‌های طراحی بسادگی در دسترس هستند، طراحی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، همچنان ماهیتی اختصاصی دارند و در انحصار و تملک شرکت‌های تولید کننده می‌باشند. سازندگان، روش‌های طراحی رایانه‌ای خود را که قابل استفاده برای طراحی مبدل‌های عرضه شده است، تکامل بخشیده‌اند و معمولاً برای استفاده طراحان در اینترنت قرار داده‌اند.

۴-۲- اجزای مبدل صفحه‌ای

یک مبدل حرارتی صفحه‌ای همان‌گونه که در شکل (۴-۴) نشان داده شده، از هشت بخش اصلی تشکیل شده است [۱]. این اجزا عبارتند از:

۱- صفحه ثابت یا صفحه قاب^۱ که معمولاً چهار دهانه ورودی و خروجی سیال روی آن قرار گرفته است.

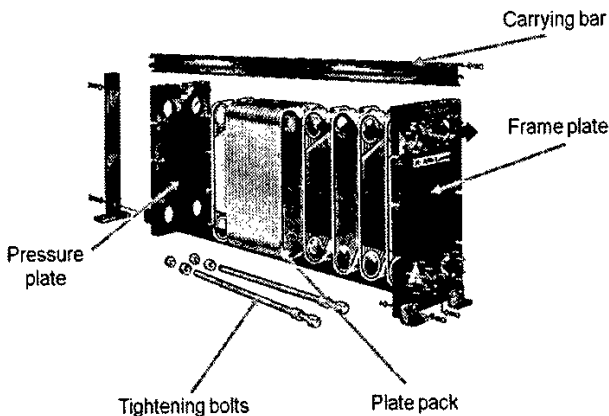
۲- صفحه فشار یا صفحه متحرک^۲ که نقش آن ایجاد فشار روی صفحات است. این صفحات معمولاً از فولادهای کربنی ساخته و سپس با مواد ضد زنگ و یک لایه رنگ پوشیده می‌شوند تا از خطر خوردگی آنها جلوگیری شود. در محیط‌های خیلی خورنده از صفحات با روکش فولاد استنلس استیل (ضد زنگ) نیز استفاده می‌شود.

۳- مجموعه صفحات و اشربندی شده، که در واقع هر دو سیال گرم و سرد، یک در میان در میان آنها جریان دارد. در اینجا و اشرها علاوه بر هدایت سیال مانع از نشت سیال به بیرون از مبدل می‌شود و از آمیخته شدن دو سیال با هم نیز جلوگیری می‌کند.

1 Fixed plate or Frame plate

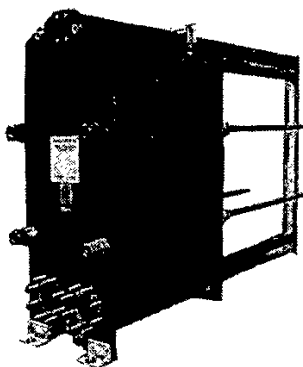
2 Pressure plate

- ۴- میله حامل بالایی^۱ که معمولاً صفحات را نگهداری می‌کند و معمولاً از جنس آلومینیوم یا فولاد کربنی رنگ شده می‌باشد.
- ۵- میله‌های پایینی^۲ که وظیفه هدایت صفحات را به عهده دارد و معمولاً از جنس استنلس استیل (فولاد زنگ نزن) ساخته می‌شود.
- ۶- میله و پیچ‌های اتصال^۳، این اتصالات به کمک دو صفحه ثابت و صفحه فشار مجموعه صفحات و اشربندی شده را تحت فشار قرار می‌دهد تا سیستم از درون بتواند فشار سیال عبوری را تحمل کند.
- ۷- مجاری اتصال دهنده^۴ که معمولاً روی صفحه ثابت تعبیه شده به گونه‌ای که در امتداد سوراخ‌های صفحات قرار می‌گیرند و وظیفه‌ی اتصال به سیستم لوله‌کشی را دارند. اتصالات و نازل‌ها معمولاً از جنس صفحات ساخته می‌شوند تا بدین وسیله از خوردگی‌های الکتروشیمیایی جلوگیری کنند.
- ۸- پایه انتهایی^۵ که در مبدل‌های کوچک به کار نمی‌رود و وظیفه افقی نگه داشتن کل مبدل را بر عهده دارد (شکل ۴-۵).



شکل ۴-۴: مبدل حرارتی صفحه‌ای واشردار [۱]

- 1 Carrying bar
- 2 Guiding bar
- 3 Tightening bolts
- 4 Connecting Port
- 5 Support column



شکل ۴-۵: مبدل حرارتی صفحه ای بزرگ با پایه انتهایی

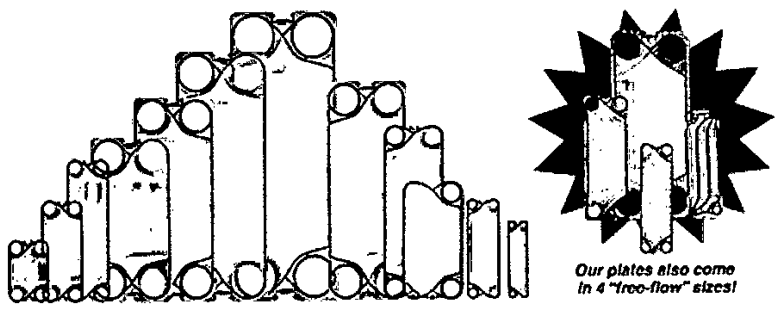
در این نوع مبدل‌ها سطح انتقال حرارت به وسیله چندین صفحه که مجاری ورود و خروج سیال در چهار گوشه آن قرار گرفته، مطابق شکل (۴-۶)، تشکیل شده است. جریان سیال سرد و گرم در یک مبدل صفحه‌ای واشردار به صورت یک در میان در بین صفحات جاری شده که الگوی جریان آن در شکل (۴-۷) نشان داده شده است. دو عامل توانایی نگهداری سیال توسط واشرها و مقاومت صفحات در مقابل تغییر شکل، تعیین‌کننده ماکزیم فشار کارکرد این نوع مبدل‌هاست، در کنار آن استحکام صفحه‌های ثابت و متحرک نیز از اهمیت خاصی برخوردار است. از سوی دیگر ماکزیم درجه حرارت کارکرد این نوع مبدل‌ها را نوع واشر مورد استفاده تعیین می‌کند.

۴-۲-۱- مجموعه چارچوب و صفحه

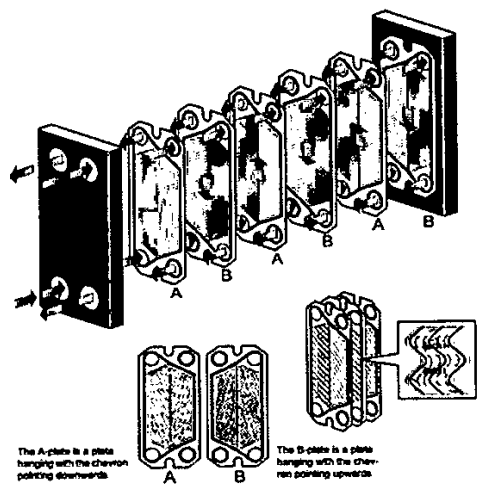
هنگامی که دسته‌ای از صفحات به هم فشرده می‌شوند، سوراخ‌های واقع در گوشه‌های صفحات، تونل‌ها و یا مجاری پوسته‌ای را تشکیل می‌دهند که سیال را از ورودی، به مجموعه صفحات هدایت می‌کند که در آنجا در داخل کاناله‌های باریکی بین صفحات توزیع می‌شود.

مجموعه صفحات توسط وسیله محکم‌کننده مکانیکی یا هیدرولیکی، با امکان کنترل فشار محکم کردن در حد مطلوب، محکم می‌گردد. گذرگاه‌های جریان که در بین صفحات و مجاری واقع در گوشه‌های آنها تشکیل می‌شوند، به شکلی آرایش می‌یابند که جریان‌های سرد و گرم برای انتقال گرما، به شکل یکی در میان، در کنار یکدیگر قرار

می‌گیرند، به طوری که همیشه دارای آرایش مخالف جهت جریان می‌باشند. در طی عبور سیال گرمتر از مبدل، این سیال بخشی از انرژی گرمایی خود را از طریق دیواره صفحه‌ای نازک، به سیال سردتر در سمت دیگر خواهد داد. سرانجام هر دو سیال، به سوراخ‌های تونل‌مانندی که در انتهای دیگر مجموعه صفحات وجود دارد، هدایت و از مبدل خارج می‌شوند. صفحات می‌توانند تا چند صد عدد در یک چارچوب، پشت هم قرار گیرند و به وسیله پیچ‌هایی که مجموعه صفحات را تحت فشار قرار می‌دهد، در کنار یکدیگر نگه داشته شوند (شکل ۴-۵).



شکل ۴-۶: صفحه مبدل حرارتی نوع شورون (chevron) [۱]

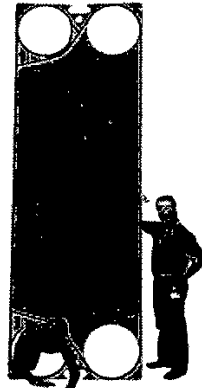
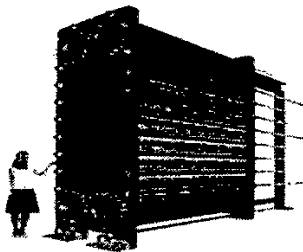


شکل ۴-۷: نمودار جریان در یک آرایش یک گذر مخالف جهت [۱]

۴-۲-۲- مجموعه صفحات واشربندی شده

مجموعه صفحات میان دو صفحه واقع در هر دو انتها، با استفاده از پیچ‌هایی فشرده می‌شوند. صفحات و مبدل حرارتی از میله حامل بالایی آویزان می‌گردند و در انتهای پایین به وسیله یک میله راهنما نگه داشته می‌شوند. میله حامل و میله راهنما، به قطعه ثابت چارچوب پیچ و مهره می‌شوند. بجز مبدل‌های کوچک، بقیه به تکیه‌گاه انتهایی متصل می‌گردند.

مجموعه صفحات مانند دسته لوله‌ها در مبدل‌های پوسته و لوله می‌باشند، با این تفاوت مهم که دو سمت جریان سرد و گرم در یک مبدل صفحه‌ای معمولاً دارای مشخصه‌های هیدرودینامیکی یکسانی هستند. یک صفحه یا ورق فلزی جزو اساسی مجموعه صفحات است که به شکل موجدار (مطابق شکل (۴-۶) به دقت فشرده و پرس می‌گردد. اندازه و ظرفیت یک مبدل حرارتی صفحه‌ای مستقیماً به اندازه صفحه موجدار آن وابسته است. همان‌گونه که در شکل (۴-۸) نشان داده شده، این صفحات در سایزها و اندازه‌های مختلفی تولید می‌شود، اما بزرگ‌ترین صفحه‌ای که تا به حال تولید شده است، دارای ارتفاع 4.3 m و عرض 1.1 m می‌باشد که به کمک پرس‌های 40000 تنی تولید شده است (شکل ۴-۸).



شکل ۴-۸: صفحات مبدل‌های حرارتی بسیار بزرگ

سطح انتقال حرارت برای یک صفحه منفرد بدین ترتیب در محدوده 0.01 m^2 تا 3.6 m^2 قرار دارد. از سوی دیگر در تغییر ابعاد صفحات باید توجه شود که سیال در تمام عرض صفحه به شکل یکسان توزیع شود. از این رو برای پرهیز از توزیع غیریکنواخت سیال در عرض صفحه دست کم نسبت عرض به طول صفحه از مرتبه یک به هشت انتخاب می‌شود. ضخامت صفحات واشربندی شده در محدوده 0.5 mm تا 1.2 mm قرار دارند که بسته به نوع سیال مورد استفاده به فاصله 2.5 mm تا 5 mm از یکدیگر قرار گرفته‌اند تا بتوانند قطر هیدرولیکی بین 5 mm تا 10 mm را برای کانال‌های جریان ایجاد کنند.

با واشربندی دور لبه خارجی صفحه، از نشتی جریان از کانال‌های صفحات به محیط بیرون جلوگیری می‌شود. برای افزایش استحکام مکانیکی و افزایش سطح حرارتی به کمک پرس‌های بزرگ هیدرولیکی طرح‌ها و نقش‌های مختلفی روی صفحات ایجاد می‌شود؛ این موج‌های به وجود آمده روی صفحات، نقش مهمی را در توزیع جریان درون کانال‌ها و انتقال حرارت ایفا می‌نمایند. بر اثر موج‌دهی صفحات، جریان سیال چندین بار از مسیر خود منحرف و سپس با هم ترکیب می‌شوند که این امر سبب ایجاد تلاطم در جریان و انتقال حرارت یکنواخت در عرض کانال می‌شود.
به طور کلی موج‌دهی صفحات دارای مزایای زیر است:

۱- استحکام مکانیکی: موج‌دهی روی صفحات سبب می‌شود که به هنگام

فشرده‌سازی مبدل‌ها در داخل قاب در چندین نقطه صفحات مجاور با یکدیگر تماس حاصل نماید، این کار موجب می‌شود مجموعه صفحات واشربندی شده بتوانند فشار متوسط سیال عبوری از مبدل را تحمل کند؛ چنانکه صفحات خیلی نازک (تا 0.5 mm ضخامت) برای فشارهای تا 1.5 MPa مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲- افزایش تلاطم: وجود این فرورفتگی و برآمدگی‌های روی صفحات باعث

می‌شود که جریان چندین بار از مسیر منحرف شده و چندین بار آمیخته شود، این عمل باعث افزایش تلاطم جریان می‌شود به طوری که جریان سیال در عدد رینولدز 200 و یا حتی کمتر مغشوش می‌شود و بدین ترتیب ضریب انتقال حرارت و اصطکاک نسبتاً بزرگ خواهد شد.

۳- کاهش رسوب گرفتگی: موج‌دهی روی صفحات باعث ایجاد جریان مغشوش

سیال و افزایش تنش برشی روی صفحات می‌شود و بنابراین در این نوع مبدل‌ها رسوب‌گرفتنگی بشدت کاهش می‌یابد و این موضوع نیز به نوبه خود انتقال حرارت را افزایش می‌دهد.

۴- افزایش سطح تماس: موج‌دهی روی صفحات باعث افزایش سطح تماس بین

سیال و صفحه می‌شود و در نتیجه انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

۵- بازدهی حرارتی بسیار بالا: چنانکه در بالا گفته شد، موج‌دهی روی صفحات

سبب می‌شود که جریان حتی در رینولدزهای پایین هم مغشوش شود و در نتیجه ضریب انتقال حرارت کلی افزایش یابد.

۶- جرم مصرفی کمتر: موج‌دهی روی صفحات باعث افزایش انتقال حرارت در

واحد سطح می‌شود از این رو جرم مصرفی کمتری در صفحات به کار می‌رود و در نتیجه حجم و وزن مبدل‌ها کاهش می‌یابد.

۷- تنوع در طراحی: موج‌دهی صفحات را با شکل‌دهی‌های مختلف می‌توان

ساخت، بنابراین انتقال حرارت‌های متفاوت و همچنین استحکام مکانیکی متفاوت را در مبدل‌های صفحه‌ای می‌توان ایجاد کرد، با توجه به این ملاحظات دست طراح در پروسه طراحی بسیار باز می‌باشد.

۴-۳- انواع موج‌دهی:

در عمل انواع مختلفی از صفحات موجدار در مبدل‌ها استفاده می‌شود که بعضی از الگوهای مورد استفاده در شکل‌های (۴-۶) و (۴-۹) نمایش داده شده است، اما در مجموع می‌توان نوع موج‌دهی در صفحات را به دو گروه کلی زیر تقسیم کرد:

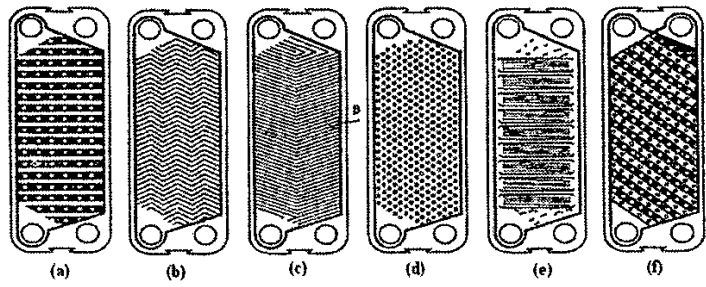
۱- نوع جریان آزاد^۱ که به آن واشبرد^۲ نیز می‌گویند.

این نوع از صفحات برای سیالاتی به کار می‌روند که حاوی ذرات جامد ریز شناور در سیال می‌باشند. از این نوع صفحات برای مثال در صنایع قند (برای عبور سیال آب حاوی شکر) و در صنایع آب میوه بسیار استفاده می‌شود.

1. Free Flow

2. Washboard

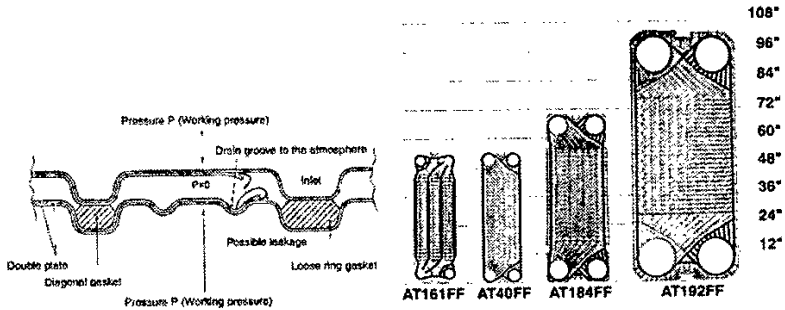
در صفحات با جریان آزاد، آشفتگی با تغییر پیوسته راستای جریان و سرعت سیال افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۹: انواع صفحات به کار رفته در مبدل‌های صفحه‌ای

Plate pattern (a) washboard; (b) zigzag; (c) chevron or herringbone; (d) protrusion and depressions; (e) washboard with secondary corrugations; (f) oblique washboard

در این نوع از صفحات، عمق موج‌ها از عمق واشر لاستیک فشرده شده بیشتر است. همان‌گونه که در شکل (۴-۱۰) مشاهده می‌شود در هنگام مونتاژ مبدل، موج‌ها در داخل یکدیگر قرار می‌گیرند. در این نوع از مبدل‌های صفحه‌ای حداکثر فاصله بین دو صفحه مجاور که جریان سیال از آن عبور می‌کند، می‌تواند تا 16 mm باشد.



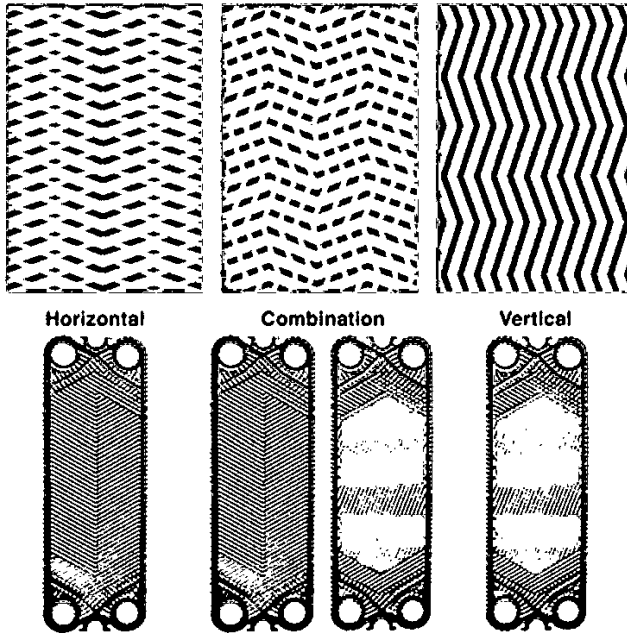
شکل ۴-۱۰: صفحات با موج‌دهی جریان آزاد (واشربرد)

۲- نوع شورون: این نوع صفحات از کاربرد بیشتری در صنعت برخوردار هستند، در

این نوع صفحات موج‌ها دارای شیارهایی موازی می‌باشند و در صفحه به عمقی برابر عمق واشر فشرده شده، پرس گردیده‌اند.

انواع شیارهای صفحات شورون به صورت افقی و عمودی همان‌گونه که در شکل (۴-۱۱) نمایش داده شده در عرض صفحات قرار دارند که به صورت موازی در کل صفحه تکرار می‌شود. عمق موج در صفحات از حدود 2.5 mm تا 5 mm تغییر می‌کند.

PLATE GEOMETRIES

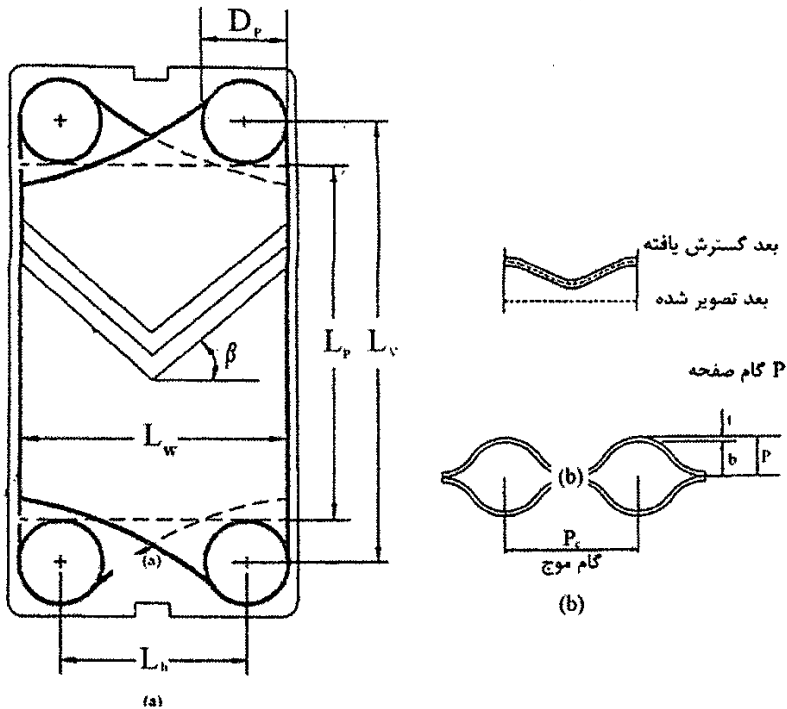


شکل ۴-۱۱: صفحات با موج‌دهی به شکل شورون افقی، عمودی و ترکیبی

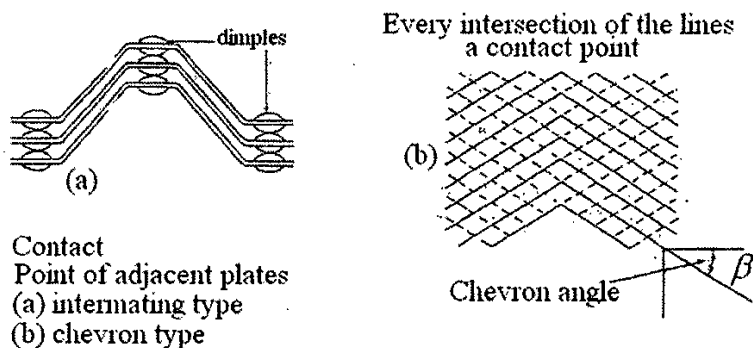
به دلیل تغییرات عمده (انتقال گرما و افت فشار) در هر الگوی موجدار، روش‌های پیش‌بینی (انتقال گرما و افت فشار)، بر مبنای داده‌های تجربی مربوط به همان الگوی مشخص استوار می‌باشد.

در نوع شورون، صفحات مجاور به نحوی مونتاژ می‌شوند که کانال جریان، حرکتی گردابه‌ای به سیال‌ها می‌دهد. الگوی موجدار، زاویه‌ای به نام β دارد که زاویه شورون

نامیده می‌شود. گفتنی است بعضی از سازندگان مبدل‌های صفحه‌ای زاویه بین شورون‌ها را θ می‌نامند، (شکل ۴-۱۲). زاویه شورون در صفحات مجاور معکوس می‌شود، و هنگامی که صفحات به یکدیگر محکم می‌شوند، موج‌های سطح، نقاط تماس متعددی ایجاد می‌کنند (شکل ۴-۱۳). به دلیل وجود این نقاط تماس متعدد، صفحات می‌توانند از مواد بسیار نازک معمولاً به ضخامت 0.6 mm ساخته شوند. زاویه شورون بین دو مقدار تقریبی حدی ۶۵ و ۲۵ درجه تغییر می‌کند و مشخصه‌های انتقال گرما و افت فشار صفحه را تعیین می‌نماید [۲].

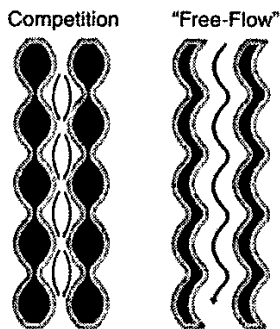


شکل ۴-۱۲: زاویه شورون روی صفحات مجاور، معکوس می‌گردد [۱]



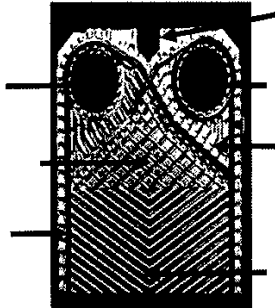
شکل ۴-۱۳: نقاط تماس صفحات مجاور هم

صفحات شورون با موج‌های V شکل افقی معمولاً برای سیالاتی به کار می‌روند که لزجت آنها کم می‌باشد. در این حالت سیال مدت بیشتری در تماس با صفحه بوده و از این رو میزان انتقال حرارت آن بیشتر می‌باشد. از صفحات شورون با موج‌های V شکل عمودی معمولاً برای سیالات با لزجت زیاد استفاده می‌شود و برای لزجت‌های متوسط، مطابق شکل (۴-۱۱)، از نوع ترکیبی که تلفیقی از هر دو صفحه افقی و عمودی است، استفاده می‌شود. شکل (۴-۱۴) مسیر جریان سیال را در هر دو نوع صفحات جریان آزاد و شورون نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۱۴: مسیر جریان سیال در صفحات جریان آزاد و شورون

شکل (۴-۱۵) بخش‌های مختلف یک صفحه با موج‌های شورون را نشان می‌دهد. سوراخ سمت چپ، مسیر ورود و خروج^۱ سیال اول می‌باشد. سیال پس از ورود از لابه‌لای موج‌های موجود در ناحیه توزیع^۲ که به صورت یک منطقه مثلثی شکل می‌باشد، وارد ناحیه اصلی انتقال حرارت^۳ می‌شود که به صورت مستطیلی و در بخش میانی صفحه قرار دارد و قسمت بزرگی از کل صفحه را تشکیل می‌دهد. واشر اصلی^۴ که دور تا دور صفحه واقع شده، وظیفه آب‌بندی سیال را به عهده دارد. سوراخ سمت راست نیز مسیر عبور^۵ سیال دومی می‌باشد که توسط دو واشر از سیال اول آب‌بندی می‌شود. به علت استفاده از واشر دوبل^۶ امکان ترکیب شدن دو سیال با یکدیگر بسیار مشکل است و وجود ناحیه نشت^۷ به سیال دوم کمک می‌کند که در صورت بروز مشکلی در واشر منطقه گذر، این سیال به بیرون نشت کند و بهره بردار را از وجود مشکل در مبدل آگاه کند.

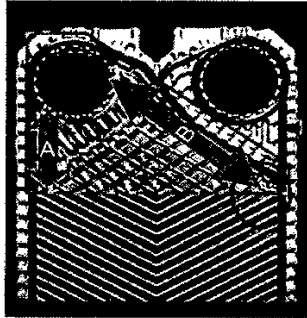


شکل ۴-۱۵: بخش‌های مختلف صفحه با الگوی شورون

در مبدل‌های جدید بیشتر از الگوهای شکلاتی^۸ برای منطقه توزیع استفاده می‌شود. این نوع الگو سبب توزیع یکنواخت‌تر جریان می‌شود و در این منطقه افت فشار توزیع را

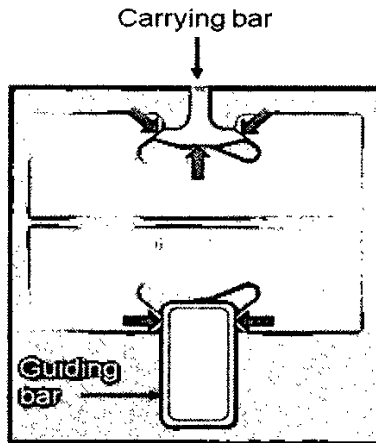
-
- 1 Inlet / outlet
 - 2 Distribution area
 - 3 Main area heat transfer
 - 4 Gasket
 - 5 Passing through
 - 6 Double gasket
 - 7 Leak champer
 - 8 Chocolate pattern

به کمترین اندازه خود می‌رساند و همان‌گونه که در شکل (۴-۱۶) نشان داده شده برای فواصل A و B افت فشار یکسانی ایجاد می‌کند.



شکل ۴-۱۶: الگوی شکلاتی در ناحیه توزیع صفحه میدل

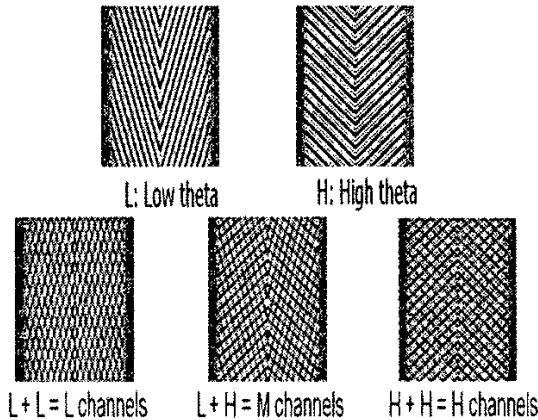
در میدل‌های بزرگ معمولاً برای کنترل موقعیت صفحه، همان‌گونه که در شکل (۴-۱۷) نمایش داده شده، به کمک میله حامل بالایی و میله هادی پایینی در پنج نقطه مختلف موقعیت دقیق افقی و عمودی صفحات تصحیح شده و به آب‌بندی بهتر صفحات کمک می‌کند.



شکل ۴-۱۷: سیستم تنظیم کننده موقعیت صفحات

صفحات با موج‌های شورون معمولاً به دو نوع L و H تقسیم می‌شوند. در نوع L زاویه

شورون کوچک^۱ و در نوع H زاویه شورون بزرگ^۲ می‌باشد. در این نوع مبدل‌ها سه نوع کانال مختلف L، M و H مطابق شکل (۴-۱۸) از ترکیب این دو نوع شورون L و H ایجاد می‌شود. مبدل با کانال جریان L دارای جریان مغشوش و افت فشار کم بوده و مبدل با کانال جریان M دارای جریان مغشوش و افت فشار متوسط می‌باشد، در حالی که نوع H دارای بیشترین اغتشاش و افت فشار است.



شکل ۴-۱۸: انواع صفحات با موج شورون و کانالهای جریان

صفحات مورد استفاده در مبدل‌های حرارتی دارای ابعاد و اندازه‌های مختلفی می‌باشند که در شکل (۴-۱۹) نمایش داده شده است. در واقع صفحات قلب یک دستگاه مبدل حرارتی، صفحه‌ای است که انتخاب دقیق و اندازه آن در تعیین عملکرد صحیح مبدل نقش به‌سزایی ایفا می‌کند. به طور کلی تعداد و اندازه صفحات یک مبدل حرارتی به عوامل متعددی بستگی دارد که از مهمترین آنها باید به دبی جریان سیال، خصوصیات فیزیکی سیال، افت فشار مجاز، دماهای ورود و خروج سیال، ضریب انتقال حرارت کلی U، الگوی صفحات موجدار و جنس و ضخامت صفحات اشاره کرد.

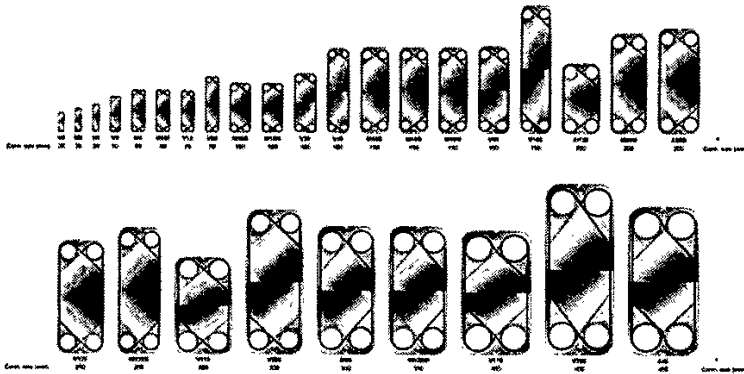
به همین دلیل سازندگان عمده مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای از گوناگونی بسیاری در صفحات برخوردار می‌باشند. به عنوان مثال شرکت GEAEcoflex آلمان بیش از ۱۸۰

1 Low theta

2 High theta

نوع صفحه مختلف را در میدل‌های خود استفاده می‌کند و به عنوان نمونه یکی از پرفروش‌ترین صفحات این شرکت به نام VT20، در ۸ نوع الگوی مختلف تولید می‌شود تا بتوان به کمک آن سیالات مختلف مانند آب، شیر، خامه، سس‌های غذایی، نوشیدنی‌ها و محصولات شیمیایی مختلف را به صورت بهینه سرد یا گرم کرد.

Alfa Laval
Gasketed plate heat exchanger product range
 - arranged according to connection size



شکل ۴-۱۹: صفحات میدل‌های حرارتی در اندازه‌های مختلف

۴-۴- جنس صفحات

الگوهای ایجاد شده در صفحات و موج‌های موجود در آن به وسیله پرس‌های هیدرولیکی بزرگ ایجاد می‌شود، از این رو می‌توان از تمام موادی که از استحکام کافی برخوردار بوده و قابلیت پرسکاری دارند در صفحات مبدل استفاده کرد. رایج‌ترین مواد مورد استفاده در صفحات را می‌توان در چهار گروه مختلف تقسیم‌بندی کرد که عبارتند از [۱-۵]:

۱- فولادهای آستنیتی^۱: که معمولاً شامل فولادهای استنلس استیل^۲ یا زنگ‌نزن

1 Austenitic

2 Stainless Steel



بوده و عبارتند از

AISI 430, AISI 316, AISI 304, AISI 316L, AISI 317, 904L, 6-XN, 317LN, 316Ti254 SMO

که مواد ترکیبی آنها در جدول (۴-۱) نشان داده شده است. این فولادها به علت مقاومت در مقابل خوردگی در صنایع غذایی و شیمیایی استفاده می‌شوند.

جدول ۴-۱: مقایسه مواد ترکیبی فولادهای زنگ‌نزن [۷-۵]

شماره	گرید فولاد زنگ نزن	ترکیبات (همگی دارای % 0.15 کربن می‌باشند)
۱	S.S.430	17 % Cr.
۲	S.S.304	17 % Cr , 10 % Ni
۳	S.S.316	18 % Cr , 10 % Ni , 2-2.5 % Mo
۴	S.S.317	18 % Cr , 10 % Ni , 3-3.5 % Mo
۵	904L	Ni Cr Mo Cu 25-20-5

۲- تیتانیوم^۱ و آلیاژهای آن: به صورت گرید یک (تیتانیوم) (Gr.1=Ti) و گرید دو (تیتانیوم-پالادیوم) (Gr.11=Ti-Pa) می‌باشند.

۳- نیکل^۲ و آلیاژهای آن: نیکل^{۲۰۰}، مونل^{۴۰۰}، هستلوی^۵ C276، هستلوی G30، اینکولوی^۶ 825، اینکولوی^۷ 686 و اینکولوی^۸ 625، D-205C-2000، C22، B-3، 3035 31 28، 825.59.

۴- مواد فلزی و آلیاژهای فلزی و غیر فلزی دیگر: که تانتالیوم^۹، مس^۸ و آلیاژهای مس، گرافیک^{۱۰}، آلومینیوم و دیابن^{۱۰} از مهمترین آنها می‌باشد. در جدول (۴-۲) ضریب هدایت گرمایی بسیاری از این مواد آورده شده است.

- 1 Titanium
- 2 Nickel
- 3 Nickel 200
- 4 Monel 400
- 5 Hastelloy C276
- 6 Incoloy 825
- 7 Tantalum
- 8 Copper
- 9 Graphite
- 10 Diabon

در این جدول اینکونل^۱ نام تجاری گروهی از آلیاژهای نیکل است که در مقابل اکسید شدن در دمای زیاد مقاوم هستند.
هستلوی^۲ نام تجاری گروهی دیگر از آلیاژهای نیکل است که در مقابل خوردگی محلول‌های شیمیایی مقاوم می‌باشند.

جدول ۴-۲: ضریب هدایت حرارتی بعضی از مواد مورد استفاده در ساخت صفحات مبدل [۸.۷]

جنس صفحه	ضریب هدایت حرارتی [w/m.k] at 300 k
فولاد زنگ نزن 304	14.9
فولاد زنگ نزن 316	13.4
آلیاژ 54 SMO	13.0
آلیاژ هستلوی C-276	10.6
نیکل	90
آلیاژ نیکل	11.7
تیتانیوم	21.9
گرافیت	5.7
مونل 400	66
اینکونل 600	16
اینکولوی 825	12
کاپرونیکل 90/10	52
کاپرونیکل 70/30	35

مونل،^۳ آلیاژی است که حدود 60 درصد - 70 درصد نیکل و 25 درصد - 35 درصد مس و مقادیر جزئی از سایر موارد را داراست و در صنایع شیمیایی، به عنوان فلز مقاوم در برابر اسید به کار می‌رود.

کاپرونیکل^۴ آلیاژی شامل 90 درصد نیکل و 10 درصد مس می‌باشد که در برابر خوردگی مقاوم است.

از آنجا که صفحات مبدل بسیار نازک هستند، معمولاً از آلیاژهای درجه یک و

1 Inconel

2 Hastelloy

3 Monel

4 Cupronickel

مرغوب ساخته می‌شوند تا خوردگی و سایش کم شود. مثلاً با آنکه لوله‌هایی از جنس فولاد زنگ نزن 316 ممکن است، برای کنترل سیالات اسیدی در مبدل‌های پوسته و لوله مناسب باشند، اما برای ساخت صفحات باید از آلیاژهای حاوی 4.20 Cr, 25 Ni, 2 Cu MO یا شاید اینکولی 825 استفاده کرد [1, 5] تولیدکننده‌های گوناگون برابر طرح ویژه خود، کاربرد و الزامات هزینه‌ای، جنس خاصی را برای صفحه انتخاب می‌کنند. توضیحات خلاصه‌ای در مورد ویژگی‌های مواد به کاررفته در بعضی از صفحات در زیر ارائه می‌شود:

فولاد زنگ نزن AISI304: شاید این ماده یکی از ارزان‌ترین نوع فولادهای زنگ نزن استنیتی باشد که در برابر سیالات آلی و غیرآلی از خود مقاومت خوبی در برابر خوردگی نمایش می‌دهد، اما مقاومت آن در برابر اسیدسولفوریک و هیدروکلریک ضعیف است و موقع وجود کلرید در آب، خوردگی حفره‌ای در آن دیده می‌شود.

فولاد زنگ نزن AISI316: نوعی فولاد زنگ‌نزن مرغوب است که حاوی 2.5 درصد مولیبدن است و به همین دلیل در برابر خوردگی حفره‌ای ناشی از کلرید مقاومت می‌کند. می‌توان در این مبدل از غلظت‌های کم اسید سولفوریک (10-15 درصد) استفاده کرد، هر چند که مقدار دقیق این غلظت به دمای کاری آن بستگی دارد.

فولاد زنگ نزن آلیاژ 254 SMO: این نوع فولاد زنگ نزن در مقایسه با AISI 316 حاوی مولیبدن بیشتری (6 درصد) است و بنابراین در برابر خوردگی حفره‌ای ناشی از کلرید بهتر مقاومت می‌کند. از این آلیاژ معمولاً در جاهایی استفاده می‌شود که اسیدهای ضعیف در مبدل به کار می‌روند و یا محتوی کلرید بالا می‌باشند، اما نباید در این مبدل‌ها از آب دریا یا آب شور استفاده کرد (به ویژه در کاربردهای دریایی).

آلیاژ C-276: یک آلیاژ گرانیوم نیکل است که تقریباً در برابر یون‌های کلرید در سطح PH پایین مقاوم است. این آلیاژ بخوبی قابلیت مقاومت به خوردگی در برابر انواع اسیدها دارد و معمولاً برای کنترل اسیدسولفوریک، هیدروکلریک و اسیدهای فسفریک خیس با غلظت‌ها و دماهای مختلف استفاده می‌شود.

تیتانیوم: این فلز ماده‌ای عالی برای مبدل‌هایی است که با محلول‌های کلریدی و آب شور یا آب دریا سر و کار دارند. از این فلز معمولاً در ساخت مبدل‌هایی استفاده می‌شود که جریان آب دریا تا دمای 100°C - 120°C در آنها جاری می‌شود. با آنکه بندرت

استفاده از این فلز به صرفه است، اما هنگام استفاده از آن باید خالص‌ترین آن را در ساخت میدل‌های صفحه‌ای به کار برد.

تیتانیوم پایدار شده با پالادیوم: این آلیاژ تیتانیوم با اضافه شدن پالادیوم بسیار گرانبه (0.15 درصد)، مقاومت به خوردگی بسیار بالایی پیدا می‌کند و گزینه‌ای مناسب برای ساخت میدل صفحه‌ای جهت کار در محیط‌های مختلفی است که به این ویژگی نیاز دارند. تیتانیوم پایدار شده با پالادیوم در محلول‌های کلرید و آب دریا در دمای بالای 100°C - 120°C بیشترین کاربرد را دارد که در آن تیتانیوم خالص قادر به مقاومت نیست و معمولاً در آن خوردگی حفره‌ای ایجاد می‌شود.

معمولاً جنس صفحات مبدل با توجه به شرایط کاری و عملیاتی نوع سیالات سرد و گرم و با توجه به مشکلات خوردگی تعیین می‌شود.

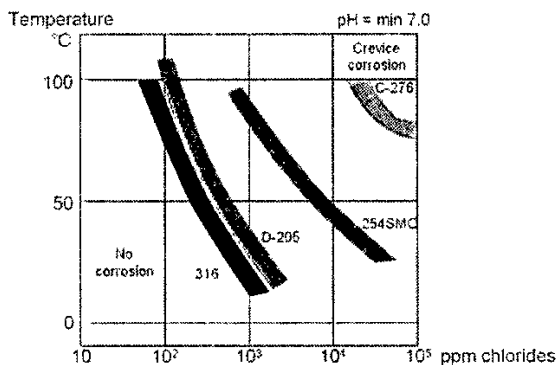
در جدول (۳-۴) مواد مورد استفاده در صفحات به همراه مقایسه نسبی قیمت آنها و کاربرد و ضخامت متداول ورق‌ها ارایه شده است.

جدول ۳-۴: مقایسه جنس صفحات [۵]

ماده	قیمت نسبی	ضخامت	کاربرد
استنلس استیل AISI 304	100 درصد	معمولاً بین 0.4 mm – 0.5 mm	جهت سیال آب-آب تمیز، آب برج خنک کن (آبی که املاح معدنی آن گرفته شده است)
استنلس استیل AISI 316	115 درصد	همیشه بین 0.5 mm – 0.6 mm	جهت سیال آب-آب مثلاً تا 250 ppm کلراید در دمای 50°C ، محلول سولفات مس در تصفیه الکترونیکی
استنلس استیل آلیاژ یا 254 High-alloy stainless steel 254 SMO	250 درصد	0.6 mm	جهت سیال آب-آب با کلراید بالا مثلاً تا 6000 ppm کلراید در دمای 50°C
تیتانیوم Titanium	300 درصد	معمولاً بین 0.5 mm و 0.6 mm البته بیشتر و کمتر هم دارد	جهت آب دریا با 3.5 درصد کلراید تا 130°C در آب دریا، آب شور، محلول‌های کلراید در شرایط بیشتر از 200 ppm، محلول‌های نمک کلرزده شده، محلول‌های هیپوکلریک،
آلیاژ نیکل Alloy C-276	600 درصد	معمولاً 0.6 mm	جهت اسید سولفوریک تا 90°C ، محلول‌های قلیایی (50 درصد تا 70 درصد)

اسید سولفوریک و نیتریک رقیق غلظت 10 درصد و دمای $>70^{\circ}\text{C}$	معمولاً بین 0.5mm- 0.6 mm	300 درصد	آلیاژ تیتانیوم- پالادیوم
بخارات آب یا گاز هیدروژن حاوی قطرات جیوه و اسید در دمای $>70^{\circ}\text{C}$	معمولاً 0.6 mm	600 درصد	اینکولوی 825

به دلیل آن که صفحات مبدل بسیار نازک هستند، معمولاً از آلیاژهای درجه یک و مرغوب ساخته می‌شوند تا خوردگی و سایش در آنها کم شود. مثلاً آنکه لوله‌هایی از جنس فولاد زنگ نزن استنلس استیل 904L نیز می‌تواند به عنوان جایگزین 254 SMO در بعضی موارد مطرح گردد. هم‌چنین برای هیدرواکسید سدیم^۱ معمولاً از ورق‌های نیکل Nickel 200 / 201 می‌توان استفاده کرد، هم‌چنین در حالتی که سیال مورد نظر آب دریا در دمای بالا (بیشتر از 130°C) باشد و یا برای آب نمک کلراید غلیظ در دمای بالا اصولاً از ورق‌های تیتانیوم پالادیوم^۲ استفاده می‌شود. برای اسیدسولفوریک نیز از آلیاژ D-205 استفاده می‌گردد. جهت خنک‌کاری گاز هیدروژن، اشباع شده با بخار آب و جیوه حاصله در واحدهای الکترولیزی نیز از صفحات اینکولوی استفاده می‌شود. شکل (۴-۲۰) مقاومت این نوع صفحات را در دماهای مختلف در مقابل کلراید در آب سرد نشان می‌دهد.



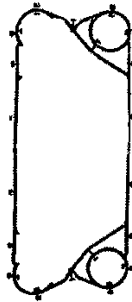
شکل ۴-۲۰: مقاومت صفحات مختلف در مقابل میزان کلراید

1 Sodium hydroxide

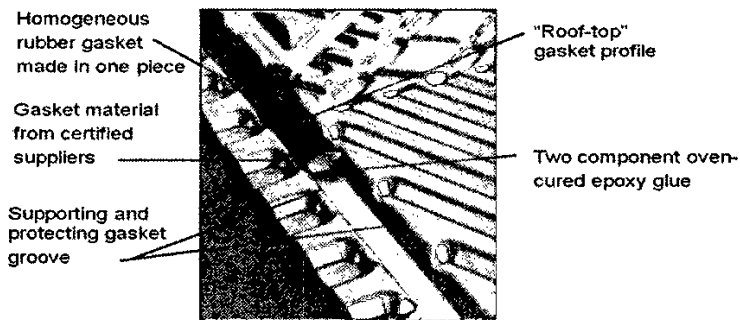
2 Titanium palladium

۴-۵- واشرها

به منظور آب‌بندی مبدل‌های صفحه‌ای از واشرهایی^۱ با آرایش خاص همان گونه که در شکل (۴-۲۱) نشان داده، استفاده می‌کنیم. واشرها در درون شیارهایی، که به همین منظور در صفحات تعبیه شده است، قرار گرفته تا بین صفحات فاصله لازم جهت عبور سیال را فراهم کنند، شکل (۴-۲۲).



شکل ۴-۲۱: واشرهای مورد استفاده در صفحات



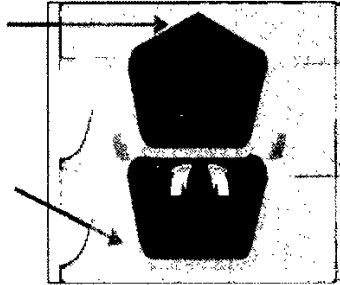
Long lasting gaskets!

شکل ۴-۲۲: نحوه قرار گرفتن واشرها در صفحات

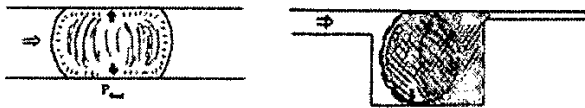
اثر فشاری که به دو طرف واشرها از طریق صفحات جانبی اعمال می‌گردد، از نشت سیال به خارج جلوگیری می‌شود. پس در عمل همان‌گونه که در شکل (۴-۲۳) نشان داده شده عملکرد صحیح واشرها ارتباط مستقیمی با فشار اعمال شده بر آنها دارد؛ در

¹ Gasket

صورتی که در اورینگ‌ها سیستم بدون هیچ‌گونه فشاری آب بندی می‌شود شکل (۴-۲۴).

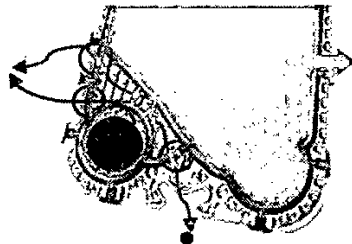


شکل ۴-۲۳: نحوه آب بندی واشرها در مبدل



شکل ۴-۲۴: مقایسه سیستم آب بندی اورینگ‌ها با واشر مبدل‌ها

در اطراف دهانه ورودی و خروجی سیال به منظور جلوگیری از اختلاط دو سیال سرد و گرم، چنانکه در شکل (۴-۲۵) نشان داده شده، از سیستم دو واشری^۲ استفاده شده است و با تعبیه گذرهایی در روی بخش‌های خروجی واشر که در شکل با فلش نشان داده شده است، می‌توان از نشت سیال در مبدل مطلع شد.



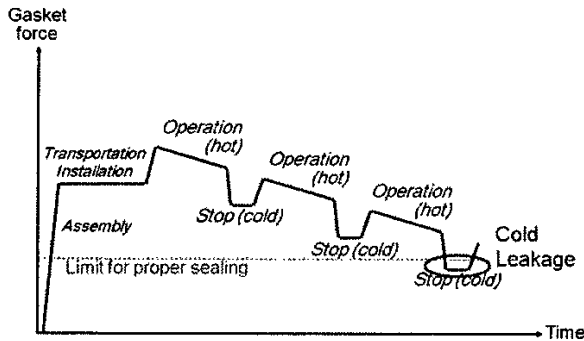
شکل ۴-۲۵: سیستم دو واشری در دهانه‌های ورودی و خروجی

1 O-ring

2 Double Gasket

واشرها باید علاوه بر آب‌بندی مبدل‌ها، دارای خاصیت مقاومت شیمیایی و حرارتی مناسب در مقابل سیالات مختلف باشد و خواص و شکل خود را طی یک دوره زمانی معین حفظ کنند، بدین منظور واشرها را معمولاً از موادی مثل لاستیک‌ها^۱، PTFE، گرافیت^۲ و تفلون^۳ می‌سازند، در این میان لاستیک‌ها کاربرد بیشتری نسبت به بقیه دارند.

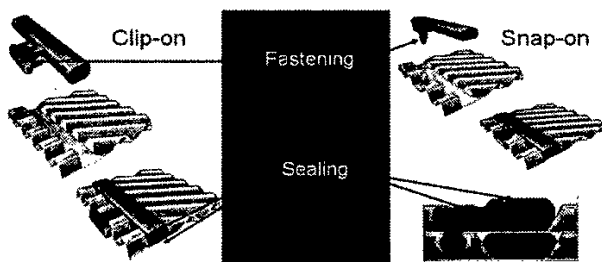
لاستیک‌ها از نوع مواد ویسکوالاستیک^۴ می‌باشند، (موادی که دارای خواص متغیر نسبت به زمان است) و عمر مفید آنها محدود می‌باشد، زیرا به صورت شیمیایی با زمان تغییر می‌کنند (مثلاً اکسیدایز و دی پلیمرایز می‌شوند). لاستیک‌ها می‌توانند مایعات و گازها را جذب کنند که این خود باعث متورم شدن، نرم شدن و ایجاد ترک روی آنها می‌شود، بنابراین انتخاب نوع ماده استفاده شده در لاستیک واشرها بستگی به نوع سیال مورد استفاده و شرایط کاری مبدل حرارتی دارد. برای نمونه پدیده نشت سرد^۵ که ناشی از متوقف شدن‌های مکرر عملکرد مبدل است، می‌تواند بر اثر مرور زمان همان گونه که در شکل (۴-۲۶) نشان داده شده به وقوع بپیوندد، که ناشی از کاهش نیروی آب‌بندی واشرها در مدت زمان خاصی است.



شکل ۴-۲۶: پدیده نشت سرد در مبدل‌ها

- 1 Rubbers
- 2 Graphite
- 3 Teflon
- 4 Visco-Elastic material
- 5 Cold leakage

از سوی دیگر واشرها به دو صورت مختلف روی صفحات نصب می‌شوند، نوع اول واشر چسبی است که در آن واشرهای لاستیکی با چسب روی صفحات محکم می‌شوند و نوع دوم واشر بدون چسب^۱ می‌باشد که برابر شکل (۴-۲۷) در چند نقطه از صفحه به دو شکل قفلی^۲ و گیره‌ای^۳ بر روی صفحه محکم می‌شوند. نوع قفلی آن در مبدل‌های قدیمی استفاده شده و از نوع گیره‌ای آن کاربرد بیشتری دارد. چسب‌دار بودن یا بدون چسب بودن واشرها را معمولاً طراحان مبدل تعیین می‌کنند، ولی به طور کلی در مبدل‌هایی با صفحات بزرگ، مبدل‌هایی که زیاد باز و بسته می‌شوند، در کاربردهای فشار بالا یا هنگامی که به علت واکنش‌های شیمیایی امکان تورم واشر وجود دارد، واشرهای چسبی ترجیح داده می‌شوند.



شکل ۴-۲۷: نحوه نصب واشرهای بدون چسب بر روی صفحات

۴-۵-۱- الاستومر (لاستیک)

تاریخچه پیدایش لاستیک همزمان با سفرهای اکتشافی کریستف کلمپ است. او در گزارشی از درختی که شیره مخصوصی دارد و بومیان آن را درخت گریان یا کائوچو^۴ می‌نامند، سخن می‌گوید. کلمپ در سفرهایش به آمریکای مرکزی و جنوبی مشاهده کرد که تنها وسیله بازی گروهی بومیان آن منطقه توپی است که از شیره درخت گریان تهیه می‌شود. برابر گزارش‌های ماری دلا^۵ در سال ۱۷۴۰ سرخ‌پوستان آن منطقه با

1 Glue-free gasket

2 Snap-on

3 Clip-on

4 Caoutchouc

5 Marie dela

شیره درخت کائوچو^۱ کفش‌های ضد آب و قمعمه‌های آب تهیه می‌کرده‌اند. در آغاز استفاده مستقیم از شیره درخت کائوچو به دلیل چسبندگی آن بسیار مشکل بود؛ این مشکل در سال ۱۸۳۹ با ابداع روش ولگانیزاسیون^۲ به دست گو‌دیر^۳ از میان رفت و استفاده صنعتی کائوچو یا لاستیک از آن زمان آغاز شد.

منبع اصلی ماده لاستیک درختان کائوچو بودند که در آن زمان تنها در آمریکا یافت می‌شدند؛ تقاضای روزافزون این ماده، انگلیسی‌ها و هلندی‌ها را به کاشت درختان کائوچو در مستعمراتشان واداشت، با وجود این، هنوز تقاضای کائوچو بیش از عرضه آن به بازار بود. ساخت لاستیک مصنوعی در این شرایط مورد توجه قرار گرفت و علم شیمی وارد عمل شد. ابتدا در جنگ جهانی اول در آلمان لاستیکی به طریق مصنوعی ساخته شد که زیاد مورد استقبال قرار نگرفت. ساخت مصنوعی لاستیک سال‌ها بعد با تهیه لاستیک بونا^۴ با نام تجاری SBR در آلمان آغاز شد. از این تاریخ به بعد دیگر ساخت لاستیک هدف اصلی شیمیدان‌ها نبود، بلکه ویژگی‌های خاصی در آن به عنوان هدف اصلی مورد نظر قرار گرفت. در زمان جنگ جهانی دوم شیمیدان‌های آمریکایی موفق شدند ویژگی‌های لاستیک طبیعی را نیز بر اساس نیاز تغییر دهند.

بونا که بیشتر همراه با بوتادین رابر^۵ می‌باشد بیشترین مصرف را در میان لاستیک‌های مصنوعی جهت تولید تایر وسایل نقلیه داشته و دارد.

لاستیک به عنوان ماده‌ای که خاصیت کشسانی (الاستیک) دارد، تعریف می‌شود. در واقع مهمترین خاصیت لاستیک کش آمدن می‌باشد، چنانچه گاهی تا شصت برابر طول اولیه خود کش می‌آید. لاستیک‌ها خاصیت فنری نیز دارند و به عنوان میراکننده نیز به کار می‌روند. لاستیک فاسد شدنی نیست و به طور عادی نیاز به روغن کاری ندارد. سختی آن با گذشت زمان افزایش می‌یابد به طوری که پس از ولگانیزه کردن لاستیک (ترکیب کردن با گوگرد) پس از چند ساعت در دمای معمولی سختی آن بشدت افزایش می‌یابد.

1 Latex

2 Volganization

3 Goodyear

4 Buna

5 Butadin Rubber



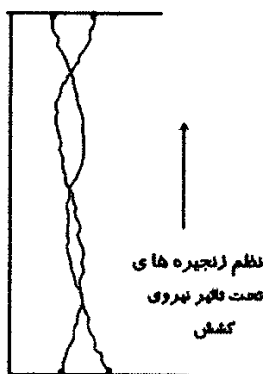
از لاستیک‌ها به عنوان مستهلک کننده صوت استفاده می‌شود، زیرا سرعت حرکت صوت در لاستیک $1/30$ حرکت آن در فولاد است، از این رو کامپوزیت‌های لاستیکی و فلزی به طور قابل توجهی از انتقال صوت جلوگیری می‌کنند. بسیاری از لاستیک‌ها بر اثر ارتباط با سیالاتی چون نفت خام دچار تورم و کاهش مقاومت تنشی و کاهش قابلیت ازدیاد طول می‌شود. بعضی از لاستیک‌ها تابع درجه حرارت می‌باشند، به طوری که در درجه حرارت‌های پایین سختی لاستیک افزایش و حالت ارتجاعی لاستیک کاهش می‌یابد.

۴-۵-۲- ساختار مولکولی و ویژگی‌های لاستیک‌ها (الاستومرها)

مهمترین ویژگی لاستیک‌ها بالا بودن قابلیت انعطافی یا الاستیسیته آنها می‌باشد. لاستیک‌ها این ویژگی را دارند که بر اثر نیروی خارجی تغییر شکل دهنده و بی‌درنگ پس از حذف نیروی خارجی باردیگر به شکل اولیه برگردند. ازدیاد طول لاستیک‌ها در مقایسه با فلزات حدود ۴۰۰ برابر بیشتر می‌باشد.

ساختار کریستالی فلزات از اتم‌های منظم با فاصله‌ای که کمترین اندازه انرژی را دارند، تشکیل شده‌اند. هرگاه فاصله اتم‌ها از یکدیگر به وسیله اثر یک نیروی خارجی تغییر نماید (بیشتر یا کمتر گردد)، انرژی سیستم نیز تغییر می‌کند. با حذف تأثیر نیروی خارجی، انرژی افزوده در سیستم تخلیه شده و اتم‌ها دوباره وضعیت اولیه خود را به دست خواهند آورد؛ از این رو فلزات دارای خاصیت ارتجاعی نسبتاً کمی می‌باشند.

اما لاستیک‌ها برخلاف فلزات دارای ساختمان اتمی منظم نمی‌باشند، بلکه مانند پلیمرهای دیگر از یک سری ماکرومولکول‌های خطی یا زنجیره‌های مولکولی تشکیل شده‌اند؛ این زنجیره‌ها در حالت ساکن در هم بوده و در برخی نقاط با یکدیگر گره‌هایی ایجاد می‌کنند. هنگامی که این زنجیره‌های گره‌خورده تحت تأثیر نیروی خارجی قرار گیرند، در جهت نیروی وارده میان مولکول‌ها نظم برقرار می‌شود و فاصله آخرین مولکول می‌تواند تا چند صد برابر افزایش یابد (شکل ۴-۲۸).



شکل ۴-۲۸: وضعیت ماکرومولکول‌های لاستیک تحت تأثیر نیروی کشش (شماتیک)

با حذف نیروی خارجی نظم ایجاد شده در میان مولکول‌ها بی‌درنگ از میان می‌رود و آنها باردیگر به حالت بی‌نظمی اولیه خود برمی‌گردند. از آنجا که ماکرومولکول‌های کشیده شده و تا حدودی نظم یافته نمی‌توانند نظم به وجود آمده را در خود نگه دارند و بلافاصله پس از حذف نیروی خارجی به سوی بی‌نظمی میل می‌کنند، خاصیت الاستیکی لاستیک‌ها را آنتروپی الاستیسیته می‌نامند.

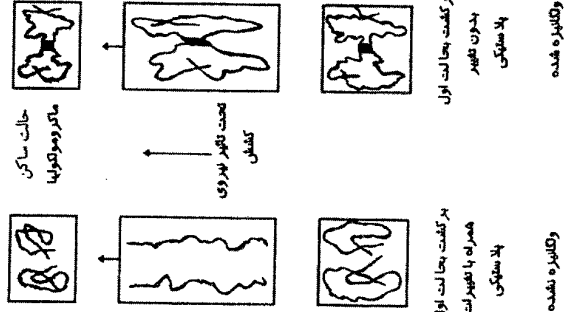
یکی از ویژگی‌های خاص ترموپلاست‌ها در میان خانواده پلیمرها استفاده بسیار زیاد آنها به عنوان ماده اولیه می‌باشد. از نظر تئوری می‌توان ترموپلاست‌ها را تا بی‌نهایت ذوب و دیگر بار قالب‌گیری کرد.

آزاد بودن ماکرومولکول‌ها و ناچیز بودن نیروی بین مولکولی در بافت ساختمانی ترموپلاست‌ها باعث می‌شود که مولکول‌های خطی بتوانند در دمای نرم‌شوندگی‌شان به راحتی روی یکدیگر بلغزند.

مولکول‌های اولیه لاستیک نیز در دمای مناسب دارای چنین ویژگی‌های لغزندگی

می‌باشند، بنابراین برای اینکه ویژگی‌های لاستیکی لاستیک تثبیت شود، باید توسط عملیات دیگری از نوزیدن ماکرومولکول‌ها (روی یکدیگر جلوگیری کرد، این عمل را "واگائیزاسیون لاستیک" می‌نامند.

افزایش گوگرد در دمای 180-220 به ماده اولیه باعث می‌شود که بین زنجیره‌های آزاد لاستیک، پلی از گوگرد برقرار گردد. این پلی گوگردی عامل تشکیل و اتصال پیوندهای عرضی بین زنجیره‌های مولکولی بوده به طوری که با افزایش گرما، زنجیره‌ها دیگر قادر به نوزیدن نمی‌باشند. موفقیت و نقش این پلی‌های گوگردی در شکل (۴-۲۹) نمایش داده شده است.



شکل ۴-۲۹: وضعیت ماکرومولکول‌های لاستیک واگائیزه شده و واگائیزه نشده در حالت کشش و آزاد

هرگاه مولکول‌های لاستیک مدت زیادی تحت تأثیر نیرو یا نیروهای خارجی قرار گیرند و یا اینکه نیروی وارده زیاد باشد، مولکول‌ها علاوه بر تغییرات الاستیکی دارای یک نوع تغییرات پلاستیکی جزئی خواهند شد. صرف‌نظر از دمای محیط و مدت زمان نیروی وارده تغییرات پلاستیکی لاستیک‌ها بیشتر تابعی از عوامل زیر می‌باشند:

- تغییرات در نظم و ترتیب داخلی گره‌های مولکولی بر اثر نیروی وارده خارجی
 - از بین رفتن پل‌های گوگردی قوی و یا جابه‌جایی آنها با پل‌های گوگردی ضعیف
 - لغزش زنجیره‌های مولکولی از سطح مواد فعال پرکننده
 - ترکیبات لاستیک
- تغییرات پلاستیکی باعث می‌شود که قطعه لاستیکی دیگر وضعیت و ابعاد اولیه را دارا نباشد. رفتار پلیمری لاستیک بیشتر به رفتار سیالاتی با ویسکوزیته بالا شباهت دارد، از این رو مواد لاستیکی به نام مواد ویسکوالاستیک^۱ نیز شناخته می‌شود.

۴-۵-۳- افزودنی‌های لاستیک

- جهت افزایش موارد کاربردی لاستیک‌ها لازم است به ۱۰۰ درصد ماده اولیه لاستیک مواد دیگری به شرح زیر اضافه گردد:
- ۱- مواد پرکننده^۲ تا ۵۰ درصد
 - ۲- مواد نرم‌کننده^۳ تا ۲۰ درصد
 - ۳- مواد ضد کهنگی^۴ تا ۲ درصد
 - ۴- کمک‌کننده‌های فرآیند^۳ درصد الی ۱۰ درصد
 - ۵- شتاب‌دهنده‌های فرآیند تا ۱/۵ درصد
 - ۶- پخت‌کننده‌ها^۵ تا ۲ درصد که معمولاً گوگرد^۶ یا پراکسیدها^۷ هستند.

1 Visco-elastic

2 Filler

3 Processing aids

4 Anti degradants

5 Curing agents

6 Sulphur

7 Peroxides

۷- فعال‌کننده‌ها تا ۵ درصد و سرانجام رنگ‌ها

ویژگی‌های یک قطعه لاستیکی بیش از هر چیزی بستگی به نوع ماده اولیه لاستیک دارد. ویژگی‌های مکانیکی مانند مقاومت در برابر پارگی و ضربه‌پذیری و یا ویژگی‌های شیمیایی مانند مقاومت در برابر روغن‌ها و چربی‌ها و مواد سوختی و یا حلال‌های شیمیایی.

۴-۵-۳-۱- مواد پرکننده

قبل از هر چیز دوده^۱ به اشکال گوناگون (فعال و غیرفعال) به عنوان پرکننده اصلی و سپس سیلیکات‌های طبیعی^۲ و یا مصنوعی از مهمترین پرکننده‌های لاستیک می‌باشند. دوده فعال باعث افزایش مقاومت لاستیک در برابر سایش‌های مکانیکی می‌شود. بزرگی و کوچکی، ریزی و درشتی دانه‌های دوده اثر مستقیم روی خصوصیات مکانیکی لاستیک می‌گذارد و عموماً با افزایش قطر دانه‌ی دوده، ویژگی‌هایی مانند سختی و استقامت لاستیک کمتر می‌شود ولی ضربه‌پذیری الاستیکی و سایش مکانیکی قطعه لاستیکی افزایش می‌یابد.

پرکننده‌های غیرفعال موادی هستند که فقط نقش پرکنندگی دارند و روی خصوصیات مکانیکی قطعه لاستیکی تاثیر نمی‌گذارند، مانند پرک‌های روشن سیلیکات‌ها.

۴-۵-۳-۲- نرم‌کننده‌ها

روغن‌های معدنی، روغن‌های شیمیایی با ویسکوزیته‌های مختلف، نرم‌کننده‌های لاستیک می‌باشند، درصد کمی از این نرم‌کننده‌ها باعث سهولت در فرایند تولید نیز می‌شوند، ولی از سوی دیگر عامل کاهش برخی ویژگی‌های مکانیکی مانند سختی هم می‌شوند. در صورت زیادبودن درصد نرم‌کننده در مواد تشکیل‌دهنده لاستیک^۳ (کامپاند لاستیک) و استفاده قطعه در دمای بالا، روغن موجود در لاستیک تبخیر گشته، باعث

1 Carbon black

2 Silica

3 Rubber compound

تردی و تغییر رنگ سطح لاستیک و نیز تغییرات ویژگی‌های الکتریکی قطعه لاستیکی می‌شود.

۴-۵-۳- مواد ضد کهنگی

برای اینکه قطعه لاستیکی در برابر عوامل جوی مانند گرما، اکسیژن و نیز تاثیرات اوزون مقاوم باشد، لازم است در ترکیب کامپاند آن از فنول‌ها^۱ و یا آمین‌ها^۲ استفاده گردد.

مقاومت در برابر تاثیرات اوزون یکی از پارامترهای اصلی و معیاری برای ارزیابی رفتار لاستیک در شرایط جوی می‌باشد. لاستیک کشیده شده در شرایط جوی ترک‌هایی برمی‌دارد که عمود بر جهت کشش می‌باشند. این ترک‌ها را ترک‌های اوزون می‌نامند. پیش‌فرض برای تشکیل ترک‌های اوزونی آزمایشی است که در آن لاستیک مورد نظر باید نیرو یا ازدیاد طول مشخصی را تحمل کند. ازدیاد طولی که لاستیک در شرایط آزمایشی فوق پیدا می‌کند، ازدیاد طول بحرانی نامیده می‌شوند، بنابراین هر چه ازدیاد طول بحرانی لاستیک بیشتر باشد به همان نسبت رفتار لاستیک در شرایط جوی بهتر خواهد بود. ازدیاد طول بحرانی 20 درصد تا 25 درصد به عنوان مرزی قابل قبول برای نمونه‌های لاستیک در نظر گرفته می‌شود.

شناخته شده‌ترین الاستومرها در برابر شرایط جوی و حملات اوزون عبارتند از لاستیک کلروپرن با نام تجاری نئوپرن و یا بای‌پرن. از پارامترهای دیگری که برای تشخیص رفتاری لاستیک مورد استفاده قرار می‌گیرد، شوک یا ضربه الاستیکی می‌باشد. در اهداف صنعتی لاستیک‌هایی که مقادیر این آزمایش آنها بیش از 50 درصد باشد، قابل پذیرش بوده، مانند لاستیک طبیعی که بهترین آنها در مقابل برخی لاستیک‌های مصنوعی مانند لاستیک بوتیل و یا لاستیک اکریلات می‌باشد.

سختی لاستیک نیز از معیارهای مهم دیگری است که در انتخاب و ارزیابی لاستیک‌ها استفاده فراوانی دارد. به طور کلی تهیه لاستیک‌های نرمی که سختی آنها با

1 Phenols

2 Amines

Shore A کمتر از 45-50 باشد، یا ممکن نیست و یا اینکه خیلی سخت می‌باشد. رایج‌ترین معیار سنجش سختی در لاستیک‌ها سختی سنجی Shore A می‌باشد، بنابراین یک قاعده کلی شاخص اندازه‌گیری در این روش از صفر تا صد می‌باشد که صفر برای مواد بشدت نرم و صد برای مواد بشدت سخت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴-۵-۳-۴- کمک‌کننده‌های فرآیند

برای یک‌نواختی در تقسیم‌پرکننده‌ها و نیز سهولت در امر تولید قطعات لاستیکی به وسیله روش‌های اکستروژنی، کلندرینگ، پرس و یا ماشین‌های تزریقی از مواد کمکی فرآیند مانند صمغ‌ها، صابون‌ها و یا فاکتایس^۱ استفاده می‌شود. افزودن درصد کمی لاستیک کهنه با مواد در فرآیند تولید نیز باعث سهولت در امر تولید می‌شود، ولی کیفیت ویژگی‌های مکانیکی محصول نهایی را کاهش می‌دهد.

۴-۵-۳-۵- شتاب‌دهنده‌ها، فعال‌کننده‌ها و رنگ‌ها

شتاب‌دهنده‌ها موادی هستند که زمان ولگانیزاسیون را مناسب با روش تولیدی مورد نظر کاهش می‌دهند. استفاده از شتاب‌دهنده‌ها باید حتماً متناسب با روش تولید باشد مثلاً زمان ولگانیزاسیون در تولید قطعاتی به روش تزریقی باید به مراتب طولانی‌تر از زمان ولگانیزاسیون به روش اکستروژن باشد.

مواد دیگری که در تنظیمات زمان ولگانیزاسیون از اهمیت برخوردارند، فعال‌کننده‌ها^۲ یا اکتیویتورها می‌باشند، مانند اکسید روی و یا اسیدهای استرین^۳. کامپاندهای بدون دوده لاستیک را می‌توان با هر رنگی ولگانیزه کرد، ولی لاستیک‌های رنگی به مرور تغییر رنگ می‌دهد و زرد رنگ می‌شود.

۴-۵-۳-۶- گوگرد یا ماده ولگانیز کننده

گوگرد تا 2 درصد عامل اصلی ولگانیزاسیون لاستیک می‌باشد. از افزودن گوگرد

1 Faktise

2 Activators

3 Stearine

8 درصد تا 10 درصد محصولی چرم‌گونه با ویژگی‌های ضعیف حاصل می‌شود و در صورت افزایش گوگرد تا 30 درصد لاستیک سخت تولید می‌شود.

۴-۵-۴- انواع لاستیک‌ها:

۴-۵-۴-۱- لاستیک پلی اورتان^۱

ساختمان شیمیایی لاستیک‌های پلی‌اورتان مانند پلی‌استراورتان (AU) و پلی اتر اورتان (EU) بیشتر شبیه ساختمان شیمیایی ترموپلاست‌هاست و با همان روش معمول فرآیند ترموپلاست‌ها می‌توان قطعات صنعتی این لاستیک را نیز تولید کرد. هر گاه این لاستیک‌ها با موادی چون پراکسید (Peroxid) مشبک گردند، می‌توانند ضمن افزایش ویژگی‌های مکانیکی و الاستیکی بهترین مقاومت را در برابر خوردگی از خود نشان دهند. مقاومت گرمایی لاستیک‌های EU و AU از دمای 70°C تا 80°C درجه قابل قبول می‌باشد و در برابر روغن‌های داغ مقاومت چندانی ندارد.

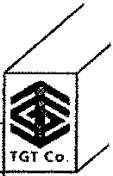
موارد استفاده لاستیک‌های AU و EU به دلیل ویژگی خاص آنها در برابر خوردگی بیشتر جهت تولید انواع غلتک‌ها و یا ساخت قطعات جهت جلوگیری از لرزش و ضربه می‌باشد. هم چنین از این نوع لاستیک در ساخت تایرهای توپر، ساخت پاشنه و تخت کفش، روکش پارچه و سیم و کابل استفاده می‌شود.

۴-۵-۴-۲- لاستیک طبیعی^۲ NR

لاستیک طبیعی و لگانیزه شده بالاترین مقاومت دینامیکی-الاستیکی و پارگی را در میان لاستیک‌های موجود دارد. لاستیک طبیعی ضمن مقاومت بالا در برابر خوردگی دارای تغییرات پلاستیکی بسیار ناچیز می‌باشد. مقاومت گرمایی لاستیک طبیعی 80°C و در کوتاه مدت تا 120°C قابل استفاده می‌باشد. یکی از ویژگی‌های ضعیف لاستیک طبیعی مقاومت کم آن در برابر عوامل جوی و بویژه تأثیرات اوزون می‌باشد که آن را نیز می‌توان به راحتی با افزودن مواد محافظ اوزون تقویت کرد. لاستیک طبیعی و لگانیزه شده مقاومت مناسبی در برابر آب، اسیدها، بازها، الکل‌ها و روغن ترمزهای گلایکولی،

1 Polyurethane (AU and EU)

2 Natural Rubber (NR)



دارد ولی در برابر روغن‌های معدنی- چربی‌ها و مواد سوختی تأثیرپذیر بوده و مقاومت ندارد.

این لاستیک بیشتر جهت ساخت تایر ماشین‌های سواری، فنرهای لاستیکی، قطعات بلبلیرنگ‌ها، واشرهاى آب بندى، شیلنگ‌های لاستیکی، پروفیل‌ها، تسمه‌ها و نیز لوازم پزشکی اتاق عمل مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴-۵-۳- لاستیک ایزوپرن^۱ IR

این لاستیک با ویژگی‌هایی بسیار مشابه به لاستیک طبیعی به روش‌های صنعتی تولید می‌شود و بیشتر برای اختلاط با لاستیک طبیعی به منظور بهبود برخی ویژگی‌های خاص آن مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما می‌توان از این لاستیک در تایر اتومبیل‌ها و نوار نقاله‌ها نیز استفاده کرد.

۴-۵-۴- لاستیک استیرن-بوتادین^۲

لاستیک استیرن- بوتادین با نام تجاری بونا^۳ مهمترین لاستیک مصنوعی تولیدی می‌باشد که از نظر ارزش تولید در مقایسه با لاستیک طبیعی یک لاستیک ارزان به شمار می‌رود. ویژگی الاستیکی SBR نسبت به NR کمتر بوده و هنگام تنش‌های مکانیکی، گرمایی زیاد در محصول انباشته می‌شود و نسبت به کائوچوی طبیعی خواص ضعیف‌تری دارد. SBR دارای مقاومت خوردگی بالا بوده و تا 100°C گرما را تحمل می‌کند. موارد استفاده‌های گوناگون از لاستیک SBR به غیر از محیط‌های روغنی باعث افزایش تولید این لاستیک شده است. از لاستیک SBR نیز مانند لاستیک طبیعی برای ساخت تایر ماشین‌های سواری، شیلنگ، پروفیل، تسمه نقاله، زوار شیشه ماشین‌های سواری و نیز قطعاتی مقاوم در برابر خوردگی استفاده می‌شود.

1 Isopren Rubber (IR)

2 Styrene-Butadiene Rubber (SBR)

3 Buna

۴-۵-۴-۵- لاستیک بوتیل IIR^۱ (لاستیک ایزوبوتیلن- ایزوپرن)

خصوصیات بارز لاستیک بوتیل قابلیت ایزولاسیونی بالا و ویژگی‌های مقاومتی بسیار خوب در مقابل عوامل جوی و بویژه مقاومت در مقابل نفوذ گاز می‌باشد. در مقابل خصوصیات الاستیکی آن کم و تمایل آن به تغییرات ماندگاری در شکل (پلاستیکی) نسبت به لاستیک‌های دیگر بیشتر می‌باشد.

این لاستیک در برابر روغن ترمزهای گلایکولی، اسیدها، بازها، روغن‌های نسوز هیدرولیکی و آستون مقاوم بوده ولی در محیط روغن‌های معدنی، چربی‌ها و مواد سوختی مقاوم نمی‌باشد.

به دلیل ویژگی خاص ایزولاسیونی IIR از این لاستیک بیشتر برای ساخت روکش کابل‌ها، پوشش پشت بام، ایزولاسیون داخلی تونل‌ها، لوله‌های آب داغ و نیز ساخت المنت‌های کاهش صدا استفاده می‌شود.

۴-۵-۴-۶- لاستیک اتیلن- پروپیلن^۲ EPM-EPDM

لاستیک EPDM با نام تجاری ویستالین^۳ نیز مانند لاستیک IIR از مقاومت خوبی در برابر عوامل جوی و تاثیرات اوزونی برخوردار بوده و دارای ویژگی‌های الکتریکی بالایی می‌باشد.

قیمت مناسب، مقاومت خوب گرمایی (120°C تا 140°C) و ویژگی الاستیکی مانند SBR در کنار مقاومت جوی مناسب استفاده از این لاستیک را افزایش داده است.

EPDM از نظر ساختمان شیمیایی، ترکیبی کاملاً اشباع شده است و می‌تواند فقط با پراکسیدها به حالت مشبکی درآید. EPM شبکه‌ای شده، دارای مقاومت گرمایی بالا و تغییرات پلاستیکی بسیار ناچیز می‌باشد. تولید قطعاتی از این لاستیک به دلیل پیچیدگی عمل ولگانیزاسیون آن همیشه با دشواری انجام می‌گیرد. در مقابل لاستیک EPDM با یک عنصر (Diene) اضافی و یک پیوند دوتایی در زنجیره جانبی‌اش براحتی می‌تواند در مجاورت شتاب‌دهنده مناسب با گوگرد ترکیب شود و عمل ولگانیزاسیون را

1 Butyl Rubber (IIR)

2 Ethylene- Propylene- Diene Rubber

3 Vistalon

انجام دهد. ویژگی‌های لاستیک EPDM تا حدودی مانند لاستیک‌های IIR و SBR بوده با این تفاوت که در برابر آب داغ و اسیدها نسبت به آنها بسیار مقاومتر است. از این لاستیک بیشتر برای ساخت واشرهای آب‌بندی، ماشین‌های لباسشویی و ظرفشویی، واشرهای مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، شیلنگ‌های آب سرد، زوار شیشه ماشین‌های سنگین و نیز واشرهای مقاوم در مقابل عوامل جوی استفاده می‌شود، از مهمترین ایرادهای این لاستیک می‌توان به مقاومت ضعیف آن در برابر روغن، بنزین و حلال‌های هیدروکربنی، چسبندگی ضعیف به الیاف و فلزات و خاصیت ضعیف آپازات کردن (وصله‌پذیری) ضعیف آن اشاره کرد.

۴-۵-۴-۷- لاستیک کربوتادین^۱ CR

لاستیک CR با نام تجاری نئوپرن^۲ میانگین ویژگی‌های همه لاستیک‌ها را مانند مقاومت نسبی در برابر عوامل جوی (در صورت استفاده از مواد محافظ اوزون)، مقاومت نسبی کوتاه مدت در برابر روغن‌ها و دمایی تا 120°C در خود گرد آورده است. لاستیک CR که به آن لاستیک پلی‌کلروپرن نیز گفته می‌شود، در دمایی کمتر از 0°C تا حدودی حالت کریستالینه پیدا می‌کند و سخت می‌شود که این سختی با قرارگیری لاستیک در دمای مناسب (بالای صفر) دیگر بار از بین می‌رود. از مهمترین ایرادهای این لاستیک می‌توان به مقاومت کم آن در برابر سرما، حلال‌های اکسیژن دار و همچنین انعطاف‌پذیری کم در دماهای پایین و سرانجام قیمت بالای آن اشاره کرد. این لاستیک بیشتر برای تولید واشرهای آب‌بندی جهت استفاده در محیط‌های باز و یا تسمه نقاله دستگاه‌های سنگ‌کوبی، ایزوله کردن پشت بام، لاستیک دور شیشه، تسمه‌های V شکل و نیز روکش کابل کاربرد دارد.

۴-۵-۴-۸- لاستیک اکریل نیتریل- بوتادین^۳ NBR

NBR لاستیکی است با ویژگی‌های مناسب برای محیط‌های چرب و مواد سوختی. از

1 Chlorobutadiene Rubber (CR)

2 Neopren

3 Acrylonitrile- Butadiene Rubber (NBR)

ویژگی‌های دیگر این لاستیک مقاومت مکانیکی و خورندگی و گرمایی مناسب آن (تا 120°C) و نیز پایداری آن در شرایط جوی در برابر تأثیرات اوزون می‌باشد. با افزایش درصد اکریل نیتریل مقاومت لاستیک در مقابل روغن‌ها و چربی‌ها افزایش می‌یابد و به موازات آن انعطاف‌پذیری آن در دمای زیر صفر کاهش پیدا می‌کند. NBR در برابر بازها، اسیدهای با غلظت متوسط و مایعات هیدرولیکی نسوز مقاومت مناسبی دارد، ولی در برابر حلال‌های پلار و اکسیژن‌دار و نیز روغن ترمزهای گلیکولی، بنزول و استرن مقاومتی ندارد. لاستیک NBR عبارت است از ساخت واشر جهت محور و شافت‌ها، واشرهای آب‌بندی مصرفی در محیط‌های چرب، روغن شیلنگ بنزین، اورینگ و شیلنگ هیدرولیک، شیلنگ روغن و گازوئیل، چرم مصنوعی و سرانجام برای ساخت واشر مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای کاربرد بیشتری دارد.

۴-۵-۴-۹- لاستیک پارل^۱

لاستیک مصنوعی، لاستیکی تقریباً جدیدی است که ویژگی‌های خوب مکانیکی و الاستیکی لاستیک طبیعی (NBR) و مقاومت اوزونی مناسب EPDM را در خود گرد آورده است. این لاستیک بدون استفاده از نرم‌کننده‌ها ویژگی الاستیکی خوبی تا دمای 50°C از خود نشان می‌دهد. مقاومت این لاستیک در برابر روغن‌ها، چربی‌ها و مواد سوختی تا حدودی نسبت به لاستیک CR کمتر است. یکی از موارد مصرف این لاستیک ساخت قطعات جهت استفاده در موتورهای داغ می‌باشد.

۴-۵-۴-۱۰- لاستیک هیپالون^۲ یا کلروسولفونیتد- پلی اتیلن^۳

ویژگی‌های لاستیک هیپالون همانند لاستیک CR (پلی کلروپرن) می‌باشد. برتری این لاستیک نسبت به لاستیک CR مقاومت بسیار مناسب آن در شرایط جوی (تأثیرات اوزون) و نیز مواد اکسید کننده شیمیایی می‌باشد. مقاومت هیپالون در محیط‌های باز این امکان را فراهم می‌سازد که بتوان از این ماده قطعات بی‌رنگ لاستیکی برای استفاده

1 Poly- Propylenoxid- Allylglycidyl ether

2 Hypalon

3 Chloro sulphonated-Polyethylene

در محیط‌های باز ساخت.

از امتیازات دیگر لاستیک هیپالون ویژگی خوب الکتریکی آن می‌باشد که از آن در ساخت قطعات الکتریکی و نیز روکش کردن کابل‌های برق و کابل کشی در محیط‌های باز، استفاده می‌شود؛ همچنین از این لاستیک در ساخت لباس ضدآتش، شیلنگ ضداسید، واشرها و پوشش داخلی مخازن شیمیایی استفاده می‌شود.

هیپالون در برابر اسیدها، بازها، نمک‌ها، عناصر اکسیدکننده (مثلاً برای ایزولاسیون و پوشش مخازن بزرگ جهت نگهداری در محیط‌های باز) از خود مقاومت نشان می‌دهد و در برابر چربی‌ها و روغن‌ها نیز از مقاومت نسبی برخوردار است. گفتنی است این لاستیک در برابر مواد سوختی غیرمقاوم است. از مهمترین محدودیت‌های این نوع لاستیک می‌توان به انعطاف‌پذیری اندک در دمای پایین و مقاومت کم در برابر حلال‌های اکسیژن‌دار و هیدروکربن‌های آروماتیک اشاره کرد.

۴-۵-۱۱- لاستیک اتیلن-وینیل استات EVA یا لوپرن^۱

این لاستیک از ویژگی‌های بسیار جالبی در برابر عوامل جوی، نور، اثرات اوزون و تثبیت رنگ‌ها برخوردار است؛ و همچنین دارای مقاومت بالایی در برابر هوای داغ و بخارات داغ تا 130°C می‌باشد.

گسیختگی در حالت گرمی و پیچیدگی عمل ولگانیزاسیون آن که به سختی امکان‌پذیر است، از ایرادهای این لاستیک برای ساخت قطعات می‌باشد. این لاستیک برای ساخت مصنوعات لاستیکی در بخش جراحی، روکش کابل، لاستیکی کردن مصنوعات نساجی بیشتر استفاده می‌شود و بندرت در قطعات فنی به کار می‌رود.

۴-۵-۱۲- لاستیک اکریلات^۲ ACM

ACM لاستیک گرانی با مقاومت مناسب در برابر تأثیرات اوزون و روغن‌های داغ تا 150°C به مدت طولانی می‌باشد. رفتار این لاستیک در دمای زیر صفر برای همه اهداف پاسخگو نیست. از این لاستیک به علت گرانی قیمت و نیز مشکلات فرآیندی آن تنها در

1 Levapren

2 Acrylate Rubber (ACM)

مواردی استفاده می‌شود که لاستیک NBR (اکریل نیتریل-بوتادین) پاسخگوی ویژگی‌های خاص گرمایی و ضد روغنی قطعه مورد نیاز نباشد و دیگر آنکه استفاده از لاستیک‌های گرانتتری مانند لاستیک‌های سیلیکونی و یا فلئوری برای رسیدن به ویژگی‌های خاص قطعه مورد نظر ضروری نباشد.

لاستیک ACM در برابر چربی‌ها و روغن‌ها (معدنی و هیدرولیکی) مقاوم، ولی در برابر حلال‌ها آروماتیک و بخارهای آب (بالتر از 130°C) ناپایدار می‌باشد. از موارد استفاده عمومی این لاستیک باید به ساخت و اش‌رهای آب بندی برای محورها و روغن‌های داغ اشاره کرد.

۴-۵-۴-۱۳- لاستیک اپی کلر هیدرین^۱ CO,ECO

ویژگی‌های این لاستیک شباهت زیادی به لاستیک اکریلات دارد و نوع CO آن از مقاومت گرمایی خوبی برخوردار است. بهترین ویژگی برای لاستیک‌های فوق از اختلاط آنها به دست می‌آید. از اختلاط CO و ECO لاستیکی ساخته می‌شود که در برابر حرارت، سرما، مواد سوختی و روغن‌ها مقاومت بهتری از نوع مجزای آنها دارد. از این لاستیک بیشتر برای ساخت و اش‌ر برای محورها استفاده می‌شود.

۴-۵-۴-۱۴- لاستیک‌های سیلیکونی^۲ PVMQ و VMQ

تفاوت این لاستیک با انواع دیگر در این است که ترکیب ساختمانی زنجیره آن به جای کربن از سیلیکون و اکسیژن تشکیل شده است، این ساختار شیمیایی عامل تجمع بهترین ویژگی‌های لاستیک‌های سیلیکونی می‌باشند.

مقاومت خوب سرمایی-گرمایی از 100°C تا 200°C بدون تغییرات محسوس و مقاومت الکتریکی بالا در کنار پایداری بسیار خوب در برابر شرایط جوی و بویژه تأثیرات اوزونی با درصد کمی تغییرات پلاستیکی از ویژگی‌های خاص لاستیک‌های سیلیکونی می‌باشد.

1 Ethylene Oxide Epichlorohydrine Rubber (ECO)

2 Silicone Rubber (PMQ and PVMQ)

لاستیک‌های سیلیکونی در برابر استرن، اترن، بازها، اسیدها، موادسوختی، آب و بخارات در دمای بالا ناپایدار بوده، ولی در مقابل روغن‌ها و چربی‌ها در کوتاه مدت مقاوم است. این نوع لاستیک معمولاً استحکام بالایی ندارد، ولی قسمت عمده استحکام می‌تواند در دماهای خیلی بالا باقی بماند.

از لاستیک‌های سیلیکونی برای ساخت قطعاتی با ویژگی‌های خاص استفاده می‌شود که به برخی از آنها اشاره می‌شود:

واشرهای آب‌بندی برای ماشین‌های سنگین، هواپیما، با خصوصیات خاص گرمایی و یا الکتریکی مثل واشر ترانسفورماتورها، فیش شمع‌های ماشین و غیره، تسمه نقاله برای مواد داغ و یا مواد چسبناک، روکش کابل‌های هواپیما و کشتی، شیلنگ‌های انتقال خون و نیز ساخت چرخ دنده‌های انتقال نوار کاست و موارد مشابه. به دلیل آنکه سیلیکون‌ها نسبتاً گرانبقیمت می‌باشند، لذا از این لاستیک در مواردی استفاده می‌شود که به مقاومت زیادی در مقابل دماهای خیلی بالا مورد نیاز باشد.

۴-۵-۴-۱۵- لاستیک فلوروکربن^۱(وایتون^۲) FKM

لاستیک گرانبقیمت فلوروکربن با نام تجاری وایتون با ویژگی‌های منحصر به فرد گرمایی، قابل استفاده در دمای 200°C تا 250°C می‌باشد. همچنین این لاستیک در برابر روغن‌ها، چربی‌ها و مواد سوختی و بسیاری از حلال‌های شیمیایی مانند اسیدها، بازهای تری (Tri) و (Per) در درجه حرارت‌های پایین و نیز روغن‌های نسوز هیدرولیکی مقاومت بسیار خوبی دارد، ولی در برابر حلال‌هایی با پلاریتی بالا مثل آستون پایدار نمی‌باشد. مقاومت گرمایی آن تقریباً به خوبی سیلیکون‌هاست و مقاومت آن در برابر روغن داغ از آکریلیک‌ها بیشتر است. و خواص مقاومت جوی آن نسبت به لاستیک کلروبوئادین (CR) برتر است. قرار دادن فلوروکربن‌ها در معرض یک پخت دو مرحله‌ای، بهترین توازن خواص را به وجود می‌آورد. از آنجایی که این لاستیک بسیار گرانبقیمت است، لاستیک فلئور برای ساخت قطعاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد که به پایداری عالی تحت شرایط عملکردی سخت نیازمند است. در مواردی نیز که لازم است، سختی

1 Fluoro-carbon Rubber

2 Viton

آنها در شرایط کار بیش از 70 Shore A باشد، مانند واشر محورها، اورینگ‌ها و آبندهای پمپ‌ها و کمپرسورها از این لاستیک استفاده می‌شود. همچنین از این نوع لاستیک در مبدل‌های صفحه‌ای استفاده می‌شود که در فرآیند فرآوری نفت خام و مشتقات نفتی بکار می‌رود.

ویژگی‌های انواع مختلف لاستیک‌های توضیح داده شده در این فصل در جدول ۴-۴
ارایه شده است.



جدول ۳-۴ ویژگی‌های انواع لاستیک‌ها

ملاحظات	مقاوم در برابر					استفاده در دمای ارتقا		استحکام کششی MPa		ناستی و گانیزه نشده (g/cm ³)	علامت اختصاری	انواع لاستیک‌ها	
								از پاره شدن و گانیزه %	تغیوت کننده‌ها				تغیوت کننده‌ها
۱- بسیار عالی ۲- خیلی خوب ۳- مناسب ۴- کم-باین ۵- غیرمقاوم- ضعیف	3	6	5	4	60	-60	600	28	22	0.93	NR	لاستیک طبیس	
	3	6	5	4	60	-60	500	24	1	0.93	IR	لاستیک ایزوپرن	
	3	6	4	3	70	-30	500	25	5	0.94	SBR	لاستیک استیرن-بوتادین	
	3	6	5	3	90	-60	450	18	2	0.94	BR	لاستیک ۱،۴-پن، بوتادین	
	2	6	5	2	120	-30	600	21	5	0.93	HR	لاستیک بوتیل	
	2	6	5	1	120	-50	500	25	4	0.86	EPDM-EPDM	لاستیک اتیلن-پروپیلن-ترپایمر	
	5	5	4	1	120	-30	500	18	5	0.98	EVA	لاستیک اتیلن-وینیل استات یا واپرن	
	2	4	2	2	90	-30	400	25	11	1.25	CR	لاستیک کلروپن	
	4	3	1	2	110	-20	450	25	6	1.0	NBR	لاستیک نیتریل بوتادین	
	3	2	1	2	100	-30	450	30	20	1.25	EU, AU	لاستیک پلی اورتان	
	3	1	1	2	120	-50	300	8	2	1.35	SR	لاستیک پلی سولفید	
	3	5	1	1	140	-10	250	12	4	1.10	ACM	لاستیک اکریل-استر	
	3	5	1	2	150	-40	250	15	5	1.27-1.36	CO, ECO	لاستیک این کتر هیدرین	
	1	3	1	2	190	-40	450	15	2	1.85	FKM	لاستیک فلوروکربن/واپرن	
	5	3	1	1	200	-80	250	10	1	1.25	PVMO-VMQ	لاستیک سیلیکون	

۴-۵-۵- روش‌های تولید قطعات لاستیکی

جهت تولید یک قطعه لاستیکی ابتدا باید ماده اولیه لاستیک با درصد مشخصی از افزودنی‌ها تحت شرایط کنترل شده کاملاً با یکدیگر مخلوط گردد، به صورتی که در انتهای پروسس اختلاط، کامپاند تهیه شده آماده ولگانیزه شدن باشد.

ولگانیزاسیون کامپاند زمانی اتفاق می‌افتد یا به عبارتی زمانی باید عمل ولگانیزاسیون روی دهد که آمیزه فرم‌دهی شده باشد تا بتواند شکل نهایی محصول را پس از مراحل تولید به طور ثابت نگه دارد و قادر باشد نیروی خارجی وارده (فشار یا کشش) را تحمل کند و تغییرات ماندگاری پلاستیکی^۱ آن پس از حذف نیروی خارجی صفر و یا خیلی کم و در حد صفر باشد. فرآیند تولید یک قطعه لاستیکی به طور خلاصه از این مراحل تشکیل شده است:

۱- ساخت آمیزه لاستیکی (کامپاند) بر اساس دستورعمل و شرایط خاص فرآیند (پخت اولیه)

۲- فرم‌دهی آمیزه توسط وسایل و دستگاه‌های مخصوص

۳- اجرای عمل ولگانیزاسیون یا پخت ثانویه (مشبکی شدن)

۴-۵-۵-۱- ساخت منقطع کامپاند لاستیک

برای تهیه کامپاندهای لاستیکی بیشتر از غلتک‌ها^۲ (جدول ۴-۵) و یا در صورت بالا بودن حجم کامپاند از مخلوط‌کننده‌های داخلی به نام بن بوری^۳ استفاده می‌شود.

جدول ۴-۵: مشخصات غلتک‌های تهیه کامپاند (آمیزه) لاستیک

مورد استفاده	طول غلتک (mm)	قطر غلتک (mm)
آزمایشگاهی	200-300	80-100
تولیدی	700-2000	700

تهیه کامپاند لاستیک به دلیل بالا بودن ویسکوزیته ماده اولیه آن همیشه یکی از مشکل‌ترین مراحل فرآیند تولید قطعات لاستیکی می‌باشد، از این رو برای پایین آوردن

1 Plastic Deformation

2 Roller Machine

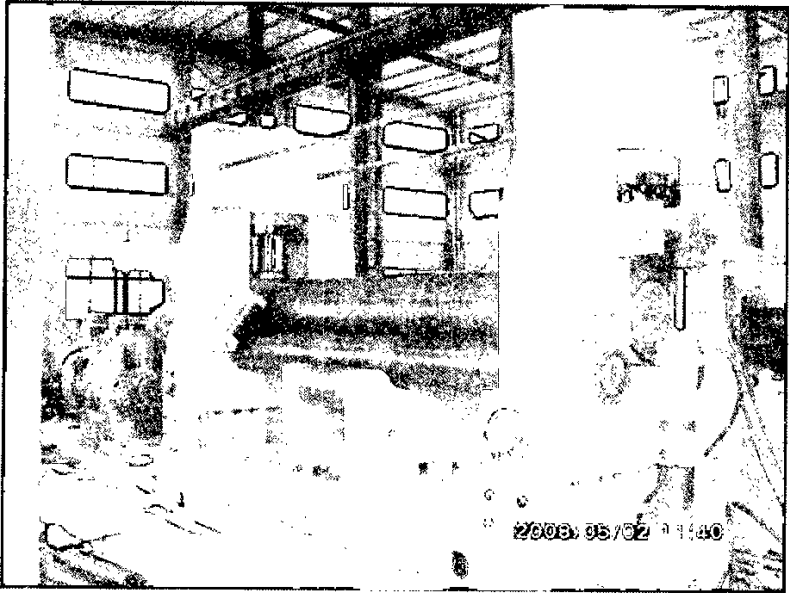
3 Banbury Machine (Rubber Mixer Machine)

ویسکوزیته ماده اولیه به نیروهای برشی زیادی نیاز می‌باشد. در برخی مواقع برای تسهیل در امر نرم‌شوندگی ماده اولیه در کنار نیروهای برشی از مواد شیمیایی نیز استفاده می‌شود. ویسکوزیته ماده اولیه لاستیک باید آن قدر کاهش پیدا کند تا آمادگی کامل جهت جذب مواد افزودنی را به دست آورد.

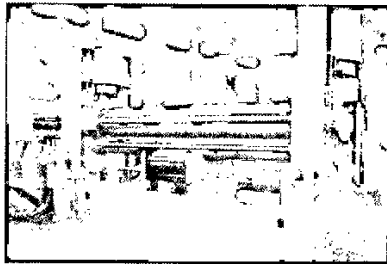
نیروهای برشی وارده بر لاستیک، انرژی اصطکاکی زیادی ایجاد می‌کند. تبدیل انرژی اصطکاکی مکانیکی به انرژی حرارتی در لاستیک باعث بالا رفتن دما می‌شود که همین امر باعث نرم شدن ماده اولیه می‌شود، ولی ماده اولیه تا حد مشخصی می‌تواند گرما را تحمل کند و از آنجا که انتقال حرارت در لاستیک هم مانند سایر پلیمرها خیلی ضعیف و به کندی انجام می‌گیرد، در صورت افزایش دمای ماده، تخریب شیمیایی لاستیک آغاز می‌شود، از این رو برای جلوگیری از تخریب شیمیایی لازم است که فرآیند نرم‌شوندگی یا کاهش ویسکوزیته لاستیک چندین بار متوالی قطع گردد تا گرمای اضافه‌ی نهفته در آن تخلیه شود.

۴-۵-۳- ساخت کامپاند به وسیله غلتک‌ها

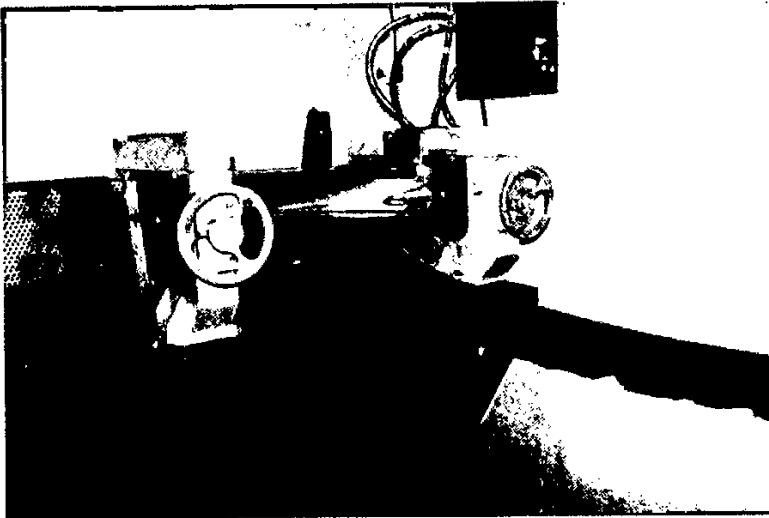
در این روش نیروی برشی لازم برای کاهش ویسکوزیته توسط غلتک‌ها بر ماده اولیه وارد می‌شود. غلتک‌ها (مجهز به سیستم گرمایش و سرمایش) با سرعت دورانی متفاوت در جهت مخالف یکدیگر حرکت می‌کنند. ماده اولیه آن قدر بین فواصل تنظیم شده غلتک‌ها نورد می‌شود و آن قدر حرارت اضافی آن توسط غلتک جلویی تخلیه می‌شود تا ماده با حرارتی یکنواخت آماده‌ی جذب افزودنی‌های دیگر گردد. افزودن مواد گوناگون دیگر همیشه طبق دستورعمل و در فواصل زمانی از پیش تعیین شده انجام می‌گیرد. با هر بار اضافه کردن مواد افزودنی نورد لاستیک میان غلتک‌ها ادامه می‌یابد تا در نهایت کامپاندی یکنواخت از نظر رنگ و درجه حرارت به دست آید. شکل (۴-۳۰)



شکل ۴-۳۰ (A): دستگاه غلتک جهت آماده‌سازی آمیزه لاستیک



شکل ۴-۳۰ (B): دستگاه غلتک جهت آماده‌سازی آمیزه لاستیک

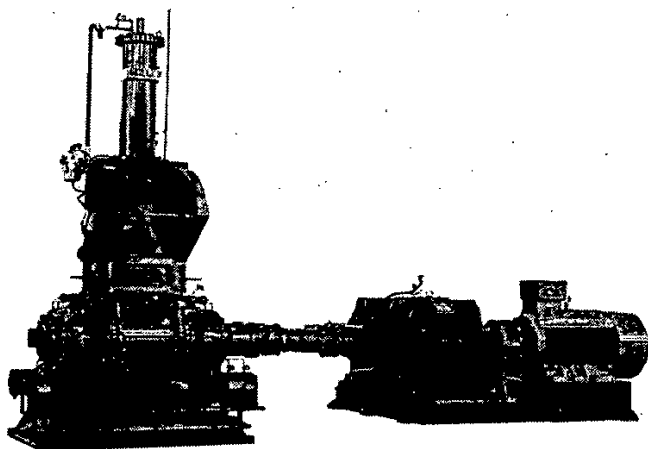


شکل ۴-۳ (C): دستگاه غلتک جهت آماده‌سازی آمیزه لاستیک (متعلق به شرکت طاهای قالب توس)

۴-۵-۳- ساخت کامپاند به وسیله‌ی دستگاه بن بوری

هرگاه ساخت کامپاند بیشتری مورد نظر باشد، دیگر به کارگیری غلتک‌ها جهت آماده‌سازی لاستیک اقتصادی نبوده و بهتر است از دستگاه بن بوری که از گنجایش بیشتری برای مواد برخوردار است، استفاده گردد.

هرگاه مواد شتاب‌دهنده کامپاند که در این دستگاه تهیه می‌شود کم باشد، فرآیند ساخت کامپاند پایان می‌یابد (پروسس یک مرحله‌ای) و می‌توان دستگاه بن بوری را تخلیه و کامپاند ساخته شده را ولگانیزه کرد، در غیر این صورت آمیزه هنوز آماده ولگانیزاسیون نبوده و لازم است پس از تخلیه دستگاه، بار دیگر روی غلتک‌ها کشیده شود. ایجاد نیروهای برشی در دستگاه بن بوری به وسیله بیلچه‌هایی انجام می‌گیرد که با حرکت دورانی غیر همسو از یک طرف ماده را میان پره‌های خود کشیده و از طرف دیگر آن را فشرده می‌سازد. شکل (۴-۳۱)



شکل ۴-۳۱ (A): دستگاه بن بوری برای تهیه آمیزه‌های لاستیک



شکل ۴-۳۱ (B): دستگاه بن بوری برای تهیه آمیزه‌های لاستیک (متعلق به شرکت طاه‌ها قالب توس)

گرمایی که در نتیجه این نیروهای برشی به وجود می‌آید به دلیل پایین بودن توان خنک‌سازی دستگاه تخلیه نمی‌شود و بیشتر آن در ماده و در درون محفظه دستگاه باقی می‌ماند که گاهی تا 150°C و یا بیشتر افزایش می‌یابد. افزایش دمای ماده و تخلیه نکردن آن در دستگاه بن بوری باعث می‌شود که برای جلوگیری از تخریب شیمیایی

ماده بویژه موادی که به گرما حساسیت دارند، پروسس آماده‌سازی چندین بار قطع گردد (آمیزه تخلیه، خنک و دوباره به دستگاه تغذیه شود).

افزایش مواد افزودنی به لاستیک در دستگاه بن بوری نیز مانند دستگاه غلتک‌ها باید طبق دستورعمل و در زمان‌های مشخص و از پیش تعیین شده انجام شود. برای نمونه، دستورعمل ساخت کامپاند NBR بر اساس استاندارد DIN در جدول ۴-۶ آورده شده است.

جدول ۴-۶: دستورعمل وزنی ساخت کامپاند NBR

درصد وزنی مواد	دستورعمل	
100 درصد (1Kg)	Perbunan N 2807 NS	ماده اولیه لاستیک
5 درصد	ZNO	اکسید فعال روی
0.5 درصد	HS	ماده محافظ در برابر شرایط جوی
70 درصد	FEF- N 550 (corax)	دوده از نوع
3 درصد	BC 40	پرکادوکس از نوع

اختلاط اولیه این آمیزه توسط دستگاه بن بوری به گنجایش ۲ لیتر و سرعت دورانی برابر با ۴۵ دور در دقیقه انجام می‌گیرد. توضیح تغذیه بن بوری با مواد افزودنی بر اساس برنامه زمان‌بندی شده در جدول (۴-۷) ارایه شده است.

جدول ۴-۷: مرحله اول برنامه زمان‌بندی ساخت کامپاند NBR در دستگاه بن بوری

ردیف	زمان افزودن مواد	نوع مواد
۱	در شروع عملیات	تغذیه بن بوری با مواد پروبونا
۲	پس از یک دقیقه	افزودن اکسید روی
۳	پس از سه دقیقه	مواد محافظ جوی و دوده
۴	پس از شش دقیقه	اتمام مرحله اولیه اختلاط و تخلیه دستگاه

برای اینکه آمیزه فوق قابلیت و لگانیزه شدن پیدا کند، باید آن را در مرحله دوم برنامه زمان‌بندی شده روی دستگاه غلتک کشید؛ برای این آمیزه دستگاهی با مشخصات ارایه شده در جدول (۴-۸) در نظر گرفته شده است.

جدول ۴-۸: مشخصات غلتک مورد استفاده جهت تولید NBR

350mm	طول غلتک‌ها:	150mm	قطر غلتک‌ها:
سرعت غلتک دوم با دور کمتر ۱۰ دور در دقیقه		1.4	اختلاف سرعت غلتک‌ها:

برنامه زمان‌بندی شده جهت استفاده از این غلتک در جدول (۴-۹) ارایه شده است.

جدول ۴-۹: برنامه زمان‌بندی شده برای مرحله دوم عملیات روی آمیزه به کمک دستگاه غلتک

ردیف	زمان عملیات	نوع عملیات اجرایی
۱	شروع عملیات	تنظیم فاصله غلتک‌ها به اندازه 1.4 mm
۲	پس از یک دقیقه	تغذیه غلتک‌ها با آمیزه-ورقه کردن آن روی غلتک اول - برش کناره‌های ورقه آمیزه و برگردان کردن آنها در وسط غلتک‌ها
۳	پس از ده دقیقه	تغذیه فاصله غلتک‌ها به اندازه 0.8 mm - تغذیه غلتک‌ها با آمیزه - و 8 bar تکرار عملیات ورقه ای کردن-برش کردن و برگرداندن
۴	پس از ۱۶ دقیقه	اتمام مرحله دوم عملیات و جمع‌آوری آمیزه از روی غلتک‌ها

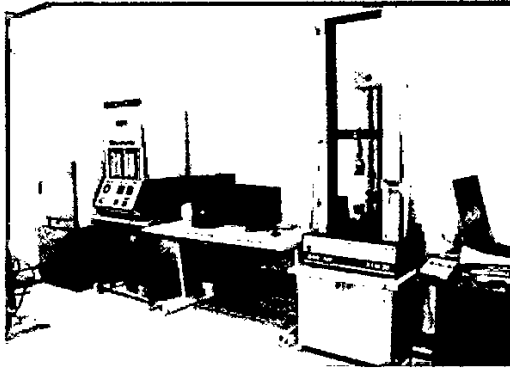
آمیزه جمع‌آوری برای خنک شدن و تبادل گرمایی با محیط باید به مدت ۱۲ تا ۲۴ ساعت در محل مناسبی نگهداری گردد و سپس بار دیگر طبق برنامه سوم مطابق جدول (۴-۱۰) روی غلتک‌ها کشیده شود.

جدول ۴-۱۰: مرحله سوم آماده‌سازی آمیزه جهت ولگانیزاسیون به کمک دستگاه غلتک

ردیف	زمان عملیات	نوع عملیات اجرایی
۱	شروع عملیات	تنظیم فاصله غلتک به اندازه 1.4 mm و تغذیه غلتک‌ها با آمیزه
۲	پس از ۱ دقیقه	ورقه کردن - برش کناره‌های ورقه آمیزه و برگردان کردن آنها
۳	پس از ۳ دقیقه	افزودن ماده پرکادوکس به آمیزه
۴	پس از ۵ دقیقه	برش کناره‌ها و برگردان کردن (اختلاط دستی روی غلتک‌ها)
۵	پس از ۱۰ دقیقه	تنظیم فاصله غلتک به اندازه 0.8 mm - ورقه کردن آمیزه-پیش‌کناره‌ها و برگردان کردن آمیزه
۶	پس از ۱۵ دقیقه	تنظیم فاصله غلتک به اندازه 2.5 mm - تکرار برش و برگردان کردن کناره‌ها و در نهایت رول کردن آمیزه به ضخامت 2.5 mm
۷	-----	اجرای عملیات ولگانیزاسیون در دمای ۱۶۰ درجه و به مدت ۲۰ دقیقه

جهت بررسی کیفی محصول، ابتدا ورق‌هایی به ضخامت 2.2 mm از کامپاند فوق در شرایط مشخصی پرس می‌شود، سپس ورق‌های تولید شده تا زمان آزمایش درون پاکت‌هایی از PE (به دلیل محافظت از تأثیرات جوی) در جایی خنک و به دور از تابش نور نگهداری می‌شود.

بر اساس استاندارد DIN آلمان آزمایش‌ها و محدوده نتایج پیشنهادی مطابق جدول (۴-۱۱) برای کامپاندهای لاستیکی لازم است. شکل (۴-۳۲) نمونه‌ای از تجهیزات آزمایشگاهی تست کامپند را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳۲: تجهیزات آزمایشگاهی تست کامپند

جدول ۴-۱۱: آزمایش‌های مربوط به بررسی کیفی محصولات لاستیکی بر اساس استاندارد DIN

نتایج قابل قبول	شرایط آزمایش	نوع آزمایش
21-25 Mpa	میله طبق DIN 53504 به ضخامت 2 mm	آزمایش کشش
200%-240%	DIN 53504	ازدیاد طول تا پارگی
78-83	DIN53505	تعمین سختی با shore A
1.25±0.02	DIN53550	جرم مخصوص
14%-18%	DIN 53517 به مدت ۲۲ ساعت در دمای 100°C	مانده تغییرات بر اثر فشار
نیرو - 15% طول - 10% 10±	نگهداری نمونه به مدت ۲۲ ساعت در دمای 100°C - انجام آزمایش کشش و ازدیاد طول - مقایسه کاهش مقدار حاصله با نتایج اولیه از آزمایش کشش	آزمایش کهنگی یا کهنگی گرمایی
افزایش وزن نمونه تا حدود 24.5- 27.5%	طبق DIN 53521 نگهداری نمونه به مدت ۲۲ ساعت در محلولی متشکل از 70 درصد تری متیل پنتان و 30 درصد تولنول در دمای محیط	افزایش وزن

۴-۵-۴- ساخت پیوسته کامپاند

اولین قدم برای ساخت آمیزه‌های لاستیکی به طور پیوسته استفاده از دستگاه مخلوط کن انتقالی^۱ است که توسط ماشین کوبنده یا متراکم کننده به طور پیوسته تغذیه می‌شود. این دستگاه مجهز به یک کلگی غلتک ماندی^۲ می‌باشد که آمیزه به صورت ورقی از میان دهانه‌ی آن بیرون آمده و در انتها روی غلتک دیگری پچیده می‌شود و یا با اتصال آن به یک دستگاه گرانول ساز- آمیزه را به صورت دانه در می‌آورد. بیشترین جهش برای یک مرحله‌ای کردن ساخت آمیزه‌هایی که مستعد ولگانیزاسیون باشند (بدون نیاز به مراحل تخلیه، خنک سازی و...) استفاده از پودر لاستیک یا لاستیک پودری می‌باشد.

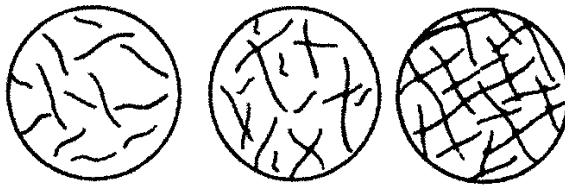
برای تهیه‌ی پودر لاستیک ابتدا کلیه عناصر تشکیل دهنده در سیستم کاملاً خشک با یکدیگر مخلوط شده و سپس آمیزه لاستیکی توسط اکسترودری^۳ خمیرکننده به صورت خمیری آماده جهت تولید پروفیل - شیلنگ و یا نوار لاستیکی به دست می‌آید. آمیزه لاستیکی تهیه شده توسط غلتک‌ها و یا اکسترودرهای خمیری کننده باید مراحل فرآیندی دیگری را طی کنند تا بتوانند به صورت یک قطعه تمام شده درآیند. این مراحل عبارتند از فرم‌دهی آمیزه و سپس اجرای عملیات ولگانیزاسیون. فرم‌دهی و ولگانیزاسیون آمیزه می‌تواند مانند تولید قطعات لاستیکی پرس و دستگاه تزریقی بلافاصله پس از هم انجام گیرد و یا اینکه هر مرحله به صورت جداگانه و در مقاطع زمانی مختلف به انجام رسد.

در مجموع فرآیند تولید قطعات لاستیکی را می‌توان از ابتدا تا انتها در مراحل زیر خلاصه کرد:

- ۱- ساخت کامپاند آمیزه پلیمری با ماکرومولکول‌های خطی
- ۲- فرم‌دهی آمیزه در قالب
- ۳- اجرای عملیات ولگانیزاسیون برای مشکی شدن ماکرومولکول‌ها و تثبیت شکل قطعه.

1 Transfer Mixer
2 Roll- Die- head
3 Extruder

هنگام ولگانیزاسیون آمیزه ممکن است که همه ماکرومولکول‌ها نتوانند در عملیات شرکت کنند و در پایان به صورت زنجیره‌هایی منفرد خطی در قطعه باقی بمانند، وجود این گونه زنجیره‌های آزاد خطی در قطعه تمام شده عاملی برای افزایش ویژگی الاستیکی محصول می‌باشند. اندازه، شکل و نوع قرارگیری زنجیره‌ها در ساختار مولکولی یک پلیمر همیشه مهمترین عامل تعیین‌کننده برای ویژگی‌های منحصر به فرد آن پلیمر به شمار می‌رود. تقسیم‌بندی پلیمرها به گروه‌های تفکیک شده ترموپلاست، ترموالاستها و ترموست‌ها نیز بیانگر همین مطلب می‌باشد شکل (۴-۳۳).



ترموست‌ها (شبکه‌ای فوی) ترموالاست‌ها (شبکه‌ای ضعیف) ترموپلاست‌ها (آزاد- بدون شبکه)

شکل ۴-۳۳: ساختار ماکرومولکول‌ها در پلیمرهای گوناگون

اساساً فرم‌دهی پلیمرها فقط در حالتی می‌تواند روی دهد که زنجیره‌های مولکولی آزاد و قابلیت لغزیدن و جابه‌جایی داشته باشند. این قانون همه گروه‌های پلیمری یعنی ترموپلاست، ترموست و یا ترموالاست را در بر می‌گیرد. تفاوت در فرآیندهای تولید میان گروه‌های مختلف پلیمری تنها پس از فرم‌دهی ایجاد می‌شود.

ترموپلاست‌های غیرمشبک باید پس از فرم‌دهی (تزریق) در قالب و یا خروج از دهانه کَلگی تا دمایی کمتر از دمای ذوب‌شوندگی‌شان خنک گردند تا بتوانند شکل و ابعاد قالب را حفظ کنند. در فرآیند تولید ترموپلاست‌ها ابتدا با افزایش انرژی گرمایی در پلیمر، حالت فیزیکی آن را از جامد به خمیری (مذاب) تغییر داده، سپس با فشاری متناسب ماده در قالب تزریق و یا شکل گرفته از دهانه اکسترودر خارج می‌شود. برای تثبیت نهایی شکل قطعه باید انرژی نهفته در پلیمر به طریقی از پلیمر تخلیه شود. بنابراین هر چه انرژی بیشتری در پلیمر نهفته باشد، به همان نسبت زمان بیشتر و یا سیستم‌های خنک‌کننده‌ای با طول خط طولانی‌تری برای تثبیت نهایی محصول مورد نیاز خواهد بود.

اما ترموالاست‌ها و یا ترموست‌ها بر عکس ترموپلاست‌ها نیازی به زمان خنک شوندگی در قالب و یا پس از خروج از کَلگی نداشته، می‌توانند پس از تزریق و اجرای عملیات ولگانیزاسیون و یا مشبکی شدن بلافاصله در همان حالت گرم از قالب خارج و نگهداری شوند. علت این امر هم محصور شدن و از بین رفتن قدرت حرکتی ماکرومولکول‌های این مواد در قطعه می‌باشد.

به طور کلی در فرم‌دهی ماکرومولکول پلیمرها (ترموپلاست-الاستومر و ترموالاست‌ها) این قانون همیشه صدق می‌کند که ماکرومولکول‌ها توسط نیروهای برشی وارده بشدت تحت تأثیر قرار گرفته جهت‌دار^۱ می‌شوند، یعنی بر اثر نیروهای وارده از حالت بی‌نظمی خارج و در جهتی مشخص منظم می‌گردند. آمیزه تا پایان یافتن فرم‌دهی کامل تحت تأثیر این نیروها خواهد بود و نظم اجباری ماکرومولکول‌ها نیز به قوت خودش باقی خواهد ماند.

هر چه نیروهای برشی موجود در کانال مواد بیشتر و یا هر چه راهگاه تزریق تنگ‌تر باشد به همان نسبت نظم ماکرومولکول‌ها بیشتر و در نتیجه درجه جهت‌دار شدن^۲ ماکرومولکول‌ها نیز بیشتر خواهد بود.

با پر شدن قالب، تأثیر نیروهای برشی از بین رفته، مولکول‌های نظم یافته تمایل شدیدی به بازگشت به حالت بی‌نظمی اولیه^۳ خواهند داشت، اما برگشت‌پذیری ماکرومولکول‌ها به حالت بی‌نظمی اولیه تا زمانی امکان‌پذیر خواهد بود که قدرت جابه‌جایی و یا لغزندگی آزاد آنها توسط خنک شدن و یا شبکه‌ای شدن از بین نرفته باشد. پدیده برگشت‌پذیری ماکرومولکول‌های جهت‌دار شده ترموالاست‌ها و ترموست‌ها در قالب داغ امکان‌پذیر است، ولی برای ترموپلاست‌ها این مورد کاملاً برعکس است. ماکرومولکول جهت‌دار شده ترموپلاست گرم در قالب سردی که همواره با آب خنک تبادل گرمایی دارد، تزریق می‌شود. قالب سرد به ماکرومولکول‌های جهت‌دار شده خصوصاً آنهایی که سطح خنک قالب را می‌پوشانند، فرصتی برای برگشت‌پذیری نمی‌دهد. سرد شدن یکباره مواد باعث می‌شود که تعادل نیروها در قطعه تولید شده به

1 Orientation

2 Orientation grade

3 Relaxation

هم خورده و قطعه پس از خنک شدن کامل (۲۴ ساعت پس از تولید) به علت تنش‌هایی ناشی از شرایط فرآیند تولید تا حدودی تغییر شکل بدهد. این حالت بیشتر در محصولات حجیم و بزرگ از ترموپلاست‌ها و بخصوص محصولاتی که ضخامت دیواره‌های آنها زیاد است، مشاهده می‌شود.

بنابراین اگر لازم باشد قطعه‌ای با کمترین تنش داخلی تولید گردد، باید پس از فرم‌دهی مواد زمان کافی به ماکرومولکول‌ها برای برگشت به حالت بی‌نظمی داده شود و پس از این زمان قطعه را خنک و یا ولگانیزه کرد.

۴-۵-۵- چگونگی جریان ولگانیزاسیون

ولگانیزاسیون یعنی مشبک‌سازی ماکرومولکول‌های الاستومر و جلوگیری از حرکت یا لغزندگی آنها توسط پل‌های گوگردی. این عمل عموماً در دمای 130°C تا 180°C و در زمانی قابل کنترل بین چند دقیقه تا چند ساعت انجام می‌گیرد. ولگانیزاسیون بستگی به نوع فرآیند تولید دارد و می‌توان آن را با تغییر نوع و یا درصد شتاب‌دهنده تنظیم و کنترل کرد.

هنگامی که فرم‌دهی کامپاند الاستومر در یک قالب داغ برای نمونه در فرآیند تولید به روش پرس و یا تزریقی صورت می‌گیرد، مرحله ولگانیزاسیون باید در کمترین زمان ممکن و بلافاصله پس از فرم‌دهی کامپاند انجام گیرد تا تولید اقتصادی و قابل قبول گردد (فرم‌دهی و ولگانیزاسیون تک مرحله‌ای)، ولی در مواقعی که زمان کمتری برای فرم‌دهی وجود داشته باشد (مانند تولید به وسیله غلتک‌ها و یا اکسترودرها) عمل ولگانیزاسیون در مرحله‌ای دیگر انجام می‌گیرد (عملیات دو مرحله‌ای).

در این روش‌ها ممکن است مرحله فرم‌دهی مواد و مرحله ولگانیزاسیون آن مدت‌ها از نظر زمانی مدت‌ها با یکدیگر فاصله داشته باشند، مشروط به اینکه کامپاند فرم داده شده قابلیت نگهداری شکل و ابعاد اولیه را تا اجرای مرحله ولگانیزاسیون داشته باشد. تجارب به دست آمده از فرآیندهای مختلف تولید نشان داده‌اند، قطعاتی که به روش تک مرحله‌ای ولگانیزه و تولید می‌گردند نسبت به قطعاتی که به روش دو مرحله‌ای تولید می‌شوند، همیشه دارای تثبیت شکل بهتر و تolerانس ابعادی کمتری می‌باشند.

از معایب ولگانیزاسیون تک مرحله‌ای احتمال وجود ناهمگونی ولگانیزاسیون در قطعه

تولیدی می‌باشد. در این روش‌ها عمل ولگانیزاسیون کامپاند لاستیکی در قالب‌های بسته صورت می‌گیرد. دمای لازم برای شروع و اتمام ولگانیزاسیون باید از طریق انتقال گرمایی دیواره‌های قالب انجام گیرد، مانند پلیمرها، ضعف انتقال گرمایی لاستیک، می‌تواند اختلاف دمایی زیادی در هسته و پوسته خارجی قطعه ایجاد کند که همین امر باعث ناهمگونی در ولگانیزاسیون قطعه می‌شود.

هر چه درجه حرارت قالب افزایش یابد و یا هر چه زمان ولگانیزاسیون کوتاه‌تر گردد، به همان نسبت احتمال درجه ناهمگونی ولگانیزاسیون کامپاند بیشتر خواهد شد. افزایش ضخامت دیواره قطعه نیز یکی دیگر از عوامل احتمال ایجاد ولگانیزاسیونی ناهمگون در قطعه می‌باشد.

۴-۵-۶- ماشین‌های تولیدی قطعات لاستیکی

۴-۵-۶-۱- تولید قطعات لاستیکی به روش یک مرحله‌ای

قطعه لاستیکی در روش تک مرحله‌ای می‌توانند به وسیله دستگاه پرس و ماشین آلات تزریقی تولید گردند. اگرچه ماشین آلات تزریقی کاربردی یکسان دارند، ولی از نظر قرارگیری پیستون تزریق و اعمال فشار در حین ولگانیزاسیون تفاوت‌های اندکی با یکدیگر دارند.

در یک نوع، پیستون تزریق عضوی از قالب فرم‌دهنده می‌باشد و در نوع دیگر پیستون تزریق عضوی از واحد فشار. دستگاه دیگری که می‌توان آن را در این تقسیم‌بندی قرار داد، دستگاه تزریقی، فشاری است و روش استفاده از آن را روش انتقال قالب‌گیری^۱ می‌نامند. از این روش بیشتر برای تولید قطعات پیچیده استفاده می‌شود.

درمقابل روش‌های فوق، روش دیگری وجود دارد که به نام تزریقی-ریزشی متداول می‌باشد. تفاوت دستگاهی این روش با بقیه در این است که در دستگاه تزریقی-ریزشی تجهیزات تزریق، مجزا از قالب و صفحه نگهدارنده قالب می‌باشد. آمیزه به وسیله پیستون مارپیچی آماده و در قالب بسته تزریق می‌شود. توان واحد خمیری‌کننده در دستگاه‌های تزریقی مهمترین عامل تعیین‌کننده برای آن دستگاه می‌باشد.

در ماشین‌آلاتی که عامل خمیری‌کننده و انتقال مواد، پیستون‌های مارپیچی می‌باشند، جای دادن گرما در آمیزه برای خمیری کردن آن از یک سو توسط هیترهای دیواره سیلندر و از سوی دیگر توسط تبدیل انرژی اصطکاکی (حاصل از نیروهای برشی) به انرژی گرمایی انجام می‌گیرد. افزایش مناسب و یکنواخت دمای ماده در طول مارپیچ باعث می‌شود که کنترل دمای آمیزه براحتی امکان‌پذیر باشد.

نکته مهم در فرآیند تولید قطعات لاستیکی به روش تزریقی، تنظیم فشار برگشتی مارپیچ برای بارگیری مجدد می‌باشد. افزایش بیش از حد این فشار باعث افزایش انرژی اصطکاکی و در نتیجه افزایش بیش از حد دمای آمیزه می‌شود. افزایش دمای آمیزه بیش از 120°C در کانال دستگاه باعث تسریع در امر ولگانیزاسیون می‌شود. شروع ولگانیزاسیون در کانال به معنی شبکه‌ای و سفت شدن آمیزه در واحد خمیری‌کننده دستگاه می‌باشد که نتیجه آن توقف تولید برای بیرون کشیدن مارپیچ و نظافت قسمت‌های گرفته آن خواهد بود.

عبور آمیزه گرم (حدود 120°C) از مسیر نسبتاً تنگ راهگاه قالب با فشار تزریقی حدود $600-1000 \text{ kgf/cm}^2$ باعث می‌شود دمای آمیزه باز هم بر اثر نیروهای برشی که در این مسیر بر آن وارد می‌شود، بیشتر شده و آمیزه کاملاً آماده ولگانیزاسیون گردد.

با ورود آمیزه به قالب و تماسش با دیواره داغ آن (حدود 180°C) ولگانیزاسیون آغاز می‌شود و پس از زمانی مشخص و تنظیم شده پایان می‌یابد. در تولید قطعاتی با ضخامت پایین می‌توان برای تسریع در امر ولگانیزاسیون و یا برای یکنواختی آن، دمای دیواره قالب را تا 200°C افزایش داد.

تفاوت قطعات لاستیکی تولید شده به وسیله فرآیند پرس با قطعات تولید شده به وسیله دستگاه‌های تزریقی علاوه بر لبه‌های زاید قطعه (پلیسه‌ها)، وجود ناهمگونی ولگانیزاسیون آن می‌باشد که در قطعات پرسی بیشتر به علت اختلاف دمای میان هسته قطعه و پوسته آن که هم‌جوار با قالب داغ است، به وجود می‌آید. در برخی مواقع پوسته قطعه به علت گرمای بیش از حد تخریب شیمیایی شده، در حالی که هسته قطعه هنوز ولگانیزه نگردیده و یا عمل ولگانیزاسیون آن به پایان نرسیده است.

۴-۵-۶-۲- تولید قطعات لاستیکی به روش دو مرحله‌ای پیوسته

با این روش ابتدا آمیزه به طور پیوسته فرم‌دهی می‌شود و سپس در مرحله بعدی که ممکن است با فرم‌دهی آمیزه اختلاف زمانی زیادی داشته باشد، در مخازن فشار ولگانیزه می‌شود. برای تولید پیوسته آمیزه جهت ولگانیزاسیون از تجهیزات و ماشین‌آلاتی مانند غلتک‌ها، کلندرینگ^۱ و اکسترودرها استفاده می‌شود.

۴-۵-۶-۳- اکسترودر کردن آمیزه‌های لاستیکی

به طور کل اکسترودر کردن یعنی تولید پیوسته محصولات نیمه تمام و در برخی مواقع تمام شده‌ای مانند پروفیل، لوله شیلنگ و غیره. صرف نظر از موارد مختلف کاربردی و در نتیجه اشکال گوناگون اکسترودرها، عموماً یک اکسترودر از سه قسمت مجزا تشکیل شده است: موتور محرکه، سیلندر-ماریچ که مهمترین قسمت اکسترودر را تشکیل می‌دهند و در نهایت قالب^۲ خروجی که فرم‌دهنده آمیزه خواهد بود. داخل کشیدن مواد، انتقال، تراکم خمیری، مذاب کردن، هموژنیزه‌سازی گرمایی و مکانیکی و سرانجام ایجاد فشار لازم برای عبور آمیزه از راهگاه قالب به عهده واحد ماریچ-سیلندر می‌باشد. بدیهی است که پس از قالب جهت نگهداری، انتقال و خنک‌سازی آمیزه فرم یافته نیاز به وسایل و تجهیزات دیگری می‌باشد که در اینجا از ذکر آنها خودداری می‌شود.

تغذیه‌ی اکسترودرها در صنعت لاستیک ابتدا با نوارهایی که از غلتک‌ها بیرون می‌آید و برخی مواقع نوارهایی که هنوز گرم بودند، انجام می‌گرفت که در اصطلاح آن را "تغذیه گرم" می‌نامیدند.

ساخت ماریچ‌هایی با منطقه عمیق تغذیه و طولی حدود 6-8D و منطقه مخصوصی به نام منطقه تراکم و طول مؤثر ماریچی حدود 15D و یا ماریچ‌هایی با مناطق برشی خاص و یا استفاده از برش دهنده‌ها و هموژنیزه‌کننده‌ها قابل تبخیه روی ماریچ به طول 2-3 D (45mm, 60 mm, 90 mm, 120 mm) این امکان را فراهم کرده است که بتوان

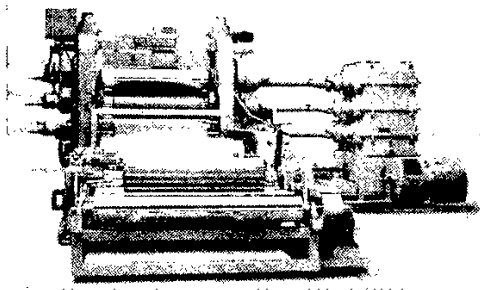
1 Calendering Machine

2 Die

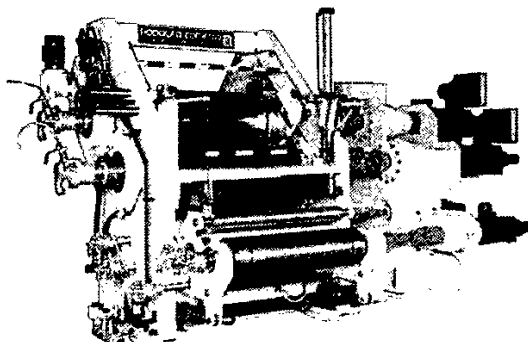
اکسترودرها را با آمیزه‌های سرد گرانولی شکل نیز تغذیه کرد. در این نوع دستگاه‌ها جهت گرم یا خنک‌سازی بدنه سیلندر بیشتر برای کنترل بهتر دمای آمیزه به جای هیتر و فن از روغن و آب استفاده می‌شود.

۴-۵-۶-۴- کلندرینگ آمیزه‌های لاستیکی

برای تولید پیوسته نوار یا ورقه‌های نازک لاستیکی از دستگاه کلندرینگ استفاده می‌شود. فرآیند تولید با روش کلندرینگ تقریباً مانند روش کار در روی سیستم‌های دو غلتکی می‌باشد با این تفاوت که در کلندرینگ به جای دو غلتک معمولاً از ۳ تا ۵ غلتک استفاده شده که بر اساس قرارگیری غلتک‌ها، به نام‌های F, S, Z, I, L و یا سیستم‌های خاص نامیده می‌شوند. شکل (۴-۳۴)



شکل (۴-۳۴) A: ماشین کلندرینگ لاستیک



شکل (۴-۳۴) B: ماشین کلندرینگ لاستیک

هر کدام از این حالات ایرادها و امتیازهایی نسبت به دیگر کلندرها دارد و در مواقع خاص مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد؛ برای نمونه کلندر 1 به دلیل پشتیبانی و تقویت غلتک‌های میانی توسط دو غلتک دیگر از ثبات بالاتری برخوردارند، در حالی که ارسال مواد روی کلندرهای S و F نسبت به بقیه راحت تر می‌باشد و کلندرهای L و F امتیازهای همه کلندرها را در خود جمع‌آوری کرده‌اند.

فاصله و سرعت دورانی غلتک‌ها بدون وابستگی به یکدیگر براحتی قابل تنظیم می‌باشند. مهمترین فاکتور در فرآیند کلندرینگ تنظیم دقیق حرارتی (گرم کردن و خنک‌سازی) غلتک‌ها می‌باشد.

۴-۵-۶-۵- فرآیند کلندرینگ

در این روش‌ها آمیزه همیشه به اولین غلتک‌ها تغذیه می‌شود. برای خمیری کردن و سرانجام به صورت پوسته یا لایه ضخیم درآوردن آمیزه باید غلتک‌های اولیه با سرعت دورانی متغیری گردش کنند در حالی که غلتک‌های بعدی با فاصله‌ای کمتر و با سرعت یکنواخت نسبت به یکدیگر حرکت خواهند داشت. به غلتک‌های ثانویه که لایه آمیزه با عرض مشخص و ضخامت نهایی (2 mm - 0.5 mm) میان آنها تعیین می‌شود غلتک‌های کار نیز می‌گویند، البته تولید نوار یا لایه‌های لاستیکی با ضخامتی بیش از 1 mm کیفیت بالایی (بدون حباب هوا) تا حدودی مشکل بوده و نیاز به دقت بالایی دارد.

آمیزه فرم گرفته شده پس از طی آخرین غلتک روی غلتک دیگری خارج از دستگاه کلندر پیچیده شده و تا اجرای عملیات ولگانیزاسیون در محل مناسبی نگهداری می‌شود. برای این که محصول نیمه تمام (نوار، باند یا لایه) روی یکدیگر چسبیده نشوند و براحتی قابل باز شدن باشند، لازم است لایه‌ها به وسیله یک نوار پلاستیکی ارزان قیمت از یکدیگر مجزا گردند.

عملیات ولگانیزاسیون محصولات دستگاه کلندرینگ در دستگاه اتوماتیک ولگانیزاسیون AUMA انجام می‌شود. یکی از موارد رایج استفاده از فرآیند کلندرینگ-پوشش‌دهی منسوجات با لایه لاستیکی می‌باشد. برای این کار ابتدا باید ضخامت آمیزه لاستیکی مورد نظر تعیین شود و سپس محصول مورد نظر (پارچه، نوار آلومینیوم یا هر محصول قابل پوشش دیگری) در فاصله آخرین غلتک‌ها به لایه چسبنده و نسبتاً گرم



لاستیکی اضافه گردد. عبور محصول پوشش داده شده از بین آخرین غلتک‌ها با فاصله کم باعث می‌شود تا میان محصول و لایه لاستیکی، چسبندگی مورد نیاز ایجاد گردد. برای تولید ورق‌ها یا لایه‌های لاستیکی با ضخامتی بالا و کیفیتی مناسب و بدون حباب از دستگاه اکسترودری با کلگی غلتکی استفاده می‌شود. این اکسترودر که اغلب با نوارهای گرم یا سردی از آمیزه تغذیه می‌شود، آمیزه را طی عملیاتی خمیری و آماده خروج از قالب یا کلگی اکسترودر می‌نماید که از دو غلتک با فاصله‌ای قابل تنظیم استفاده شده است. محصول خروجی از این دستگاه سپس باید روی کلندرهای F یا L کشیده و برای ولگانیزاسیون آماده شود.

۴-۵-۶- لاستیک‌های اسفنجی

برای تولید قطعات اسفنجی (با سلول‌های باز یا بسته) از لاستیک‌ها، لازم است که آمیزه با مواد شیمیایی که در دمای ولگانیزاسیون قادر به تولید گاز می‌باشند، مخلوط گردد.

هرگاه آمیزه مزبور در فرم‌های باز و ولگانیزه شود، اسفنجی با سلول‌های باز از آن به دست می‌آید که قابلیت آب‌بندی نداشته، ولی قابلیت مکش دارد و هرگاه آمیزه در فرم‌های بسته تزریق و ولگانیزه گردد، اسفنجی با پوسته صاف و یکنواخت و هسته‌ای اسفنجی و سلول‌های بسته از آن حاصل می‌شود که برای آب‌بندی نیز مناسب می‌باشد.

۴-۵-۷- تجهیزات ولگانیزاسیون

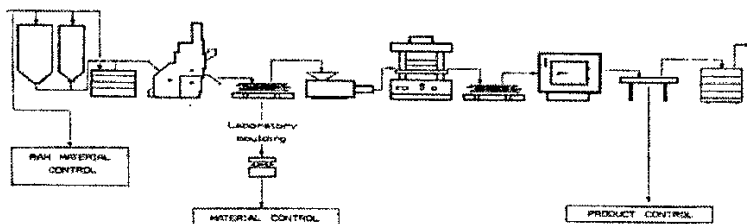
برای ولگانیزاسیون محصولاتی که در فرآیند اکستروژن و یا کلندرینگ تولید می‌گردند، بیشتر از دیگ فشار مجهز به هوای فشرده یا گاز نیتروژن با فشاری حدود 3 تا 5 اتمسفر استفاده می‌شود. تحت فشار قرار دادن محصول فرم گرفته شده در دستگاه فوق بیشتر برای از بین رفتن حباب‌های هوا و نیز جلوگیری از تشکیل این‌گونه حباب‌ها در طی عملیات ولگانیزاسیون می‌باشد. انتقال گرمایی لازم جهت آغاز عملیات نیز به وسیله المنت‌های حرارتی ایجاد می‌شود و گاهی نیز برای گرم کردن دیگ فشار از بخار آب اشباع شده استفاده می‌شود. این سیستم یکنواختی حرارتی بیشتری نسبت به المنت‌های گرمایی دارد، ولی احتمال است روی محصول ولگانیزه شده لکه‌های آب دیده

شود و در نتیجه افت کیفی محصول را به دنبال آورد. قطر دیگ‌های فشار آزمایشگاهی برای ابعادی با طول حدود 600 mm تا 1000 mm و برای کارخانجات تولیدی به قطر 2 m الی 3 m متر و طولی تا 30 m می‌باشد.

۴-۵-۶-۸- تولید واشرهای مبدل‌های صفحه‌ای

فرآیند تولید واشرهای لاستیکی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای را می‌توان مطابق شکل (۴-۲۵) در دو بخش زیر خلاصه کرد:

- ۱- ساخت کامپاند یا آمیزه پلیمری که خود شامل کنترل مواد خام، اختلاط آن، کنترل مواد ایجاد شده و اکسترودر آن برای قرار گیری در قالب می‌باشد.
- ۲- فرم‌دهی کامپاند در قالب و اجرای عملیات ولگانیزاسیون برای مشبک شدن ماکرومولکول‌ها و تثبیت شکل قطعه، پخت مجدد و کنترل محصول نهایی. بازرسی نهایی پخت ثانویه پخت اولیه اکسترودر تهیه کامپاند لاستیک ذخیره‌سازی مواد اولیه



شکل ۴-۲۵: مراحل ساخت و کنترل کیفیت واشرهای مبدل‌های صفحه‌ای

۴-۵-۷- واشرهای مورد استفاده در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای

چنانکه پیش‌تر گفته شد، کارایی (ایمنی و قابلیت اعتماد در برابر نشتی) مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای بشدت به واشرها و قابلیت اعتماد جنس مورد استفاده در آنها بستگی دارد. این واشرها معمولاً الاستومرهای (لاستیک‌های) قالب‌گیری شده یک‌تکه‌ای هستند که مشخصات خاص آنها براساس سازگاری با سیال، دمای کاری و فشار موجود در مبدل انتخاب می‌شود. در کنار شرایط کاری (نوع سیال، غلظت مواد اضافه‌شونده، دما، فشار و سایر موارد) خصوصیات فشاری برای مقاومت در برابر تنش‌ها و نیروهای که از جریان سیال تولید می‌شوند، اهمیت فراوانی دارند؛ بنابراین واشرها معمولاً از مواد قابل

شکل‌دهی و الاستیک مانند لاستیک و اشکال مختلف پلیمری ساخته می‌شوند. هر کدام از این مواد دارای آستانه دمایی محدودکننده‌ای هستند که دستورعمل انتخابی جنس این واشرها در جدول (۴-۱۲) ارایه شده است. از ۹ لاستیک اشاره شده در این جدول، امروزه در کاربردهای صنعتی از سه نوع واشر پلیمری FKM, EPDM, NBR بیشتر استفاده می‌شود که در ادامه به توضیح مختصری از ویژگی‌های هر کدام از این مواد خواهیم پرداخت.

۱- NBR، یک لاستیک عادی است که با محیط‌های آبی و چرب سازگار است و مقاومت شیمیایی آن در برابر روغن‌های معدنی، روغن‌های گیاهی و چربی‌ها خوب است. این پلیمر دارای هیدروکربن‌های جایگزین شده است که در آن یک اتم هیدروژن با یک گروه سیانو^۱ جایگزین شده است $C \equiv (N)$ تا نیتریل (NBR) ساخته شود. آستانه دمایی کاری نوع عمل‌آوری شده با گوگرد^۲ این لاستیک تقریباً محدود به $110^{\circ}C$ است، در حالی که NBR عمل‌آوری شده (پخته شده)^۳ با پراکسید^۴ (NBRP) را می‌توان تا $140^{\circ}C$ استفاده کرد. واشرهای NBR در انواع مختلفی در صنعت استفاده می‌شود که شامل انواع استاندارد برای کاربردهای معمولی برای دماهای کم (نوع پایه^۵) NBRB و برای کاربردهای تا دمای $140^{\circ}C$ یعنی NBRP را در برمی‌گیرد.

جدول ۴-۱۲: جنس واشرهای مورد استفاده در مبدلهای حرارتی صفحه‌های،

حداکثر دمای کاری و کاربرد آنها [۹، ۱۰]

جنس موادواشر	حداکثر دمای کارکرد: [°C]	کاربرد
لاستیک طبیعی	70	حلال‌های اکسیژنه ^۶ ، اسیدها و الکل‌ها
نئوپرن (CR)	70	الکل‌ها، مواد قلیایی ^۷ و اسیدی ^۸ ، حلال‌های هیدروکربنی

- 1 Cyano group
- 2 Sulphur
- 3 Curing System
- 4 Peroxide
- 5 Base
- 6 Oxygenated Solvents
- 7 Alkalies
- 8 Acids

محلول‌های آبی ^۱ ، مواد قلیایی و اسیدی، حلال‌های اکسیژنه	85	استیرن بوتادین (SBR)
محصولات لبنی، نوشابه‌ها ^۲ ، سیالات دارویی ^۳ و بیوشیمیایی، بنزین، روغن‌ها و حلال‌های آلی	135	نیتریل (NBR)
روغن‌ها	150	فلورو الاستومر ^۴
مواد قلیایی و اسیدی، روغن‌های حیوانی و گیاهی، آلدئیدها ^۵ ، کتون‌ها ^۶ ، فنول‌ها ^۷ (اسید فنیک) و استرها ^۸ (نمک‌های آلی)	155	بوتیل (IIR)
الکل‌ها، هیپوکلریت سدیم ^۹ و انواع سیالات شیمیایی	155	لاستیک اتیلن- پروپیلن (EPDM)
روغن‌ها، بنزین، محلولهای آبی، حلالهای آلی ^{۱۰}	180	لاستیک فلورینی (FKM)
مایعات خورنده ^{۱۱}	180	لاستیک سیلیکن

همچنین گریدهای خاص مورد استفاده در صنایع غذایی^{۱۲} و دارویی برای دماهای بالا یعنی NBREF و نیز کاربردهای تبریدی^{۱۳} برای دماهای پایین یعنی NBRLT را می‌توان نام برد که طبق ضوابط اداره دارو و غذای آمریکا^{۱۴} (FDA) فرمول‌بندی می‌شوند، لذا این نوع واشرها جهت عمل‌آوری غذا و دارو نیز مناسب می‌باشند.

نیتریل هیدروژنه^{۱۵} یا HNBR که یک گونه خاص و گرانیقیمت لاستیک نیتریل

-
- 1 Aqueous Solutions
 - 2 Beverages
 - 3 Pharmaceutical
 - 4 Fluoro- elastomer
 - 5 Aldehydes
 - 6 Ketones
 - 7 Phenols
 - 8 Ester
 - 9 Sodium hypochlorite
 - 10 Organic Solvents
 - 11 Corrosive liquids
 - 12 Food grade
 - 13 Refrigeration
 - 14 Food and Drug Administration
 - 15 Hydrogenated Nitrile

می‌باشد، تا دمای تقریبی 160°C و معمولاً در هنگامی که در محلول مورد استفاده هیدروژن سولفید^۱ موجود است، کاربرد دارد. این نوع واشر معمولاً در حالت بدون چسب به کار می‌رود و برای نمونه از آن در فرآیند هدایت نفت خام^۲ استفاده می‌شود. از گرید NBRHTF نیز می‌توان تا دمای 135°C برای الکل یا روغن خورنده (آروماتیک^۳) استفاده کرد. استحکام کششی (مکانیکی) این نوع واشرها معمولاً از 11.9 MPa تا 20.4 MPa بسته به نوع آن متغیر است و قابلیت کششی (ازدیاد طول) تا حالت گسیختگی آن 240 درصد تا 200 درصد می‌باشد. در بهترین شرایط مانده تغییرات بر اثر فشار^۴ پس از ۲۴ ساعت در دمای 125°C در حدود 9 درصد می‌باشد. سختی این نوع واشرها از 75 تا 80 Shore A متغیر می‌باشد و فقط به رنگ مشکی تولید می‌شود.

۲- EPDM، لاستیک دیگری است که کاربردهای شیمیایی و آبی گوناگونی دارد که از آن جمله می‌توان به عمل‌آوری حلال‌های آلی، غلظت‌های خاصی از اسیدها و مواد قلیایی قوی اشاره کرد. EPDM در برابر آب داغ و بخار به خوبی مقاومت می‌کند و می‌توان تا دمای 110°C از آن استفاده کرد، اما این الاستومر هیدروکربنی در برابر روغن، نفت و یا چربی‌ها مقاوم نیست. این نوع واشر نیز همانند انواع دیگر در گریدهای مختلفی ساخته می‌شود که عبارتند از:

EPDM که معمولاً جهت واشرهای چسبی استفاده می‌شود. EPDMC که معمولاً برای واشرهای قفلی در دمای بالا به کار برده می‌شود، EPDMC که همانند واشر نوع قبلی است، اما برای صفحاتی که دارای عمق پرسکاری کم (1.5 mm-3 mm) استفاده می‌شود، EPDMFF که معمولاً طبق ضوابط FDA برای صنایع غذایی استفاده می‌شود. EPDMAL در جاهایی استفاده می‌شود که به علت وجود سیالات خاص شیمیایی و افزایش فشار واشرهای معمولی EPDM باد می‌کنند. استحکام کششی (مکانیکی) این نوع واشرها 10.8 Mpa و قابلیت کششی (ازدیاد طول) تا حالت گسیختگی آن 225 درصد بوده و در بهترین شرایط، مانده تغییرات بر اثر فشار آن پس از 24 ساعت در دمای 150°C در حدود 7.8 درصد می‌باشد و سختی آن نیز در محدوده 75 تا

1 Hydrogen Sulfide

2 Crude Oil

3 Aromatic

4 Compression set

80 shore A متغیر است و می‌توان این واشر را به رنگ مشکی یا هر رنگ دل‌خواه دیگری تولید کرد. امروزه یکی از کاربردهای مهم این نوع واشرها در صنعت تاسیسات حرارتی و برودتی و تهویه مطبوع (HVAC) و تاسیسات بخار می‌باشد.

۳- FKM، گروهی از الاستومرها هستند که در مواجهه با سیالات اسیدی، بخار و محلول‌های آبی بسیار خوب عمل می‌کنند. این لاستیک که با مارک تجاری وایتون^۱ از شرکت دوپان^۲ معروف می‌باشد، معمولاً برای دماهای بالا 100°C چندان مناسب نیست، اما یک نوع خاص آن یعنی FKMT کاربرد خاصی دارد و تا دمای 180°C استفاده می‌شود. این واشر گرانیقیمت معمولاً برای سیالات شیمیایی خورنده مثل اسید سولفوریک، کامپاندهای آلی آروماتیک و کامپاندهای آلی کلردار استفاده می‌شود و بیشتر در سه گرید مختلف تولید می‌گردد. نوع FKMG بر اساس وایتون GF300 به منظور افزایش مقاومت شیمیایی ساخته می‌شود. گرید FKMS معمولاً محتوی فلور بیشتری است که با PTFE پر شده و برای مقاومت شیمیایی حداکثر به کار می‌رود همانند کار با اسیدسولفوریک دما بالا و غلیظ، نوع FKMT نیز معمولاً برای استفاده در محیط‌های بخار و دماهای بالا استفاده می‌شود. معمولاً همه انواع واشرهای FKM برای مقاومت بهتر در برابر بخار با پراکسید عمل‌آوری می‌شوند.

در گذشته استفاده از واشرهای FKM روی صفحاتی از جنس تیتانیوم توصیه نمی‌شد، چرا که یون‌های فلوراید آن سبب خوردگی صفحات تیتانیوم می‌شد، اما امروزه گریدهای خاصی از این نوع واشرها را می‌توان تا دماهای زیر 100°C بر روی صفحات تیتانیوم نیز به کار برد.

استحکام کششی (مکانیکی) این نوع واشرها 15 MPa و قابلیت کششی (ازدیاد طول) تا حالت گسیختگی آن 218 درصد بوده و مانده تغییرات بر اثر فشار آن پس از 24 ساعت در دمای 200°C در حدود 10.3 درصد می‌باشد و سختی آن نیز در محدوده 75 تا 80 shore A متغیر است. این واشر تنها به رنگ مشکی ساخته می‌شود.

در گذشته از واشرهای (کلینگریت ۴۰۰)^۳ نیز در میدل‌ها استفاده می‌شد، اما امروزه

1 VITON

2 DUPONT

3 Klingerite 400



به دلیل مشکلاتی که برای سلامت انسان‌ها ایجاد می‌کنند، از آنها استفاده نمی‌شود، امروزه واشره‌های Kingsil 4430 که براساس الیاف شیشه می‌باشد و تا دمای 180°C کار می‌کنند و واشره‌های Kingsil 4500 که براساس الیاف کربن ساخته می‌شود و تا دمای 200°C به کار می‌روند، جایگزین این نوع واشرها شده‌اند. معمولاً هزینه ساخت و اثر یک مبدل حرارتی صفحه‌ای با دمای کاری، فشار کارکرد و آستانه مقاومت به خوردگی رابطه مستقیمی دارد و طبیعی است هر چه مقاومت جنس یک واشر بالاتر باشد، قیمت آن نیز بیشتر خواهد بود. از سوی دیگر عمر آب‌بندی واشرها و طول عمر کارکرد آنها به عوامل گوناگونی همچون جنس واشرها، نحوه نصب روی صفحه (با چسب یا بدون چسب)، شکل واشر، شکل شیار صفحه، درست نشستن واشر در شیار، درجه حرارت و فشارهای عملکردی، نوع سیال، نحوه عملکرد مبدل (پیوسته یا سیکلیک بودن)، روش تمیز کردن مبدل و تعداد دفعات باز و بسته کردن آن بستگی دارد.

اگر واشرها در بیشترین دمای خیس^۱ خود کار کنند، معمولاً یک سال دوام می‌آورند و طبیعی است که در صورت کمتر بودن دمای کاری نسبت به حداکثر دمای مذکور، عمر آن بیشتر می‌شود. معمولاً براساس یک قاعده سرانگشتی^۲ به ازای کاهش تقریبی هر 10°C دمای کاری، عمر واشر با یک ضریب دو افزایش می‌یابد. به عنوان مثال اگر یک واشر در دمای 110°C یک سال عمر می‌کند، در دمای 100°C دو سال، در دمای 85°C چهار سال، در دمای 60°C هشت سال و در دمای 40°C تقریباً ۱۶ سال عمر می‌کنند.

چنانکه گذشت امروزه تعدادی از سازندگان به جای واشره‌های استاندارد به عمل‌آوری شده با گوگرد، از واشره‌های عمل‌آوری شده با پراکسید استفاده می‌کنند که خود سبب افزایش مقاومت فشاری می‌شود و قابلیت کار در دماهای بالاتری را نیز فراهم می‌کند.

۴-۵-۸- نحوه نگهداری واشر

همان‌گونه که پیشتر گفته شد، لاستیک‌ها از نوع مواد ویسکوالاستیک می‌باشند، و در واقع خواص آنها با گذشت زمان تغییر می‌کند، از این رو عمر محدودی دارند و پس

1 Wet temperature

2 Rule of thumb

از گذشت زمانی معین دیگر قابل استفاده نخواهند بود. به دیگر سخن لاستیک‌ها به صورت شیمیایی با زمان تغییر می‌کنند و در اصل می‌توانند اکسیداز، دی‌پلیمرایز، هیدرولیز شوند. از سوی دیگر لاستیک‌ها می‌توانند سیالات یا گازها را جذب کنند که این خود باعث تورم، نرم‌شدگی، ایجاد ترک و گسیختگی می‌شود، لذا همه این شواهد و قرائن بر این مهم تأکید دارد که عمر و اشردار محدود است، اما از سوی دیگر به علت مصرفی بودن این قطعه باید استفاده‌کنندگان مبدل‌های حرارتی تعداد مورد نیازی از این واشرها را معمولاً در انبار یا محل‌های مشخصی نگهداری کنند.

هنگامی که واشرها به عنوان قطعات یدکی نگهداری می‌شوند، باید بنابر الگوی آنها را انبار کرد، زیرا ترکیبات موادی که در ساختمان واشر به کار برده می‌شود، می‌تواند از محیط متأثر شده و عمر مفید آن کاهش یابد، از این رو در نگهداری واشرها باید به نکته‌های زیر توجه داشت:

۱- محیطی که واشرها در آن نگهداری می‌شوند، نباید از 180°F (21°C) بیشتر باشد. برای این منظور بهتر است دمای محیط را زیر دمای 60°F (15°C) نگه داشت. دمای محیط نیز نباید زیر صفر درجه سانتیگراد باشد.

۲- محیط انبار باید رطوبت کمی داشته باشد؛ در واقع ماکزیمم نسبت رطوبت 70 درصد توصیه می‌شود.

۳- واشرها باید در یک اتاق تاریک نگهداری شوند تا در معرض اشعه فرابنفش قرار نگیرند.

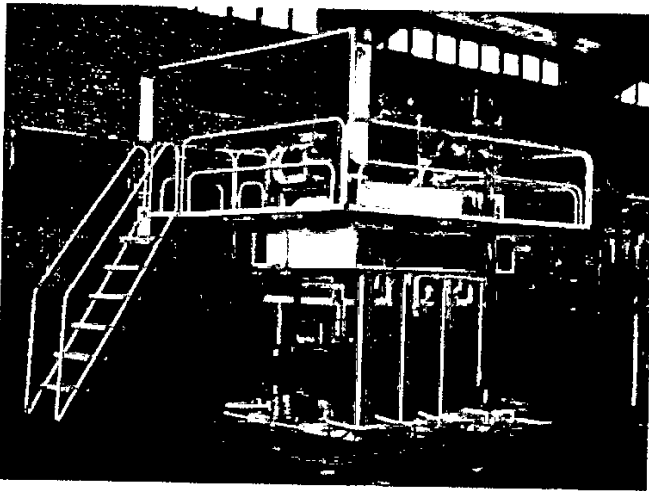
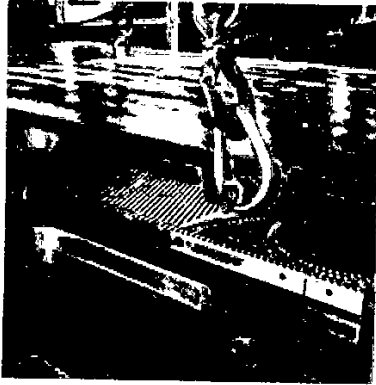
۴- در جایی که واشرها نگهداری می‌شوند باید کاملاً به صورت آزاد باشند به این معنی که واشرها نباید تحت کشش و یا خمیده شدن قرار بگیرند و یا اینکه مجاله شوند.

۵- تمام منابعی که ممکن است گاز اوزون تولید کند مانند موتورهای الکتریکی، تجهیزات جوشکاری باید از نزدیکی محل انبار واشرها برداشته شوند.

۶- حلال‌های بنیادی، اسیدها و مانند مواد نباید در محل نگهداری واشرها وجود داشته باشد.

۷- واشرها نباید در محلی که گرمایش آنجا تحت سیستم حرارتی تابشی است و یا در نزدیکی رادیاتورها نگهداری شوند.

۸- واشرها باید در داخل کیسه‌ها و یا جعبه پوشانده شود تا کمتر در معرض هوای



شکل ۴-۳۷: نمونه‌ای از پرس‌های هیدرولیکی تولید صفحات

در ادامه مروری بر فرایند جریان مواد تولید و تست در تولید مبدل‌های صفحه‌ای، مبدل‌های لحييم شده، مبدل‌های صفحه‌ای نیم‌جوش و تمام‌جوش شده خواهیم داشت.

۴-۶-۱- مبدل‌های صفحه و قاب

در ابتدا مواد خام برای تولید صفحات انتقال حرارت مبدل حرارتی صفحه‌ای مانند فولاد زنگ‌نزن، تیتانیوم یا دیگر مواد مورد استفاده برای ساخت صفحات قبل از ورود به

پرسکاری بازرسی می‌شوند، سپس کوپل مواد خام که در یک سیستم کوپل بازکن قرار گرفته براساس اندازه‌های مشخصی برش داده می‌شود و آنگاه به کمک پرس‌های هیدرولیکی بسیار بزرگ فرم داده و سپس ترمیم می‌شوند. پرسکاری شامل شکل‌دهی سرد در یک قالب دارای شیارهای سطحی مطلوب در پرس NC است. طی این فرآیند، یک شماره یا کد نیز روی لبه صفحه ایجاد می‌شود تا بتوان آن را شناسایی و در صورت لزوم دسته‌بندی کرد. مجموعه ماشین‌کاری شده نازل‌ها به دقت روی قاب‌های انتهایی مونتاژ می‌شوند، به همین ترتیب، پیچ‌ها، میله‌های حامل بالایی و پایه (یا هادی پایینی)، ستون پایه و دیگر اجزای انتهایی قاب، ماشین‌کاری و آماده مونتاژ می‌شوند.

واشرهای بازرسی و تأیید شده قبل از قرار گرفتن صفحه در یک صفحات با چسب در شیار صفحات قرار می‌گیرند یا به صورت گیره‌ای در آن نصب می‌شوند، سپس واحد صفحه و قاب مربوط بر اساس نیاز مشتری (تعداد صفحات، سایز آنها، ابعاد سطح، واشرهای طبق مشخصات کاری حرارتی) مونتاژ می‌شوند. آنگاه این واحد تکمیل شده طبق یک کد معین هیدر و تست می‌شود. باید توجه داشت که در تمامی شرایط خاص این واحد قبل از بازرسی و بسته‌بندی نهایی آزمایش می‌شود.

۴-۶-۲- مبدل‌های حرارتی لحیم شده^۱

بعد از بازرسی مواد خام (فولاد زنگ‌نزن و مس) برای صفحات کانال، کوپل‌های هر کدام از کانال‌ها در خطوط پرس کامپیوتری و خودکار نصب می‌شوند، سپس ورق‌های فولاد زنگ‌نزن و مس همزمان و با هم برشکاری و پرس می‌شوند. صفحات کانال در یک‌های صفحه حاوی تعداد معینی صفحه قرار می‌گیرند و سپس در میان صفحات انتهایی (در پوش) مونتاژ و در پایان نازل‌ها روی صفحات نصب می‌شوند، سپس واحدهای مونتاژ شده در پالت‌های خاص لحیم‌کاری شده به صورت مجزا و به دقت در پالت‌ها قرار می‌گیرند و هر واحد با گرافیت و شبکه‌های خاص از هم جدا می‌شوند. جنس این شبکه به گونه‌ای است که سبب کاهش ضربه به لحیم‌کاری و نیز کاهش تنش‌های ناشی از اختلاف در انبساط حرارتی صفحه و کانال می‌شود. مجموعه

¹ Brazed heat exchanger (BHE)

پالت‌بندی شده این مبدل‌ها (BHE ها) در یک کوره گذاشته می‌شوند که در آن واحدها به مدت ۸ ساعت تحت لحیم‌کاری سخت خلایی قرار می‌گیرند. در این فرآیند، مواد لحیم‌کاری در نقاط تماس میان صفحات جمع می‌شوند که دلیل آن وجود نیروهای موینگی^۱ است و بنابراین اتصالات لحیم شده بسیار بهتر می‌شوند.

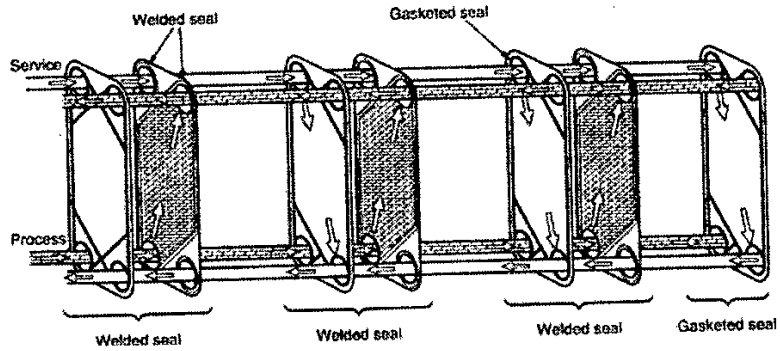
بعد از فرآیند لحیم‌کاری سخت، هر واحد مبدل با شماره سریال حک شده‌ای روی خود علامت‌گذاری می‌شود؛ با این عمل برای شناسایی و تأیید شرایط کار و جنس مبدل ضروری است، سپس کنترل نشتی تحت فشار و انسجام سازه‌ای این مبدل‌ها قبل از بسته‌بندی نهایی برای تحویل آزمایش می‌شوند.

۴-۶-۳- مبدل‌های صفحه‌ای نیمه جوشکاری شده^۲

صفحات این مبدل‌ها نیز با فرآیند مبدل‌های صفحه و قاب، که پیشتر اشاره شد، تولید شده و در ادامه پک‌های صفحه‌ای دوقلو با جوش دادن دو صفحه به هم ساخته می‌شوند. این کار با شیوه جوشکاری لیزری انجام می‌شود. شایان ذکر است که بیشتر موادی که پیش از این گفته شد مانند فولاد زنگ‌نزن، تیتانیوم، تیتانیوم پایدار شده با پالادیم برای جوشکاری لیزری مناسب هستند؛ سپس واشری که از قبل بازرسی شده است، روی هر کدام از دو وجه خارجی جفت صفحه جوشکاری شده یا با چسب و یا با گیره نصب می‌شود. آنگاه این جفت صفحات جوشکاری شده واشردار را مطابق شرایط حرارتی مورد نیاز و همانند مبدل‌های حرارتی کاملاً واشربندی شده مونتاژ می‌کنند. سرانجام کل این واحد قبل از بسته‌بندی نهایی طبق شرایط کدهای تولید و کاربری، بازرسی و تست آبی (هیدروتست) می‌شوند. شکل ۴-۳۸ طرح شماتیک یک مبدل صفحه‌ای تیمه جوشکاری شده و نحوه جریان سیال در آن را نمایش می‌دهد.

1 Capillary force

2 Semi-welded plate heat exchanger

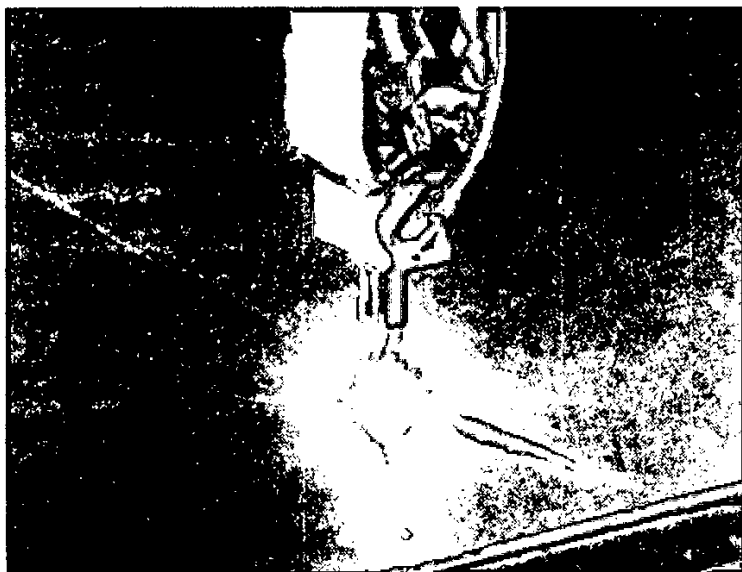


شکل ۴-۳۸: طرح شماتیک یک مبدل نیمه جوشکاری شده

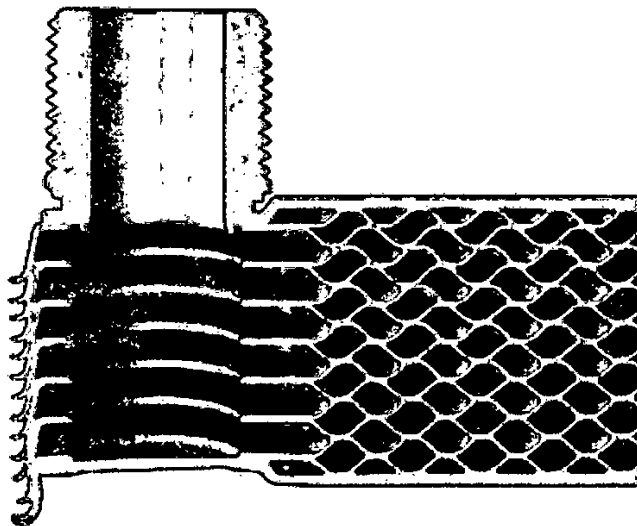
۴-۶-۴- مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای تمام جوشکاری شده^۱

در مبدل‌های تمام جوشکاری شده، برخلاف مبدل‌های صفحه‌ای نیمه جوشکاری شده، مجموعه صفحات به صورت یک به یک و در محل شیارهای صفحه به یکدیگر جوشکاری لیزری می‌شوند. نمونه‌ای از این نوع جوشکاری لیزری در شکل ۴-۳۹ نمایش داده شده است، سپس مجموعه صفحات میان صفحات انتهایی قاب (صفحات قاب و صفحات فشاری) مونتاژ می‌شوند و توسط پیچ‌های جانبی محکم می‌گردند. اتصالات نازل‌ها که به مجموعه صفحات جوش شده‌اند، در مجموعه صفحات انتهایی قرار می‌گیرند، سپس واحد کامل شده این مبدل‌ها قبل از بازرسی و بسته‌بندی نهایی طبق شرایط کد و استاندارد، هیدروتست می‌شوند؛ همچنین تقریباً تمامی مواد مورد استفاده در ساخت صفحات مبدل‌های صفحه‌ای نیمه جوشکاری شده برای مبدل‌های صفحه‌ای کاملاً جوشکاری شده مناسب هستند. نمونه‌ای از سطح مقطع صفحات در این نوع مبدل حرارتی صفحه‌ای تمام جوشکاری شده در شکل ۴-۴۰ مشاهده می‌شود.

¹ Fully-Welded plate heat exchanger



شکل ۴-۳۹: جوشکاری صفحات مبدل حرارتی صفحه‌ای توسط لیزر



شکل ۴-۴۰: نمونه‌ای از سطح مقطع صفحات در مبدل حرارتی صفحه‌ای کاملاً جوشکاری شده



مراجع فصل ۴:

- [1] Gupta, J.P., Fundamentals of Heat Exchanger and pressure Vessel Technology, Hemisphere, Washington, DC, 1986.
- [2] Novak, L., Private communication, 2002.
- [3] Raju, K.S.N. and Jagdish, C.B., Plate Heat Exchanger and their Performance, in Low Reynolds Number Flow Heat Exchangers, ed., S.Kakac, R.K. Shah, and A.E. Bergles, Hemisphere, Washington, DC, 1983, PP. 899-912.
- [4] Saunders, E.A.D., Heat Exchangers-Selection, Design and Construction, Wiley, New York, 1988.
- [5] Cowen, C.T., Choosing Materials of Construction for Plate Heat Exchangers – I, II, in Process Heat Exchange, ed. V. Cavaseno, McGraw-Hill, New York, 1980.
- [6] Kakac, S. and Liu, H., heat Exchangers – Selection, Rating, and Thermal Design, 2nd edn, CRC Press, Boca Raton, FL, 2002.
- [7] Touloukian, Y.S. and Ho, C.Y., eds., Thermophysical Properties of Matter Plenum, New York, NY, 1972.
- [8] Cengel, Y.A., Heat Transfer, 2nd edn, McGraw-Hill, New York, 2003.
- [9] Kulesus, G., Select the Right Gasket for Plate Heat Exchangers, Chemical Engineering, Vol. 99, no. 9, PP. 167-170, 1992.
- [10] Manglik, R.M. and Muley, A., Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Plate- and-Frame Heat Exchangers: A Literature Review, Report No. TFL-Int-1, University of Cincinnati, OH, 1993

فصل ۵



اصول طراحی مبداهای حرارتی

۵-۱- مقدمه

طراحی حرارتی- هیدرولیکی^۱ مبداهای حرارتی صفحه ای بیش تر مشابه روش‌های به کار گرفته شده برای طراحی انواع دیگر مبداهای حرارتی می‌باشد، الگوریتم کلی فرآیند طراحی در شکل ۵-۱ خلاصه شده است [۱] و چنانچه که نشان داده شده، ملاحظات کلی طراحی شامل موارد زیر می باشند:

۱- مشخصات مساله ی مورد نظر یا طرح و فرآیند

۲- طراحی حرارتی و هیدرولیکی

۳- طراحی مکانیکی و ساختاری و محدودیت های موجود در سر راه بهره برداری

مبدا و نگهداری از آن

۴- ملاحظات مربوط به ساخت و هزینه

۵- عوامل (متوازن کننده) و بهینه سازی بر اساس سیستم

در بخش مشخصات فرآیند یا مساله طراحی، همه ی اطلاعات لازم برای طراحی و بهینه سازی مبدا در یک کاربرد خاص ارایه می شود. از جمله این خصوصیات می توان به نوع ساختار مبدا و مواد مورد استفاده، نوع سیالات و آرایش جریان آن‌ها، بار حرارتی و محدودیت های افت فشار اشاره کرد.

1 . Thermal hydraulic design

2 . Trade off factors

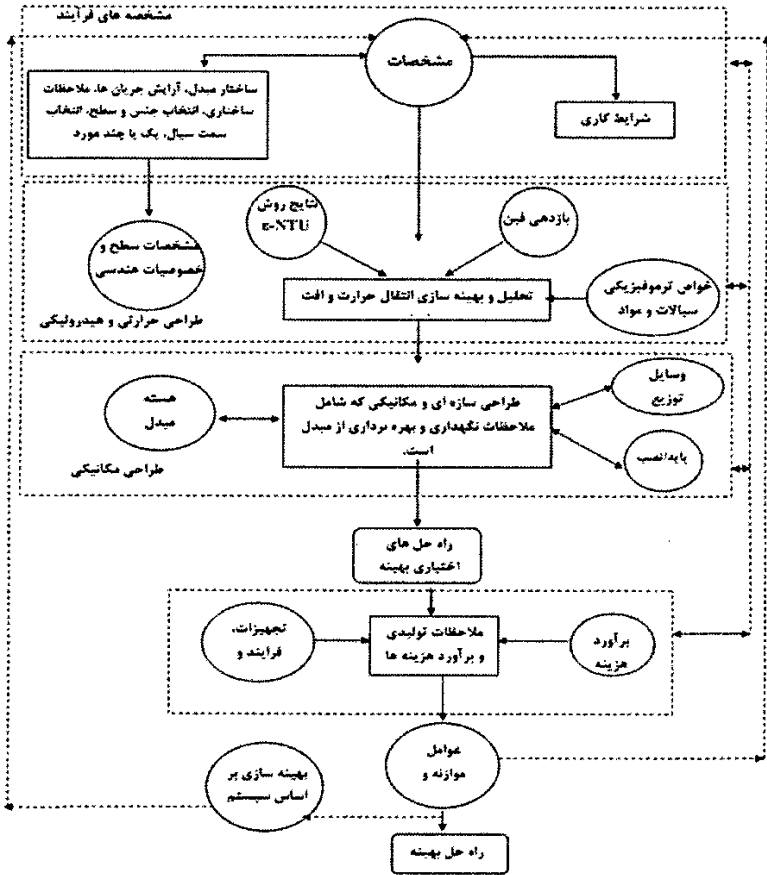


طراحی حرارتی- هیدرولیکی مبدل حرارتی تعیین کمی انتقال حرارت، افت فشار و همچنین مشخص کردن ابعادی مبدل^۱ و درجه بندی^۲ را در بر می‌گیرد. در طراحی مکانیکی، انسجام سازه ای و مکانیکی مبدل تحت شرایط کاری حالت پایدار و گذرا بررسی می‌شود، همچنین انطباق مبدل با کدها و استانداردهای محلی، ملی و بین‌المللی (مانند TEMA، بخش VIII استاندارد ASME، API و دیگر کدهای مربوط به خستگی و مخازن تحت فشار) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ارزیابی های تولیدی و برآورد هزینه‌های ضروری باید طوری انجام شود که بتوان برای بهینه سازی سیستم مصالحه لازم را انجام داد. در مساله بسیار پیچیده طراحی مبدل، تنها در یک بخش از کل فرآیند طراحی، ارزیابی تحلیلی کمی داریم. با توجه به تعداد زیاد ارزیابی های کیفی و موازنه هایی که باید در طراحی مبدل انجام شوند، می توان گفت که طراحی یک مبدل حرارتی چیزی فراتر از یک فن و مهارت بلکه یک هنر است [۴-۱].

در این فصل روش کلی طراحی و هیدرولیکی (گام دوم در لیست فوق در شکل ۱-۵) ارائه می‌شود. برخی از موضوعات مربوط به ساختار و شیوه تولید مرتبط با مبدل‌های حرارتی صفحه ای در فصل های ۲ و ۴ مطرح شدند. دو مساله ی ابتدایی و اساسی در طراحی حرارتی و هیدرولیکی مبدل های حرارتی صفحه ای، درجه بندی و سایزبندی آن ها می باشند. مساله درجه بندی عبارت است از تعیین بار حرارتی، دماهای خروجی سیالات و افت فشار در هر طرف در یک مبدل حرارتی صفحه ای. بنابراین باید توجه ساختمان، اندازه و مشخص بودن تمام ابعاد، آرایش جریان، مشخصات حرارتی و هیدرولیکی و شرایط کاری جریان ها، دبی ها، دماهای ورودی، عوامل رسوب و غیره، مشخث گردد. مساله ی تعیین ابعاد مبدل (سایزبندی)، از سوی دیگر نیاز به تعیین نوع ساختمان، آرایش جریان، مساحت سطح لازم (یا اندازه مبدل) برای یک مجموعه معلوم از جریان های سیال و شرایط کاری آن ها (دماهای ورودی / خروجی و دبی ها)، بار حرارتی مشخص و محدودیت های افت فشار، دارد [۴].

1. Exchanger sizing

2. Rating



شکل ۵-۱: روش کلی طراحی مبدل حرارتی

۵-۲- تئوری انتقال حرارت

وقتی دو جسم که در مجاورت یکدیگر قرار گرفته‌اند دارای دمای متفاوتی باشند، بین آنها پدیده‌ای به نام انتقال حرارت صورت می‌گیرد که بر اساس این پدیده گرما از جسم با دمای بیشتر به طرف جسم با دمای کمتر منتقل می‌شود. هرچه اختلاف دمای بین دو جسم زیادتر باشد میزان گرما بیشتر و جریان گرما سریعتر منتقل می‌شود. با

گذشت زمان اختلاف دما کاهش می‌یابد و نرخ انتقال گرما نیز کم می‌شود تا جایی که دمای دو جسم یکسان می‌شود و دیگر تبادل حرارت اتفاق نمی‌افتد. به صورت کلی انتقال حرارت به سه روش انجام می‌گیرد:

۱- هدایت^۱: انتقال حرارت در اجسام جامد از طریق هدایت صورت می‌گیرد که به علت ارتعاش مولکول‌ها و اتم‌ها بوده و هیچ‌گونه انتقال موادی وجود ندارد، انتقال گرما در دسته قاشق که در داخل یک فنجان چای داغ قرار گرفته است، از طریق هدایت انجام می‌گیرد (شکل ۵-۲). انتقال گرما در داخل مصالح ساختمانی مانند دیوار و سقف نیز از طریق هدایت صورت می‌پذیرد.

۲- جابه‌جایی^۲: انتقال حرارت در سیالات از طریق جابه‌جایی انجام می‌گیرد که در آن انرژی از طریق حرکت المانهای جرمی کوچک منتقل می‌شود. انتقال حرارت در آب و هوا هر دو از طریق جابه‌جایی است، گرم شدن اتاق توسط رادیاتور شوفاژ، یا سرد شدن قاشق داغ توسط شیر آب مثال‌هایی از انتقال حرارت به طریقه‌ی جابه‌جایی هستند. (شکل ۵-۳). معمولاً جابه‌جایی آزاد به علت اختلاف چگالی و جابه‌جایی اجباری معمولاً از طریق پمپ ایجاد می‌شود.

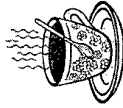
۳- تشعشع^۳: انتقال حرارت خورشید به سطح زمین تابش یا تشعشع است؛ این نوع انتقال حرارت بر خلاف دو نوع قبلی نیازی به محیط مادی ندارد و به صورت موج حرکت می‌کند، عبور نور و گرمای خورشید از خلأ و رسیدن آن به سطح زمین نشان از آن دارد که انتقال این نوع گرما نیازی به محیط مادی ندارد (شکل ۵-۴).

در بیشتر مسایل مهندسی و در صنعت نحوه انتقال گرما ترکیبی از حالت‌های فوق می‌باشد که به صورت سری یا موازی انجام می‌شود. در مبدل‌های حرارتی معمولاً انتقال حرارت به روش تشعشع انجام نمی‌شود و انتقال حرارت عموماً به صورت هدایت و جابه‌جایی صورت می‌گیرد که روش جابه‌جایی از تأثیر بیشتری برخوردار است.

از سوی دیگر دو نوع جریان سیال داریم: یکی آرام^۴ و دیگری مغشوش^۵. وقتی سیال

-
- 1 Conduction
 - 2 Convection
 - 3 Radiation
 - 4 Laminar
 - 5 Turbulent

در داخل مسیری حرکت می‌کند به علت وجود اصطکاک سرعت سیال در دیواره‌ها صفر و هر چه از دیواره‌ها دورتر شویم سرعت بیشتر می‌شود، از این رو پروفیل سرعت سیال به فرم سهمی خواهد بود.



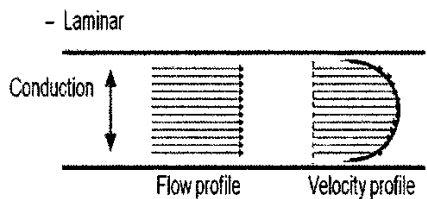
شکل ۴-۲: انتقال حرارت توسط هدایت از انتهای فاشی به دسته آن



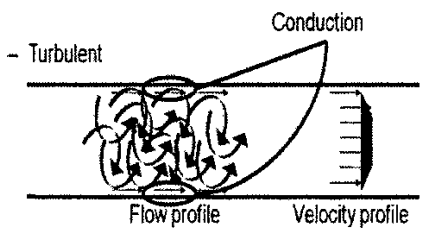
شکل ۴-۳: انتقال حرارت توسط جابه‌جایی، جذب گرما توسط آب و سرد شدن فاشی تا برابری دمای هر دو



شکل ۴-۴: انتقال حرارت توسط تشعشع جذب گرمایی خورشید در روز و تشعشع گرما در شب در سرعت‌های پایین و در شرایط معمولی جریان سیال آرام خواهد بود که در این صورت انتقال حرارت به صورت هدایت انجام می‌شود، ولی در سرعت‌های بالا و یا در شرایط خاص فقط در نزدیکی دیواره‌ها جریان آرام و در بقیه نقاط متشنش خواهد بود، از این رو بیشتر پروسه انتقال حرارت در این حالت به صورت جابه‌جایی انجام می‌گیرد، که در شکل‌های (۴-۵) و (۵-۵) این موضوع بخوبی نشان داده شده است.



شکل ۵-۵: انتقال حرارت در جریان آرام

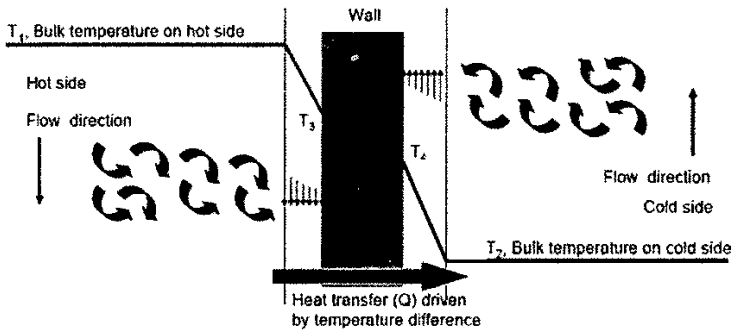


شکل ۵-۶: انتقال حرارت در جریان مغشوش

بنابراین با افزایش اغتشاش در جریان، میزان انتقال حرارت مبدل بیشتر می‌شود. عوامل متعددی در مغشوش شدن جریان تاثیر دارد که مهمترین آنها سرعت، ویسکوزیته^۱ و نوع صفحه می باشد. با افزایش سرعت، لایه آرام جریان نازکتر می‌شود و بر اغتشاش افزوده می‌شود، اما افزایش ویسکوزیته سیال، لایه آرام جریان را ضخیم تر می‌کند و از اغتشاش می‌کاهد.

فرایند انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی به خوبی در شکل (۵-۷) نمایش داده شده است.

1 Viscosity

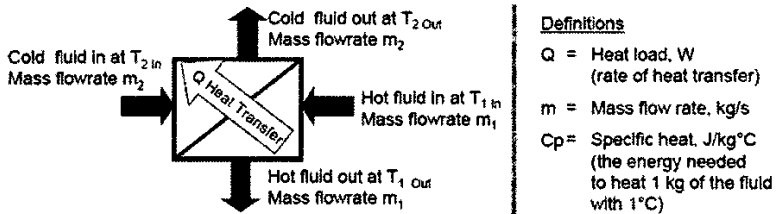


شکل ۵-۷: پروفیل تغییرات دما در نقطه‌ای از دیواره یک مبدل حرارتی

بنابراین با افزایش اغتشاش، لایه آرام جریان نازکتر می‌شود و با کاهش افت درجه حرارت در آن، انتقال حرارت بهتری انجام می‌گیرد.

۵-۳- روابط انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی

در مبدل‌های حرارتی تلفات حرارتی منتقل شده به محیط صفر در نظر گرفته می‌شود و در واقع گرمای منتقل شده از سیال گرم‌کننده همگی صرف گرم شدن محصول می‌شود و به وسیله آن جذب می‌گردد. از این رو بالانس انرژی در مبدل‌های حرارتی را براساس شکل (۵-۸) می‌توان به صورت زیر نوشت:



شکل ۵-۸: بالانس انرژی در مبدل حرارتی

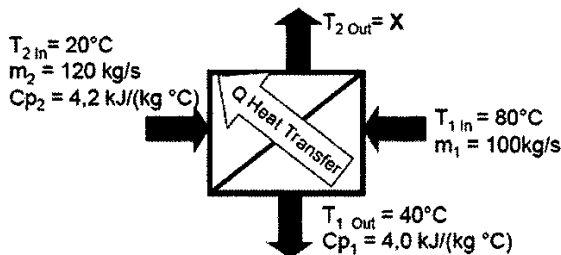
$$Q_1 = m_1 C_{p1} (T_{1in} - T_{1out}) \quad \text{گرمای آزاد شده از طرف سیال گرم}$$

$$Q_2 = m_2 C_{p2} (T_{2out} - T_{2in}) \quad \text{گرمای جذب شده توسط سیال سرد}$$

$$Q_1 = Q_2 \quad \text{بالانس انرژی (با صرف نظر از اتلاف حرارت)}$$

که در آن Q بار حرارتی^۱ بر حسب W (نرخ انتقال حرارت)، m دبی جرمی بر حسب kg/s و C_p ظرفیت گرمایی ویژه سیال^۲ (انرژی لازم برای گرم کردن 1 kg از سیال به اندازه $1^\circ C$) بر حسب $J/kg^\circ C$ می‌باشد.

مثال ۵-۱: به عنوان مثال درجه حرارت خروجی سیال سرد را می‌توان در شکل (۹-۵) با استفاده از بالانس انرژی به صورت زیر به دست آورد.



شکل ۹-۵: یافتن درجه حرارت خروجی یک مبدل به کمک بالانس انرژی

$$Q_1 = m_1 C_{p1} (T_{1in} - T_{1out}) = 100\text{ kg/s} \times 4.0\text{ kJ/Kg}^\circ C \times (80 - 40)^\circ C = 16000\text{ KJ/S} = 16000\text{ KW}$$

$$Q_1 = Q_2 \Rightarrow 16000 = Q_2 = m_2 C_{p2} (T_{2out} - T_{2in})$$

$$16000\text{ KW} = 120\text{ kg/s} \times 4.2\text{ KJ/Kg}^\circ C \times (X - 20)^\circ C \Rightarrow X = 52^\circ C$$

رابطه کلی انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی عبارت است از:

$$Q = U \times A \times \text{LMTD} \quad (1-5)$$

که در آن Q همان بار حرارتی بر حسب W ، U ضریب انتقال حرارت کلی^۳ OHTC بر حسب $W/m^2^\circ C$ ، A سطح انتقال حرارت (م^۲) و LMTD اختلاف دمایی لگاریتمی^۴ می‌باشد. اختلاف دما در واقع نیروی محرک یک مبدل حرارتی است و LMTD پروفیل دمایی آن را توصیف می‌کند.

1 Heat load

2 Specific heat

3 Overall heat transfer coefficient

4 Logarithmic Mean temperature difference

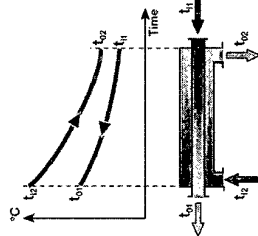
۳-۵-۱- اختلاف دمای لگاریتمی LMTD در مبدل‌های حرارتی

در صنعت، تبادل حرارت به دو صورت مستقیم و غیر مستقیم انجام می‌شود.

۱- **تبادل حرارت مستقیم**^۱ که در آن سیال گرم‌کننده و سیال گرم‌شونده به منظور تبادل حرارت با هم مخلوط می‌شوند. گرم کردن آب یا هر سیال دیگری با تزریق بخار به داخل آنها تبادل حرارت مستقیم محسوب می‌شود.

۲- **تبادل حرارت غیر مستقیم**^۲ در این روش یک لایه جداکننده یا صفحه‌ای بین سیال گرم‌کننده و سیال گرم‌شونده وجود دارد که مانع از ترکیب آنها می‌شود. در نتیجه گرما از طریق این صفحه از سیال گرم‌کننده به محصولی که قرار است گرم شود، منتقل می‌شود.

مبدل‌های حرارتی براساس تبادل حرارتی غیرمستقیم عمل می‌کنند که نمونه‌ای از آن برای یک مبدل پوسته لوله در شکل (۵-۱) نشان داده شده است. آب گرم‌کننده در پوسته و آب گرم‌شونده یا همان محصول در لوله جریان دارد و انتقال گرما توسط جداره لوله انجام می‌پذیرد.



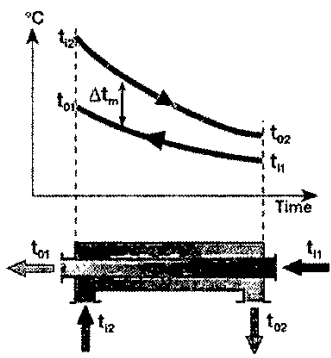
شکل ۵-۱: پروفیل تغییرات دما در یک مبدل حرارتی

در یک مبدل حرارتی که دو جریان سرد و گرم در آن با یکدیگر تبادل حرارت می‌کنند، جریان سرد با دمای T_{c1} وارد شده و پس از گرم شدن با دمای T_{c2} از سمت

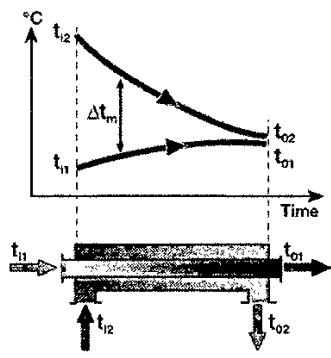
1 Direct heating

2 Indirect heating

دیگر خارج می‌شود. برای این تبادل حرارت دو مدل مختلف در مبدل‌های حرارتی در نظر گرفته می‌شود. در مدل اول که در شکل (۵-۱۱) نمایش داده شده دو جریان ضمن حرکت در جهت عکس یکدیگر تبادل حرارت می‌کنند که به آن جریان معکوس^۱ می‌گویند. در مدل دوم جریان ضمن حرکت در جهت هم‌سوی یکدیگر تبادل حرارتی می‌کنند که به آن جریان هم جهت^۲ (موازی) گفته می‌شود، که در شکل (۵-۱۲) نمایش داده شده است.



شکل ۵-۱۱: پروفیل درجه حرارت در جریان معکوس



شکل ۵-۱۲: پروفیل درجه حرارت در جریان هم جهت (موازی)

1 Counter-current flow
2 Co-current flow

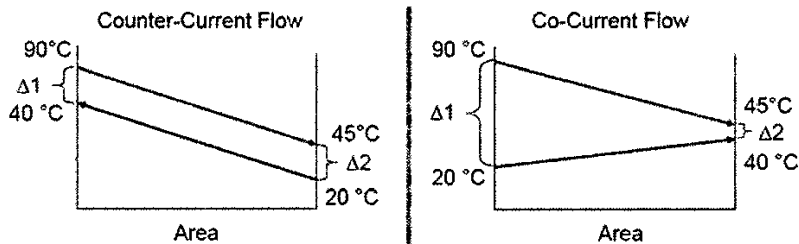
یکی از نکته‌های مهمی که در آرایش جریان هم جهت (موازی) شکل (۵-۱۲) آمده، آن است که دمای نهایی جریان سیال سرد همواره کمتر از جریان سیال گرم خروجی است. در حالت حدی با در نظر گرفتن سطح حرارتی نامحدود (A)، این دو درجه حرارت برابر خواهند شد. از دیگر سو در آرایش جریان معکوس، به خاطر اختلاف دمای مطلوب، دمای جریان سرد نهایی ممکن است از دمای جریان سیال گرم خروجی بیشتر شود. این مزیت ترمودینامیکی خاص آرایش جریان معکوس، سبب کاهش سطح حرارتی مورد نیاز در مبدل جهت یک بار حرارتی معین در قیاس با آرایش جریان موازی می‌شود. همان‌گونه که در رابطه (۵-۱) مشاهده شده، یکی از پارامترهای مهم در طراحی یک مبدل حرارتی، اختلاف دمای لگاریتمی LMTD می‌باشد. LMTD به نوع مدل جریان مبدل بستگی دارد به گونه‌ای که برای جریان هم جهت از رابطه

$$LMTD = \frac{(T_{i2} - T_{i1}) - (T_{o2} - T_{o1})}{\ln \frac{T_{i2} - T_{i1}}{T_{o2} - T_{o1}}} \quad (۲-۵)$$

و برای جریان معکوس از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$LMTD = \frac{(T_{i2} - T_{o1}) - (T_{o2} - T_{i1})}{\ln \frac{T_{i2} - T_{o1}}{T_{o2} - T_{i1}}} \quad (۳-۵)$$

مثال ۵-۲: در یک مبدل حرارتی جریان سرد یا دمای ۲۰°C وارد و با دمای ۴۰°C خارج می‌شود و جریان گرم از دمای ۹۰°C به ۴۵°C کاهش می‌یابد. LMTD را برای هر دو حالت جریان محاسبه کنید:



شکل ۵-۱۳: نمایش پروفیل دما در جریان‌های هم جهت و معکوس

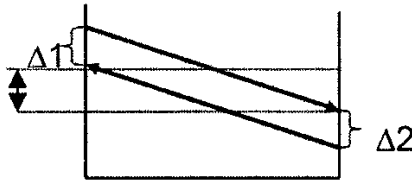
حل: برای جریان معکوس داریم:

$$LMTD = \frac{50 - 25}{\ln \frac{50}{25}} = \frac{25}{\ln 2} = 36.1^{\circ}\text{C}$$

و برای جریان هم جهت داریم:

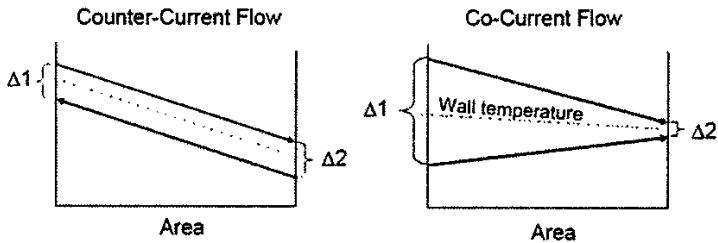
$$LMTD = \frac{70 - 5}{\ln \frac{70}{5}} = \frac{65}{\ln 14} = 24.6^{\circ}\text{C}$$

بنابراین جریان معکوس دارای LMTD بالاتر بوده و از این رو در آن سطح تبادل کمتری مورد نیاز می‌باشد و از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه تر است. همان‌گونه که پیشتر بیان شد، در این حالت دمای خروجی جریان گرم می‌تواند از دمای خروجی جریان سرد همان‌گونه که در شکل (۵-۱۴) نشان داده شده، کمتر باشد.



شکل ۵-۱۴: پروفیل دما در جریان معکوس

یکی دیگر از تفاوت‌های بین جریان‌های هم جهت و معکوس در پروفیل، دمای دیواره^۱ می‌باشد، همان‌گونه که در شکل (۵-۱۵) نشان داده شده است، در جریان هم جهت دمای دیواره تقریباً ثابت بوده، ولی پروفیل دمای دیواره در جریان معکوس متغیر می‌باشد. از این رو در مواردی که کنترل دمای دیواره مورد نظر است (همانند بعضی از مواد غذایی که به درجه حرارت‌های خاصی حساسیت دارند یا سیالاتی که در درجه حرارت‌های خاصی احتمال کریستال شدن داشته و یا در درجه حرارت‌های معینی رسوب CaCO_3 در آنها ایجاد می‌شود) از مبدل‌هایی با جریان هم جهت استفاده می‌شود.



شکل ۵-۱۵: پروفیل دمای دیواره در جریان‌های هم جهت و معکوس

مثال ۵-۳: اطلاعات مربوط به یک مبدل حرارتی در جدول (۵-۱) ارائه شده است.

مطلوب است محاسبه:

۱- دمای خروجی سیال سرد

۲- LMTD و سطح حرارتی مورد نیاز مبدل برای دو نوع جریان هم جهت و معکوس

جدول ۵-۱: مشخصات مبدل حرارتی

مشخصه	سیال گرم (۱)	سیال سرد (۲)
دبی جرمی kg/s	100	120
ظرفیت گرمایی ویژه KJ/kg°C	4.0	4.2
دمای ورودی °C	80	20
دمای خروجی °C	50	?
ضریب انتقال حرارت کلی W/m ² °C	6690	

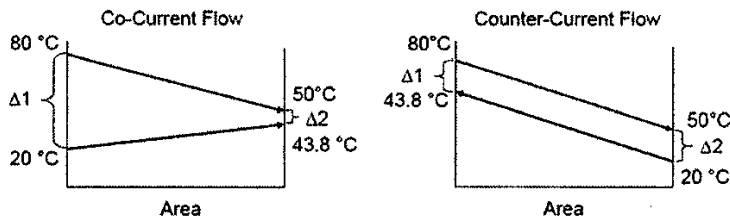
حل:

۱- محاسبه دمای خروجی سیال سرد:

$$Q_1 = m_1 C_{p1} (T_{1in} - T_{1out}) = 100 \text{ kg/s} \times 4.0 \text{ kJ/Kg}^\circ\text{C} \times (80 - 50)^\circ\text{C} \\ = 12000 \text{ KW}$$

$$Q_1 = Q_2 \Rightarrow 12000 \text{ KW} = Q_2 = m_2 C_{p2} (T_{2out} - T_{2in}) \\ \Rightarrow 12000 \text{ KW} = 120 \text{ kg/s} \times 4.2 \text{ kJ/Kg}^\circ\text{C} \times (T_{2out} - 20)^\circ\text{C} \\ \Rightarrow T_{2out} = 43.8^\circ\text{C}$$

پروفیل دما در جریان‌های هم جهت و معکوس در شکل (۵-۱۶) آورده شده است.



شکل ۵-۱۶: پروفیل دما در جریان‌های هم جهت و معکوس

۲- حال برای مبدل با جریان معکوس داریم:

$$LMTD = \frac{(36.2 - 30)}{\ln\left(\frac{36.2}{30}\right)} = \frac{6.2}{\ln 1.2067} = 33^\circ\text{C}$$

$$Q = U \times A \times LMTD \Rightarrow 12000 \text{ KW} = 6.69 \text{ KW/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \times A \times 33^\circ\text{C}$$

$$\Rightarrow A = 54.3 \text{ m}^2$$

اما برای مبدل با جریان هم جهت نیز خواهیم داشت:

$$LMTD = \frac{(60 - 6.2)}{\ln\left(\frac{60}{6.2}\right)} = \frac{53.8}{\ln 9.677} = 23.7^\circ\text{C}$$

$$Q = U \times A \times LMTD \Rightarrow 12000 \text{ KW} = 6.69 \text{ KW/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \times A \times 23.7^\circ\text{C}$$

$$\Rightarrow A = 75.7 \text{ m}^2$$

همان‌گونه که انتظار می‌رفت، مبدل حرارتی با جریان معکوس سطح حرارتی کمتری نیاز دارد و از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است.

۵-۳-۲- ضریب انتقال حرارت کلی (OHTC) در مبدل‌های حرارتی

در طراحی مبدل‌های حرارتی هر چه مقدار ضریب انتقال حرارت کل بیشتر باشد، سطح انتقال حرارت کاهش می‌یابد و مبدل حرارتی مقرون به صرفه‌تر خواهد بود. این ضریب به عوامل متعددی بستگی دارد که مهمترین آنها عبارتند از:

۱- افت فشار مجاز طرف سیال گرم و سرد

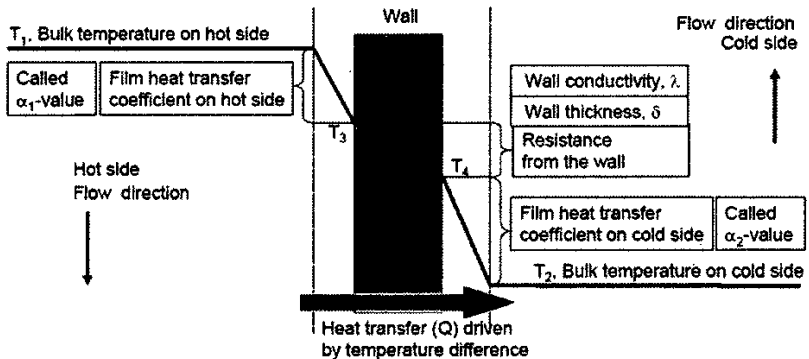
۲- لزجت سیال گرم و سرد

۳- شکل و ضخامت صفحه جداکننده بین سیال گرم و سرد

۴- جنس صفحه جداکننده

۵- وجود یا نبود رسوب در صفحات

ضریب انتقال حرارت کلی یک مبدل حرارتی مطابق شکل (۵-۱۷) از سه بخش مربوط به سیال سرد، سیال گرم و دیواره جداکننده تشکیل شده است که توسط رابطه (۴-۵) محاسبه می‌شود.



شکل ۵-۱۷: انتقال حرارت کلی در یک مبدل حرارتی

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_h} + \frac{1}{h_c} + \frac{t}{K_w} \quad (۴-۵)$$

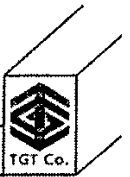
که در این رابطه h_c و h_h ضریب انتقال حرارت لایه مرزی سیال سرد و گرم و K_w ضریب هدایت حرارتی دیواره^۱ بر حسب W/m^2C بوده که از جداول هندبوک‌ها به دست می‌آید و t هم ضخامت دیواره بر حسب m می‌باشد. حال در صورت افزایش آشفتگی^۲ جریان، لایه مرزی آرام جریان نازکتر شده و بنابراین مقاومت حرارتی کاهش می‌یابد که این موجب افزایش ضریب h و در نهایت افزایش ضریب انتقال حرارت کلی U می‌شود. برای محاسبه h از سه عدد معروف بدون بعد که توصیف کننده انتقال حرارت می‌باشند، استفاده می‌کنیم. عدد ناسلت^۳ که توصیف کننده انتقال حرارت می‌باشد عبارت است از:

$$NU = \frac{hD_h}{k} \quad (۵-۵)$$

1 Wall thermal conductivity

2 Turbulence

3 Nusselt number



که در آن k ضریب هدایت حرارتی سیال (بر حسب $W/m^{\circ}C$) بوده که از جداول قابل دسترسی است و D_h قطر متوسط هیدرولیکی^۱ (بر حسب m) است که مثلاً در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای مساوی دو برابر عمق پرس شده صفحه می باشد. عدد پراتل^۲ که توصیف کننده خود سیال می‌باشد، عبارت است از:

$$Pr = \frac{C_p \mu}{K} \quad (۶-۵)$$

که در آن C_p ظرفیت گرمایی ویژه سیال ($J/kg^{\circ}C$)، μ ویسکوزیته سیال ($Pa.s$) و K ضریب هدایت حرارتی ($W/m^{\circ}C$) با توجه به مشخص بودن سیال به عنوان پارامترهای معلوم می‌باشند.

عدد رینولدز^۳ که شرایط جریان سیال را توصیف می‌کند، عبارت است از:

$$Re = \frac{G.D_h}{\mu} \quad (۷-۵)$$

که در آن G نرخ جریان جرمی^۴ در هر کانال مبدل ($Kg/m^2.s$) می باشد که از تقسیم نرخ جریان کلی سیال تقسیم بر تعداد کانال‌ها در مبدل محاسبه می‌شود. این سه ثابت توسط رابطه ای به هم مربوط هستند که در بخش های بعدی ارایه می‌شود.

۵-۳-۳- عملکرد حرارتی (طول حرارتی)

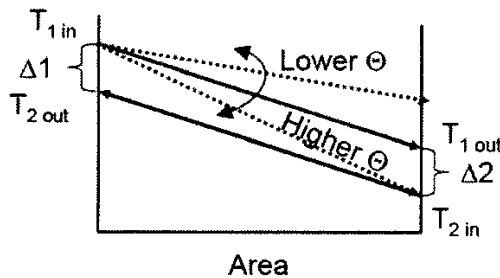
طول حرارتی^۵ مقیاسی برای تعیین میزان سختی انجام یک عملیات مشخص در یک مبدل حرارتی است و در واقع برای ارزیابی کمی عملکرد گرمایی صفحات مبدل تعریف می‌شود. طول حرارتی با دو نام مختلف در صنعت مبدل بیان می‌شود. یکی تعداد واحدهای انتقال حرارت^۶ NTU و دیگری θ می‌باشد. از مفهوم θ در مبدل‌های حرارتی

-
- 1 Hydraulic mean diameter
 - 2 Prantl number
 - 3 Reynolds number
 - 4 Mass flow rate
 - 5 Thermal length
 - 6 Number of Heat Transfer Unit
 - 7 Theta

در بخش‌های مختلف همانند وظیفه حرارتی، واحد حرارتی، نوع صفحات و نوع کانال‌ها (کانال با θ کم، زیاد و متوسط) استفاده می‌شود. معمولاً $\theta_1 < \theta$ را کم^۱ و $\theta > \theta_1$ را زیاد^۲ در نظر می‌گیرند. مطابق شکل (۵-۱۸) می‌توان NTU یا θ را روی هر دو سوی یک مبدل حرارتی به صورت زیر به دست آورد:

$$NTU_1 = \theta_1 = \frac{|T_{1in} - T_{1out}|}{LMTD} = \frac{UA}{(\dot{m}C_p)_1} \quad (۹-۵)$$

$$NTU_2 = \theta_2 = \frac{|T_{2in} - T_{2out}|}{LMTD} = \frac{UA}{(\dot{m}C_p)_2} \quad (۱۰-۵)$$



شکل ۵-۱۸: تعریف طول حرارتی

یک مبدل حرارتی با طول حرارتی بالاتر نسبت به مبدل با طول حرارتی کمتر، امکان انجام عملیات ترمودینامیکی سخت‌تری را دارد. واحدهای حرارتی با θ زیاد در صفحات بلندتر ایجاد می‌شود که به سیال زمان بیشتری برای انتقال حرارت می‌دهد. از سوی دیگر عمق پرسکاری شده این صفحات کمتر می‌باشد، از این رو سیال کمتری در بین صفحات آنها جاری است. به هر حال در صفحات با θ زیاد (که به آن صفحات سخت^۳ نیز گفته می‌شود) افت فشار زیاد و ضرایب انتقال گرما بزرگ هستند، در مقابل در صفحات با θ کم (که به آنها صفحات نرم^۴ نیز گفته می‌شود) افت فشار کم و ضرایب

- 1 Low theta
- 2 High theta
- 3 Hard Plates
- 4 Soft Plates

انتقال حرارت هم کوچک می‌باشند. از این رو جدا از ابعاد کلی صفحه، نوع برجستگی‌های صفحه اثر عمده‌ای بر عملکرد حرارتی صفحات دارد.

سازندگان مبدل‌های صفحه‌ای هم به دلیل آنکه محدوده وسیعی از وظایف حرارتی با بیشترین بازده پوشش داده شود، هم صفحات سخت (θ بزرگ) و هم صفحات نرم (θ کوچک) را تولید می‌کنند. این سازندگان، صفحات دارای مقادیر بزرگ زاویه شورون را به صورت صفحات با θ بزرگ و صفحات دارای مقادیر کوچک زاویه شورون را به صورت صفحات با θ کوچک مشخص می‌کنند. یک زاویه شورون حدود 25° تا 30° زاویه کوچک در نظر گرفته می‌شود، در حالی که یک زاویه بزرگ شورون حدود 60° تا 65° می‌باشد.

یکی از مسایل مربوط به واحدهای صفحه‌ای انطباق کامل با وظایف گرمایی است. دستیابی به وظیفه گرمایی مورد نیاز به همراه استفاده کامل از افت فشار مجاز بسیار مشکل است. یک راه حل نصب بیش از یک نوع کانال در یک صفحه مجموعه با مقادیر NTU متفاوت می‌باشد. انواع مختلف کانال می‌توانند در کنار هم قرار داده شوند تا NTU مطلوب در محدوده بین بزرگترین و کوچکترین مقدار به دست آید. صفحه دارای NTU بزرگ دارای موج‌های شورون با زاویه بزرگ است که منجر به افت فشار نسبتاً بزرگتری می‌شود، در حالی که صفحه دارای NTU کوچک، موج‌های شورون با زاویه خطی کوچکتری را داراست که به افت فشار نسبتاً کوچکی منجر می‌شود.

۵-۴- ملاحظات طراحی

در طراحی یک مبدل حرارتی صفحه ای پارامترهای بسیار زیادی دخالت دارند. برخی از این پارامترها باید به طور مستقل توسط طراح بسته به شرایط کاری مبدل حرارتی انتخاب شوند. سایر پارامترهای طراحی با استفاده از تصمیم‌های گرفته شده توسط طراح محاسبه خواهند شد.

در این بخش برخی از عوامل مؤثر در طراحی یک مبدل حرارتی صفحه‌ای معرفی شده و سپس هر کدام از آنها به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این عوامل عبارتند از:

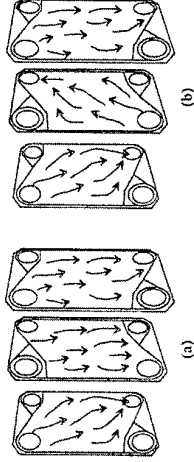
۵-۴-۱- آرایش و توزیع جریان

یکی از مزایای استفاده از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای قابلیت آن در دستیابی به

آرایش‌های مختلف جریان می‌باشند، این مزیت با استفاده از الگوها و واترهای آب‌بندی مناسب به دست می‌آید. پارامترهای زیادی روی آرایش جریان تأثیر می‌گذارند که از جمله می‌توان به مسیر برای جریان، تعداد مسیرها (گذرها)، تعداد (راه‌های بین صفحات در یک مسیر، توزیع جریان در مجرای ورودی و خروجی صفحه، آخرین صفحه مبدل حرارتی صفحه‌ای و سایر موارد نام برد.

۴-۲- جهت جریان

زمانی که هر دو جریان سیال گرم و سرد در دو طرف صفحه مبدل حرارتی در یک جهت حرکت می‌کنند، جریان دو سیال، جریان موازی (هم جهت) نامیده می‌شود و برعکس، زمانی که دو سیال خلاف جهت یکدیگر در دو سوی صفحه مبدل حرارتی حرکت کنند، مبدل همراه با جریان معکوس^۲ به دست می‌آید. این موضوع در شکل ۱۹-۵ نمایش داده شده است.



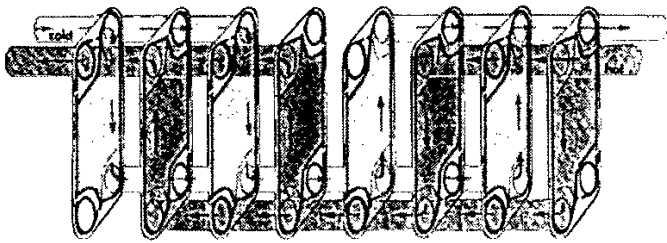
شکل ۱۹-۵: جریان موازی (a) و معکوس (b).

همان‌گونه که پیشتر گفته شد، مبدل با جریان معکوس معمولاً به علت بازدهی حرارتی بالا عملکرد بهتری دارد و تنها زمانی از مبدل با جریان موازی استفاده می‌شود که شرایط محدود است و به دلایلی نمی‌توان از مبدل با جریان مخالف استفاده کرد.

۴-۳- مسیر جریان^۳ (گذر)

1 Parallel flow
2 Counter flow
3 Pass

اگر جریان یک سیال تنها در یک جهت داخل صفحه‌های مبدل حرارتی صفحه‌ای حرکت کنند، آرایش را یک آرایش یک مسیره می‌نامند، آرایش چند مسیره جریان (چند گذر) نیز زمانی به دست می‌آید که سیال در طول مبدل صفحه‌ای در جهت‌های متفاوتی در گروهی از صفحات جریان داشته باشد. به منظور ایجاد این آرایش در حرکت سیال، از چند صفحه که کمتر از ۴ مجرای ورود و خروج سیال دارند، استفاده می‌شود نحوه انجام این عمل در شکل ۵-۲۰ مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۲۰: نحوه ایجاد آرایش چند مسیره جریان

کار گذاشتن یک صفحه با حفره‌های بسته به تبدیل آرایش یک مسیره (گذر) به یک آرایش دو مسیره (دو گذر) و کار گذاشتن دو صفحه با حفره بسته به تبدیل آرایش یک گذر به یک آرایش سه گذر منجر می‌شود و این روند به همین شکل ادامه دارد. هنگامی از آرایش‌های چند مسیره (گذر) استفاده می‌شود که به مقدار NTU بیشتر از آنچه که با استفاده از آرایش تک مسیره حاصل می‌شود، نیاز است. اگر افت فشار در یکی از سیال‌ها بیشتر باشد، از آرایش‌هایی استفاده می‌شود که در آنها مسیر عبور سیال با افت فشار بالاتر، کاهش یافته است. آرایش چند گذری در قیاس با آرایش تک گذر دو ایراد اساسی دارد: نخست آن که افت فشار بالاتری دارد، که مسافت جریان طولانی‌تر در داخل مبدل نام دارد. دیگر آنکه بازدهی پایین جریان‌های چندگذر است که بر اثر وجود جریان‌های موازی در داخل مبدل می‌باشد، زیرا این جریان‌های موازی دست کم در برخی از کانال‌های مجاور به وجود می‌آیند و نمی‌توان از آنها پرهیز کرد.

۵-۴-۴- تعداد مسیرها^۱ در یک گذر

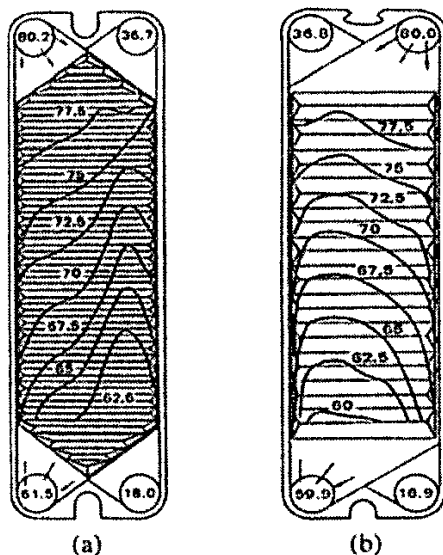
تعداد راه‌های بین صفحات که در یک مسیر جریان سیال از آنها می‌گذرد نیز یکی از پارامترهای تأثیرگذار به آرایش جریان می‌باشد. به عنوان مثال در شکل ۵-۲۰ این تعداد در هر دو مسیر نمایش داده شده، برابر با ۲ می‌باشد. انتخاب این تعداد راه، یک مقدار مهم در محاسبه‌ی سرعت جریان بین صفحات مبدل حرارتی صفحه‌ای می‌باشد. سرعت بسیار بالا میان صفحات باعث عدم پایداری انتقال حرارت و جریان می‌شود، در حالی که سرعت بسیار کم نیز به کاهش انتقال حرارت منجر می‌شود و احتمال رسوب‌گیری را افزایش می‌دهد، بنابراین، انتخاب تعداد مسیرها در هر گذر به سرعت جریان و نیز سطح مؤثر انتقال حرارت بستگی خواهد داشت.

۵-۴-۵- توزیع جریان در مجاری ورودی و خروجی جریان

نحوه توزیع جریان در ورودی و خروجی از صفحات در توزیع عرضی دما و فشار در صفحات مبدل حرارتی بسیار مؤثر می‌باشد. مجرای ورود و خروج سیال در یک سوی صفحه مبدل حرارتی دو نوع قرارگیری نسبت به هم دارند. در نوع اول که جریان قطری^۱ نامیده می‌شود مجرای ورودی و مجرای خروجی در دو سمت مخالف هم قرار دارند. در نوع دوم که جریان قائم^۲ نامیده می‌شود، هر دو مجرا در یک سوی صفحه قرار می‌گیرند. این دو نوع توزیع جریان در شکل ۵-۲۱ نمایش داده شده‌اند.

1 Diagonal flow

2 Vertical flow



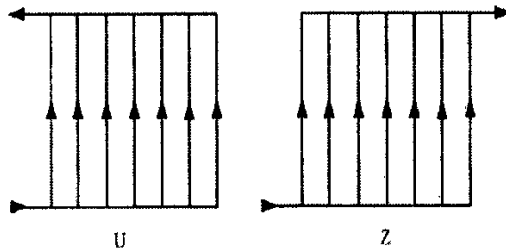
شکل ۵-۲: توزیع دما در جریان قائم (a) و جریان قطری (b)

در شکل ۵-۲۱ دمای ورود و خروج هر دو سیال و توزیع عرضی دما نیز نمایش داده شده است. همان گونه که مشخص است توزیع دما در صورت استفاده از ساختار جریان قطری یکنواخت‌تر خواهد بود. سایر پارامترهایی که در چگونگی توزیع عرضی دما تأثیر می‌گذارند، نسبت ابعادی صفحات (نسبت مقطری^۱، طول متوسط انتقال حرارت به عرض جریان) و تلفات در مجاری می‌باشند. نسبت کم ابعادی صفحه سبب توزیع نامناسب جریان در صفحات می‌شود، اما اینکه این نسبت چه مقداری باید باشد، هیچ توصیه جامعی وجود ندارد، اما بیشتر سازندگان معتبر مبدل‌های صفحه‌ای بر این واقعیت تأکید می‌کنند که نسبت ابعادی صفحات نباید از ۱.۸ کمتر باشد.

۵-۴-۶- صفحات انتهایی مبدل حرارتی صفحه‌ای

روی هم دو نوع توزیع جریان در مبدل‌های حرارتی استفاده می‌شود، این دو آرایش که U و Z نامیده می‌شوند. در شکل ۵-۲۲ مشاهده می‌شوند. در آرایش U شکل،

اتصالات ورودی و خروجی صرفاً در صفحه قاب ثابت مبدل حرارتی صفحه‌ای ایجاد می‌شوند، به طوری که این سیستم تنها محدود به آرایش‌های تک‌گذری است. در آرایش Z شکل، اتصالات ورودی و خروجی روی قاب ثابت و متحرک ایجاد می‌شوند. در آرایش U به طور معمول هر چهار مجرای صفحه اول با استفاده از واشر، آب‌بندی شده است تا از هرگونه نشت سیال به داخل فریم در ورودی سیال به مبدل حرارتی جلوگیری شود، به همین صورت آخرین صفحه مبدل حرارتی نیز هیچ گونه مجرای ندارد، بنابراین این دو صفحه هیچ حرارتی را انتقال نمی‌دهند، زیرا سیال تنها در یک طرف آنها جریان دارد. این دو صفحه با این ویژگی صفحات انتهایی^۱ مبدل نامیده می‌شوند، اما سایر صفحات مبدل که وظیفه انتقال حرارت را برعهده دارند، صفحات حرارتی^۲ مبدل نامیده می‌شوند.



شکل ۵-۲۲: دو نوع توزیع جریان در مبدل حرارتی صفحه و فریم
(a) آرایش U شکل (b) آرایش Z شکل

در آرایش Z شکل نیز با آنکه صفحات انتهایی از نظر واشر و سوراخ متفاوت هستند، اما همانند آرایش U شکل حرارت را منتقل نمی‌کنند. به هر روی دو صفحه انتهایی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای تنها در یک طرف با سیال در ارتباط است و انتقال حرارتی در آن انجام نمی‌شود که این موضوع باید در طی طراحی مورد توجه قرار گیرد.

۵-۴-۷- طبقه‌بندی آرایش مسیرها

مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای واشردار از نظر نحوه آرایش جریان بسیار انعطاف‌پذیرند،

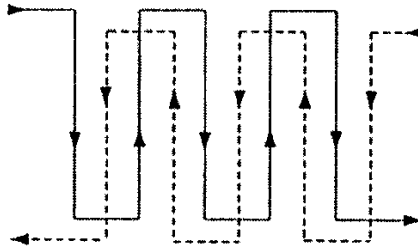
1 End plate

2 Thermal plate

به گونه‌ای که می‌توان آرایش جریان سیال درون مبدل را براساس چگونگی حرکت و جهت سیال تقسیم‌بندی کرد. براساس آرایش و اشهرهای آب بندی، انواع مختلفی از آرایش مسیر در هر سوی یک سیال در یک مبدل حرارتی امکان‌پذیر است. این آرایش‌ها عبارتند از: جریان سری^۱، جریان حلقوی^۲، یاموازی جریان مرکب^۳ یا ترکیبی.

۱- آرایش جریان سری

در این آرایش تمام جریان روی هر یک از صفحات حرکت می‌کند و بعد از عبور از هر صفحه تغییر جهت می‌دهد. این نوع آرایش هنگامی استفاده می‌شود که نرخ جریان (دبی) در آنها کم است؛ در ضمن باید اشاره کرد که از این آرایش بندرت استفاده می‌شود. طرح شماتیک این آرایش مسیر در شکل ۵-۲۳ مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۲۳: آرایش جریان سری

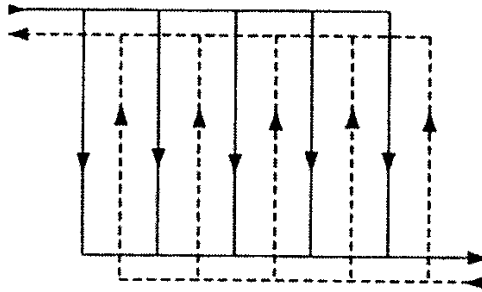
۲- آرایش جریان حلقوی

در آرایش جریان حلقوی، جریان اصلی پس از ورود به مبدل حرارتی به چندین زیر شاخه تقسیم می‌شود، سپس هر کدام از زیر شاخه‌ها پس از عبور از صفحات مبدل حرارتی در خروجی با یکدیگر ترکیب می‌شوند. این آرایش در کاربردهایی با نرخ جریان بالا استفاده می‌شود و یکی از معمول‌ترین آرایش‌های مسیر می‌باشد. در شکل ۵-۲۴ آرایش جریان حلقوی را مشاهده می‌کنید.

1 Series flow

2 Looped flow

3 Complex flow



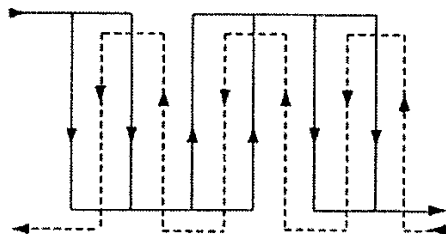
شکل ۵-۲۴: آرایش جریان حلقوی

۳- آرایش جریان مرکب

این آرایش ترکیبی از دو آرایش سری و حلقوی می‌باشد که در شکل ۵-۲۵ نمایش داده شده است. این گونه آرایش‌ها و انواع دیگر آنها بسادگی با استفاده از صفحات خاص که تعدادی از سوراخ‌های آنها بسته است و واشرهای معینی که در روی صفحات قرار دارند، به راحتی تشکیل می‌شوند. برای نمونه ممکن است جریانی که وارد کانال می‌شود، در بین چند صفحه اول تقسیم شود، سپس در پایین مبدل با هم آمیخته شده، آنگاه چند کانال را بدون اینکه جریان بین صفحات تقسیم شود به صورت سری طی کند، سپس جریان به صورت موازی بین کانال‌های انتهایی مبدل تقسیم شود و دوباره در انتها با هم ترکیب شده سیال از مبدل خارج می‌شود. به آرایشی که توضیح داده شد، آرایش چند گذر نیز گفته می‌شود. واژه گذر^۱ در مبدل‌های صفحه‌ای به گروهی از کانال‌ها^۲ گفته می‌شود که در آنها جریان در یک جهت باشد.

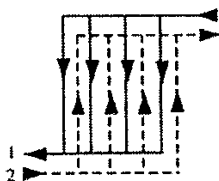
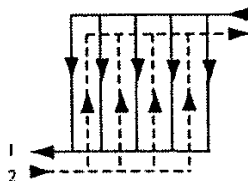
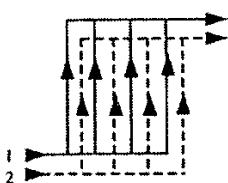
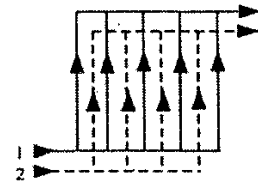
1 Pass

2 Channel

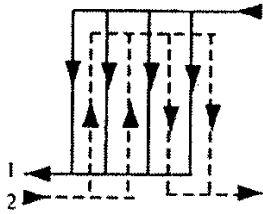


شکل ۵-۲۵ آرایش جریان مرکب

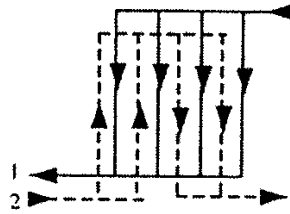
یکی از راه‌های معمول به منظور طبقه‌بندی آرایش مسیرها در مبدل‌های حرارتی بر اساس تعداد آرایش‌های سری و حلقوی موجود در مسیر هر سیال می‌باشد. در نتیجه یک آرایش تک مسیره با نماد ۱-۱ و آرایش‌های چند مسیره با نمادهای ۱-۲، ۲-۲ و غیره نمایش داده می‌شوند. برای نمونه در آرایش ۲-۱، عدد ۲ مربوط به وجود ۲ مسیر در جریان سیال اول و عدد ۱ مربوط به وجود یک مسیر در جریان سیال دوم است هر کدام از آرایش‌ها می‌توانند براساس چگونگی ورود و خروج سیال‌ها نیز به چند زیرشاخه تبدیل شوند. این طبقه‌بندی Kandlikar و Shah دسته‌بندی آرایش در مبدل‌های صفحه فریم بیانگر تعداد صفحات مورد نیاز در صورت استفاده از آرایش N در اشکال ۵-۲۶ تا ۵-۳۲ آرایه شده است.


 No. 111 ($N=1,3,5,\dots$)

 No. 112 ($N=2,4,6,\dots$)

 No. 113 ($N=1,3,5,\dots$)

 No. 114 ($N=2,4,6,\dots$)

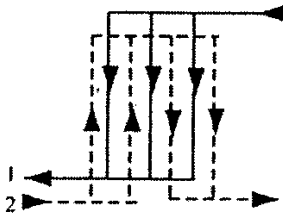
شکل ۵-۲۶: چهار آرایش ممکن برای ۱-۱



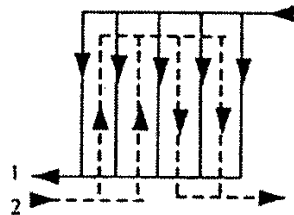
No. 211 ($N=3,7,11\dots$)



No. 212 ($N=3,7,11\dots$)

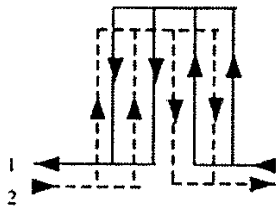


No. 213 ($N=2,6,10\dots$)

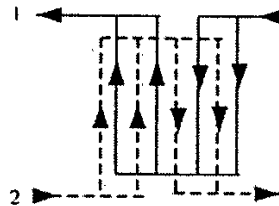


No. 214 ($N=4,8,12\dots$)

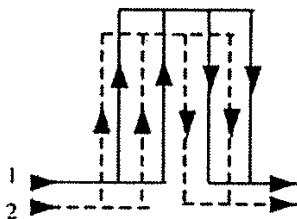
شکل ۵-۲۷: چهار آرایش ممکن برای ۲-۱



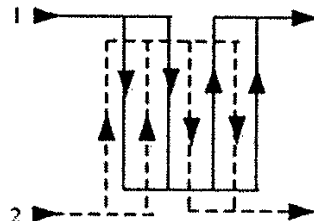
No. 221 ($N=3,7,11\dots$)



No. 222 ($N=3,7,11\dots$)

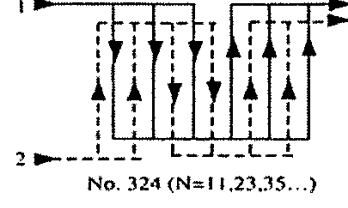
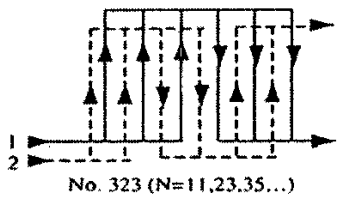
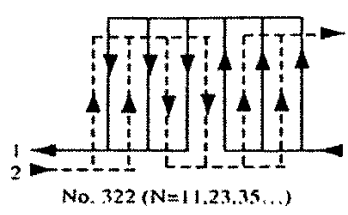
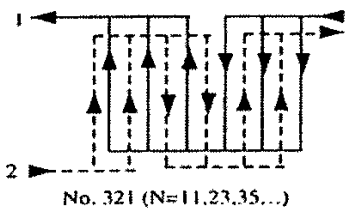


No. 223 ($N=3,7,11\dots$)

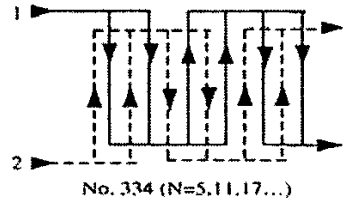
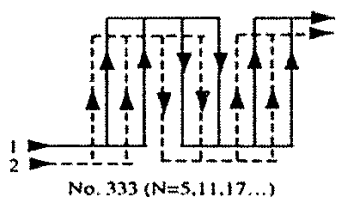
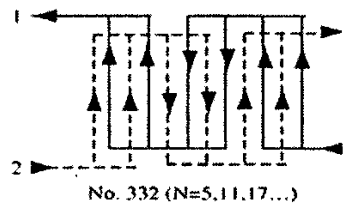
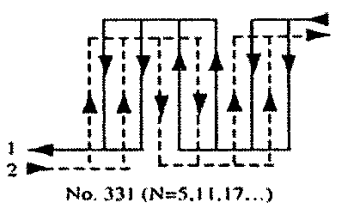


No. 224 ($N=3,7,11\dots$)

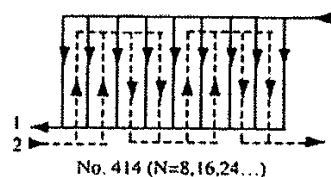
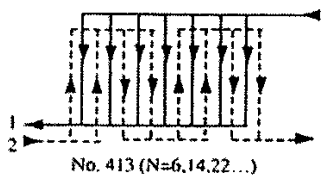
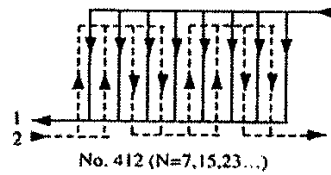
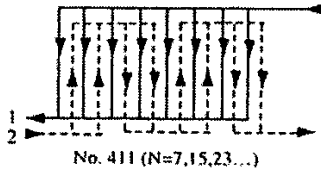
شکل ۵-۲۸: چهار آرایش ممکن برای ۲-۲



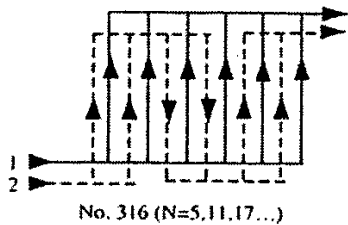
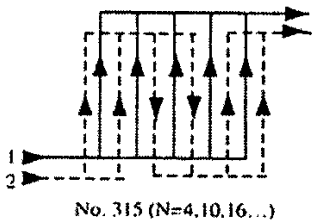
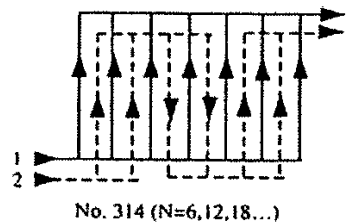
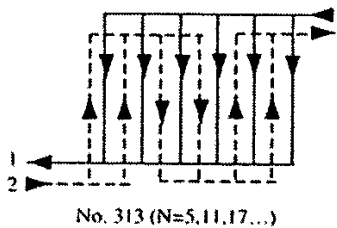
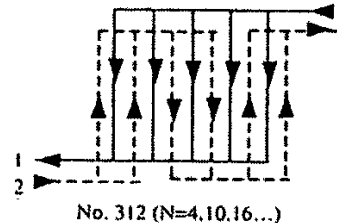
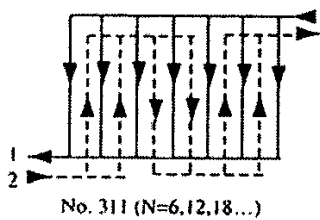
شکل ۵-۲۹: چهار آرایش ممکن برای ۲-۳



شکل ۵-۳۰: چهار آرایش ممکن برای ۳-۳

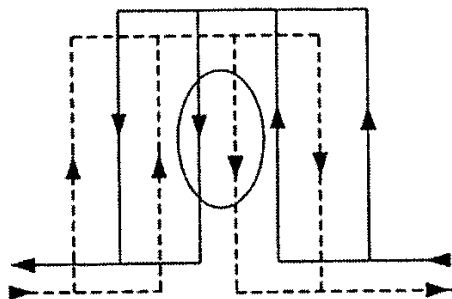


شکل ۵-۳۱: چهار آرایش ممکن برای ۴-۱



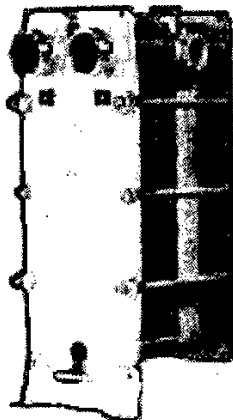
شکل ۵-۳۲: شش آرایش ممکن برای ۳-۱

نکته قابل توجه در آرایش مسیره‌های موجود این است که اگر بیش از یک مسیر در آرایش وجود داشته باشد، حداقل در یک جفت از کانال‌های بین صفحات نوع جریان (معکوس و یا موازی) با سایر کانال‌های بین صفحات متفاوت خواهد بود. این موضوع در شکل ۳۳-۵ مشاهده می‌شود.

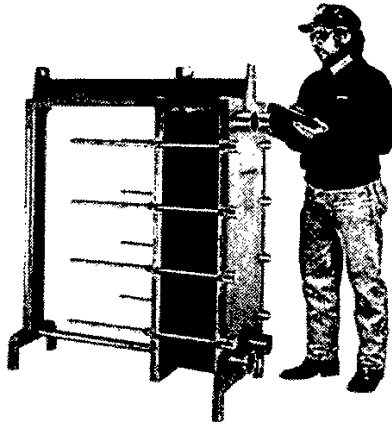


شکل ۳۳-۵: ایجاد جریان موازی در آرایش جریان معکوس ۲-۲

شکل (۳۴-۵) یک مبدل حرارتی صفحه‌ای را با آرایش Z شکل چند گذر و شکل (۳۵-۵) نیز یک مبدل صفحه‌ای را با آرایش U شکل یک گذر نشان می‌دهد.



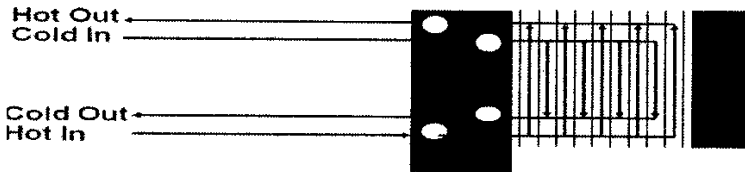
شکل ۳۴-۵: آرایش Z شکل چند گذر (نازلهای ورودی و خروجی روی دو قاب قرار دارد)



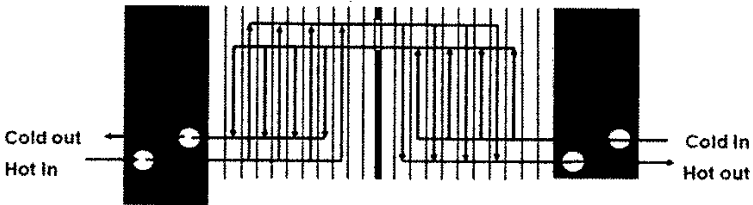
شکل ۵-۳۵: آرایش U شکل یک گذر (نازلهای ورودی و خروجی روی قاب ثابت قرار دارد

شکل (۵-۳۶) آرایش جریان موازی تک گذر چهار کانال U شکل و شکل (۵-۳۷)

آرایش جریان موازی چند گذر^۱ با چهار کانال را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۳۶: آرایش جریان موازی تک گذر چهار کانال U شکل (شکل بندی ۱×۴ / ۱×۴)



شکل ۵-۳۷: آرایش جریان موازی دو گذر چهار کانال (شکل بندی ۲×۴ / ۲×۴)

۵-۵- طراحی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای

با توجه به تنوع در طراحی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای که با استفاده از صفحات و

آرایش‌های مختلف می‌توانند برای وظایف گرمایی متفاوتی مناسب باشند، طراحی این مبدل‌ها بسیار تخصصی است. بر خلاف مبدل‌های حرارتی لوله‌ای که برای آنها داده‌ها و روش‌های طراحی برای آنها بسادگی در دسترس است، طراحی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای همچنان ماهیتی اختصاصی دارند و در انحصار و تملک شرکت‌های تولیدکننده هستند و سازندگان، روش‌های طراحی رایانه‌ای خود را که قابل استفاده برای طراحی مبدل‌ها است، تکامل بخشیده‌اند.

هر چند تلاش‌هایی برای بهبود دقت روابط انتقال حرارت و افت فشار برای استفاده در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای انجام شده است، ولی بیشتر این روابط نمی‌توانند به طور عمومی به کار روند و دارای قابلیت پیشبینی با دقت زیاد باشند. در این مبدل‌ها سیال‌ها در مقایسه با مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله، بیشتر به جریان مخالف جهت نزدیک هستند. هر چند در سال‌های اخیر، برخی روش‌های طراحی، ارائه شده‌اند اما بیشتر این روش‌ها تقریبی بوده و برای تعیین مقدماتی اندازه نامی واحدهای صفحه‌ای برای یک وظیفه گرمایی مشخص، مناسب می‌باشند و متأسفانه هیچ اطلاعات منتشر شده‌ای راجع به طراحی دقیق مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای در دسترس نیست.

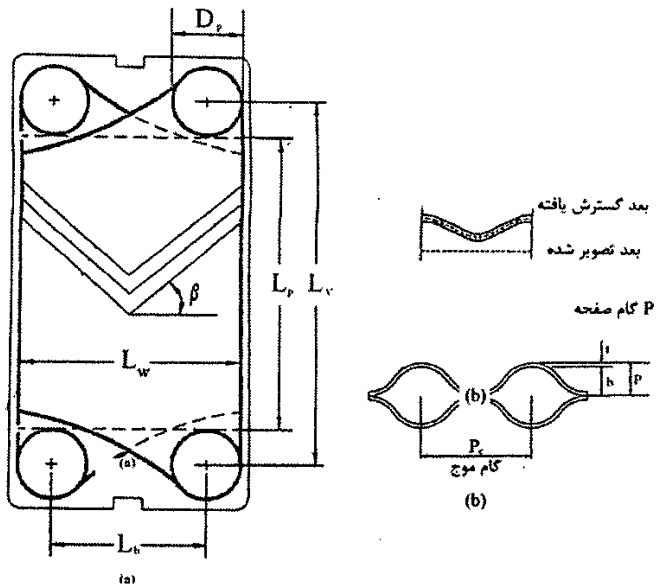
۵-۵-۱- سطح انتقال حرارت صفحات

موج‌های ایجاد شده در صفحه، مساحت سطح صفحه را در مقایسه با سطح تخت اولیه، افزایش می‌دهند. برای بیان میزان افزایش طول توسعه یافته^۱ (گسترده)، نسبت به طول تصویر شده، ضریب بزرگ شدگی سطح^۲، ϕ به صورت نسبت طول توسعه یافته (گسترده)، به طول تخت یا طول تصویر شده، تعریف می‌شود.

طول توسعه یافته (گسترده) تقسیم بر طول تصویر شده = ϕ

1 Developed length

2 Enlargement factor



شکل ۵-۲۸: زاویه شورون روی صفحات مجاور، معکوس می گردد [۵]

مقدار ϕ تابعی از گام موج^۱ و عمق موج^۲ یا گام صفحه^۳ می باشد (۵-۳۸). ضریب بزرگ‌شدگی معمولاً بین ۱.۱۵ و ۱.۲۵ تغییر می کند. که در عمل مقدار ۱.۱۷ به عنوان متوسط معمول در نظر گرفته شود [۶]. مقدار ϕ که توسط معادله بالا ارایه شده است، نسبت مساحت مؤثر واقعی^۴ که توسط سازنده مشخص می شود، A_1 ، به مساحت سطح تصویر شده^۵، A_{1P} می باشد:

$$\phi = \frac{A_1}{A_{1P}} \quad (۱۱-۵)$$

که A_{1P} می تواند از شکل (۵-۳۸) به صورت زیر تقریب زده شود [۱]:

$$A_{1P} = L_p \cdot L_w \quad (۱۲-۵)$$

- 1 Corrugatin pitch
- 2 Developed length
- 3 Plate pitch
- 4 Developed area
- 5 Projected area

فاصله عمودی دهانه‌ها (در امتداد ارتفاع صفحات)، L_v و فاصله افقی دهانه‌ها (در امتداد عرضی صفحات) L_h و قطر دهانه‌ها D_p به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$L_p \approx L_v - D_p \quad (۱۳-۵)$$

$$L_w \approx L_h + D_p \quad (۱۴-۵)$$

مقدار ϕ برای محاسبه مسیر مؤثر جریان استفاده می‌شود.

۵-۵-۲- متوسط فاصله کانال جریان

کانال جریان، مجرای است که به وسیله دو صفحه مجاور بین واشرها تشکیل می‌شود از آنجا که سطح مقطع یک سطح موجدار، بسیار پیچیده است متوسط فاصله، b ، مطابق آنچه در شکل (۳۸-۵) نشان داده شده است، تعریف می‌شود:

$$b = P - t \quad (۱۵-۵)$$

در این تعریف P گام صفحه یا عمق سمت خارجی صفحه موجدار و t ضخامت صفحه است. هنگامی که موج‌های دو صفحه فلزی مجاور در تماس باشند، b ضخامت یک واشر کاملاً فشرده می‌باشد.

گام صفحه، P نباید با گام موج، P_c اشتباه شود. فاصله کانال، b برای محاسبه سرعت جرمی و عدد رینولدز مورد نیاز می‌باشد و بنابراین مقداری بسیار مهم است که معمولاً توسط سازنده مشخص نمی‌شود. اما فاصله کانال جریان، b را می‌توان به کمک گام صفحه، P توسط معادله (۱۵-۵) محاسبه کرد، که گام صفحه برابر است با:

$$P = \frac{L_c}{N_t} \quad (۱۶-۵)$$

که در آن L_c طول صفحات فشرده شده مبدل (فاصله بین صفحات ثابت و متحرک مبدل) بوده و معمولاً روی نقشه مشخص می‌شود و N_t ، تعداد کل صفحات می‌باشد.

۵-۵-۳- قطر معادل کانال

قطر معادل کانال یا قطر متوسط هیدرولیکی، D_e با رابطه (۱۷-۵) تعریف می‌شود:

$$D_e = \frac{4A_c}{P_w} \quad (۱۷-۵)$$

که در آن A_c سطح جریان در کانال و P_w سطح تر شده می‌باشد. رابطه (۱۷-۵) را

می‌توان با تقریب $b \ll L_w$ به صورت زیر نوشت:

$$D_e = \frac{4b \cdot L_w}{2(b + L_w \phi)} \approx \frac{2b}{\phi} \quad (۱۸-۵)$$

در مبذل‌های صفحه‌ای قطر معادل کانال تقریباً دو برابر عمق پرس شده^۱ می‌باشد. عمق پرس شده در مبذل‌های صفحه‌ای بر اساس نوع سیال مورد استفاده تعیین می‌شود که می‌تواند در محدوده 1.5 mm تا 11 mm قرار گیرد. معمولاً برای محصولات خاص که دارای ذرات جامد قابل ملاحظه می‌باشند، همانند صنایع قند و محصولات غذایی مثل کنستانتره میوه‌ها و غیره که احتمال مسدود شدن کانال‌ها وجود دارد، از صفحات با عمق پرس شده زیاد استفاده می‌شود.

۵-۴-۵- ضریب انتقال گرما

هر تلاشی برای تخمین ضریب فیلم انتقال گرما در مبذل‌های صفحه‌ای واشردار، گسترش روابطی را در برمی‌گیرد که برای انتقال گرما بین گذرگاه‌های تخت جریان در دسترس هستند. روش مرسوم برای چنین گذرگاه‌هایی آن است که روابط مربوط به لوله‌ها را به کار برند، با این تفاوت که با تعریف قطر معادل برای گذرگاه غیر دایره‌ای D_e این قطر به جای قطر لوله دایره‌ای d ، در رابطه جای‌گذاری شده است [۵، ۶، ۱۰].

$$\frac{hD_e}{k} = C_h \left(\frac{D_e G}{\mu} \right)^n \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.17} \quad (۱۹-۵)$$

که در آن D_e قطر معادل تعریف شده به وسیله معادله (۱۷-۵) می‌باشد. مقادیر C_h و n به مشخصه‌های جریان و زوایای شورون بستگی دارند. که این مقادیر در جدول (۵-۲) به ازای زوایای شورون مختلف و اعداد رینولدز آرایه شده است. انتقال از جریان آرام به آشفته، در اعداد رینولدز کم رخ می‌دهد و در نتیجه مبذل‌های صفحه‌ای واشردار، ضرایب انتقال گرمایی بزرگی را ایجاد می‌کنند.

روش کاملاً توسعه یافته مستند برای تخمین انتقال گرما و افت فشار مبذل‌های صفحه‌ای واشردار، برای محدوده وسیعی از صفحات تجاری موجود با الگوی شورون به

¹ The pressing depth

کار می‌رود که در اینجا این روش بیان خواهد شد.
 عدد رینولدز Re بر مبنای نرخ جریان جرمی در هر کانال مبدل G_c و قطر معادل کانال D_e ، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{G_c D_e}{\mu} \quad (20-5)$$

که در آن μ ویسکوزیته دینامیکی سیال است. G_c از تقسیم نرخ جریان کلی سیال تقسیم بر تعداد کانال‌ها در مبدل محاسبه می‌شود، از این رو سرعت جرمی در کانال با رابطه زیر ارایه می‌شود:

$$G_c = \frac{\dot{m}}{N_{cp} b L_w} \quad (21-5)$$

که در آن N_{cp} تعداد کانال به ازای هر گذر می‌باشد و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$N_{cp} = \frac{N_t - 1}{2N_p} \quad (22-5)$$

که در آن N_t تعداد کل صفحات و N_p تعداد گذرها می‌باشد.

جدول ۵-۲: ثابت‌ها برای محاسبه افت فشار و انتقال گرمای یک فاز، در مبدل‌های صفحه‌ای و اشردار [۶]

افت فشار			انتقال گرما			
m	K_p	عدد رینولدز	n	C_h	عدد رینولدز	زاویه شورون β
1	50	< 10	0.349	0.718	≤ 10	≤ 30
0.589	19.4	10-100	0.663	0.348	> 10	
0.183	2.99	> 100				
1	47	< 10	0.349	0.718	< 10	45
0.625	18.29	15-300	0.598	0.400	10-100	
0.206	1.441	> 300	0.663	0.300	> 100	
1	34	< 20	0.333	0.630	< 20	50
0.631	11.25	20-300	0.591	0.291	20-300	
0.161	0.772	> 300	0.732	0.130	> 300	
1	24	< 40	0.326	0.562	< 20	60
0.457	3.24	40-400	0.529	0.306	20-4400	
0.215	0.76	> 400	0.703	0.108	> 400	
1	24	50	0.326	0.562	< 20	≥ 65
0.451	2.80	50-500	0.503	0.331	20-500	
0.213	0.639	> 500	0.718	0.087	> 500	

۵-۵-۵- افت فشار کانال

وقتی جریانی آشفته می‌شود، افت فشار Δp به وجود می‌آید، به این ترتیب که فشار جریان در ابتدای مسیر بالاتر از انتهای آن می‌باشد. افت فشار پدیده‌ای با نتایج مثبت و منفی برای انتقال حرارت است. افت فشار بیش از اندازه به طور حتم، نتایج منفی در پی دارد، زیرا در آن صورت جریان باید با استفاده از قدرت پمپاژ بیشتری از مبدل عبور کند. قدرت پمپاژ زیاد نیز با استفاده از پمپ‌های بزرگ میسر می‌گردد که توان الکتریکی زیادی مصرف می‌کنند و این خود به غیر اقتصادی بودن عملیات می‌انجامد. نتیجه مثبت حاصل از افت فشار، همان ازدیاد مقدار آشفتنگی جریان است که در مبدل حرارتی باعث ازدیاد روند انتقال حرارت می‌شود.

افت فشار معمولاً توسط کاربر مشخص می‌شود. افت فشار معمول در مبدل‌های صفحه ای 100 Kpa (1 Bar) می‌باشد.

در مبدل‌ها در جریانهای کاملاً مغشوش کاهش مساحت A باعث افزایش سرعت جریان به همان نسبت خواهد شد ($V \approx \frac{1}{A}$) و از سوی دیگر هرگاه سرعت جریان افزایش یابد، افت فشار با توان ۲ افزایش خواهد یافت ($\Delta P \approx V^2$). همچنین ضریب انتقال حرارت U با توان 1/3 افت فشار رابطه مستقیم دارد. به طور کلی افت فشار در یک کانال مبدل صفحه‌ای به متغیرهای مختلفی بستگی دارد که در جدول (۵-۳) آورده شده است.

جدول ۵-۳: روابط افت فشار

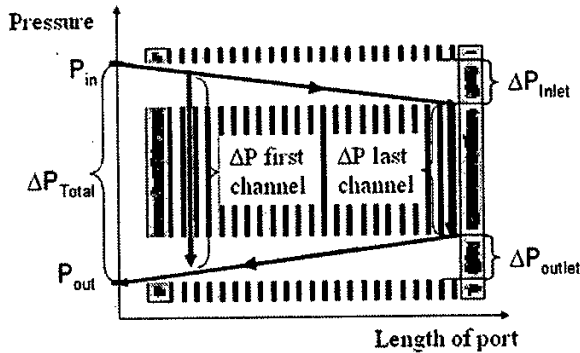
متغیر	متناسب با
عمق پرس	$\Delta P \propto \frac{1}{d_e^3}$
عرض صفحه	$\Delta P \propto \frac{1}{L_w^2}$
طول صفحه	$\Delta P \propto L_v$
الگوی صفحه	الگوی θ بالا ← افت فشار بالا
سایز خروجی	سایز کوچک خروجی ← ΔP بالا

افت فشار کل در یک مبدل حرارتی شامل بخش‌های زیر می‌باشد:

۱- افت فشار ناشی از اصطکاک

- ۲- افت فشار ناشی از تغییرات چگالی
- ۳- افت فشار ناشی از تغییرات در سرعت
- ۴- افت فشار ناشی از تغییرات ارتفاع

مهمترین بخشی که بر افت فشار تأثیر می‌گذارد، افت فشار ناشی از اصطکاک در کانال‌های جریان، یک مبدل Δp_c می‌باشد. دومین افت فشار مهم در مبدل‌های صفحه‌ای افت فشار ایجاد شده در دهانه‌های ورودی و خروجی سیال (پورت‌ها) و اتصالات مربوط، Δp_p می‌باشد. شکل (۵-۳۹) تغییرات افت فشار را بر حسب طول کانال مبدل نمایش می‌دهد.



شکل ۵-۳۹: افت فشار در مبدل صفحه‌ای

افت فشار اصطکاکی کانال، Δp_c ، را می‌توان با داشتن ضریب اصطکاک f که تابعی از عدد رینولدز می‌باشد، به صورت زیر نوشت:

$$\Delta p_c = 4f \frac{L_{eff} N_p}{D_e} \frac{G_c^2}{2\rho} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{-0.17} \quad (۲۳-۵)$$

که در آن L_{eff} طول مؤثر مسیر جریان بین دهانه‌های ورودی و خروجی می‌باشد و در این طول مؤثر باید ضریب بزرگ‌شدگی شکل موجی سطح ϕ نیز در نظر گرفته شود، بنابراین $L_{eff} = L_v$ در نظر گرفته می‌شود که L_v فاصله عمودی دهانه‌ها می‌باشد که در شکل (۵-۳۹) نشان داده شده است. ضریب اصطکاک، f در معادله (۲۳-۵) بر حسب عدد رینولدز با رابطه زیر ارایه می‌شود:

$$f = \frac{K_p}{Re^m} \quad (24-5)$$

مقادیر m و K_p در جدول (۵-۲) به صورت توابعی از عدد رینولدز برای مقادیر متفاوت زوایای شورون ارائه شده‌اند [۱۶-۶]. برای شکل‌بندی‌های مختلف سطح صفحه، ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز باید توسط سازنده به دست آید.

۵-۵-۶- افت فشار دهانه‌های خروجی و ورودی

معمولاً مجموع افت فشار در دهانه‌های ورودی و خروجی جریان و اتصالات مربوط از ۳۰ درصد کل افت فشار کوچکتر می‌باشد. در صورتی که مقدار افت فشار در دهانه‌های ورودی و خروجی بیش از ۳۰ درصد کل افت فشار باشد، نشان می‌دهد که سیال به شکل نامناسبی در مبدل توزیع شده است. به دیگر سخن سیال در کانال اول مبدل جریان بیشتری داشته و در کانال‌های آخر سیال کمتری جریان می‌یابد، که این نشان‌دهنده عملکرد نامناسب مبدل می‌باشد.

مجموع افت فشار در دهانه‌های ورودی و خروجی جریان در فضای ما بین دو صفحه مجاور (کانال) Δp_p ، به صورت ۱.۴ برابر مقدار هد سرعتی جریان تخمین زده می‌شود:

$$\Delta p_p = 1.4 N_p \frac{G_p^2}{2\rho} \quad (25-5)$$

که در آن:

$$G_p = \frac{\dot{m}}{\pi D_p^2 / 4} \quad (26-5)$$

که در آن \dot{m} کل نرخ جرمی جریان در دهانه و D_p قطر دهانه است.

در نتیجه کل افت فشار اصطکاکی کانال و دهانه‌ها (پورت‌ها) عبارت است از:

$$\Delta p_t = \Delta p_c + \Delta p_p \quad (27-5)$$

۵-۵-۷- ضریب کلی انتقال حرارت

ضریب کلی انتقال حرارت برای یک سطح تمیز که بیانگر مجموع تأثیر هدایت و جابه‌جایی در انتقال حرارت می‌باشد، همان‌گونه که در بخش‌های قبلی بیان شد، عبارت است از:

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{h_h} + \frac{1}{h_c} + \frac{t}{K_w} \quad (28-5)$$

در این رابطه t ضخامت صفحه، k_w ضریب هدایت حرارتی صفحه (که از جداول هندبوک‌ها قابل دسترس است) و h_c و h_h ضریب انتقال حرارت لایه مرزی سیال سرد و گرم می‌باشد که می‌توان آنها را به کمک روابط جریان مغشوش سیال نیوتنی به صورت زیر به دست آورد:

$$Nu = C_h Re^n Pr^a \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^x \quad (29-5)$$

در این رابطه μ_w ویسکوزیته سیال در دمای دیواره (صفحات) می‌باشد.

$$Nu = \frac{hD_e}{K} \quad (30-5)$$

محدوده تغییرات ثابت‌های C_h ، n ، a و x در جریان مغشوش (آشفته) عبارت است از:

$$0.15 < C_h < 0.40 \quad (31-5)$$

$$0.65 < n < 0.85$$

$$0.3 < a < 0.45 \quad (\text{معمولاً } 0.33)$$

$$0.05 < x < 0.20$$

که در آن مقادیر C_h و n را می‌توان در حالت‌های دیگر براساس جدول (۵-۲) بر حسب عدد رینولدز و زاویه شورون صفحه به دست آورد.

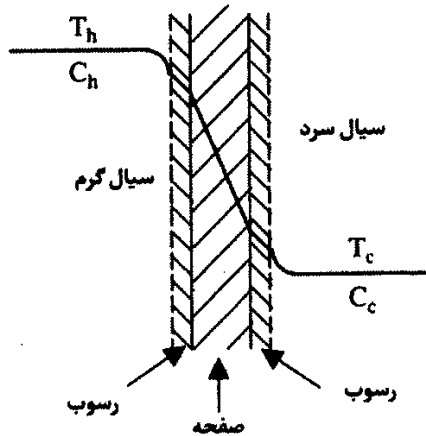
ضریب کلی انتقال حرارت برای صفحات رسوب گرفته یا تحت بهره‌برداری عبارت است از:

$$\frac{1}{U_f} = \frac{1}{h_h} + \frac{1}{h_c} + \frac{t}{K_w} + R_{fh} + R_{fc} \quad (32-5)$$

که در آن h و c به ترتیب نشانگر جریان‌های گرم و سرد هستند و R_f نیز نشان‌دهنده نوعی مقاومت حرارتی است که ناشی از رسوب روی صفحات می‌باشد، شکل (۵-۴۰).

رابطه بین U_c برای شرایط تمیز، U_f برای شرایط رسوب گرفته و ضریب تمیزی CF می‌تواند به شکل زیر نوشته شود:

$$U_f = U_c (CF) = \frac{1}{\frac{1}{U_c} + R_{fh} + R_{fc}} \quad (۳۳-۵)$$



شکل ۵-۴۰: اجزای به وجود آورنده مقاومت حرارتی کل در یک مبدل حرارتی صفحاتی دو سیالی تک فاز

افزایش رسوب باعث آشفته‌گی کمتر جریان می‌شود و علاوه بر کاهش سیال در کانال‌های مبدل، میزان انتقال حرارت را کاهش می‌دهد، از این رو به سطح حرارتی بیشتری نیاز می‌باشد. معمولاً در حالت بهره برداری ضریب کلی انتقال حرارت به علت رسوب روی صفحات می‌تواند بین ۵ تا ۱۰ درصد تغییر کند.

در طراحی مبدل‌های حرارتی صفحاتی، به علت ایجاد رسوب روی صفحات معمولاً یک ضریب اطمینان طراحی در محاسبات لحاظ می‌شود. این ضریب اطمینان عموماً بر حسب اختلاف ضرایب کلی انتقال حرارت برای سطوح تمیز و رسوب گرفته به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\% \text{ Margin} = 100 \frac{U_c - U_f}{U_f} \quad (۳۴-۵)$$

که در آن:

$$\frac{1}{U_f} = \frac{1}{U_c} + R_f$$

مقدار مجاز این اختلاف^۱ براساس تجربه و بسته به نوع کاربرد محاسبه می‌شود، ولی مقدار مجاز آن بین ۵ تا ۱۰ درصد می‌باشد.

به عنوان مثال در یک مبدل پوسته و لوله که هر دو سیال سرد و گرم آن آب می‌باشد، مقادیر R_f و U_C در حالت طبیعی برابرند با:

$$R_f = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$U_C = 2000 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\frac{1}{U_f} = \frac{1}{U_C} + R_f = \frac{1}{2000} + 10^{-4} \Rightarrow U_f = 1667 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\% \text{ Margin} = 100 \frac{U_C - U_f}{U_f} = 100 \times \frac{2000 - 1667}{1667} = 20$$

بنابراین در این مبدل رسوب قابل ملاحظه‌ای تشکیل می‌شود که به کاهش اغتشاش جریان و عملکرد ضعیف مبدل می‌انجامد، از سوی دیگر تمیز کردن مبدل‌های پوسته و لوله نیز کار ساده‌ای نمی‌باشد.

حال با شرایط یکسان مبدل حرارتی صفحه‌ای را در نظر می‌گیریم که دیگر بار مقادیر R_f و U_C در حالت طبیعی آن عبارت است از:

$$R_f = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$U_C = 6000 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\frac{1}{U_f} = \frac{1}{U_C} + R_f = \frac{1}{6000} + 10^{-4} \Rightarrow U_f = 3750 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\% \text{ Margin} = 100 \frac{U_C - U_f}{U_f} = 100 \times \frac{6000 - 3750}{3750} = 60$$

درصد اختلاف زیاد نشان‌دهنده نیاز به سطح حرارتی بیشتر، جریان کمتر در هر کانال، اغتشاش کمتر و در نتیجه ایجاد رسوب روی صفحات می‌باشد، که در مقایسه با مبدل پوسته و لوله بسادگی می‌توان صفحات را باز و تمیز کرد.

۵-۵-۸- مساحت سطح انتقال گرما

معادلات بالانس حرارتی در مبدل‌های صفحه‌ای واشردار، همانند معادلات مبدل‌های حرارتی لوله‌ای هستند. بار حرارتی مورد نیاز Q_r ، برای جریانهای سرد و گرم عبارت است از:

$$Q_r = (\dot{m} c_p)_c (T_{c2} - T_{c1}) = (\dot{m} c_p)_h (T_{h1} - T_{h2}) \quad (۳۵-۵)$$

از سوی دیگر بار حرارتی واقعی به دست آمده Q_f که ناشی از شرایط رسوب گرفتن صفحات می‌باشد، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q_f = U_f A_e F \text{ LMTD} \quad (۳۶-۵)$$

در این تعریف A_e ، کل مساحت توسعه یافته تمام صفحات مؤثر، به لحاظ گرمایی، یعنی $N_f - 2$ می‌باشد که عدد دو، مربوط به دو صفحه، در مجاورت صفحات ثابت و متحرک انتهایی است. در آرایش‌های چند گذر یک سوی صفحه جداکننده گذرها، دارای جریان هم جهت یا معکوس است که اثر ناچیزی بر متوسط اختلاف دما خواهد داشت. اگر جریان در تمامی گذر هم سو باشد، برای به دست آوردن اختلاف دمای لگاریتمی متوسط، LMTD، ضریب تصحیح F باید به کار رود، در غیر این صورت برای آرایش مخالف جهت، از متوسط واقعی اختلاف دما، LMTD به شکل رابطه (۳۷-۵) استفاده می‌شود:

$$\text{LMTD} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\text{Ln} \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (۳۷-۵)$$

که در آن ΔT_1 و ΔT_2 اختلاف‌های دمای سیال گرم و سرد در انتهای ورودی و خروجی مبدل حرارتی هستند.

مقایسه‌ای بین Q_r و Q_f ضریب ایمنی طراحی، C_s را تعریف می‌کند:

$$C_s = \frac{Q_f}{Q_r} \quad (۳۸-۵)$$

در طراحی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، جنس صفحات و شکل موج‌دهی روی صفحات، یا توجه به شرایط عملیاتی، دما و فشار سیال ورودی و خروجی، انتخاب می‌گردد. به منظور دستیابی به ظرفیت‌های حرارتی و محدوده دما در این نوع مبدل‌ها از انواع آرایش‌های جریان به صورت سری، موازی و مرکب به صورت هم جهت و

معکوس استفاده می‌شود. در دما و فشارهای پایین از مبدل‌های صفحه‌ای واشردار و در دما و فشارهای بالاتر از نوع مبدل صفحه‌ای جوش شده استفاده می‌شود. روی هم رفته طراحی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای بر پایه سعی و خطا بوده و بتازگی نیز از نرم افزارهای مخصوص استفاده می‌شود که توسط سازندگان تهیه شده و دارای مراحل زیر می‌باشد:

۱- تعیین مشخصات سیال سرد و گرم از نقطه نظر نوع سیال، افت فشار مجاز، دبی جرمی و دماهای ورودی و خروجی

۲- تعیین خواص فیزیکی سیال سرد و گرم از نقطه نظر ویسکوزیته، دانسیته، ضریب هدایت حرارتی، ضریب رسوب‌گذاری و ضریب گرمایی ویژه.

۳- انتخاب جنس صفحات با توجه به نوع سیال مورد استفاده و محاسبه ضریب هدایت حرارتی صفحات

۴- انتخاب نوع صفحه و مشخصات آن که ضخامت صفحه، نسبت طول به عرض صفحه و نسبت سطح انتقال حرارت گسترش یافته به سطح حرارت تصویر شده و شکل موجودی صفحات (زاویه شورون) را در برمی‌گیرد.

۵- تعیین سطح مؤثر صفحه

هنگامی سیال فرآیند شامل مواد جامد، کریستالی، خمیری یا ویسکوزیته بالا باشد، معمولاً از صفحات جریان آزاد^۱ استفاده می‌شود که در آن فاصله بین صفحات می‌تواند تا 12 mm استفاده گردد.

برای آشنایی بیشتر با روند طراحی در مبدل‌های صفحه‌ای واشردار در ادامه دو مثال متفاوت که نحوه محاسبات گام به گام و مستند این نوع مبدل‌ها را توضیح می‌دهد، ارائه خواهد شد.

مثال ۴-۵: برای گرم کردن آب سرد با نرخ جریان 140 Kg/s از دمای 22°C تا 42°C از یک مبدل حرارتی صفحه‌ای واشردار استفاده شده است که آب گرم آن دارای همان نرخ جریان در دمای 65°C وارد مبدل شده و در 45°C از آن خارج می‌شود. بیشترین افت فشار مجاز برای هر جریان 15 lb_f/in² می‌باشد. مشخصات فرآیند مورد نظر

در جدول ۴-۵ ارایه شده است.

جدول ۴-۵: مشخصات فرآیند:

سیال سرد	سیال گرم	موارد
آب سرد	آب دور ریز ^۱	سیال‌ها
140	140	نرخ‌های جریان Kg/s
$T_{C1} = 22$	$T_{h1} = 65$	دماهای ورودی °C
$T_{C2} = 42$	$T_{h2} = 45$	دمای خروجی °C
15	15	حداکثر افت فشار مجاز lb/in^2
0	0.00005	مقاومت کلی رسوب $m^2.k/w$
4178	4138	گرمای ویژه $C_p = J/kg.k$
7.68×10^{-4}	5.11×10^{-4}	لزجت $\mu = N.s/m^2$
0.616	0.635	ضریب هدایت گرمایی k
995	986	چگالی $\rho \text{ kg/m}^3$
5.21	3.32	عدد پراتنل Pr

داده‌های ساختاری مبدل حرارتی صفحه‌ای پیشنهاد شده نیز در جدول ۵-۵ آورده شده است.

جدول ۵-۵: داده‌های ساختاری مبدل حرارتی صفحه‌ای

SS304	جنس صفحات
0.6	ضخامت صفحه (mm)
45	زاویه شورون (درجه)
105	تعداد کل صفحات
1.25	ضریب بزرگ شدگی
یک گذر	تعداد گذرها
8000/4500	ضریب کلی انتقال گرما
----	به ترتیب در شرایط تمیز و رسوب گرفته (W/m.k)
110	مساحت کلی مؤثر (m^2)
200	قطر تمامی دهانه‌ها (m)
0.0006	ضخامت صفحه (m)
0.38	طول مجموعه صفحه فشرده شده (m)

1.55	فاصله عمودی دهانه ها (m)
0.43	فاصله افقی دهانه ها (m)
0.63	پهنای مؤثر کانال (m)
17.5	ضریب هدایت گرمایی ماده صفحه (W/m.k)

حل:

تحلیل گام به گام عملکرد:

بار گرمایی مورد نیاز می‌تواند از موازنه گرمایی، به صورت زیر محاسبه شود:

$$Q_{rh} = 140 \times 4183 \times (65 - 45) = 11712.4 \text{ KW}$$

$$Q_{rc} = 140 \times 4178 \times (42 - 22) = 11698.4 \text{ KW}$$

متوسط اختلاف دما با مقادیر زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta T_1 = \Delta T_2 = 23 \text{ }^\circ\text{C}$$

بنابراین:

$$LMTD = 23 \text{ }^\circ\text{C}$$

تعداد مؤثر صفحات برابر است با:

$$N_e = N_t - 2 = 103$$

طول مؤثر جریان بین دو دهانه در امتداد ارتفاع مبدل حرارتی عبارت است از:

$$L_{eff} \approx L_v = 1.55 \text{ m}$$

گام صفحه می‌تواند از معادله (۵-۱۶) تعیین شود:

$$P = \frac{L_c}{N_t} = \frac{0.38}{105} = 0.0036 \text{ m}$$

متوسط فاصله کانال جریان از معادله (۵-۱۵) به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$b = 0.0036 - 0.0006 = 0.003 \text{ m}$$

سطح جریان یک کانال به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A_{ch} = b \times L_w = 0.003 \times 0.63 = 0.00189 \text{ m}^2$$

مساحت سطح انتقال گرمای یک صفحه برابر است با:

$$A_1 = \frac{A_e}{N_e} = \frac{110}{103} = 1.067 \text{ m}^2$$

مساحت تصویر شده صفحه A_{1p} ، از معادله (۵-۱۲) عبارت است از:

$$A_{1p} = L_p L_w = (1.55 - 0.2) \times 0.63 = 0.85 \text{ m}^2$$

ضریب بزرگ شدگی توسط سازنده مشخص می‌شود، ولی می‌تواند از معادله (۵-۱۱) تایید گردد:

$$\phi = \frac{1.067}{0.85} = 1.255$$

قطر معادل کانال از معادله (۵-۱۸) محاسبه می‌گردد:

$$D_e = \frac{2b}{\phi} = \frac{2 \times 0.003}{1.255} = 0.00478 \text{ m}$$

تعداد کانال‌ها به ازای هر گذر، N_{cp} از معادله (۵-۲۲) به دست می‌آید:

$$N_{cp} = \frac{N_t - 1}{2N_p} = \frac{105 - 1}{2} = 52$$

تحلیل انتقال گرما:

نرخ جرمی جریان به ازای هر کانال با رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\dot{m}_{ch} = \frac{140}{52} = 2.69 \text{ kg/s}$$

سرعت جرمی، G_{ch} برابر است با:

$$G_{ch} = \frac{2.69}{0.00189} = 1423.3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

اعداد رینولدز سیال گرم و سرد عبارتند از:

$$Re_h = \frac{G_h D_e}{\mu_h} = \frac{1423.3 \times 0.00478}{5.11 \times 10^{-4}} = 13314$$

$$Re_c = \frac{G_c D_e}{\mu_c} = \frac{1423.3 \times 0.00478}{7.68 \times 10^{-4}} = 8859$$

بنابراین جریان هر دو سیال سرد و گرم، آشفته است.

ضریب انتقال گرمای سیال گرم، h_n :

این ضریب می‌تواند با مراجعه به جدول (۵-۲) به دست آید، $C_{h1} = +0.3$

از ضریب انتقال گرما از معادله (۵-۱۹): $n = 0.663$

$$Nu_h = \frac{h_h D_e}{k} = 0.3(Re)^{0.663} (Pr)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.17}$$

با فرض $\mu_b \approx \mu_w$ ، پس:

$$Nu_h = 0.3(13314)^{0.663} (3.32)^{\frac{1}{3}} = 242.8$$

$$h_h = \frac{Nu_h k}{D_e} = \frac{0.635 \times 242.8}{0.00478} = 32255 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

ضریب انتقال گرمای سیال سرد، h_c :

این ضریب می‌تواند از جدول (۵-۲) و معادله (۵-۱۹) محاسبه شود:

$$Nu_c = \frac{h_c D_e}{k} = 0.3(8859)^{0.663} (5.21)^{\frac{1}{3}} = 215.4$$

$$h_c \frac{Nu_c k}{D_e} = \frac{0.616 \times 215.4}{0.00478} = 27759 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

ضریب کلی انتقال گرما:

ضریب کلی انتقال گرمای مبدل با سطوح تمیز از معادله (۵-۲۸) تعیین می‌گردد:

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_h} + \frac{0.0006}{17.5}$$

$$U_c = 9870 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

ضریب کلی انتقال گرمای مبدل با سطوح رسوب گرفته (تحت بهره برداری) از

معادله (۵-۳۲) محاسبه می‌شود:

$$\frac{1}{U_f} = \frac{1}{U_c} + 0.00005$$

$$U_f = 6609 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

ضریب تمیزی مربوط عبارت است از:

$$CF = \frac{U_f}{U_c} = \frac{6609}{9870} = 0.67$$

که مقدار آن به دلیل رسوب زیاد، نسبتاً کوچک است.

بار گرمایی واقعی برای سطح تمیز و سطح رسوب گرفته به ترتیب عبارتند از:

$$Q_c = U_c A_e LMTD = 9870 \times 110 \times 23 = 24971 \text{ KW}$$

$$Q_f = U_f A_e LMTD = 6609 \times 110 \times 23 = 16721 \text{ KW}$$

ضریب اطمینان عبارت است از:

$$C_s = \frac{Q_f}{Q_r} = \frac{16721}{11698} \approx 1.4$$

درصد اضافی سطح طراحی برابر است با:

$$\% OS = 100 U_c R_{ft} = 49.35\%$$

که مبدل حرارتی نسبتاً بزرگی است و می‌تواند علاوه بر پاسخگویی به نیازها و مشخصه‌های فرآیند، کوچک‌تر انتخاب شود. از این رو اضافه سطح حرارتی برابر 30 درصد برای کاهش هزینه سرمایه‌گذاری، ترجیح داده می‌شود و برنامه زمان‌بندی تمیزکاری می‌تواند بر طبق آن تنظیم گردد. بنابراین، طرح پیشنهاد شده می‌تواند اصلاح شود و مقادیر نامی عملکرد آن، باردیگر تعیین گردد.

تحلیل افت فشار:

برای محاسبه ضرایب اصطکاک سیال گرم و سرد، از معادله (۵-۲۴) و جدول (۵-۲):

$$f_h = \frac{1.441}{(Re_h)^{0.206}} = \frac{1.441}{(13314)^{0.206}} = 0.204$$

$$f_c = \frac{1.441}{(Re_c)^{0.206}} = \frac{1.441}{(8859)^{0.206}} = 0.222$$

افت فشار اصطکاکی مربوط به جریانهای گرم و سرد، از معادله (۵-۲۳) محاسبه می‌شوند.

برای سیال گرم:

$$(\Delta p_c)_h = 4 \times 0.204 \times \frac{1.55 \times 1}{0.00478} \times \frac{(1423.3)^2}{2 \times 986} = 271819 \text{ Pa}$$

$$(\Delta p_c)_h = 39.4 \frac{\text{lb}_f}{\text{in}^2}$$

و برای سیال سرد:

$$(\Delta p_c)_c = 4 \times 0.222 \times \frac{1.55 \times 1}{0.00478} \times \frac{(1423.3)^2}{2 \times 995} = 293128 \text{ Pa}$$

$$(\Delta p_c)_c = 42.5 \frac{\text{lb}_f}{\text{in}^2}$$

افت فشار در دهانه‌های ورودی و خروجی از معادله (۵-۲۵) محاسبه می‌شود. با تعیین سرعت جرمی در دهانه‌ها:

$$(G_p)_h = (G_p)_c = \frac{\dot{m}}{\pi \left(\frac{D_p}{4}\right)^2} = \frac{140}{\pi \left(\frac{0.2^2}{4}\right)} = 4458.6 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

برای سیال گرم:

$$(\Delta p_p)_h = 1.4 \times 1 \times \frac{G_p^2}{2 \times 986} = 14112.96 \text{ Pa}$$

$$(\Delta p_p)_h = 2.05 \text{ lb}_f/\text{in}^2$$

و برای سیال سرد:

$$(\Delta p_p)_c = 1.4 \times 1 \times \frac{G_p^2}{2 \times 995} = 13985.31 \text{ Pa}$$

$$(\Delta p_p)_c = 2.03 \text{ lb}_f/\text{in}^2$$

کل افت فشار از معادله (۵-۲۷) برای سیال گرم محاسبه می‌شود:

$$(\Delta p_t)_h = (\Delta p_c)_h + (\Delta p_p)_h = 39.4 + 2.05 = 41.45 \text{ lb}_f/\text{in}^2$$

و برای سیال سرد:

$$(\Delta p_t)_c = (\Delta p_c)_c + (\Delta p_p)_c = 42.5 + 2.03 = 44.53 \text{ lb}_f/\text{in}^2$$

محاسبه نشان می‌دهد که واحد پیشنهاد شده، فرآیند مورد نیاز و محدودیت افت فشار را جوابگو نیست.

مثال ۵-۵: برای گرمایش آب شهر ($R_{fc} = 0.0006 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$) در یک مبدل حرارتی

صفحه ای واشردار از آب دور ریز که در 90°C در دسترس است، استفاده می‌شود. فاصله عمودی دهانه‌های صفحه 1.6 m ، عرض صفحه 0.5 m و فاصله بین صفحات 6 mm می‌باشد. ضریب بزرگ شدگی، توسط سازنده معادل با 1.17 تعیین شده و زاویه شورون برابر 50° می‌باشد. صفحات از جنس تیتانیوم ($K_w = 20 \text{ W/m.k}$) با ضخامت 0.0006 m ساخته شده است. قطر دهانه‌ها 0.15 m می‌باشد. آب سرد در دمای 15°C وارد مبدل حرارتی صفحه‌ای می‌شود و در دمای 45°C با دبی جرمی 6 kg/s از آن خارج می‌شود. این آب سرد، توسط آب گرم دور ریز با دمای 90°C و نرخ جرمی جریان معادل با 12 kg/s گرم می‌شود. با در نظر گرفتن آرایش یک گذر برای هر دو جریان، مطلوب است محاسبه:

الف - مساحت سطح مؤثر و تعداد صفحات این مبدل حرارتی
 ب - افت فشار برای هر دو جریان
 مشخصات فرآیند مورد نظر در جدول ۵-۶ ارائه شده است.

جدول ۵-۶: مشخصات فرآیند

سیال سرد	سیال گرم	موارد
آب سرد	آب دور ریز	سیال‌ها
6	12	نرخ های جریان Kg/s
$T_{C1} = 15$	$T_{h1} = 90$	دماهای ورودی °C
$T_{C2} = 45$	$T_{h2} = ?$	دمای خروجی °C
15	15	حداکثر افت فشار مجاز lb/in^2
0	0.00006	مقاومت کلی رسوب $m^2.k/w$
4179	4205	گرمای ویژه $C_p = J/kg.k$
8.15×10^{-4}	3.16×10^{-4}	لزجت $\mu = N.s/m^2$
0.612	0.675	ضریب هدایت گرمایی k
996	965	چگالی $\rho \text{ kg/m}^3$
5.58	1.96	عدد پرانتل Pr

و داده‌های ساختاری مبدل حرارتی صفحه‌ای پیشنهاد شده نیز در جدول ۵-۷ آورده شده است.

جدول ۵-۷: داده های ساختاری مبدل حرارتی صفحه‌ای

تیتانیوم	جنس صفحات
0.6	ضخامت صفحه (mm)
50	زاویه شورون (درجه)
?	تعداد کل صفحات
1.17	ضریب بزرگ شدگی
یک گذر	تعداد گذرها
0.15	قطر تمامی دهانه ها (mm)
1.6	فاصله عمودی دهانه ها (m)
0.5	پهنای مؤثر کانال (m)
20	ضریب هدایت گرمایی ماده صفحه (W/m.k)

حل:

الف) با نوشتن رابطه بالانس انرژی، دمای خروجی آب گرم را می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

$$Q = (\dot{m}C_p)(T_{c2} - T_{c1}) = (\dot{m}C_p)_h(T_{h1} - T_{h2}) = 6 \times 4179 \times (45 - 15) = 752220 \text{ W}$$

$$T_{h2} = T_{h1} - \frac{(\dot{m}C_p)(T_{c2} - T_{c1})}{(\dot{m}C_p)_h} = 90 - \frac{6 \times 4179 \times (45 - 15)}{12 \times 4205} = 75^\circ\text{C}$$

اختلاف دمای لگاریتمی مبدل برابر است با:

$$\text{LMTD} = \frac{(T_{h1} - T_{c2}) - (T_{h2} - T_{c1})}{\ln \frac{(T_{h1} - T_{c2})}{(T_{h2} - T_{c1})}} = \frac{(90 - 45) - (75 - 15)}{\ln \frac{90 - 45}{75 - 15}} = 52.14^\circ\text{C}$$

برای یافتن تعداد صفحات مورد استفاده در مبدل از یک روش سعی و خطا استفاده می‌کنیم. در ابتدا مسأله را براساس یک ضریب انتقال حرارت فرضی حل می‌کنیم؛ سپس بعد از یافتن تعداد صفحات، ضریب انتقال حرارت بر مبنای فرضیات لحاظ شده محاسبه می‌شود، حال اگر این دو ضریب انتقال حرارت یکسان باشند که نشان دهنده فرض صحیح در مسأله است، در غیر این صورت محاسبات براساس ضریب به دست آمده جدید تکرار می‌شود.

ضریب انتقال حرارت کلی U_e در اولین سعی برابر $5000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ فرض می‌شود.

با فرض ضریب اطمینان برابر $1/4$ داریم:

$$Q_f = C_s \cdot Q_r = 1.4 \times 752220 = 1053108 \text{ W}$$

که در آن $Q_f = U_f A_e \text{FLMTD}$ آنگاه داریم:

$$A_e = \frac{Q_f}{U_f \cdot \text{FLMTD}} = \frac{1053108}{5000 \times 1 \times 52.14} = 4.0395 \text{ m}^2$$

بنابراین سطح تصویر شده یک صفحه منفرد از معادله (۵-۱۲) برابر است با:

$$A_{1p} = L_w \cdot L_p = (L_v - D_p) \cdot (L_h + D_p) = (1.6 - 0.15)(0.5 + 0.15) = 0.9425 \text{ m}^2$$

و سطح انتقال گرمای یک صفحه با استفاده از معادله (۵-۱۱) برابر است با:

$$A_1 = A_{1p} \cdot \phi = 0.9425 \times 1.17 = 1.1027 \text{ m}^2$$

حال تعداد صفحات مؤثر را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$N_e = \frac{A_e}{A_1} = \frac{4.0395}{1.1027} \approx 5 \text{ Plates}$$

و سرانجام تعداد کل صفحات برابر است با:

$$N_t = N_e + 2 = 5 + 2 = 7 \text{ Plates}$$

حال برای چک کردن صحت فرضیات لحاظ شده، ضریب انتقال حرارت را براساس این فرضیات دیگر بار محاسبه می‌کنیم. سطح جریان کانال، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A_{ch} = b \times L_w = 0.006 \times (0.5 + 0.15) = 0.0039 \text{ m}^2$$

قطر معادل کانال با استفاده از معادله (۵-۱۸) برابر است با:

$$D_e = \frac{4(b \cdot L_w)}{2(b + L_w \phi)} = \frac{2b}{\phi} = \frac{2 \times 0.006}{1.17} = 0.01026 \text{ m}$$

تعداد کانال‌ها به ازای هر گذر، N_{cp} از معادله (۵-۲۲) به دست می‌آید:

$$N_{cp} = \frac{N_t - 1}{2 \cdot N_p} = \frac{7 - 1}{2 \times 1} = 3$$

نرخ جرمی جریان به ازای هر کانال برای سیال گرم و سرد به ترتیب برابر است با:

$$\dot{m}_{ch,h} = \frac{12}{3} = 4 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{ch,c} = \frac{6}{3} = 2 \text{ kg/s}$$

سرعت جرمی، G_{ch} برای سیال گرم و سرد نیز به ترتیب برابر است با:

$$G_{ch,h} = \frac{4}{0.0039} = 1025.64 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$$

$$G_{ch,c} = \frac{2}{0.0039} = 512.82 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$$

بنابراین اعداد رینولدز مربوط به جریان گرم و سرد را می‌توان چنین نوشت:

$$Re_h = \frac{G_{ch,h} \cdot D_e}{\mu_h} = \frac{1025.64 \times 0.01026}{3.16 \times 10^{-4}} = 33300$$

$$Re_c = \frac{G_{ch,c} \cdot D_e}{\mu_c} = \frac{512.82 \times 0.01026}{8.15 \times 10^{-4}} = 6456$$

بنابراین جریان هر دو سیال سرد و گرم، آشفته است.

برای محاسبه ضریب انتقال گرمای سیال گرم، h_h و سرد h_c ابتدا با استفاده از جدول (۲-۵) برای زاویه شورون $\beta = 50^\circ$ مقادیر $C_h = 0.13$ و $n = 0.732$ را به دست می‌آوریم، سپس به کمک رابطه زیر:

$$Nu_h = \frac{hD_e}{k} = 0.13(Re_h)^{0.732} (Pr)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.17}$$

با فرض $\mu_b \approx \mu_w$ ضریب انتقال گرمای سیال سرد و گرم را می‌توان چنین به دست آورد:

$$Nu_h = 0.13(33300)^{0.732} (5.58)^{\frac{1}{3}} = 1087.5$$

$$h_h = \frac{Nu_h k}{D_e} = \frac{1087.5 \times 0.612}{0.01026} = 64868 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$Nu_c = 0.13(6456)^{0.732} (1.96)^{\frac{1}{3}} = 230.9$$

$$h_c = \frac{Nu_c k}{D_e} = \frac{230.9 \times 0.675}{0.01026} = 15191 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

ضریب کلی انتقال گرمای مبدل با سطوح تمیز از معادله (۲۸-۵) تعیین می‌گردد:

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_h} + \frac{0.0006}{20}$$

$$U_c = \left[\frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_h} + \frac{0.0006}{20} \right]^{-1} = \left[\frac{1}{15191} + \frac{1}{64868} + \frac{0.0006}{20} \right]^{-1}$$

$$= 8989 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

ضریب کلی انتقال گرمای مبدل با سطوح رسوب گرفته (تحت بهره‌برداری) از معادله (۳۲-۵) محاسبه می‌شود:

$$\frac{1}{U_f} = \frac{1}{U_c} + 0.00006$$

$$U_f = \left[\frac{1}{U_c} + 0.00006 \right]^{-1} = \left[\frac{1}{8989} + 0.00006 \right]^{-1} = 5839 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

بنابراین ضریب انتقال حرارت محاسبه شده از ضریب انتقال حرارت فرض شده

$$U_f = 5839 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

بزرگ‌تر می‌باشد، لذا محاسبات باردیگر با فرض $5000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

به صورت زیر تکرار می‌شود:

$$A_e = \frac{Q_f}{U_f F \text{LMTD}} = \frac{1053108}{5839 \times 1 \times 52.14} = 3.4591 \text{ m}^2$$

تعداد صفحات مؤثر برابر است با:

$$N_e = \frac{A_e}{A_1} = \frac{3.4591}{1.1027} = 3.1369 \approx 5 \text{ Plates}$$

جهت برابر بودن تعداد کانال‌های سیال سرد و گرم عدد مورد نظر به یک عدد فرد گرد شده است.

$$N_t = N_e + 2 = 5 + 2 = 7 \text{ Plates}$$

بنابراین ادامه‌ی محاسبات فرآیندی شبیه محاسبات قبلی را طی می‌کند و سرانجام ضریب کلی انتقال حرارت رسوب گرفته شده برابر $5859 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ محاسبه می‌گردد.

بنابراین تعداد کل صفحات برابر است با:

$$N_t = N_e + 2 = 5 + 2 = 7 \text{ Plates}$$

و مساحت مؤثر انتقال حرارت برابر است با:

$$A_e = N_e \cdot A_1 = (7 - 2) \times 1.1027 = 5.5135 \text{ m}^2$$

ب - تحلیل افت فشار

برای محاسبه ضرایب اصطکاک سیال گرم و سرد، از معادله (۵-۲۴) و جدول (۵-۲)

داریم:

$$f_h = \frac{0.772}{(\text{Re})^{0.161}} = \frac{0.772}{33300^{0.161}} = 0.144$$

$$f_c = \frac{0.772}{(\text{Re})^{0.161}} = \frac{0.772}{6456^{0.161}} = 0.188$$

افت فشار اصطکاک‌ی مربوط به جریانهای گرم و سرد، از معادله (۵-۲۳) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta p_c = 4f \frac{L_{\text{eff}} N_p}{D_e} \frac{G_c^2}{2\rho} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{-0.17}$$

$$(\Delta p_c)_h = 4 \times 0.144 \times \frac{1.6 \times 1}{0.01026} \times \frac{1025.64^2}{2 \times 965} = 48958 \text{ Pa}$$

$$(\Delta p_c)_c = 4 \times 0.188 \times \frac{1.6 \times 1}{0.01026} \times \frac{512.82^2}{2 \times 996} = 15482 \text{ Pa}$$

افت فشار در دهانه‌های ورودی و خروجی از معادله (۵-۲۵) محاسبه می‌شود. با تعیین سرعت جرمی سیال گرم و سرد در دهانه‌ها داریم:

$$(G_p)_h = \frac{\dot{m}}{\pi \left(\frac{D_p}{4}\right)^2} = \frac{12}{\pi \left(\frac{0.15^2}{4}\right)} = 679.06 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

$$(G_p)_c = \frac{\dot{m}}{\pi \left(\frac{D_p}{4}\right)^2} = \frac{6}{\pi \left(\frac{0.15^2}{4}\right)} = 339.53 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

بنابراین افت فشار در دهانه‌های ورودی و خروجی جهت جریان گرم و سرد به ترتیب برابر است با:

$$\Delta p_p = 1.4 N_p \frac{G_p^2}{2\rho}$$

$$(\Delta p_c)_h = 1.4 \times 1 \times \frac{679.06^2}{2 \times 965} = 334.49 \text{ Pa}$$

$$(\Delta p_c)_c = 1.4 \times 1 \times \frac{339.53^2}{2 \times 996} = 81.02 \text{ Pa}$$

کل افت فشار از معادله (۵-۲۷) برای سیال گرم و سرد به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta p_t = \Delta p_c + \Delta p_p$$

$$(\Delta p_t)_h = (\Delta p_c)_h + (\Delta p_p)_h = 48958 + 334.49 = 49292 \text{ Pa}$$

$$(\Delta p_t)_c = (\Delta p_c)_c + (\Delta p_p)_c = 15482 + 81.02 = 15563 \text{ Pa}$$

بنابر آنچه پیشتر گفته شد با توجه به اینکه افت فشار کلی کمتر از $1 \text{ bar} \cong 10^5 \text{ Pa}$ می‌باشد، از این رو واحد پیشنهاد شده جوابگوی افت فشار متداول می‌باشد.

۵-۶- روش‌های طراحی حرارتی

چنانکه پیش از این گفته شد، برای تحلیل انتقال حرارت یک مبدل حرارتی، از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که می‌توان به روش‌های LMTD، ϵ -NTU و

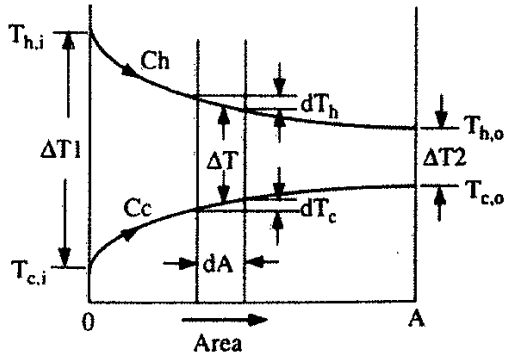
P-NTU اشاره کرد. اگرچه همه این روش‌ها عمدتاً از روند یکسانی پیروی می‌کنند، دو مورد آخری به صورت بدون بعد آرایه می‌شوند. جزئیات کامل‌تر این دو روش و بعضی روش‌های دیگر توسط Shah و Mueller [۵] خلاصه شده است. هر دو روش LMTD و ϵ -NTU به شکلی گسترده در صنعت به کار می‌روند، درحالی‌که روش P-NTU معمولاً برای محاسبه‌ی فاکتور تصحیح F برای LMTD به کار می‌رود. این روش‌های تحلیلی براساس ساده‌سازی‌ها و ایده‌آل‌سازی‌های زیر بنیان گذاشته شدند:

- ۱- مبدل حرارتی تحت شرایط حالت پایدار کار می‌کند.
- ۲- تمام ویژگی‌های فیزیکی در مبدل حرارتی صفحه‌ای ثابت هستند، بنابراین از تغییرات خواص سیال برحسب دما صرف نظر می‌شود و ضریب کلی انتقال حرارت و همچنین تعداد واحدهای انتقال حرارت در طول جریان ثابت می‌مانند.
- ۳- در هر گذر یا مسیر از مبدل، دمای یکنواخت و توزیع جریان یکسان وجود دارد و همچنین هر کدام از جریان‌های سیال کاملاً در هر کدام از مقاطع عرضی داخل کانال مخلوط می‌شوند.
- ۴- هدایت حرارت در کانال‌های داخل صفحه‌ای، اصولاً عمود بر جریان سیال است. از هدایت حرارت طولی در صفحه و سیال صرف نظر می‌شود.
- ۵- انتقال حرارت مبدل به محیط (خارج از مبدل) ناچیز بوده و از این رو اتلاف حرارتی وجود ندارد؛ عایق کاری مناسب مبدل حرارتی صفحه‌ای و نیز فضاهاى هوای مرده بین صفحات اولی و انتهایی این موقعیت را ایجاد می‌کند.
- ۶- درحالتی که هیچ‌گونه تغییر فازی (چگالش یا تبخیر) در هیچ کدام از جریان‌های سیال وجود نداشته باشد یا اگر یکی از سیالات تحت شرایط تغییر فاز قرار بگیرد، این حالت در فشار اشباع ثابت (فشار ثابت) اتفاق می‌افتد و از این رو ضریب انتقال حرارت کلی ثابت خواهد بود، بنابراین ظرفیت حرارتی مؤثر در مورد دوم به سمت بی‌نهایت ($C_{\max} \rightarrow \infty$) میل می‌کند.

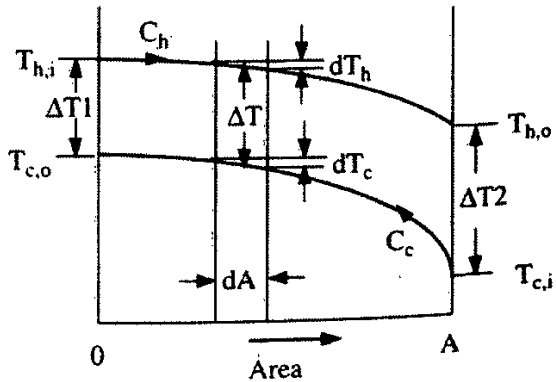
۵-۶-۱- روش اختلاف دمای متوسط لگاریتمی (روش LMTD)

نرخ انتقال حرارت در عرض یک المان سطح دیفرانسیلی dA در امتداد مبدل (شکل ۵-۴۱ و ۵-۴۲ را ببینید) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$dQ = U \cdot dA \cdot \Delta T = U \cdot dA \cdot (T_h - T_c) \quad (39-5)$$



شکل ۴۱-۵: توزیع دما در آرایش جریان موازی



شکل ۴۲-۵: توزیع دما در آرایش جریان مخالف برای

می‌توان از این معادله دیفرانسیل در کل سطح انتقال حرارت A در امتداد طول مبدل انتگرال گرفت. گفتنی است که ضریب انتقال حرارت کلی U ثابت در نظر گرفته می‌شود. همچنین، با در نظر گرفتن موازنه انرژی در سطح دیفرانسیلی dA خواهیم داشت:

$$dQ = -C_h dT_h = \pm C_c dT_c \quad (40-5)$$

که در آن C_h و C_c به ترتیب نرخ‌های ظرفیت حرارتی^۱ (دبی حرارتی) جریان‌های

¹ Heat capacity rates

سیال گرم و سرد می‌باشند، بنابراین، برای یک آرایش جریان مخالف (معکوس) برای داریم:

$$d(T_h - T_c) = dT_h - dT_c = dQ \left(\frac{1}{C_c} - \frac{1}{C_h} \right) \quad (۴۱-۵)$$

با جای گذاری معادله (۴۱-۵) در معادله (۴۱-۵)، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{d(T_h - T_c)}{T_h - T_c} = U \left(\frac{1}{C_c} - \frac{1}{C_h} \right) dA \quad (۴۲-۵)$$

که می‌توان از آن در امتداد طول کلی مبدل حرارتی انتگرال گرفت:

$$\ln \frac{T_{h,o} - T_{c,i}}{T_{h,i} - T_{c,o}} = UA \left(\frac{1}{C_c} - \frac{1}{C_h} \right) \quad (۴۳-۵)$$

یا

$$T_{h,o} - T_{c,i} = (T_{h,i} - T_{c,o}) \exp \left(UA \left(\frac{1}{C_c} - \frac{1}{C_h} \right) \right) \quad (۴۴-۵)$$

همچنین برای آرایش جریان موازی، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T_{h,o} - T_{c,o} = (T_{h,i} - T_{c,i}) \exp \left(UA \left(\frac{1}{C_c} + \frac{1}{C_h} \right) \right) \quad (۴۵-۵)$$

توجه داشته باشید که $Q = C_h(T_{h,i} - T_{h,o}) = C_c(T_{c,o} - T_{c,i})$ می‌باشد، بار

حرارتی کلی Q مبدل به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = UA \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln(T_{h,i} - T_{c,o} / T_{h,o} - T_{c,i})} = UA \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (۴۶-۵)$$

که در آن ΔT_1 اختلاف دما بین جریان‌های سیال سرد و گرم در یک انتها و ΔT_2 اختلاف دما در انتهای دیگر همان‌طور که در شکل‌های (۴۱-۵) و (۴۲-۵) نشان داده شده است، می‌باشد.

با مقایسه معادله (۴۶-۵) و (۴۶-۵) به آسانی می‌توان فهمید که اختلاف دمای متوسط را بین جریان‌های سرد و گرم در طول کلی مبدل می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$LMTD = \Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (۴۷-۵)$$

عبارت فوق عموماً نشان دهنده اختلاف دمای لگاریتمی، یا $LMTD$ یا ΔT_{LMTD} یا

ΔT_m می‌باشد. از این رابطه همچنین می‌توان در شرایطی که دمای یکی از جریان‌های سیال ثابت است یا هنگامی که برای یکی از سیالات تغییر فاز با فشار یا دمای ثابت اتفاق می‌افتد، همان طور که در شکل‌های (۵-۴۱) و (۵-۴۲) نشان داده شده است، استفاده کرد؛ همچنین، در حالتی که $C_h = C_c$ می‌باشد، اختلاف دما در آرایش جریان خلاف جهت (معکوس) ثابت بوده و از این رو $\Delta T_{LMTD} = \Delta T_1 = \Delta T_2$ است که مساوی با اختلاف دمای متوسط حسابی^۱ می‌باشد. بنابراین اگر اختلاف دمای ΔT_1 بیشتر از 50 درصد بزرگتر از ΔT_2 نباشد، اختلاف دمای متوسط حسابی 1 درصد مقدار ΔT_{LMTD} خواهد بود و می‌توان از آن برای ساده کردن محاسبات استفاده شود. گفتنی است که ΔT_{LMTD} نشان دهنده بیشترین پتانسیل دمایی انتقال حرارت است که می‌توان در مبدل حرارتی جریان خلاف جهت (معکوس) به آن دست یافت. در نتیجه سطح صفحه لازم برای یک بار حرارتی معین در آرایش جریان معکوس نسبت به آرایش‌های جریان موازی، جریان متقاطع و چند گذر کمتر است.

باید گفت که استفاده از ΔT_{LMTD} فقط یک تحلیل تقریبی است به طوری که در حالت واقعی ضریب انتقال حرارت کلی U معمولاً نه یکنواخت و ثابت نبوده است. این ضریب به طور قابل ملاحظه‌ای در امتداد سطح انتقال حرارت در دو جهت طولی و عرضی (جانبی) تغییر می‌کند و باید از معادله (۵-۳۹) به صورت مرحله به مرحله انتگرال گرفت که در بخش‌های بعدی مطالعه خواهد شد. اما در بسیاری از طراحی‌های استاندارد و معمول، از یک مقدار ثابت برای نشان دادن مقدار متوسط یا میانگین ضریب انتقال حرارت کلی استفاده می‌شود.

برای یک آرایش چند گذر در یک مبدل حرارتی صفحه‌ای، عملیات ریاضی لازم برای محاسبه اختلاف دمای متوسط بسیار پیچیده‌تر می‌شود. برای اصلاح اختلاف دمای متوسط لگاریتمی در معادله انتقال حرارت معمولاً از یک ضریب تصحیح استفاده می‌شود که در نتیجه معادله زیر حاصل خواهد شد:

$$Q = (UA)F\Delta T_{LMTDC-F} \quad (۴۸-۵)$$

در معادله فوق ضریب تصحیح F نسبت اختلاف دمای متوسط واقعی به اختلاف

1 The arithmetic mean temperature difference

دمای متوسط لگاریتمی برای آرایش جریان معکوس با در نظر گرفتن دمای به هم رسیدن (پروچ) یکسان می‌باشد. این ضریب نشان‌دهنده مقدار انحراف اختلاف دمای متوسط واقعی از ΔT_{LMTD} در جریان معکوس است و نباید با بازده مبدل حرارتی صفحه‌ای اشتباه شود. برای یک آرایش جریان معین، مقدار F به بازده حرارتی بدون بعد P و نسبت نرخ‌های ظرفیت حرارتی دو جریان سیال، R بستگی دارد و می‌توان آن را به شکل زیر نمایش داد:

$$F = \phi(P, R) \quad \text{(آرایش جریان و } P, R \text{)} \quad (۴۹-۵)$$

که در آن P و R به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$P = [(T_{c,o} - T_{c,i}) / (T_{h,i} - T_{c,i})] = (\Delta T_c / \Delta T_{max}) \quad (۵۰-۵)$$

$$R = [(T_{h,i} - T_{h,o}) / (T_{c,o} - T_{c,i})] = (C_c / C_h) \quad (۵۱-۵)$$

ضریب تصحیح F برای تمامی آرایش‌های جریان کمتر از یک است، بجز آرایش‌های جریان معکوس و موازی که در آنها برابر با یک می‌باشد. در مورد دوم، $\Delta T_{LMTD} - F$ را باید برای آرایش جریان موازی به دست آورد. در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، به دلیل اینکه دو صفحه انتهایی نقشی در روند انتقال حرارت ندارند، تعداد کانال‌های داخل صفحه‌ای تأثیر بسزایی روی ماهیت جریان معکوس یا موازی واقعی دارند، توضیحات بیشتر در این زمینه در ادامه ارائه شده است؛ همچنین، هیچ گونه معادلات صریحی برای حدس ضرایب تصحیح برای آرایش‌های گوناگون جریان وجود ندارد و روش مرسوم، ایجاد جداول یا نمودارهایی به ازای آرایش‌های موجود و همزمان استفاده از روش‌های عددی یا تحلیلی می‌باشد. برای مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای چندگذر، مطالعاتی توسط Marriot [۶]، Bassiouny و Martin [۷]، Shah [۸-۹] و Yang و [۱۰ Wang] انجام شده است که نتایج آن در ادامه این فصل نشان داده شده است.

۵-۶-۲- ϵ -NTU روش

با وجود اینکه روش LMTD (یا ΔT_{LMTD}) به شکلی گسترده برای طراحی مبدل حرارتی استفاده می‌شود، اما عمدتاً در مواردی که تمام دماهای خروجی معلوم هستند به کارگیری این روش بسیار مفید می‌باشد؛ در صورت نداشتن این اطلاعات، محاسبات

تکراری خسته‌کننده‌ای برای ترم‌های لگاریتمی نیاز است. روش ε -NTU سبب ساده شدن عملیات ریاضی مورد نیاز می‌شود و روند بسیار مناسبی را با استفاده از پارامترهای بدون بعد ارائه می‌دهد که در این صورت می‌توان بسادگی مسایلی از نوع طراحی مبدل و همچنین بررسی کارایی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای را حل کرد.

بازده مبدل حرارتی^۱ ε به صورت نسبت نرخ واقعی انتقال حرارت در یک مبدل حرارتی مشخص به بیشترین نرخ انتقال حرارت ممکن تعریف می‌شود که فقط با قانون دوم ترمودینامیک محدود می‌شود یا:

$$\varepsilon = (Q/Q_{\max}) \leq 1 \quad (52-5)$$

که در آن رابطه به دست آوردن حداکثر بار حرارتی ممکن برابر است با:

$$Q_{\max} = C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (53-5)$$

که در آن C_{\min} کوچکتر از C_h و C_c می‌باشد. با توجه به ترمودینامیک، بیشترین بار حرارتی، Q ای را ارائه می‌دهد که می‌توان آن را در یک مبدل حرارتی با جریان معکوس با مساحت سطح نامحدود به دست آورد و از این رو بازده ε به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon = \frac{C_h(T_{h,i} - T_{h,o})}{C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i})} = \frac{C_c(T_{c,o} - T_{c,i})}{C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (54-5)$$

بنابراین نرخ انتقال حرارت در مبدل حرارتی را می‌توان به شکل زیر نیز نشان داد:

$$Q = \varepsilon C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (55-5)$$

که رابطه اصلی را بین بازده، ظرفیت حرارتی کوچک‌تر و تفاوت بین دماهای ورودی (یا تفاوت دماهای به هم رسیدن) در روش ε -NTU ارائه می‌کند. این عبارت جایگزین معادلات ۴۶-۵ و ۴۸-۵ در روش LMTD می‌شود و شامل دماهای خروجی نمی‌گردد (دماهای خروجی، در مسایل از نوع درجه بندی کارایی معلوم نیستند).

برای یک مسأله طراحی حرارتی به کمک روش ε -NTU، بازده ε را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$\varepsilon = \phi(NTU, R \text{ و آرایش جریان}) \quad (56-5)$$

در رابطه فوق، NTU یا تعداد واحدهای انتقال حرارت به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$NTU = (UA / C_{\min}) \quad (۵۷-۵)$$

NTU در واقع اندازه سطح انتقال حرارت مورد نیاز برای یک بار حرارتی معین یا سائز مبدل است. هرچقدر مقدار NTU بزرگتر باشد، مبدل حرارتی به محدودیت ترمودینامیکی‌اش نزدیکتر خواهد بود. همچنین، R نسبت کمترین و بیشترین نرخ‌های انتقال حرارت دو جریان سیال است:

$$R = (C_{\min} / C_{\max}) \quad (۵۸-۵)$$

برای بررسی بهتر معادله (۵۷-۵) اجازه دهید مثالی واضح را در نظر می‌گیریم. یک مبدل حرارتی صفحه‌ای با آرایش جریان موازی را در نظر بگیرید معادله (۴۵-۵) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$T_{h,o} - T_{c,i} = (T_{h,i} - T_{c,o}) \exp \left[\frac{UA}{C_{\min}} \left(\frac{C_{\min}}{C_c} + \frac{C_{\min}}{C_h} \right) \right] \quad (۵۹-۵)$$

در نتیجه، با ترکیب معادلات $Q = C_h(T_{h,i} - T_{h,o}) = C_c(T_{c,o} - T_{c,i})$ و (۵۴-۵) و حذف $T_{h,o}$ و $T_{c,o}$ رابطه زیر برای آرایش جریان موازی به دست می‌آید:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-(1 + (C_h / C_c)) (UA / C_h)]}{(C_{\min} / C_h) + (C_{\min} / C_c)} \quad (۶۰-۵)$$

در این معادله، هر دو شرط $C_h > C_c$ یا $C_h < C_c$ را می‌توان به کار برد و عبارت نهایی را برای ε می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-(1 + C_{\min} / C_{\max}) UA / C_{\min}]}{1 + (1 + C_{\min} / C_{\max})} = \frac{1 - \exp[-(1 + R) NTU]}{1 + R} \quad (۶۱-۵)$$

عملیات فوق چگونگی نمایش بازده را برای یک آرایش جریان معین برحسب پارامترهای بدون بعد R و NTU نشان می‌دهد. با استفاده از یک روند ریاضی مشابه برای آرایش جریان مخالف جهت، بازده به صورت زیر به دست می‌آید:

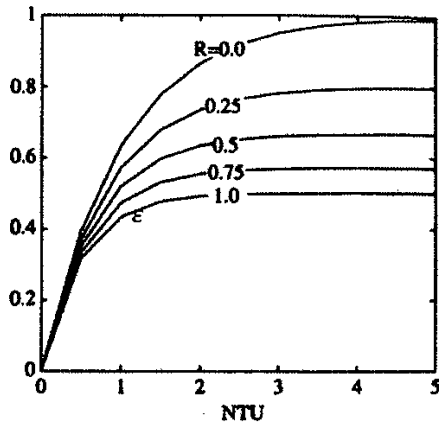
$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-(1 - R) NTU]}{1 - R \cdot \exp[-(1 - R) NTU]} \quad (۶۲-۵)$$

تغییرات ε با R و NTU برای آرایش‌های جریان موازی و خلاف جهت در شکل‌های ۵-۱۰ و ۵-۱۱ به ترتیب رسم شده‌اند. گفتنی است که در یک اواپراتور یا کندانسور به ترتیب C_h یا C_c به سمت بی نهایت میل می‌کنند به مقدار $R = 0$ بوده و از این رو بازده مستقل از جهت جریان است و می‌توان آن را به صورت زیر محاسبه کرد:

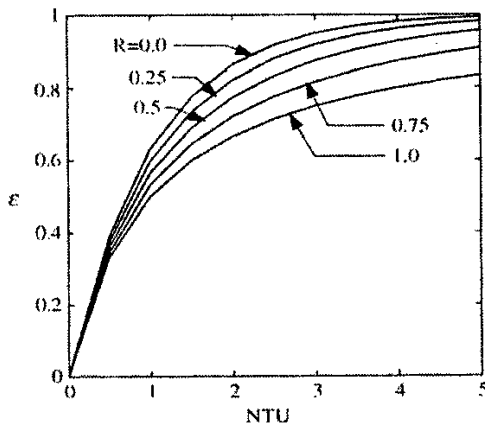
$$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU)$$

(۶۳-۵)

و روابط مشابهی برای آرایش‌های چند گذر به دست آورد، اما از آنجایی که این روابط بسیار پیچیده می‌باشند، بنابراین عموماً نتایج به صورت نمودارهای مناسب ارایه می‌شود.



شکل ۴۳-۵: تغییرات ε بر حسب NTU و R در یک آرایش جریان موازی



شکل ۴۴-۵: تغییرات ε بر حسب NTU و R در یک آرایش جریان معکوس

۵-۶-۳- P-NTU روش

این شیوه در اصل همان روش ϵ -NTU می‌باشد که تغییرات کوچکی در آن داده شده است. با آنکه در روش ϵ -NTU مشخص می‌شود که کدام جریان مقدار دبی حرارتی کوچکتری دارد، اما در روش P-NTU یک بازده دمای P^1 که تابعی از NTU و P می‌باشد، صریحاً یا برای سیال ۱ یا سیال ۲ تعریف می‌شود [۱۱]. این پارامتر صرف نظر از اینکه که کدام سمت جریان گرم یا سرد است، برگزیده می‌شود و رابطه کاری همراه با تعاریف پارامتری مربوط که در زیر می‌آیند بر اساس سمت ۱ سیال هستند که باید در طرح برای هر آرایش جریان توسط طراح به دقت مشخص شود:

$$P_1 = \phi(NTU_1, R_1, \text{جریان}) \quad (۶۴-۵)$$

$$Q = P_1 C_1 |T_{2,i} - T_{1,i}| \quad (۶۵-۵)$$

$$P_1 = [(T_{1,o} - T_{1,i}) / (T_{2,i} - T_{1,i})] \quad (۶۶-۵)$$

$$R_1 = C_1 / C_2 = [(T_{2,i} - T_{2,o}) / (T_{1,o} - T_{1,i})] \quad (۶۷-۵)$$

$$NTU_1 = (UA / C_1) = (|T_{1,o} - T_{1,i}| / \Delta T_m) \quad (۶۸-۵)$$

همچنین، روابط داخلی بین این پارامترها، به ترتیب برای دو سمت سیال ۱ و ۲ می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$Q = P_1 C_1 |T_{2,i} - T_{1,i}| = P_2 C_2 |T_{1,i} - T_{2,i}| \quad (۶۹-۵)$$

$$P_1 = P_2 R_2 \quad (۷۰-۵)$$

$$P_2 = P_1 R_1 \quad (۷۱-۵)$$

$$NTU_1 = NTU_2 R_2 \quad (۷۲-۵)$$

$$NTU_2 = NTU_1 R_1 \quad (۷۳-۵)$$

$$R_1 = 1/R_2 \quad (۷۴-۵)$$

در عمل، اگرچه این روش بیشتر برای طراحی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای استفاده نمی‌شود، اما برای محاسبه ضرایب تصحیح مورد نیاز در روش LMTD به کار می‌رود. ضریب تصحیح F معمولاً برحسب ترم‌های P و R نمایش داده می‌شود و مثال‌هایی برای آرایش‌های جریان مختلف مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای چندگذر در ادامه این فصل مطالعه شده‌اند.

۵-۶-۴- روند اندازه‌بندی و درجه‌بندی مبدل‌ها

همان طور که در پیش آمد، تحلیل و طراحی حرارتی مبدل‌های ابتدا مسایل سایزبندی^۱ و درجه‌بندی^۲ را در بر می‌گیرد. برای حل این گونه مسایل برای مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، هر دو روش LMTD و ϵ -NTU را می‌توان به کار برد اما روش دوم ساده‌تر است.

در مسایل سایزبندی برای یک مبدل حرارتی صفحه‌ای دارای دو جریان، دبی‌های جرمی و دماهای ورودی معمولاً داده می‌شوند. همچنین دمای خروجی یکی از جریان‌های سیال نیز معلوم است. الگوریتم تحلیل حرارتی به کمک روش LMTD شامل مراحل زیر می‌باشد:

۱- محاسبه بار حرارتی Q و دمای خروجی مجهول با استفاده از معادلات:

$$Q = c_h (T_{h,i} - T_{h,o}) = c_c (T_{c,o} - T_{c,i})$$

۲- محاسبه بازده حرارتی P و نسبت نرخ‌های ظرفیت حرارتی R به ترتیب با استفاده

از معادلات (۵-۵۰) و (۵-۵۱)

۳- مشخص کردن آرایش جریان به همراه تعداد گذرها و تعداد مسیرهای هر گذر، و سپس تعیین ضریب تصحیح F به کمک منحنی F - P (یا فرمول) برای یک آرایش جریان خاص.

۴- محاسبه ضرایب انتقال حرارت سمت سیال گرم و سرد براساس شرایط جریان سیال مربوط، تقریب ضرایب رسوب (در صورت نیاز؛ فصل ۶)، و سپس محاسبه ضریب انتقال حرارت کلی U به کمک معادله (۵-۳۲)

۵- تعیین اختلاف دمای متوسط لگاریتمی ΔT_m با استفاده از معادله (۵-۴۷)

سرانجام محاسبه سطح انتقال حرارت A مورد نیاز به کمک معادله (۵-۴۸)

اگر روش ϵ -NTU به کار گرفته شود، روند محاسبات از مراحل زیر تشکیل شده است:

۱- محاسبه بار حرارتی Q و دمای مجهول T_o با استفاده از معادلات

$$Q = C_h (T_{h,i} - T_{h,o}) = C_c (T_{c,o} - T_{c,i})$$

۲- محاسبه بازده ϵ مبدل حرارتی از معادله (۵-۵۴) و نسبت نرخ‌های ظرفیت

حرارتی R با استفاده از معادله (۵-۵۸).

۳- مشخص کردن آرایش جریان به همراه تعداد گذرها و تعداد مسیره‌های هر گذر و تعیین تعداد واحدهای انتقال حرارت NTU و همچنین معادله مشخصه ϵ -NTU یا یک مجموعه از نمودارهای عملکرد برای آرایش جریان موردنظر

۴- محاسبه h_h و h_c براساس شرایط جریان سیال مربوط، تقریب ضرایب رسوب (فصل ۶) و سپس محاسبه ضریب انتقال حرارت کلی U با استفاده از معادله (۵-۳۲)

۵- نهایتاً، محاسبه سطح انتقال حرارت A موردنیاز به کمک معادله (۵-۵۷).
در حالت کلی، هر دو روش برای سایزبندی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای مناسب هستند و می‌توان آنها را بسادگی به کار برد. در مسأله درجه بندی برای یک مبدل حرارتی صفحه‌ای دازای دو جریان، دبی‌های جرمی و دماهای ورودی دو سیال و همچنین آرایش جریان، معلوم است (تعداد گذرها و تعداد مسیره‌های هر گذر) و سطح انتقال حرارت A نیز مشخص می‌باشد (در این تعریف هدف تعیین کارایی حرارتی یک مبدل حرارتی خاص است). گام‌های حل مسأله با استفاده از روش LMTD عبارتند از:

۱- محاسبه نسبت نرخ‌های ظرفیت حرارتی R با استفاده از معادله (۵-۵۱)

۲- دمای خارجی یکی از جریان‌های سیال را فرض کرده، سپس بار حرارتی Q و همچنین دمای خروجی جریان سیال دیگر را به کمک معادلات $Q = C_h (T_{h,i} - T_{h,o}) = C_c (T_{c,o} - T_{c,i})$ محاسبه کنید

۳- محاسبه بازده حرارتی P با استفاده از معادله (۵-۵۰)

۴- تعیین فاکتور تصحیح F به کمک منحنی F-P برای آرایش جریان داده شده

۵- محاسبه h_h و h_c ، تقریب هر کدام از ضرایب رسوب مورد نیاز، محاسبه ضریب انتقال حرارت کلی U با استفاده از معادله (۵-۳۲)

۶- محاسبه ΔT_{LMTD} از معادله (۵-۴۷) و سپس به دست آوردن Q با استفاده از معادله (۵-۴۸)

۷- محاسبه دماهای خروجی و مقایسه این مقادیر با مقادیر فرض و محاسبه شده در مرحله ۲

۸- تکرار گام‌های ۲ تا ۷ تا زمانی که همگرایی مطلوب به دست آید.

در صورت به کار گرفتن روش ϵ -NTU، روند محاسبات شامل مراحل زیر خواهد بود:

۱- محاسبه R به کمک معادله (۵-۵۸)

۲- محاسبه h_{hi} و h_{co} ، ضرایب رسوب و U با استفاده از معادله (۵-۲۲)

۳- تعیین بازده ϵ مبدل حرارتی از جدول ϵ -NTU-R یا رابطه آرایش جریان

خاص

۴- محاسبه بار حرارتی کلی Q از معادله (۵-۵۵)

۵- سرانجام تعیین دماهای خروجی سیال با استفاده از توازن انرژی، معادلات:

$$Q = C_h (T_{hi} - T_{ho}) = C_c (T_{co} - T_{ci})$$

مقایسه مراحل ارایه شده آشکارا نشان می‌دهد که روش ϵ -NTU نسبتاً صریح و

ساده بوده و آنالیز حرارتی دقیق و مناسبی را ارایه می‌دهد.

۵-۷- روش‌های طراحی هیدرودینامیکی

افت فشار بناچار برای هر جریان سیالی که از داخل مبدل حرارتی عبور می‌کند، اتفاق می‌افتد و تقریب مقدار آن اهمیت قابل ملاحظه‌ای در طراحی کلی و انتخاب مبدل حرارتی دارا می‌باشد. در هر دو نوع مسایل درجه‌بندی و سایزبندی، عموماً محدودیت‌هایی توسط ملاحظات اقتصادی (قیمت پمپ) یا قیود فرآیند (یا در واقع هر دو) اعمال می‌شود. در هر دو مورد، بیشترین افت فشار مجاز در مشخصات طراحی داده می‌شود و به کارگیری بهینه افت فشار ΔP معمولاً سبب افزایش کارایی حرارتی خواهد شد (که در این صورت اندازه مبدل حرارتی نیز کوچک می‌شود).

افت فشار کلی ΔP_t در یک مبدل حرارتی صفحه‌ای شامل المان‌های اصطکاکی و افت‌دهای بسیاری می‌باشد و می‌توان آن را به صورت زیر نمایش داد:

$$\Delta P_t = [\Delta P_f + \Delta P_g + \Delta P_a + \sum \Delta P_{Ni}] \quad (۷۵-۵)$$

در رابطه فوق ΔP_f افت فشار اصطکاکی یا افت (اتلاف) برشی، ΔP_g افت فشار حاصل از نیروی جاذبه یا هد استاتیکی، ΔP_a افت فشار شتاب جریان و $\sum \Delta P_{Ni}$ نیز مجموع سایر افت‌های حاصل از توزیع جریان ورودی یا خروجی است که شامل افت فشار پورت‌ها و چندراهه‌ها^۱ می‌باشد.

افت فشار اصطکاکی برای جریان تک فاز [۱۲] معمولاً توسط رابطه زیر محاسبه

می‌شود:

$$\Delta P_f = [2f(L/D_e)(G^2/\rho)] \quad (۷۶-۵)$$

که در آن L طول جریان صفحه^۱ بین پورت‌ها، G سرعت جرمی یا سرعت شار جریان^۲، ρ چگالی سیال و f ضریب اصطکاک فانیگ^۳ می‌باشد. فاکتور اصطکاک فانیگ تابعی از الگوی شیار صفحه، عدد رینولدز جریان و مشخصات سیال می‌باشند. برای کاربردهای دو فاز (جوش یا چگالش)، تقریب ΔP_f پیچیده بوده و روش معینی در این کتاب برای محاسبه این پارامتر ارائه نشده است. معمول‌ترین روش مورد استفاده براساس مدل Lockhart-Martinelli [۱۳ و ۱۴] است که برای جریان هم دمای هوا-آب در لوله‌های افقی می‌باشد. پارامتر X مدل Lockhart-Martinelli و ضرب کننده اصطکاک دو فازی^۴ Φ_1 برای مایع به صورت زیر نشان داده می‌شوند:

$$X = \sqrt{\Delta P_1 / \Delta P_v} \quad (۷۷-۵)$$

$$\varphi = \sqrt{\Delta P_f / \Delta P_1} \quad (۷۸-۵)$$

که در آن ΔP_1 افت فشار اصطکاک فاز مایع، ΔP_v افت فشار فاز بخار و ΔP_f افت فشار دو فاز هستند. هر دو مقدار ΔP_1 و ΔP_v با استفاده از معادلات تک فاز محاسبه افت فشار در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای حاصل می‌شوند. رابطه بین ΔP_1 و ΔP_v برای کاربردهای متفاوتی به دست آمدند [۱۴]، و برای لوله‌های افقی عبارت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\Phi_1^2 = [1 + (C/X) + (1/X^2)] \quad (۷۹-۵)$$

جدول ۵-۸: مقادیر C در مدل Lockhart-Martinelli

شرایط جریان در حالت مایع-بخار	C
T-T متلاطم-متلاطم	20
V-T لزوج-متلاطم	12
T-V متلاطم-لزوج	10
V-V لزوج-لزوج	5

1 plate flow length

2 flux

3 Fanning friction factor

4 Two-phase friction multiplier

مقدار ثابت C در این معادله برای جریان‌های داخل لوله در جدول (۵-۸) آمده است. برای مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، Thonon مقدار C=8 را پیشنهاد می‌کند [۱۵]، در حالی که Wang مقدار 16 را در نظر می‌گیرد [۱۶]. در منابع مختلف در این زمینه نظر یکسانی وجود ندارد و اطلاعات بیشتری برای به دست آوردن روابط افت فشار اصطکاکی جریان دو فاز با دقت بالاتر برای مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای نیاز است. افت فشار جاذبه‌ای یا افت هد استاتیکی برای جریان‌های تک-فاز در یک کانال عمودی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta P_g = \pm \rho g L \quad (۵-۸۰)$$

و برای جریان‌های دو-فاز رابطه زیر به کار می‌رود:

$$\Delta P_g = \pm \int_0^L [\alpha \rho_v + (1-\alpha)\rho_l] g dz \quad (۵-۸۱)$$

که در آن علامت "+" برای جریان قائم روبه بالا و علامت "-" برای جریان قائم رو به پایین می‌باشد. همچنین، g شتاب جاذبه زمین و α کسر تهی دو فاز^۱ می‌باشند که به صورت کسری از مساحت مقطع عرضی کانال جریان که توسط فاز بخار اشغال شده است، تعریف می‌شود. در یک کانال عمودی، این کسر تهی را می‌توان به کمک رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\alpha = \left[1 + \frac{1-x}{x} (\rho_v / \rho_l)^{2/3} \right]^{-1} \quad (۵-۸۲)$$

که در آن x کیفیت بخار (کسری از جرم کل جریان که از بخار تشکیل شده است) می‌باشد.

برای جریان تک فاز معمولاً می‌توان از افت فشار حاصل از شتاب جریان ΔP_a صرف نظر نمود، اما برای جریان‌های دو فاز، معادله زیر را به کار می‌بریم [۱۳].

$$\Delta P_a = G^2 \left\{ \left[\frac{(1-x_0)^2}{\rho_l(1-\alpha_0)} + \frac{x_0^2}{\alpha_0 \rho_v} \right] - \left[\frac{(1-x_i)^2}{\rho_l(1-\alpha_i)} + \frac{x_i^2}{\alpha_i \rho_v} \right] \right\} \quad (۵-۸۳)$$

که در آن α_0 و α_i به ترتیب کسرهای تهی ورودی و خروجی هستند، و x_0 و x_i نیز کیفیت‌های بخار ورودی و خروجی می‌باشند.

سرانجام افت فشار توزیع جریان $\sum \Delta P_{Ni}$ در یک مبدل حرارتی صفحه‌ای موارد زیر را

در برمی‌گیرد:

۱- افت در اتصالات ورودی و خروجی $\Delta P_{con,i}$ و $\Delta P_{con,o}$

۲- افت در پورت‌های ورودی و خروجی $\Delta P_{port,i}$ و $\Delta P_{port,o}$

در حالت عملی، معمولاً از روابط تجربی برای تقریب این افت فشارهای اضافی استفاده می‌شود. یکی از روش‌ها براساس فشار دینامیکی VP است که به کمک رابطه زیر به دست می‌آید [۱۸]:

$$VP = (\rho U^2 / 2) \quad (۸۴-۵)$$

که در آن U سرعت متوسط سیال است. همچنین، برای جریان‌های دو فاز داخل پورت‌ها و اتصالات ورودی و خروجی، مدل جریان همگن را می‌توان برای محاسبه چگالی دو فاز به کار برد [۱۴]:

$$\rho = [(x/\rho_v) + \{(1-x)/\rho_l\}]^{-1} \quad (۸۵-۵)$$

در نتیجه، افت فشارها در اتصالات ورودی و خروجی با استفاده از عبارات زیر به دست می‌آیند:

$$\Delta P_{con,i} = X_i(c)_i \cdot VP_i \quad (۸۶-۵)$$

$$\Delta P_{con,o} = X_i(c)_o \cdot VP_o \quad (۸۷-۵)$$

که در آن $X_i(c)$ ضریبی است که به علت افت فشار حاصل از اتصالات انقباضی و انبساطی به وجود می‌آید و مقدار آن به تفاوت قطرهای اتصال و پورت بستگی دارد. افت فشارها در پورت‌های ورودی و خروجی به کمک روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\Delta P_{port,i} = -VP_i [0.64 - 0.8(f4L_{port}/3D)] \quad (۸۸-۵)$$

$$\Delta P_{port,j} = -VP_o [2.16 - 0.8(f4L_{port}/3D)] \quad (۸۹-۵)$$

که در آن D قطر پورت، f فاکتور اصطکاک فائینگ و L_{port} طول پورت می‌باشند، به همین ترتیب، افت فشار اضافی را می‌توان از رابطه تجربی زیر تقریب زد:

$$\sum \Delta P_{Ni} = 1.5(VP_i)N_{pass} \quad (۹۰-۵)$$

افت فشار کلی و توزیع آن در بخش‌های مختلف مبدل حرارتی صفحه‌ای، در عملکرد مناسب آن نقش مهمی دارند، زیرا بیشترین دبی قابل تحمل در مبدل را تعیین می‌کنند. برای مایعات با لزجت کم، افت فشار داخل پورت معمولاً عامل محدود کننده‌ای برای رسیدن به ظرفیت‌های جریان بالاست. اما برای مایعات لزج و گازها، افت

فشار کانال از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد. به عنوان یک راهکار کلی و عمومی، افت فشار مجراها (پورت‌ها) بهتر است که کمتر از 50 درصد افت فشار کلی نگه داشته شود؛ اگر افت فشار از 66 درصد مقدار کلی بزرگتر شود، در این صورت باید تغییرات در طرح را مورد نظر قرار داد [۲۰]؛ همچنین، پس از ساینبدی گرمایی مبدل حرارتی، افت فشار را باید برای اطمینان از اینکه کوچکتر از بیشترین مقدار مجاز است، چک کرد.

۵-۸- ضریب انتقال حرارت کلی متغیر

یکی از فرض‌های در نظر گرفته شده برای روش طراحی که در بخش قبلی مطرح شده ضریب انتقال حرارت ثابت در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای می‌باشد. اگرچه عموماً این فرض بیشتر در کاربردهای عملی شامل جریان‌های تک فاز، قابل قبول است، اما در کاربردهایی که در آنها تغییر فاز روی می‌دهد، U در امتداد کانال صفحه^۱ تغییر می‌کند. در مورد اخیر، U (یا به صورت دقیق‌تر، h برای جریان دارای تغییر فاز) تابعی از سرعت جرمی، دمای سیال و کیفیت بخار می‌باشد. کیفیت بخار مشخصاً با فرآیند تغییر فاز در امتداد صفحه، تغییر می‌کند و همچنین دمای سیال (که تابعی از افت فشار است) نیز متغیر خواهد بود. در نتیجه نیاز به محاسبه همزمان افت فشار و عملکرد حرارتی می‌باشد. واضح است که روش‌های قبلی طراحی ($\epsilon - NTU$ و $LMTD$) براساس ضریب انتقال حرارت کلی ثابت بوده و قادر به انجام این محاسبه نخواهند بود. در این حالت محاسبه مرحله به مرحله برای در نظر گرفتن حالت غیرخطی موجود نیاز است [۲۲] و [۲۱]. به عنوان مثال، چگالش بخار را به کمک جریان آب سرد کننده در یک مبدل حرارتی صفحه‌ای مطالعه می‌کنیم [۲۳]. برای آسان کردن محاسبات مرحله به مرحله، سطح صفحه را به بخش‌های کوچکی در امتداد طول جریان تقسیم می‌کنیم، به صورتی که در هر ناحیه، انتقال حرارت و افت فشار به طور همزمان محاسبه می‌شوند. با آنکه تعداد تقسیمات، براساس دقت مورد نیاز تعیین خواهد شد؛ اما با توجه به محاسبات، ۱۰۰ بخش برای به دست آوردن دمای خروجی با دقت همگرایی 0.001°C کافی است. مرحله بعدی، فرض کردن یک مقدار دما برای سمت سیال سرد و در پی آن تعیین شار

حرارت^۱ و کیفیت بخار با استفاده از موازنه حرارتی می‌باشد. افت فشار سمت بخار را سپس می‌توان با استفاده از مدل Lockhart-Martinelli [۱۲] محاسبه کرد. توجه داشته باشید که فشار بخار و دمای اشباع آن معلوم هستند؛ در این صورت، به کمک روابط انتقال حرارت مربوط، h سمت آب و بخار، دماهای دیواره، U کلی و شار حرارت را می‌توان با استفاده از یک روند تکراری به دست آورد. این تکرارها دمای آب را به گونه‌ای تنظیم می‌کنند که موازنه حرارتی برای زیرگروه صحیح باشد و الگوریتم کلی در شکل (۴۳-۵) نشان داده شده است. این روند در واقع برای مسأله درجه بندی بوده و از این رو محاسبات آن تا حدی خسته کننده می‌باشد. می‌توان آن را برای مسأله ساینبدی نیز به کار برد.

همچنین این تحلیل مرحله ای برای کارهای تجربی نیز مناسب است به گونه‌ای که می‌توان از آنها برای به دست آوردن روابط ضرایب انتقال حرارت و افت فشارها در جریان‌های دارای تغییر فاز داخل مبدل حرارتی صفحه‌ای استفاده کرد.

۵-۹- اختلاط حرارتی^۲

در مبدل حرارتی صفحه‌ای، اصطلاحات "صفحه بلند یا کوتاه"، "صفحه با تتای زیاد یا تتای کم"^۳ و "صفحه سخت یا نرم"، معمولاً برای توصیف در عملکرد حرارتی این نوع از مبدل‌ها استفاده می‌شوند. این عبارات مترادف، به NTU اشاره می‌کنند که در واقع برای ارزیابی کمی عملکرد گرمایی صفحات مبدل تعریف می‌شود، بنابراین θ نشان‌دهنده عملکرد صفحه است که به صورت نسبت تغییر دمای یکی از جریان‌های سیال به تفاوت دمایی متوسط لگاریتمی آن تعریف می‌شود. این پارامترها را می‌توان برای هر دو سیال گرم و سرد به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\theta_h = [(T_{h,i} - T_{h,o}) / \Delta T_{LMTD}] \quad (۹۱-۵)$$

$$\theta_c = [(T_{c,o} - T_{c,i}) / \Delta T_{LMTD}] \quad (۹۲-۵)$$

1 heat flux

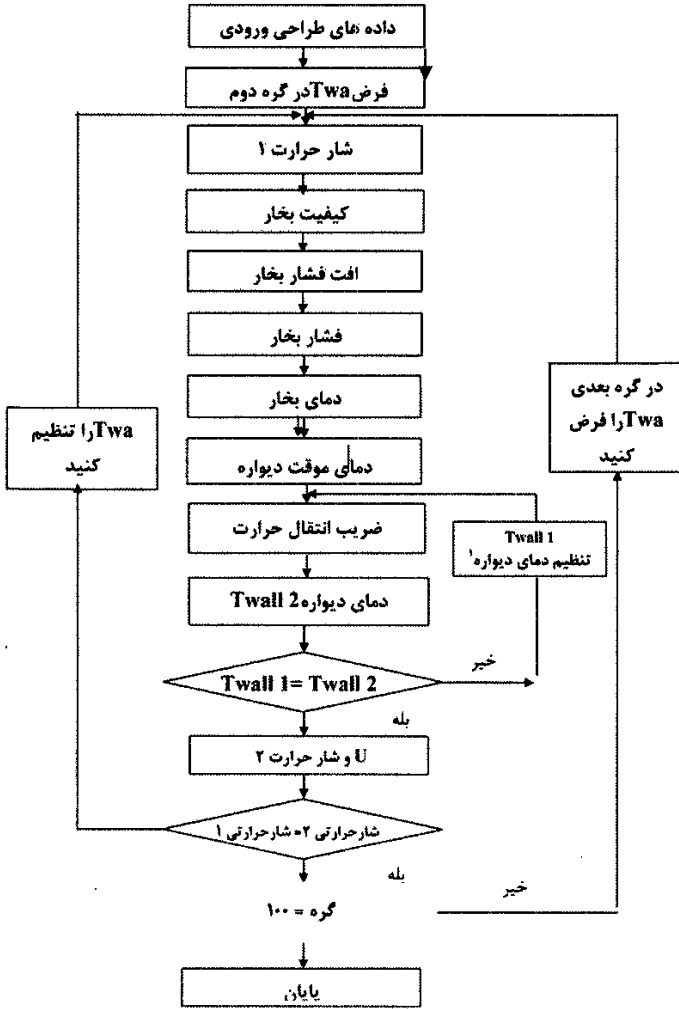
2 Thermal mixing

3 High theta

4 Low theta

برای یک آرایش جریان مخالف جهت در یک مبدل حرارتی صفحه‌ای، این معادلات را می‌توان با استفاده از روابط موازنه انرژی (۳، ۵-۵) به شکل زیر نشان داد:

$$\theta_h = (UA/C_h) \quad (۵-۹۳)$$



شکل ۵-۴۵: روند محاسبه برای کاربردهایی که تغییر فاز می دهند

برای یک آرایش جریان معکوس در یک مبدل حرارتی صفحه‌ای، این معادلات را

می‌توان با استفاده از روابط موازنه انرژی (۵-۱) به شکل زیر نشان داد:

$$\theta_h = (UA/C_h) \quad (۹۳-۵)$$

$$\theta_c = (UA/C_c) \quad (۹۴-۵)$$

در نتیجه، صفحه‌ای با مقدار θ بزرگ، یک صفحه حرارتی بلند^۱ یا صفحه سخت در نظر گرفته می‌شود و از انتقال حرارت و افت فشار بزرگتری برخوردار است. این موارد به صورت عملی در صفحات با زوایای شورون بزرگ اتفاق می‌افتند. برعکس، صفحات با مقدار θ کوچک به لحاظ حرارتی کوتاه یا صفحه نرم می‌باشند، این نوع از صفحات دارای زاویه شورون کوچک بوده و لذا افت فشار و انتقال حرارت آنها نیز کم خواهد بود. یک مبدل حرارتی صفحه‌ای با مقدار θ بزرگ دارای ظاهر فیزیکی بلند و باریک بوده و در صورت کوچک بودن مقدار θ ، مبدل حرارتی صفحه‌ای کوتاه و چاق^۲ می‌باشد.

این دو نوع از صفحات، همان طور که در شکل‌های (۵-۴۴) و (۵-۴۵) نشان داده شده‌اند، در عمل برای ایجاد سه گونه آرایش جریان داخل کانال استفاده می‌شوند. آرایش متقارن صفحه θ زیاد با زوایای شورون منفرجه^۳، مدل H یا کانال سخت^۴ را تولید می‌کند، در حالی که صفحه θ کم با زوایای شورون حاده^۵، مدل L یا کانال نرم^۶ را ایجاد خواهد کرد. آرایش میانی M یا کانال مختلط^۷ با پشت سر هم قرار دادن صفحات θ زیاد و θ کم در مجموع صفحات به وجود می‌آید. همچنین صفحات θ زیاد و θ کم در آرایش‌های متنوع دیگر می‌تواند در کنار یکدیگر قرار بگیرند به صورتی که بخش‌هایی از مجموعه شامل کانال‌های سخت بوده و سایر قسمت‌ها از کانال‌های نرم تشکیل شده‌اند. هدف از طراحی این گونه آرایش‌های متفاوت، رسیدن به اختلاط حرارتی مطلوب است.

1 Thermally long

2 fat

3 Obtuse-angled

4 Hard channel

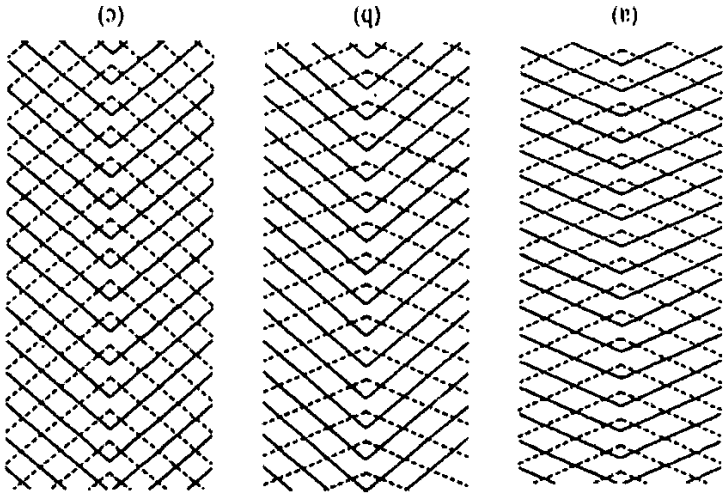
5 Acute-angled

6 Soft-channel

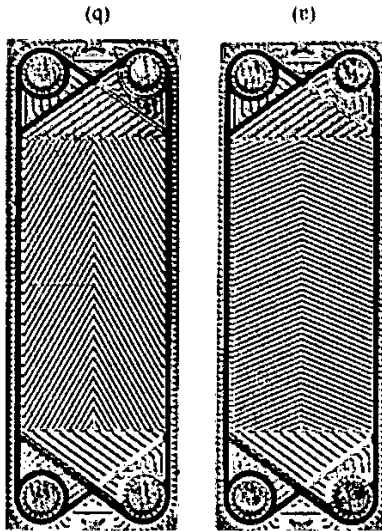
7 Mixed-channel

۱. ۲. ۳. ۴. ۵. ۶. ۷. ۸. ۹. ۱۰. ۱۱. ۱۲. ۱۳. ۱۴. ۱۵. ۱۶. ۱۷. ۱۸. ۱۹. ۲۰. ۲۱. ۲۲. ۲۳. ۲۴. ۲۵. ۲۶. ۲۷. ۲۸. ۲۹. ۳۰. ۳۱. ۳۲. ۳۳. ۳۴. ۳۵. ۳۶. ۳۷. ۳۸. ۳۹. ۴۰. ۴۱. ۴۲. ۴۳. ۴۴. ۴۵. ۴۶. ۴۷. ۴۸. ۴۹. ۵۰. ۵۱. ۵۲. ۵۳. ۵۴. ۵۵. ۵۶. ۵۷. ۵۸. ۵۹. ۶۰. ۶۱. ۶۲. ۶۳. ۶۴. ۶۵. ۶۶. ۶۷. ۶۸. ۶۹. ۷۰. ۷۱. ۷۲. ۷۳. ۷۴. ۷۵. ۷۶. ۷۷. ۷۸. ۷۹. ۸۰. ۸۱. ۸۲. ۸۳. ۸۴. ۸۵. ۸۶. ۸۷. ۸۸. ۸۹. ۹۰. ۹۱. ۹۲. ۹۳. ۹۴. ۹۵. ۹۶. ۹۷. ۹۸. ۹۹. ۱۰۰.

تصاویر زیر را به ترتیب از چپ به راست مشاهده کنید و به کمک خط کش و قیاس زاویه θ را اندازه بگیرید و در جدول زیر ثبت کنید. (۱-۵)



تصاویر زیر را به ترتیب از چپ به راست مشاهده کنید و به کمک خط کش و قیاس زاویه θ را اندازه بگیرید و در جدول زیر ثبت کنید. (۶-۱۰)

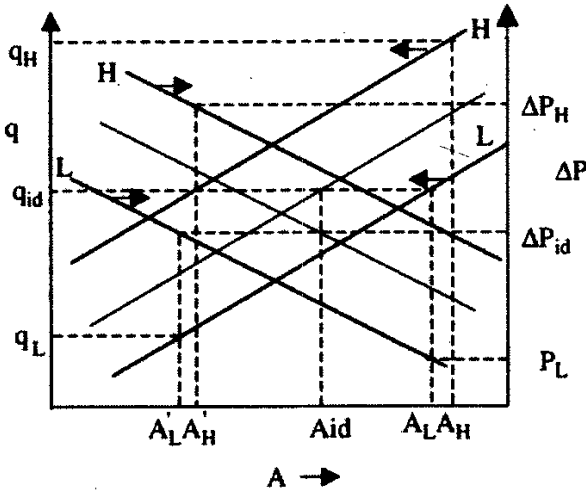


یکی از مشکلات موجود در طراحی مبدل حرارتی صفحه‌ای، سازگاری و هماهنگی دقیق بارهای حرارتی و هیدرودینامیکی می‌باشد. فراهم کردن بار حرارتی مورد نیاز و نیز به وجود آوردن افت فشار مناسب در یک زمان مشکل است، زیرا کوچکترین مساحت سطح مقطع عرضی جریان و مساحت سطح صفحه در یک مبدل حرارتی صفحه‌ای برخلاف انواع دیگر مبدل‌های حرارتی فشرده به یکدیگر وابسته می‌باشند [۱۹]. در این صورت طراحی مبدل به دو عامل افت فشار یا انتقال حرارت محدود خواهد شد. در طراحی با محدودیت در افت فشار، سطح جریان آزاد یا مقطع عرضی جریان به گونه‌ای تعیین می‌شود که حد فشار را تأمین کند، اما سطح صفحه مربوط در این صورت می‌بایست بزرگتر از سطح لازم برای برآوردن بار حرارتی باشد. در طراحی با محدودیت در انتقال حرارت، با آنکه سطح صفحه محاسبه شده، بار حرارتی مورد نیاز را به وجود می‌آورد، اما مساحت سطح جریان آزاد متناظر باید بزرگتر از مقدار لازم برای افت فشار باشد.

ویژگی طراحی اختلاط حرارتی به صورت کامل‌تر در شکل (۵-۴۶) نشان داده شده است؛ بدین منظور دو نوع صفحه متفاوت (صفحات θ زیاد و θ کم) به عنوان گزینه‌های ممکن برای رسیدن به بار حرارتی مشخص Q_H و افت فشار ΔP_{id} برای جریان سیال با حد هیدرودینامیکی دقیق، در نظر گرفته شده است. اگر از صفحات با θ زیاد استفاده شود، A_H طراحی شده مقدار افت فشار لازم را فراهم می‌سازد، اما سطح صفحه به کار گرفته شده به اندازه‌ای خواهد بود که بار حرارتی بزرگتر از Q_H را نیز تحمل می‌کند. اگر مبنای طراحی بر اساس مقدار انتقال حرارت مورد نیاز برآورده شود، سطح صفحه طراحی شده A'_H بوده ولی افت فشار حاصل ΔP_H بشدت بزرگتر از افت فشار مورد نظر ΔP_{id} می‌باشد، از این رو، طراحی مبدل با صفحات θ زیاد توسط قید افت فشار مشخص شده ΔP_{id} محدود می‌شود و طرح محدود شده با افت فشار^۱ نامیده می‌شود. اگر از صفحات θ کم استفاده شود، در این صورت سطح صفحه طراحی شده A_L ، بار حرارتی لازم را فراهم می‌کند، اما افت فشار موردنظر را به وجود نمی‌آورد ($\Delta P_L < \Delta P_{id}$). هنگامی که تمام افت فشار ΔP_{id} به کار گرفته شود، سطح صفحه

طراحی شده A'_L به شدت کوچکتر از سطح موردنیاز برای بار حرارتی داده شده، است $(Q_L < Q_{id})$. در این حالت طرح مبدل حرارتی با صفحات θ کم، توسط مساحت سطح A_L محدود می‌شود که برای انتقال بار حرارتی Q_{id} مورد نیاز است و این طرح را طرح محدود شده با انتقال حرارت^۱ می‌نامند.

در شکل (۵-۴۶) یک طرح ایده آل نشان داده شده است که در آن علاوه بر اینکه حد فشار ΔP_{id} رعایت شده است، بار حرارتی مورد نیاز Q_{id} نیز فراهم می‌شود. در این طرح ایده آل مساحت انتقال حرارت، A_{id} بوده که هم از A_L و هم از A_H کوچکتر می‌باشد. در این طرح، مدل شیپهای صفحات بین صفحات θ کم و θ زیاد است.



شکل ۵-۴۷: طراحی بر اساس محدودیت انتقال حرارت و افت فشار [۱۰]

متاسفانه، به علت مشکلات ساخت قالب‌ها و هزینه‌های آن همواره امکان ساخت چنین صفحاتی که براساس وظیفه محوله ساخته می‌شوند، وجود ندارد، زیرا در این حالت باید به تعداد زیادی از صفحات با الگوها و سایزهای متعدد دسترسی داشت. یک روش برای از میان بردن این مشکل در طراحی استفاده از اختلاط حرارتی به دست آمده به کمک ترکیب صفحات با الگوهای شیپ متفاوت می‌باشد [۲۴ و ۲۵]. ایده اصلی

موجود در ورای این طرح به کارگرفتن آرایش جریان موازی در دو نوع کانال مختلف به شیوه‌ای است که با عملکرد هیدرودینامیکی و حرارتی کل مورد نیاز منطبق باشد. تئوری پایه برای تعیین تعداد هر نوع از کانال‌ها برای رسیدن به طرح موردنظر توسط Marriott [۲۵] ارائه شده است و محاسبات آن در اینجا به طور خلاصه ارائه می‌گردد. تعداد کانال‌های که از صفحات θ کم و θ زیاد استفاده می‌کنند، از روابط زیر به دست می‌آید:

$$N_L = (M/m_L)[(\xi - \xi_H)/(\xi_L - \xi_H)] \quad (۹۵-۵)$$

$$N_H = [(M - N_L m_L)/m_H] \quad (۹۶-۵)$$

در این معادلات، M دبی جرمی کل سیال، m_L و m_H به ترتیب دبی‌های جرمی در هر کانال صفحات θ کم و θ زیاد و ξ پارامتر عملکرد^۱ است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\xi = [(e^{(1-R)\theta} - 1)/(e^{(1-R)\theta} - R)]$$

در رابطه فوق θ طول حرارتی (با تعریف قبلی) و R نسبت دبی حرارتی جریان سیال فرابند موردنظر به دبی حرارتی جریان سیال متناظر آن در مبدل است. توجه داشته باشید که ξ بدون زیرنویس نشان دهنده مقدار کل موردنیاز بوده و ξ با زیرنویس، مقداری است که برای کانال موردنظر به دست می‌آید.

با استفاده از ترکیب کانال‌ها می‌توان بخوبی حد افت فشار و یا حد انتقال حرارت را از میان برد، در این صورت در مقایسه با مبدل‌های حرارتی معمولی می‌توان تا ۲۵ درصد در سطح انتقال حرارت صرفه‌جویی کرد. مثال زیر نمونه‌ای از طراحی با این شیوه را نشان می‌دهد [۲۴]:

- وظیفه: خنک کردن $400 \text{ m}^3/\text{hr}$ آب تصفیه شده خشک کننده.

- تغییر دما: ۴۳-۵۷ درجه سانتیگراد.

- دمای خنک کن: ۳۰ درجه سانتیگراد

- ΔP مجاز: ۰.۱۵ MPa



جدول ۵-۹: تأثیر آرایش کانال‌های مبدل در تعداد صفحات

تعداد صفحات	θ زیاد	θ متوسط	حالت ترکیبی ^a
	211	181	147
ΔP	0.15 MPa	0.08 MPa	0.15 MPa
ملاحظات	مساحت سطح بسیار زیاد است	ΔP کاملاً استفاده نمی‌شود	Q برآورده شده و ΔP کاملاً استفاده نمی‌شود

^a 70 درصد صفحات θ زیاد بوده و 30 درصد آنها، θ کم می‌باشد.

علائم:

- A مساحت سطح انتقال حرارت، m^2
- dA المان سطح کوچک، m^2
- dQ بار حرارتی کوچک، W
- C دبی حرارتی، W/K
- C ثابت رابطه Chisholm، معادله (۷۹-۵)
- D قطر مجرا، m
- D_e قطر معادل، m
- F ضریب تصحیح، LMTD
- g شتاب جاذبه، m/s^2
- G سرعت جرمی، $kg/(m^2.s)$
- h ضریب انتقال حرارت همرفتی، $W/m^2.K$
- k رسانایی حرارتی، $W/(m.K)$
- L طول، m
- M دبی جرمی در هر کانال، kg/s
- M دبی جرمی سیال، kg/s
- N تعداد کانال‌ها یا گذرها
- NTU تعداد واحدهای انتقال حرارت
- P بازده حرارتی
- Q بار حرارتی، W

R	نسبت نرخ انتقال حرارت
R_f	مقاومت رسوب، $m^2.K/W$
U	ضریب انتقال حرارت کلی، $W/m^2.K$
v	سرعت، m/s
VP	فشار دینامیکی محلی، Pa
x	کیفیت بخار
ΔP	افت فشار، Pa
ΔT	اختلاف دما، K
ΔT_1	اختلاف دما در یک انتها، K
ΔT_2	اختلاف دما در انتهای دیگر، K
$\sum \Delta P_{Ni}$	افت فشار توزیع، Pa

علائم یونانی

α	کسر تهی
δ	ضخامت صفحه، m
ε	کارایی مبدل حرارتی
ϕ	ضرب کننده دو فاز
ρ	چگالی، kg/m^3
ξ	پارامتر عملکرد تعریف شده در معادله (۹۷-۵)

زیرنویس ها

1	جریان سیال ۱
2	جریان سیال ۲
a	شتاب
c	جریان سیال سرد
con	اتصال
f	اصطکاک



جاذبه	g
جریان سیال گرم	h
زیاد θ	H
ورودی	i
ایده آل	id
سیال	l
کم θ	L
LMTD اختلاف دمای متوسط لگاریتمی	
مقدار متوسط	m
حداکثر	max
حداقل	min
خروجی	O
صفحه	p
گذر	pass
پورت، مجرا یا درگاه	port
کلی	t
بخار	v

مراجع فصل ۵:

- [1] Shah, R.K., Heat Exchanger Design Methodology, in Heat Transfer Equipment Design, ed. R.K. Shah, E.C. Subbarao and R.A. Mashelkar, Hemisphere, Washington, PP. 17-22, 1988
- [2] Kakac, S. and Liu, H., Heat Exchangers: selection, Rating and Thermal Design, CRC Press, Boca Raton, FL, 1998.
- [3] Bell, K.J., Overall Design Methodology for Shell-and tube Exchangers, in Heat Transfer Equipment Design, ed. R.K. Shah, Sabbarao E.C., and Mashelkar R.A., Hemisphere, Washington, PP. 131-144, 1988
- [4] Shah, R.K., Heat Exchanger Basic Design Methods, in Low Reynolds Number Flow Heat Exchangers, ed. S. kakac, R.K. Shah, and A.E. Bergles, Hemisphere, Washington,, 1982
- [5] Shah, R.k. and Muller, A.C., Heat Exchanger Basic Thermal Design Methods, in Handbook of Heat Transfer Applications, 2nd edn, ed. W.M. Rohsenow, J.P. Hartnett, and E.N. Ganic, McGraw-Hill, New York, chapter 4, 1985.
- [6] Marriott, J., Where and How to Use Plate Heat Exchangers, Chemical Engineering, PP. 121-134, April, 1971.
- [7] Bassiouny, M.K and Martin, H., Temperature Distribution in a Four Channel Plate Heat Exchanger, Heat Transf Engineering, Vol. 6, no. 2, PP. 58-72, 1985.
- [8] Kandlikar, S.G. and Shah, R.K., Asymptotic Effectiveness-NTU Formulas for Multipass Plate Heat Exchangers, ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 111, PP. 314-321, May 1989.
- [9] Kandlikar, S.G and Shah, R.K., Multipass Plate Heat Exchangers- Effectiveness-NTU Results and Guidelines for Selecting Pass Arrangements, Jurnal of Heat Transfer, vol. 111, PP. 300-313, May 1989
- [10] Yang, Q. and Wang, L., Thermal Performance and maldistribution of Multipass Plate Heat Exchangers, in Heat Transfer Science and Technology, ed. B. Wang, Higher Education Press,, China, PP. 621-626, 1996.
- [11] Shah, R.K. and Sekulic, D.p., Heatexchangers, in Handbook of Heat Transfer, 3rd edn, ed. W. R0hsenow, J. Hartnett, and Y. Cho , McGraw- Hill, NewYork, Chapter 17, 1998.
- [12] White, F.M., Fluid Mecanics, 4th edn, McGraw-Hill, New York, 1999.
- [13] Lockhart, R.W. and Martinelli, R.C., Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-component Flow in Pipes, Chemical Engineering Progress, vol. 45, no. 1, PP. 39-48, 1949.
- [14] Collier, J.G. and Thome, J.R., Convective Boiling and Condensation, 3rd edn, Oxford University Press, Oxford, 1994.
- [15] Thonon, b., Vidil, R., and Marvilet, c., Recent Research and Developments in Plate Heat Exchangers, Journal of Enhanced Heat Transfer, vol. 2, nos.1-2, PP. 149-155, 1995.
- [16] Wang, L., An Experimental Investigation of Steam Condensation Performance in Plate Heat Exchangers, Publ. 99/2009, Thesis for Licentiate of Engineering Degree, Lund Institute of Technology, Lund Sweden, 1999.
- [17] Zivi, S.M., Estimation of Steady-state Steam Void-fraction by Means of the Principle of Minimum Entropy Production, Journal of Heat Transfer, vol. 12, PP.



247-252, 1964.

[18] Kay, J.M., An Introduction to Fluid Mecanics and Heat Transfer, Cambridge University Press, New York, 1963.

[19] Shah, R.K. and focke, W.W., Plate Heat Exchangers and Their Design Theory, in Heat Transfer Equipment Design, ed. R.K. Shah, E.C. Subbarao, and R.A. Mashelkar, Hemisphere, Washington, PP. 227-254, 1988.

[20] Raju, K.S.N. and Bansal, J.C., Design of Plate Heat Exchangers, in Low Reynolds Number Flow Heat Exchangers, ed. S. Kakac, R.K. Shah, and A.E. Bergles, Hemisphere, Washington, PP. 913-932, 1983.

[21] Westwater, J.W., Compact Heat Exchangers with Phase Change, Proceedings of the 8th International Heat Transfer Conference, San Francisco, PP. 269-278, 1986.

[22] Cooper, A., Condensation of Steam in Plate Heat Exchangers, AIChE Symposium, vol. 70, no. 138, PP. 172-177, 1987.

[23] Wang, L., Christensen, R., and Sunden, B., An Experimental Investigation of Steam Condensation in Plate heat Exchangers, International Journal of Heat Exchangers, vol. 70, no. 2, PP. 125-150, 2000.

[24] Clark, D.F., Plate heat Exchanger Design and Recent Development, Chemical Engineer, no. 285, PP. 275-279, 1974.

[25] Marriott, J., Performance of an Alfaflex Plate Heat Exchanger, Chemical Engineering Progress, PP. 73-78, February, 1977.



فصل ۶

رسوب^۱، خوردگی^۲ و ساییدگی^۳

یکی از علل متداول عملکرد نامناسب و خرابی یک صفحه مبدل حرارتی که بخوبی طراحی و ساخته شده است، ذرات رسوب روی صفحات و خرابی‌های حاصل از خوردگی و ساییدگی صفحات می‌باشد. در مبدل‌های حرارتی، انباشتگی ذرات ناخواسته روی سطح انتقال حرارت را رسوب می‌نامند که ناشی از پدیده‌های انتقال حرارت، انتقال جرم و انتقال انرژی می‌باشد، یعنی عواملی که عملکرد مبدل حرارتی به آنها بستگی دارد. لایه رسوب سبب می‌شود که سطح جریان باریک و از این رو سرعت جریان برای یک دبی حجمی معین افزایش یابد؛ در این صورت، افت فشار زیاد می‌شود و در پی آن توان کاری پمپ نیز افزایش می‌یابد. اگرچه ضریب انتقال حرارتی جابه‌جایی به علت افزایش سرعت، مقدار کمی بزرگ می‌شود، اما ذرات رسوب باعث اعمال مقاومت حرارتی بیشتر در برابر انتقال حرارت می‌شود که در نتیجه میزان انتقال حرارت کاهش می‌یابد.

خوردگی در واقع تجزیه یک ماده بر اثر واکنش با محیط است. این پدیده، یک فرآیند الکتروشیمیایی می‌باشد که در آن یک فلز به حالت طبیعی خود، اکسید آهن^۴ یا زنگ آهن^۵ باز می‌گردد، بنابراین موجب خرابی مبدل‌های حرارتی می‌شود که به دنبال آن کل سیستم مهندسی درست کار نخواهد کرد.

1 Fouling

2 Corrosion

3 Erosion

4 Iron oxide

5 Rust

ساییدگی یا خوردگی مکانیکی، در واقع از بین رفتن ماده است که به علت سرعت برخورد بالای جریان‌های سیال، قطرات معلق در جریان گازی، حباب‌های بخار معلق در جریان مایع یا ذرات جامع معلق در جریان‌های گاز یا سیال به وجود می‌آید. در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، مقدار خوردگی و ساییدگی را باید در حالت حداقل نگه داشت تا بدین وسیله بتوان از صفحات نازک محافظت کرد. این خرابی‌های ایجاد شده سبب کاهش عمر کاری مبدل می‌شود. همچنین گفتمنی است که رسوب، خوردگی و ساییدگی مستقل از یکدیگر عمل نمی‌کند و در عوض متقابلاً روی هم تأثیر می‌گذارند. برای نمونه می‌توان به "رسوب ناشی از خوردگی"^۱ اشاره کرد که سبب می‌شود محصولات ناشی از خوردگی به سطح بچسبند و نه تنها انتقال حرارت را به علت هدایت حرارتی کم کاهش دهند، بلکه محل‌های مناسبی جهت جرم‌گیری و ایجاد رسوب توسط سایر مکانیزم‌های دیگر رسوب ایجاد کنند.

مثال دیگر خوردگی ساییدگی^۲ است، این نوع خوردگی افزایش یافته، از افزایش حرکت نسبی بین سیال خورنده و یک دیوار فلزی به وجود می‌آید، بنابراین رسوب، خوردگی و ساییدگی را در هنگام طراحی یک مبدل حرارتی جدید باید همراه با یکدیگر در نظر گرفت. بی‌توجهی به این مهم ابتدا سبب کاهش کارایی این مبدل می‌شود، اما پس از یک مدت خاص، خرابی کلی مبدل را در پی خواهد آورد. از این رو، تحقیق روی رسوب، خوردگی و ساییدگی در سال‌های گذشته به طور گسترده برای مبدل‌های حرارتی مختلف انجام شده است. در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، تلاش‌های تحقیقاتی قابل ملاحظه‌ای روی خصوصیات تشکیل رسوب و روش‌های کاهش آن صورت گرفته است؛ همچنین مطالعات گسترده‌ای در زمینه خوردگی در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای وجود دارد و راهنمایی‌های گوناگونی برای انتخاب جنس صفحه در محیط‌های خورنده متفاوت انجام شده است. در زمینه ساییدگی در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، روش معمول، جلوگیری از سرعت بحرانی برای تشکیل ساییدگی در برخی مکان‌های خاص می‌باشد، اما بررسی‌های اصولی و تحقیقات پایه‌ای زیادی در این مورد صورت نگرفته است، از این رو، بخش اصلی این فصل به رسوب و پدیده خوردگی اختصاص خواهد داشت و تنها

1 The corrosion fouling

2 The erosion corrosion

توضیحی کوتاه درباره ساییدگی در پایان ارایه خواهد شد.

۶-۱- رسوب

رسوب، جمع شدن و رشد ماده ناخواسته روی سطح انتقال حرارت است. این پدیده تأثیر قابل توجهی در کارایی مبدل حرارتی دارد. بنابراین باید ایجاد رسوب را در طراحی مبدل حرارتی در نظر گرفت. اگر رسوب را به صورت صحیح در نظر نگیریم، کارایی مبدل حرارتی پس از یک مدت معین کاهش و به دنبال آن بازده کل سیستم نیز پایین می‌آید.

۶-۱-۱- ملاحظات اصلی

در یک مبدل حرارتی فرآیند انتقال حرارت از یک سیال گرم و یک سیال سرد، شامل فرآیندهای مختلف هدایتی و همرفتی (جابه‌جایی) می‌باشد. هر کدام از این‌ها را می‌توان به صورت جداگانه بر اساس مقاومت حرارتی نشان داد. جمع این مقاومت‌های جداگانه، مقاومت حرارتی کل سیستم است و معکوس آن ضریب کلی انتقال حرارت U می‌باشد. برای مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای که سطح انتقال حرارت در آنها مسطح است، ضریب کلی انتقال حرارت U از رابطه به دست می‌آید:

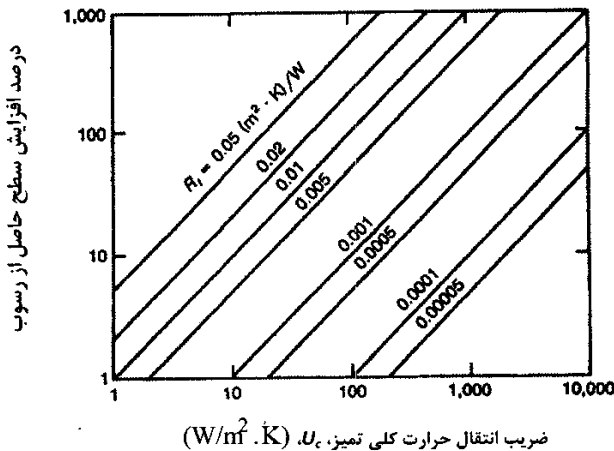
$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{\delta_p}{k_p} + R_{f,1} + R_{f,2} \quad (1-6)$$

که در آن h_1 و h_2 به ترتیب ضریب انتقال حرارت جریان‌های سیال، بر حسب $W/(m^2 \cdot K)$ ؛ δ_p ضخامت صفحه، بر حسب m ؛ k_p هدایت حرارتی صفحه، بر حسب $W/(m \cdot K)$ ؛ $R_{f,1}$ و $R_{f,2}$ مقاومت‌های رسوب به ترتیب روی سطح صفحه دو جریان، بر حسب $(m^2 \cdot K/W)$ می‌باشند. هنگامی که مبدل حرارتی جدید است، مقاومت رسوب صفر است و ضریب کلی انتقال حرارت را در این حالت می‌توان با نماد U نشان داد. در دو حالت با رسوب و بدون آن برای یک وظیفه حرارتی ثابت، نرخ انتقال حرارت با اختلاف دمای متوسط یکسان می‌باشد، بنابراین، می‌توان از معادله زیر برای تقریب نسبت سطح انتقال حرارت دستگاه تمیز و رسوب نگرفته و دستگاه رسوب گرفته، استفاده کرد [۱]:

$$\frac{A_f}{A_c} = 1 + U_c R_f \quad (۲-۶)$$

که در آن A_f ، سطح انتقال حرارت در حالت رسوب گرفته برحسب A_c ؛ m^2 سطح انتقال حرارت در حالت تمیز برحسب m^2 ، R_f مقاومت کلی رسوب ($R_f = R_{f,1} + R_{f,2}$) می‌باشند. در معادله (۲-۶)، $U_c R_f$ ، سطح انتقال حرارت اضافی حاصل از رسوب در مبدل حرارتی را نشان می‌دهد. شکل (۱-۶) درصد افزایش سطح انتقال حرارت را به علت رسوب، در یک محدوده از مقاومت‌های رسوب نشان می‌دهد. واضح است که با افزایش U_c ، تأثیرات رسوب قابل ملاحظه‌تر خواهد شد.

برای نمونه اگر ضریب انتقال حرارت کلی تمیز U_c ، $(W/m^2 \cdot K)$ 100 باشد، مقاومت کلی رسوب R_f برابر با $0.000 (W/m^2 \cdot K)$ ، 1 درصد به سطح اولیه اضافه می‌کند، اما همین مقدار مقاومت رسوب در صورتی که U_c مساوی با $(W/m^2 \cdot K)$ 10,000 باشد، 100 درصد به سطح اولیه اضافه خواهد کرد. با توجه به این دیدگاه تأثیر رسوب برای مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای نسبت به مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله از اهمیت بیشتری برخوردار است. زیرا در مبدل‌های صفحه‌ای ضریب انتقال حرارت بالاتر است. محدوده متداول ضرایب انتقال حرارت بسته به شرایط هر فرآیند بین $1000 (W/m^2 \cdot K)$ و $10,000 (W/m^2 \cdot K)$ می‌باشد.



شکل ۱-۶: اثرات رسوب روی مساحت سطح مبدل [2]

از جمله مهمترین آثار مقاومت رسوب می‌توان به کاهش انتقال حرارت و افزایش افت فشار اشاره کرد. معادله (۶-۲) نشان می‌دهد که مقاومت‌های رسوب سبب کاهش ضریب انتقال حرارت کلی خواهند شد، از این رو با توجه به معادله اصلی $A = Q/(U \cdot \Delta T_m)$ ، سطح انتقال حرارت بزرگ می‌شود. معادله (۶-۲) همچنین نشان می‌دهد در صورتی که ضریب انتقال حرارت تمیز کلی بزرگ باشد، یک مقدار کوچک مقاومت رسوب، سطح انتقال حرارت را به میزان قابل توجهی افزایش خواهد داد. به دیگر سخن هنگامی که رسوب روی سطح انتقال حرارت تولید می‌شود، سطح مقطع جریان کاهش می‌یابد، بنابراین سرعت متوسط جریان به ازای دبی حجمی ثابت، افزایش خواهد یافت. اگر ضریب اصطکاک را ثابت فرض کنیم، افت فشار کلی به صورت قابل ملاحظه‌ای بزرگ می‌شود. گفتنی است که افت فشار، تابعی از مجذور سرعت سیال است. در نتیجه رسوب با افزایش افت فشار و در پی آن افزایش توان پمپ، باعث بالا رفتن هزینه‌های کاری خواهد شد. به علاوه رسوب، هسته‌هایی^۱ را به وجود می‌آورد که شکل‌های مختلف خوردگی را ایجاد می‌کنند، از این رو کارایی مبدل‌های حرارتی کاهش می‌یابد.

به دلیل تأثیرات رسوب روی کارایی حرارتی و هیدرولیکی مبدل‌های حرارتی، بخش‌های صنعتی مرتبط هزینه اضافی زیادی را متحمل می‌شوند. این هزینه‌ها شامل افزایش هزینه‌های سرمایه‌ای^۲ (به علت نیاز به سطح انتقال حرارت بزرگتر از اندازه لازم)، افزایش هزینه‌های کاری (به علت افت فشار افزایش یافته)، کاهش محصول (به علت خرابی مبدل حرارتی)، افزایش هزینه تعمیرات (به علت نیاز به تمیزکاری) و غیره می‌باشند، بنابراین هزینه رسوب قابل ملاحظه است، به طوری که سالانه در آمریکا در حدود 4.2 میلیارد دلار تا 10 میلیارد دلار به علت ایجاد رسوب در مبدل‌های حرارتی هزینه می‌شود [۳]. در نتیجه تحقیقات زیادی در زمینه رسوب در مبدل‌های حرارتی صورت می‌گیرد، اما این پدیده تا امروز به دلیل پیچیده بودن مکانیزم آن حل نشده است.

1 Nucleate Sites

2 Capital Expenditure

۶-۱-۲- مکانیزم اصلی

پدیده رسوب یک فرآیند وابسته به زمان می‌باشد، به گونه‌ای که پس از گذشت یک دوره کاری، مبدل‌های حرارتی تازه نصب شده، با مقدار رسوب طراحی شده مواجه می‌شوند. فرآیند تولید رسوب معمولاً از ۵ مرحله متوالی تشکیل شده است: آغاز^۱، انتقال جرم^۲، ته‌نشینی^۳، رسوب‌برداری^۴، کهنگی^۵، توضیحات اندکی در ادامه ارائه شده است و اطلاعات جزئی‌تر را می‌توان در Epstein [۵] و Kho [۶] یافت.

آغاز رسوب‌گیری: با ادامه کار یک مبدل حرارتی تمیز، باید مدت زمان معلومی بگذرد تا بتوان رسوب را به صورت محسوس مشاهده کرد. این مدت زمان، زمان آغاز یا زمان شکل‌گیری رسوب^۶ نامیده می‌شود. در طول مرحله آغاز، وضعیت سطح برای رسوبی که در آینده قرار است به وجود آید، آماده می‌شود. دمای سطح، جنس آن، زبری سطح و عوامل دیگر بشدت روی تأخیر اولیه در شروع رسوب‌گیری تأثیر می‌گذارند.

انتقال: در طول مرحله انتقال جرم، شرایط لازم برای ته‌نشین شدن فراهم می‌شود و ذرات رسوب از سیال به سطح انتقال حرارت منتقل خواهند شد. این انتقال معمولاً توسط پدیده‌هایی مانند پخش^۷، ته‌نشینی^۸ و ترموفرسایش^۹ می‌باشد.

ته‌نشینی: در این مرحله، ذراتی که رسوب را به وجود می‌آورند (که قبلاً به سطح انتقال حرارت منتقل شده‌اند) به سطح انتقال حرارت می‌چسبند. سرعت ته‌نشینی به سرعت انتقال جرم، به سطح و سرعت واکنش شیمیایی در سطح بستگی دارد. خصوصیات ماده مانند چگالی، اندازه و شرایط سطح در این مرحله مهم هستند.

رسوب‌برداری: برخی از مواد پس از ته‌نشینی بی‌درنگ از سطح جدا و برخی دیگر با گذشت زمان جدا می‌شوند. سرعت جدا شدن بستگی به مقاومت رسوب و نیروهای

1 Initiation

2 Mass transport

3 Deposition

4 Removal

5 Ageing

6 Incubation period

7 Diffusion

8 Sedimentation

9 Thermophoresis

برشی سیال دارد. حل شدن جرم‌ها^۱، ساییدگی و پوسته شدن^۲ از جمله مکانیزم‌های مؤثر در فرآیند جدا شدن هستند.

کهنگی: پس از اینکه رسوب ته‌نشین شد، دستخوش یک فرآیند کهنگی از طریق تغییرات شیمیایی یا فیزیکی می‌شود که ممکن است رسوب را تقویت یا آن را تضعیف کند.

نتیجه کلی مراحل فوق تشکیل شبکه رسوب مواد روی سطح انتقال حرارت می‌باشد. بدیهی است که مقدار رسوب ماده به زمان وابسته می‌باشد.

پیش‌بینی صحیح این رفتار برای تعیین درصد افزایش سطح و همچنین مشخص کردن سیکل تمیزکاری، اهمیت دارد. مدل زیر که در ابتدا توسط Kern و Seaton [۷] ارائه شده است، سرعت ته‌نشین شدن رسوب dm_f / dt را به صورت ترکیبی از سرعت ته‌نشین شدن \dot{m}_d و سرعت جدا شدن \dot{m}_r نشان می‌دهد.

$$\frac{dm_f}{dt} = \dot{m}_d - \dot{m}_r \quad (۳-۶)$$

سال‌هاست که این مدل به شکلی گسترده پذیرفته شده است، بویژه با توجه به اینکه معادلات متناظر برای دو شار جرمی، \dot{m}_d و \dot{m}_r باید به دقت مدل شوند. در نتیجه مدل‌های متنوعی در منابع مختلف برای توصیف این دو شار مخصوصاً برای هر مکانیزم رسوب [۸-۹] ایجاد شده‌اند که در اینجا به بررسی آنها نخواهیم پرداخت.

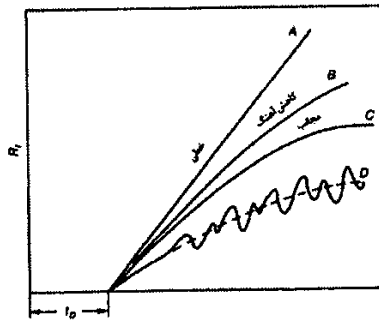
بسته به شرایط کاری، انواع مختلفی از فرآیندهای رسوب‌گیری و رسوب‌برداری به صورت هم‌زمان اتفاق می‌افتند که شکل‌های مختلف منحنی‌های رسوب را به وجود می‌آورند. در حالت کلی، چهار نوع منحنی رسوب وجود دارد که در شکل (۶-۲) نشان داده شده‌اند. نوع منحنی رسوب به تفاضل آهنگ رسوب‌گیری و رسوب‌برداری بستگی دارد. منحنی A، یک منحنی رسوب خطی است که در آن مقاومت رسوب با یک آهنگ ثابت افزایش می‌یابد منحنی C، یک منحنی رسوب دارای مجانب بوده^۳ که متداول‌ترین نوع گزارش شده است. در این حالت، رسوب با آهنگ نزولی تا یک مقدار ثابت افزایش

1 Dissolution

2 Spalling

3 Asymptotic

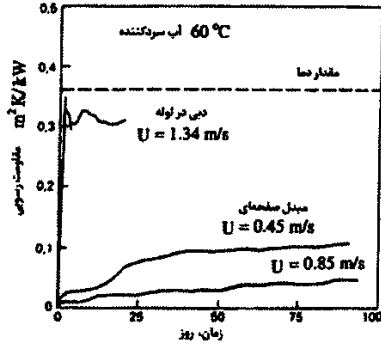
می‌یابد، این منحنی هنگامی به دست می‌آید که آهنگ رسوب‌گیری ثابت و آهنگ رسوب‌برداری متناسب با ضخامت لایه رسوب است. منحنی B بین منحنی‌های رسوب خطی و منحنی رسوب دارای مجانب قرار دارد. معمولاً این رفتار در حالتی به وجود می‌آید که آهنگ رسوب‌گیری متناسب با معکوس ضخامت رسوب باشد. منحنی D، یک منحنی دندان‌دار است که روند متوسط آن مشابه منحنی C می‌باشد، اما مقاومت رسوب با زمان نوسان می‌کند، این منحنی هنگامی به دست می‌آید که تکه‌های نسبتاً بزرگ رسوب به صورت تناوبی به دلیل افزایش تنش برشی و یا به علل دیگر از سطح انتقال حرارت جدا می‌شود.



شکل ۶-۲: افزایش مقاومت رسوب با زمان [۲]

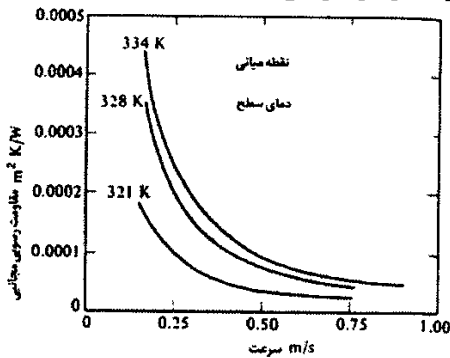
برای مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، از جمله عوامل مؤثر در تشکیل رسوب می‌توان به شرایط کاری، خصوصیات سیال، طرح‌های صفحه اشاره کرد. معمولاً شش نوع رسوب در عمل مشاهده می‌شود که در بخش بعدی توضیح داده خواهند شد. تأثیرات عوامل مختلف برای هر نوع خاص رسوب کاملاً متفاوت است. اما در بیشتر اوقات انواع مختلف رسوب هم‌زمان اتفاق می‌افتند و معمولاً تشخیص و جدا کردن آنها از یکدیگر مشکل می‌باشد، بنابراین برخی از مطالعات بدون در نظر گرفتن نوع رسوب ظاهر شده، انجام گرفته‌اند. کوپر^۱ و همکارانش [۱۰]، رسوب آب سردکننده را با استفاده از مبدل صفحه‌ای شرکت APV، مدل R405 بررسی کردند. روی آب قبل از ورود به مبدل حرارتی تحت آزمایش، عملیات شیمیایی صورت می‌گیرد. برخی از نتایج مهم حاصل از این تحقیق در

شکل (۳-۶) نشان داده شده‌اند.



شکل ۳-۶: مقایسه رسوب در یک مبدل حرارتی صفحه‌ای و یک مبدل پوسته و لوله [۱۰]

بدیهی است که با وجود پایین‌تر بودن سرعت‌های جریان، مقاومت رسوب^۱ در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای به صورت قابل توجهی نسبت به مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله کمتر است. اگر سرعت جریان افزایش یابد، مقاومت رسوب مشابه مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله کم می‌شود. تأثیر سرعت را همچنین می‌توان در شکل (۴-۶) مشاهده کرد که در آن تأثیر دمای سطح نشان داده شده است. با افزایش دمای سطح، مقاومت رسوب نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۶: مقاومت رسوب در یک مبدل حرارتی صفحه‌ای به صورت تابعی از سرعت جریان و دما [۱۰]

علاوه بر مقاومت کلی رسوب، چگونگی توزیع محلی رسوب نیز مورد توجه قرار می‌گیرد که معمولاً به سرعت محلی و توزیع دمایی حاصل از آرایش جریان، الگوی صفحه و سایر عوامل بستگی دارد. شکل (۵-۶) با استفاده از تحقیقات تجربی کوپر و همکارانش [۱۰] به دست آمده و به صورت واضح نشان می‌دهد که رسوب فقط در یک سوم بالای صفحه اتفاق می‌افتد. این ناحیه نزدیک محل ورودی آب داغ و خروجی آب سرد است که در واقع دارای دمای پروفیل‌های سطح بالا برای شرایط مورد آزمایش می‌باشد.



شکل ۵-۶: توزیع رسوب روی صفحات یک مبدل [۱۰]

۶-۱-۳- اشکال مختلف رسوب

رسوب‌ها بر اساس مکانیزم‌های مختلف شکل‌گیری، به شش نوع اصلی تقسیم می‌شوند: ذره‌ای، بلوری، بیولوژیکی، واکنش شیمیایی، خوردگی و انجمادی. نام‌های دیگری نیز در منابع مختلف برای این اسامی استفاده می‌شود مثلاً به رسوب ذره‌ای ته‌نشینی^۱ نیز می‌گویند؛ رسوب نوع بلوری^۲ را، رسوب جسم از محلول^۳ نیز می‌نامند و یا اصطلاح رسوب پلیمریزه^۴ و رسوب زغال‌سنگی^۵ برای رسوب از نوع واکنش شیمیایی به

-
- 1 Sedimentation
 - 2 Crystallization fouling
 - 3 Precipitation
 - 4 Polymerization fouling
 - 5 Coking fouling

کار می‌رود. بعلاوه، جرم^۱ کلمه‌ای است که معمولاً در حالت عملی برای اشاره به ذرات ته‌نشین حاصل از فوق اشباع شدن^۲ نمک‌های معدنی^۳ غیرآلی در سیستم‌های آبی استفاده می‌شود، اما همان‌طور که توسط گوپتا^۴ نیز مطرح شده در حالت کلی هیچ‌گونه تمایزی بین رسوب و جرم در منابع مختلف قایل نشده‌اند و می‌توان آنها را به جای یکدیگر به کار برد.

در این قسمت، این شش نوع رسوب بررسی و مکانیزم متناظر و عوامل مؤثر نیز توضیح داده می‌شود و به دلیل موضوع و هدف اصلی این کتاب، بیشتر تشکیل رسوب در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای بررسی خواهد شد. عوامل مؤثر (از جمله سرعت سیال، دماهای سطح و دمای سیال، جنس صفحه و الگوی صفحه و غیره) نیز تا حد امکان مورد بررسی قرار خواهند گرفت. بیشتر تحقیقاتی که در زمینه رسوب در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای انجام شده است، مربوط به رسوب نوع ذره‌ای، بلوری و شیمیایی است، زیرا در حالت عملی این نوع رسوب‌ها بیشتر مشاهده می‌شوند.

۶-۱-۳-۱- رسوب ذره‌ای

رسوب ذره‌ای^۵ از تجمع ذرات معلق در جریان فرآیند روی سطح انتقال حرارت به وجود می‌آید. جریان‌های آب معمولاً شامل گل و لای، شن، گرد و غبار یا ذرات زنگ هستند که در نواحی سرعت پایین تجمع کرده، متراکم می‌شوند. این ذرات گاهی اوقات به صورت کاتالیزور^۶ عمل و واکنش‌های شیمیایی را تسریع می‌کنند و با فرآیندهای تبلور که گاه همزمان روی می‌دهند، ترکیب می‌شوند. در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، تلاطم ایجاد شده توسط موج‌های صفحه در حفظ معلق بودن ذرات نقش دارند، بنابراین، رسوب ذره‌ای در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای نسبت به مبدل‌های پوسته و لوله از اهمیت کمتری برخوردار است؛ همچنین، طراحی خاص مبدل‌های صفحه‌ای با

1 Scale

2 Super saturation

3 Inorganic salt

4 Gupta

5 Particulate Fouling

6 Catalist

شکاف‌های عریض^۱ کاملاً در کاهش رسوب نوع ذره‌ای مؤثر است. رسوب ذره‌ای در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای توسط Muller-Steinhagen و Mididis [۱۲] و Thonon و همکارانش [۱۳] بررسی شده است. نتایج زیر از تحقیقات آنها به دست آمده و اطلاعات جزئی‌تر را می‌توان در مقاله‌های اصلی آنها یافت.

۱- مقاومت رسوب به سرعت و بدون تأخیر در شروع آزمایش افزایش یافته و پس از گذشت یک مدت زمان به مقدار ثابت (مجانِب) می‌رسد. با افزایش غلظت، سرعت رسوب‌گیری و همچنین مقدار ثابت (مجانِب) مقاومت رسوب افزایش می‌یابد.

۲- مشابه انواع دیگر رسوب، مقاومت ثابت (مجانِب) رسوب با افزایش سرعت سیال به علت افزایش تنش برشی دیواره، کاهش می‌یابد.

۳- نوع ذره و شرایط سیال، تأثیرات قابل توجهی روی نرخ رسوب‌گیری ذره‌ای دارند. این موضوع بویژه برای ذرات Al_2O_3 یا TiO_2 مهم است که در آنها PH محلول روی توزیع اندازه ذره مؤثر می‌باشد.

۴- تأثیر هندسه صفحه در رشد رسوب ذره‌ای قابل توجه می‌باشد. مشخص شده است که برای یک سرعت معین، زاویه شورون بزرگ، باعث ایجاد مقاومت رسوب کمتر می‌شود.

۵- دما، تأثیری روی فرآیند ایجاد رسوب ذره‌ای ندارد، ولی ممکن است در تشکیل انواع دیگر رسوب آثار مهمی داشته باشد.

شکل (۶-۶) توزیع رسوب ذره‌ای را روی صفحات با زوایای شورون 30° و 60° نشان می‌دهد که توسط مطالعات تجربی Thenon و همکارانش به دست آمده‌اند [۱۳]. با توجه به تحقیقات انجام شده توسط آنها در سرعت‌های پایین و متوسط (کمتر از 0.75 m/s)، برای یک صفحه با زاویه شورون 30° لایه ته‌نشین شده، کاملاً یکنواخت است و به نظر همگن می‌آید. برای یک صفحه با زاویه شورون 60° ، لایه ته‌نشین شده اندک است و عمدتاً در مناطق پایین دست نقاط تماس صفحه ایجاد خواهد شد. اگر سرعت پایین باشد (کمتر از 0.1 m/s) که متناظر با عدد رینولدز 800 است، لایه رسوب همگن می‌شود. آنها سپس این پدیده را با توزیع جریان مربوط کردند که به زاویه شورون

بستگی دارد. خوانندگانی که به این موضوع علاقه‌مند هستند، برای اطلاعات بیشتر می‌توانند به مقاله‌های اصلی آنها مراجعه کنند. به طور خلاصه سرعت سیال، نحوه توزیع جریان سیال، زبری سطح انتقال حرارت و اندازه ذرات معلق عوامل مهم مؤثر در فرایند رسوب ذره‌ای می‌باشند.



شکل ۶-۶: نمایش رسوب ذره‌ای روی صفحات [۱۳]: با زاویه شورون (a) 30° و (b) 60°

۶-۱-۳-۲- رسوب بلوری یا کریستالی

رسوب بلوری^۱ معمولاً هنگامی در سیستم‌های آب سردکننده تشکیل می‌شود، که نمک‌های محلول در آب، عمدتاً کربنات کلسیم^۲، فوق اشباع شده^۳ برای تشکیل جرم روی سطح انتقال حرارت متبلور شوند. معمولاً غلظت این نمک‌ها با دما افزایش می‌یابد، اما ویژگی حل‌پذیری برخی از نمک‌هایی که در آب شور یا آب دریا موجود هستند (گاهی اوقات بالاتر از یک دمای مشخص) رفتار معکوس (حلالیت معکوس) دارند. این نمک‌ها با خصوصیت حل‌پذیری معکوس هنگامی که مایع گرم می‌شود، متبلور می‌شوند. از جمله مثال‌های این دسته‌بندی می‌توان به سولفات کلسیم CaSO_3 ، CaSO_4 و کربنات کلسیم CaCO_3 اشاره کرد. بدیهی است که دما بیشترین تأثیر را روی رسوب بلوری دارد. رسوب بلوری به وجود آمده از محلول‌های CaSO_4 در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، توسط Bansal و Muller-Steinhagen بررسی شده است [۱۴]. با توجه به این تحقیقات،

1 Crystallization fouling

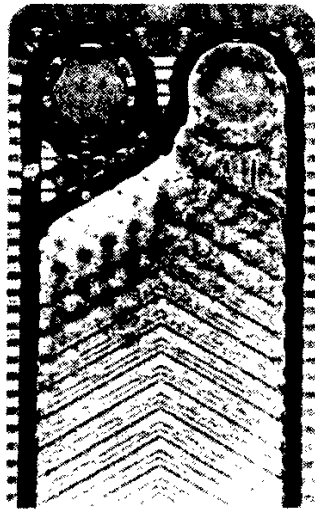
2 Calcium carbonates

3 Super saturated

مشخص شد که نرخ رسوب‌گیری با افزایش دمای دیواره، افزایش غلظت حجمی و کاهش سرعت جریان، افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت جریان، آهنگ اولیه رسوب‌گیری و مقاومت رسوب کاهش می‌یابد. آهنگ رسوب‌گیری اولیه در دمای دیواره کمتر و در سرعت‌های جریان بالاتر کاهش می‌یابد با وجود این، مقاومت رسوب به علت آهنگ رسوب‌برداری بیشتر همراه با دمای فصل مشترک کمتر، کاسته می‌شود. همچنین غلظت $CaSO_4$ ، فقط در مراحل اول فرآیند رسوب‌گیری مهم است، زیرا پس از آن، عمق کانال^۱ به طور قابل توجهی به علت رسوب‌گیری کاهش می‌یابد و سبب می‌شود که عوامل دیگری مانند تنش‌های برشی بالاتر و دماهای سطح کمتر غالب شوند. در این حالت به دلیل کوچک شدن سطح توزیع جریان خروجی، افزایش افت فشار به مقدار قابل توجهی بیشتر از افزایش مقاومت حرارتی رسوب است. افزون بر این توزیع محلی رسوب بلوری به سرعت محلی و توزیع دمایی بستگی دارد. در حالت کلی، سرعت کم و دمای بالا، رسوب بلوری را افزایش خواهد داد. شکل (۶-۷)، نمای نزدیک، از تشکیل بلور را در یک نقطه خاص از صفحه مبدل حرارتی نشان می‌دهد [۱۴]. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که اندازه و مقدار بلورها متفاوت است. حول نقاط تماس بین صفحات، سرعت جریان کم می‌باشد که این خود سبب افزایش دمای دیواره می‌شود و آهنگ رسوب‌برداری نیز کمتر خواهد شد. به دلیل هندسه خاص این نواحی پروفیل دما در نزدیکی نقاط تماس با پروفیل دما در کانال جریان متفاوت می‌باشد زیرا یک حجم سیال از جهت‌های متفاوتی گرم می‌شود. با توجه به آنچه گذشت اثرات تراکم شکل‌گیری بلور در نزدیکی نقاط تماس می‌باشد؛ بدیهی است که این موضوع برای مناطق جریان راکد در مبدل حرارتی، صادق نیست. با بررسی بیشتر تشکیل بلور در نزدیکی یک نقطه تماس (نشان داده شده در شکل ۶-۸) می‌بینیم که می‌توان بلورها را از لحاظ اندازه به دو دسته تقسیم کرد: یک رسوب تقریباً همگن از بلورهای کوچک به طور مستقیم روی سطح صفحه دیده می‌شود، در حالی که بلورهای بزرگ تک، در بالای این لایه اولیه تشکیل می‌شوند.

همچنین علاوه بر رسوب‌گیری بلوری خالص، اثر ذرات معلق روی رسوب بلوری در

مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای از سوی Bansal و همکارانش [۱۵] بررسی شده است. با توجه به تحقیقات آنها، ذرات معلق روی سطح انتقال حرارت ته‌نشین می‌شوند و مانند یک هسته رفتار می‌کنند. وجود این محل‌های هسته‌زا معلوم شد که سبب افزایش قابل ملاحظه آهنگ تبلور می‌شود. مهم‌ترین عواملی که در رسوب بلوری که به آن رسوب لایه‌ای^۱ نیز گفته می‌شود تأثیرگذار هستند، دما اغتشاش سیال، سرعت سیال، توزیع جریان، نوع پرداخت سطح ترکیب و غلظت نمک‌های موجود در آب، سختی آب و PH می‌باشد. از آنجایی که این نوع رسوبات بیشتر در PH بالا رخ می‌دهند، یکی از راه‌های مقابله با آن حفظ PH آب در حدود ۷ تا ۹ می‌باشد؛ همچنین همان‌گونه که پیشتر گذشت، خطر رسوب‌گیری با افزایش درجه حرارت آب زیاد می‌شود. تجربه نشان می‌دهد که چنانچه دمای دیواره مبدل کمتر از 65°C باشد، بندرت شاهد این نوع رسوبات خواهیم بود. به عنوان مثال در بسیاری از کندانسورها به دلیل اینکه دمای آب آنقدر بالا نیست، این نوع رسوب بندرت تشکیل می‌شود.



شکل ۶-۷: الگوی رسوب بلوری روی صفحه [۱۴]

۶-۳-۲- رسوب بیولوژیکی^۱

رسوبی که با رشد مواد با منشأ بیولوژیکی روی یک سطح انتقال حرارت ایجاد می‌شود، رسوب بیولوژیکی نامیده می‌شود. این گونه مواد شامل میکروارگانیسم‌ها^۲ (مانند باکتری، جلبک^۳ و قارچ^۴) و ماکروارگانیسم‌ها^۵ (جلبک دریایی^۶، جلبک آبی^۷ و سرخاپ^۸) هستند. رسوب بیولوژیکی در سیستم‌هایی که در آن‌ها، آب سرد از دریا، دریاچه، رودخانه، آب‌های ساحل و غیره گرفته می‌شود، زیاد اتفاق می‌افتد. این ارگانیسم‌ها در تماس با سطوح انتقال حرارت، به آن می‌چسبند و امکان تولید مثل آنها نیز وجود دارد و گاهی کاملاً مسیرهای سیال را اشغال می‌کنند و در مواردی گل و لای یا سایر ذرات جامد معلق را به دام انداخته سبب رشد خوردگی حاصل از رسوب می‌شوند. به دلیل اینکه میدل‌های حرارتی صفحاتی به طور کلی از تمامی انواع منابع آب طبیعی به عنوان سیالات سرد کننده استفاده می‌کنند، بدیهی است که رسوب بیولوژیکی می‌تواند به عنوان موضوع مهمی در طراحی میدل‌های حرارتی صفحاتی مطرح شود.



شکل ۶-۸. رشد بلور در نزدیکی نقاط تماس روی صفحات [۱۴]

- 1 Biological fouling
- 2 Micro-organisms
- 3 Algae
- 4 Fungi
- 5 Macro-organisms
- 6 Seaweed
- 7 Water weed
- 8 Barnacle (جانبوری که به کشتی می‌چسبد)

نواک^۱ رفتار رسوب حاصل از آب رودخانه راین در نزدیکی شهر مانهایم آلمان و آب دریای اورسند^۲ در سوئد را بررسی کرده است. برای هر دو نوع آب، عموماً رسوب بیولوژیکی مشاهده شده است. در بیشتر موارد، مشخص شد که مقاومت رسوب تقریباً به طور خطی در طول یک دوره مشخص افزایش می‌یابد. از جمله عوامل مؤثر می‌توان به سرعت سیال، دمای سطح و تنش برشی دیواره اشاره کرد. با افزایش سرعت سیال، مقاومت رسوب کاهش یافته که مشابه روند موجود در سایر مکانیزم‌های رسوب می‌باشد. برای سرعت جریان ثابت، مشخص شده است که بیشترین رسوب در دمای سطح حدود 35°C اتفاق می‌افتد که به علت شرایط زندگی مناسب موجودات بیولوژیکی در این دما، می‌باشد.

اثر تنش برشی دیواره کمابیش به سرعت سیال مربوط است. سرعت سیال بالاتر معمولاً سبب تنش برشی بزرگتر خواهد شد که در این صورت مقاومت رسوب کاهش می‌یابد.

۶-۱-۳-۴- رسوب شیمیایی^۳

رسوب‌های به وجود آمده توسط واکنش‌های شیمیایی در سطح انتقال حرارت که در آن خود ماده در سطح، واکنش دهنده نمی‌باشد، با عنوان رسوب حاصل از واکنش شیمیایی نامیده می‌شوند. پلیمریزاسیون^۴، شکسته شدن و تبدیل به زغال شدن (کک سازی) هیدروکربن‌ها، از جمله مثال‌های اصلی رسوب حاصل از واکنش شیمیایی هستند. در صنایع غذایی، صنایع شیمیایی و پالایشگاه‌های نفت که مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای به وفور استفاده می‌شوند، می‌توان رسوب شیمیایی را یافت. یک پارامتر بحرانی، دمای سطح است که آهنگ و نرخ واکنش را تعیین می‌کند. با توجه به مطالعاتی که توسط Shibuya [۱۷] و همکارانش انجام شده است، در مواردی که از بنزین استفاده می‌شود، پس از یک مدت طولانی کار کرد مقاومت رسوب در مبدل‌های

1 Novak

2 Oresund

3 Chemical fouling

4 Polymerization

حرارتی صفحه‌ای نسبت به مبدل‌های پوسته و لوله بسیار کمتر می‌شود. تلاش‌هایی برای ایجاد مدل‌های تئوری برای پیشبینی رسوب شیمیایی در صنایع غذایی صورت گرفته است، مثلاً توسط Fryer و Paterson [۱۸] [De Jong ۱۹]، اما به کار بردن آنها در صنایع واقعی به علت پیچیده بودن فرآیند صنایع غذایی مشکل می‌باشد. در نتیجه، راه حلی که فعلاً برای رسوب شیمیایی در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای وجود دارد، تشخیص و مشاهده رسوب و تعیین دوره‌های مناسب برای تمیزکاری است [۲۰].

۶-۱-۳-۵- رسوب خوردگی^۱

سطوح انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی هنگامی که در تماس با یک سیال خورنده باشند، می‌توانند طی یک فرآیند الکتروشیمیایی به آن سیال واکنش نشان دهند و تولید محصولات خوردگی کنند. قسمتی از محصولات خوردگی برش یافته در جریان سیال معلق می‌شوند و در نهایت در پایین دست ته‌نشین خواهند شد. قسمتی دیگر شاید به سطح چسبیده و انتقال حرارت را به دلیل هدایت حرارتی کم، کاهش دهند و محل‌های (تجمع) هسته‌زایی^۲ برای رسوبات ایجاد کنند تا براساس سایر مکانیزم‌ها مانند رسوب‌گیری بلوری و ذره‌ای رسوب کند.

گفتنی است که هیچ‌گونه مطالعات منظمی در رابطه با رسوب خوردگی در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای صورت نگرفته است زیرا جدا کردن اثرات رسوب خوردگی از سایر مکانیزم‌های رسوب مشکل می‌باشد. اما باور همگانی آن است که از روش‌های کاهش آهنگ خوردگی می‌توان برای کاهش این نوع رسوب نیز استفاده کرد. روش‌های ممکن برای کاهش رسوب در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای در ادامه فصل بررسی خواهند شد.

۶-۱-۳-۶- رسوب انجمادی^۳

هنگامی که دمای سطح کمتر از دمای یخ‌زدگی یا انجماد یک یا چند جزو موجود در

1 Corrosion fouling

2 Nucleation fouling

3 Solidification fouling

سیال می‌باشد، این اجزا روی سطح منجمد می‌شوند و رسوب را به وجود می‌آورند. برای نمونه می‌توان به رسوب پارافین^۱ نفت خام در خطوط لوله و مبدل‌های حرارتی اشاره کرد. به دلیل این که رسوب انجمادی فقط در کاربردهای خاصی از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای روی می‌دهد، تحقیق انجام شده روی این نوع رسوب واقعاً محدود می‌باشد. بدیهی است که دمای سطح در این حالت خیلی مهم بوده و بنابراین کنترل رسوب انجمادی به کنترل دمای سطح صفحه بستگی دارد.

گفتنی است که بیشتر حالات رسوب شامل چند مکانیزم رسوب‌گیری مختلف می‌باشد؛ همچنین ممکن است برخی از فرآیندهای رسوب‌گیری یکدیگر را کامل کنند. برای نمونه رسوب خوردگی محل‌های هسته‌زایی (تجمع) برای رسوب کریستالی و رسوب ذره‌ای به وجود می‌آورد. به دیگر سخن، خوردگی معمولاً با ظاهر شدن انواع رسوب مانند رسوب بلوری یا بیوفیلم‌ها^۲ رشد می‌کنند و در پی آن رسوب خوردگی نیز گسترش می‌یابد، از این رو در عمل مکانیزم‌های مختلف رسوب‌گیری را باید به صورت همزمان بررسی کرد.

۶-۱-۴- کاهش رسوب

برای حفظ یا باز یابی راندمان انتقال حرارت، از روش‌های مختلف جهت کاهش رسوب استفاده می‌کنند. برخی از این شیوه‌ها برای جلوگیری یا کند کردن روند تشکیل رسوب است. انواع دیگر روش‌ها، تمیز کردن مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای رسوب گرفته می‌باشد. این روش‌های کاهش را می‌توان به دو گروه روش‌های تمیزکاری در خط^۳ و تمیزکاری خارج از خط^۴ تقسیم کرد. در تمیزکاری خارج از خط باید فرآیند تولید را متوقف کرد، درحالی که تمیزکاری داخل خط را می‌توان در طول کار سیستم انجام داد و بنابراین تولید ادامه پیدا خواهد کرد. توضیح کامل روش‌های متعدد تمیزکاری را در منابعی مانند Bott [۴] و Kuppam [۲۱] می‌توان یافت و در این فصل تنها به بررسی

1 Wax

2 Bio-films

3 On-line cleaning

4 Off-line cleaning



روش‌های تمیزکاری برای مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای می‌پردازیم. برای پاکسازی آسان مبدل حرارتی از رسوبات، توجه به علایم رسوب‌گیری قبل از مسدود شدن کامل مبدل، از اهمیت خاصی برخوردار است. یکی از راه‌های تشخیص این موضوع اندازه‌گیری دمای ورودی و خروجی مبدل حرارتی است. این مقادیر نشانگر بروز یا عدم بروز رسوبات در مبدل هستند. همان‌طور که می‌دانیم، به دلیل تشکیل جدار عایق توسط رسوب روی سطح حرارتی مبدل، راندمان حرارتی مبدل کاهش می‌یابد و تفاوت دمای دو سمت مبدل از مقادیر تعیین شده کمتر می‌شود. روش دیگر تشخیص رسوبات، اندازه‌گیری افت فشار روی مبدل حرارتی است. از آنجایی که رسوب باعث تنگ شدن مسیره‌های عبور سیال می‌شود، از این رو سرعت سیال را افزایش می‌دهد و افت فشار روی مبدل افزایش خواهد یافت. باید توجه داشت که به هنگام اندازه‌گیری افت فشار، جریان سیال باید به اندازه تعیین شده باشد، زیرا تغییرات در جریان سیال روی تفاوت دما و همچنین افت فشار تأثیر خواهد گذاشت.

۶-۱-۴-۱- تمیزکاری خارج از خط

تمیزکاری خارج خط را می‌توان به دو شیوه تمیزکاری خارج از محل^۱ و تمیزکاری در محل^۲ انجام داد.

تمیزکاری خارج از محل: در روش تمیزکاری خارج از محل، صفحات مبدل حرارتی صفحه‌ای جدا و خارج از مبدل با شیوه مکانیکی یا شیمیایی تمیز می‌شوند. این روش باید بتوان مبدل حرارتی را دمونتاز کرد و از این رو آن را فقط برای مبدل‌های حرارتی صفحه و قاب می‌توان به کار گرفت. در تمیزکاری مکانیکی، از برس‌های غیرفلزی یا شست و شو با فشار بالا استفاده می‌شود. برای تمیزکاری شیمیایی می‌توان از مواد متنوع با توجه به ماهیت و درجه رسوب‌گیری استفاده کرد. از جمله مواد متداولی که جهت تمیزکاری اجرام و رسوبات به کار می‌روند، می‌توان به آب داغ، اسید نیتریک، اسید سولفوریک، اسید سولفامیک (NH_2SO_3H)، اسید سیتریک

1 Cleaning-off-place
2 Cleaning-in-place (CIP)

$C_3H_4(OH)(COOH)_3$ ، اسید فسفوریک^۱ (H_3PO_4)، پلی فسفات سدیم^۲ اشاره کرد. برای تمیز کردن لجن و مواد بیولوژیک، عوامل پاک کننده قلیایی مانند هیدروکسید سدیم و کربنات سدیم معمولاً مناسب و مؤثر هستند؛ اگر نیاز به سرویس کامل تری باشد، می توان صفحات را برای ترمیم کلی نزد سازنده برد، در این حالت، صفحات مبدل به کارایی استاندارد خواهند رسید.

تمیز کاری در محل: تمیز کاری در محل نیاز به دمنواژ صفحات نیاز ندارد، بنابراین می توان آن را برای همه انواع مبدل های حرارتی صفحه ای به کار برد. در این روش، یک حلال شیمیایی^۳ خارجی برای حل کردن و زدودن رسوب داخل مبدل حرارتی گرداننده می شود. این شیوه، روشی اقتصادی برای حفظ کارایی حداکثر مبدل و افزایش عمر آن است. انتخاب حلال شیمیایی به ماهیت رسوب و مواد صفحه بستگی دارد. تحت هیچ شرایطی نباید از اسید هیدروکلریک^۴ (HCl) برای تمیز کردن صفحات فولادی استنلس استیل (ضد زنگ) استفاده کرد؛ همچنین صفحات از جنس تیتانیوم را نباید با اسید هیدروفلوریک تمیز کرد. اگر از این اسیدها برای این نوع صفحات استفاده شود، صفحات خورده می شود و باید آنها را تعویض کرد. مواد تمیز کننده ای که شامل آمونیاک و اسیدهای اکسید کننده^۵ مانند اسید نیتریک (HNO_3) هستند، نباید برای تمیز کردن صفحات از جنس نیکل، مونل^۶، هستلوی^۷ B^۷ و مبدل های حرارتی لحیم شده مسی استفاده کرد، زیرا این مواد سبب خوردگی در صفحات و اتصالات لحیم و در نهایت به خرابی مبدل منجر می شوند. انتخاب محلول رسوب زدایی همان گونه که بیان شد، به نوع مشکل بستگی دارد. اما در هر حال یک اسید ضعیف محلول خوبی برای شروع خواهد بود. این محلول را می توان با ۵ درصد اسید فسفریک و یا در صورت رسوب زدایی متناوب مبدل حرارتی از ۵ درصد اسید اکسالیک تهیه کرد. محلول رسوب زدایی

-
- 1 Phosphoric-acid
 - 2 Sodium polyphosphate
 - 3 Chemical solution
 - 4 Hydrochloric acid
 - 5 Oxidizing acid
 - 6 monel
 - 7 Hasteloy

باید توسط یک پمپ در مبدل گردش کند. برای بهینه سازی عملیات رسوب‌زدایی نرخ جریان محلول رسوب‌زدایی در محل (در جا) باید دست کم یک و نیم برابر نرخ جریان عادی مبدل باشد. بهتر است جهت گردش سیال رسوب‌زدایی برعکس جهت عادی جریان باشد، زیرا به این ترتیب احتمال حل شدن رسوبات بیشتر خواهد بود.

پس از عملیات رسوب‌زدایی، مبدل حرارتی باید به دقت با آب خالص شسته شود. استفاده از یک محلول ۱ تا ۲ درصد هیدروکسید سدیم (NaOH) یا بی‌کربنات سدیم (NaHCO_3) قبل از آب‌کشی، موجب اطمینان از بی‌اثر شدن اسیدهای موجود خواهد شد. یک روش برای تخمین زمان مناسب آب‌کشی، اندازه‌گیری PH سیال خروجی از مبدل است. PH خروجی باید بین ۶ تا ۹ باشد.

مخزن محلول رسوب‌زدایی یک سیستم رسوب‌زدایی در محل باید از مواد مقاوم در برابر اسید و قلیا باشد و لوله‌های منعطف نیز از جنس PVC ساخته می‌شود. در نظر گرفتن سیستم جریان معکوس در پمپ‌های محلول رسوب‌زدایی یک امتیاز به شمار می‌رود. به وسیله‌ی سیستم جریان معکوس سیال رسوب‌زدایی می‌تواند از هر دو سمت رسوبات را پاک کند؛ همچنین در نظر گرفتن وسیله گرم‌کننده برای پمپ یک مزیت است. گرم کردن محلول رسوب‌زدایی معمولاً باعث افزایش اثر پاک‌کنندگی می‌شود.

۶-۱-۴-۲- تمیزکاری در خط

روش‌های تمیزکاری در خط چند نوع هستند که از جمله آنها می‌توان به صافی^۱ خودکار، شست و شو در خلاف جهت جریان و تزریق مواد شیمیایی اشاره کرد. اصول این روش در ادامه توضیح داده می‌شوند.

صافی خودکار: از صافی‌ها در سیستم‌های باز (مانند برج خنک‌کن یا سیستم‌های سرمایش مرکزی) که در آنها مقدار قابل توجهی ذرات معلق در آب سردکننده وجود دارد، استفاده می‌شود، بدین وسیله می‌توان از انسداد مبدل‌های حرارتی و سایر تجهیزات در هنگام استفاده از آب کم کیفیت جلوگیری کرد. صافی‌های خودکاری با محرک‌های کنترل نیوماتیکی یا الکتریکی وجود دارند که قادرند به طور خودکار شست

و شو در خلاف جهت را انجام داده و سبب صافی را در بازه‌های از پیش تنظیم شده تمیز کند. گفتنی است که نصب یک صافی خودکار فقط برای ذرات با قطرهای به نسبت بزرگ مناسب می‌باشد. استفاده از یک صافی معمولی نیز در ورودی مبدل حرارتی توصیه می‌شود. صافی از ورود ذرات بزرگتر از یک میلی‌متر به مبدل حرارتی جلوگیری می‌کند، از این رو توری پیشنهادی باید قابلیت مسدود کردن ذرات بزرگتر از یک میلی‌متر را داشته باشد که متناسب با قطر سیم‌ها حدود 20-16 شبکه خواهد داشت. به علت اغتشاش موجود در سیال، ذرات کوچکتر معمولاً از داخل مبدل عبور خواهند کرد. اگر از صافی‌های سایز پایین‌تر استفاده کنیم، جلوی ورود ذرات بیشتری را خواهیم گرفت اما در عوض افت فشار ناخواسته بیشتری را تحمل خواهیم کرد و سیستم نیز نیاز به پاکسازی دوره‌ای بیشتری خواهد داشت.

شست و شو در خلاف جهت^۱: در این روش، جریان داخل مبدل حرارتی برای یک مدت زمان کوتاه برای خارج کردن ذرات و مواد زائد متراکم شده در کانال ورودی مبدل حرارتی، معکوس می‌شود. این کار را می‌توان با نصب یک نازل و شیر معکوس‌کننده جریان در لوله‌ها انجام داد و بدین طریق جریان معکوس شده کثیفی‌ها را به خارج مبدل حمل می‌کند. اگر شست و شو در خلاف جهت به طور منظم انجام شود، در حذف ذرات یا مواد زائد از سطح پورت ورودی بسیار مؤثر خواهد بود، اما این روش فقط هنگامی مفید است که ذرات به سطح انتقال حرارت مبدل حرارتی صفحه‌ای نرسیده باشند. معمولاً این سیستم نسبت به صافی خودکار ارزانتر است.

تزریق مواد شیمیایی: روش تزریق مواد شیمیایی، استفاده از مواد افزودنی شیمیایی برای به حداقل رساندن رسوب می‌باشد. انتخاب مواد افزودنی به ماهیت رسوب بستگی دارد. برای نمونه، مواد معدنی موجود در آب را می‌توان به کمک سختی‌گیری آب^۲ که برای کاهش رسوب بلوری مفید است، حذف کرد. نمونه دیگر، به کارگیری تزریق پیوسته کلر یا انواع دیگر بیوسیدها^۳ برای کم کردن رسوب بیولوژیکی می‌باشد. گفتنی است که این روش معمولاً بستگی به نوع مبدل حرارتی ندارد و تنها باید

1 backflushing

2 Softening

3 biocides

افزودنی‌های شیمیایی مناسب را انتخاب کرد، بنابراین می‌توان از اطلاعات مربوط به مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله در این زمینه فقط با توجه به جنس استفاده کرد. همان‌گونه که در بالا اشاره شد، تزریق مواد شیمیایی به سیال داخل مبدل معمولاً یکی از عملی‌ترین و کارآمدترین روش‌های مبارزه با رسوبات بیولوژیکی می‌باشد. برای نمونه این مواد همانند کلر و اوزون در برج‌های خنک کننده و یا استخرهای شنا مورد استفاده قرار می‌گیرند که موجب کشته شدن یا جلوگیری از رشد میکروارگانیسم‌های موجود در آب خواهند شد، البته باید توجه داشت که استفاده از این مواد باعث پاک‌سازی موادی که به سطح چسبیده‌اند، نخواهند شد. این موضوع اهمیت تمیز بودن سیستم از ابتدا را خاطر نشان می‌سازد.

در این نوع رسوب‌زدایی که معمولاً مواد شیمیایی برای حل کردن یا سست کردن رسوبات در تجهیزات و لوله‌های فرآیند به صورت یکنواخت تزریق می‌شود، از سایر روش‌ها هزینه کلی کمتری دارد. اسیدهای معدنی همچون اسید هیدروکلریک، اسید سولفامیک، اسید نیتریک و اسید فسفریک و اسیدهای آلی مانند اسیدفرمیک (HCOOH) و اسیداستیک (CH_3COOH) و اسیدسیتریک برای حل کردن رسوبات قابلیت خوبی دارند، اما بعضی از اسیدهای معدنی موجب خوردگی در فولاد ضد زنگ و مس می‌شوند، از این رو استفاده از اسیدهای آلی که از اسیدهای معدنی به مراتب ضعیف تر هستند، رواج بیشتری در رسوب‌زدایی مبدل‌ها دارند. برای نمونه برخی اوقات اسید فسفریک با غلظت 2 درصد و دمای 50°C در حدود 4 تا 6 ساعت برای بی‌اثر کردن در لوله‌های فولادی و پاکسازی رسوبات اکسید آهن و رسوب‌زدایی از فولاد ضدزنگ استفاده می‌شود.

پیشرفت‌هایی در روش‌های تمیزکاری داخل خط صورت گرفته است که از جمله می‌توان به فناوری ضد رسوب الکتریکی^۱ و اصلاح سطح اشاره کرد. در فناوری ضد رسوب الکتریکی، یک میدان الکتریکی نوسانی با استفاده از میدان مغناطیسی متغیر با زمان در سلونوئید به وجود می‌آید که دور لوله تغذیه پیچیده می‌شود. با توجه به تحقیقات تجربی که توسط Cho و همکارانش [۲۲] صورت گرفته است، این روش برای

کاهش رسوب در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای مفید است، اما مؤثر بودن این شیوه به بررسی و تحقیقات بیشتری نیاز دارد و مباحث علمی زیادی باید حل شوند تا بتوان از آنها در صنایع استفاده کرد. در روش اصلاح سطح^۱، مشخص شده است که سطح صفحه‌ای که تحت پیوند اشعه یونی^۲، مگنترون^۳، آبکاری و غیره قرار می‌گیرد، به شکل چشمگیری رسوب را کاهش می‌دهد [۲۳]. این تأثیرات قبلاً در سطح آزمایشگاهی مشخص شده‌اند و کاربردهای عملی آنها را می‌توان پیش‌بینی کرد، اگرچه نیازمند تحقیقات بیشتری می‌باشد.

به طور کلی، هر دو روش‌های کاهش رسوب در خط و خارج خط در عمل برای مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای استفاده می‌شوند. انتخاب روش به درجه رسوب، ماهیت رسوب، ماده صفحات، مقررات زیست محیطی، ملاحظات هزینه، نوع مبدل و غیره بستگی دارد. برای یک کاربرد خاص در عمل، بهتر است که با تولیدکننده مبدل حرارتی برای شناخت روش‌های مناسب کاهش رسوب مشورت کرد.

۶-۱-۵- طراحی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای تحت تأثیر رسوب

به دلیل اینکه رسوب‌گیری یک فرآیند اجتناب‌ناپذیر در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای است، باید در طول طراحی مورد نظر قرار گیرد. راه‌حل معمول، بزرگتر در نظر گرفتن مبدل با لحاظ کردن ضریب رسوب در آن است، اما در انتخاب مقادیر مناسب برای مقاومت رسوب باید دقت کرد. در نظر گرفتن ضرایب رسوب معمولاً، به افزایش تعداد صفحات منجر می‌شود و از این رو سطح مقطع عرضی برای سیالات نیز افزایش خواهد یافت. برای دبی جرمی مساوی، سرعت سیال و تنش برشی در کانال‌های جریان به اندازه قابل توجهی کاهش می‌یابند. در این صورت آهنگ رسوب‌گیری، همان‌طور که در مکانیزم اصلی تشکیل رسوب توضیح داده شد، افزایش می‌یابد. در پی آن مبدل‌های حرارتی که با مقاومت رسوب بالا طراحی شده‌اند، بسیار سریعتر نسبت به مبدل‌هایی که با مقاومت رسوب کم طراحی می‌شوند، رسوب می‌گیرند. افزایش در آهنگ رسوب‌گیری

1 Surface modification

2 ion beam implantation

3 magnetron



ممکن است به حدی زیاد باشد که مبدل‌های طراحی شده با ضرایب رسوب بزرگ، باید به دفعات بیشتری نسبت به مبدل‌هایی که با ضرایب رسوب پایین طراحی می‌شوند، تمیز کرد [۲۴]. بنابراین، انتخاب مقاومت رسوب در کاربردهای مبدل حرارتی صفحه‌ای بسیار اهمیت دارد. همان‌طور که قبلاً بیان شد، مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای معمولاً نسبت به مبدل حرارتی پوسته و لوله کمتر دچار رسوب‌گیری می‌شوند و ضرایب رسوب آنها معمولاً 20 تا 25 درصد ضرایب استفاده شده برای مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله است. براساس تحقیقات کوپر^۱ و همکارانش [۱۰] مقادیر رسوب مورد استفاده در طراحی نباید از یک پنجم مقادیر مورد استفاده در مبدل‌های لوله‌ای بیشتر باشد، جدول ۶-۱ توسط Marriot [۲۵] برای انتخاب ضرایب رسوب در مبدل‌های حرارتی صفحه و قاب پیشنهاد شده است.

علاوه بر انتخاب مقادیر مناسب برای مقاومت رسوب، آرایش^۲ سطوح انتقال حرارت افزوده شده به مبدل نیز اهمیت دارد. این آرایش، سرعت جریان و دمای سطح و در نتیجه آهنگ رسوب‌گیری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. زتلر^۳ و همکارانش احتمالات مختلف گسترش سطح انتقال حرارت را برای رسوب بررسی کردند و اثرات تقریبی آن در جدول ۶-۲ آمده است. با توجه به تحقیقات آنها دست کم رسوب هنگامی اتفاق می‌افتد که سطح صفحات افزوده شده توسط آرایش جریان دوگذر صفحات اصلی به گونه ای استفاده شود که ابتدا از صفحات بلندتر با عرض یکسان و سپس از صفحات بلندتر با نسبت عرض به ارتفاع استاندارد، استفاده شود. حداقل کارایی هنگامی به وجود می‌آید که سطح بزرگ شده بسادگی به کمک اضافه کردن صفحات موازی ایجاد شود.

1 Cooper

2 Sputtering

3 Zettler

جدول ۶-۱: مقاومت جرم گیری برای مبدل‌های صفحه و قاب [24]

سیال	مقاومت جرم گیری (m^2k/w)
آب	
فاقد مواد معدنی ^۱ یا تقطیر شده ^۲	0.000009
شهری (نرم)	0.000017
گرمایش با آب شهری (سخت)	0.000043
برج خنک کن (آب تصفیه شده)	0.000034
آب دریا (ساحلی) یا در دهانه رودخانه	0.000043
رودخانه، نهر، چاه و غیره	0.000043
دریا (اقیانوس)	0.000026
آب مورد استفاده برای خنک کردن در موتور	0.000052
روغن‌های روانکاری	0.000017-0.000043
روغن‌های نباتی (گیاهی)	0.000017-0.000052
حلال‌های آلی	0.000009-0.000026
بخار	0.000009
سیالات فرآیند، عمومی	0.000009-0.000052

جدول ۶-۲: اثر آرایش صفحه روی جرم گیری [26]

اثر آرایش صفحه روی			
رسوب گیری ^۱	دمای دیواره	سرعت جریان	طراحی بیش از حد استاندارد ^۲
↑	↓ (کاهش)	↑ (افزایش)	صفحات بلندتر
↑	↑	↑	صفحات عریض‌تر
←	←	←	نسبت منطقی ^۳ یکسان
↑	↑	↓	صفحات اضافی
↓	↓	↑	صفحات اضافی در گذر دوم

نکته: a - به نوع رسوب نیز بستگی دارد.

-
- 1 Demineralized
 - 2 Distilled
 - 3 Over Design
 - 4 Aspect Ratio

۶-۲- خوردگی

خوردگی بخشی از سیکل ایجاد، رشد و از بین رفتن اجسام در طبیعت است. مخازن، ناوهای رزمی و خودروهای امروزی، پسماندهای آهنی فردا هستند. اگر خوردگی در حالت کلی مطلوب نیست، باید به خاطر داشت که راه حل طبیعی از بین رفتن زباله‌هاست. بدون خوردگی، خانه‌های ما به مکانی فرسوده و پر از وسایل شکسته و قدیمی تبدیل خواهند شد که راحت شدن از دست آنها ممکن نیست، از این دیدگاه، خوردگی یک فرآیند خوب و در واقع لازم است [۲۷]. اما در نهایت خوردگی سبب خرابی تجهیزات و در نتیجه خرابی سیستم‌های مهندسی خواهد شد. با توجه به تحقیقات Fontana و Greene [۲۸]، هزینه سالانه خوردگی در ایالات متحده در ۱۹۷۷ بیشتر از ۳۰ میلیارد دلار بوده است. گفتنی است که این مطلب برای هزینه کلی خوردگی می‌باشد (فقط محدود به مبدل‌های حرارتی نیست)، اما شامل هزینه به وجود آمده حاصل از توقف تولید، مدت از کارافتادگی کارخانه و غیره نمی‌باشد؛ از این رو شناخت اصول خوردگی و کنترل آن به همان اندازه که در زندگی عادی اهمیت دارد، در صنعت نیز مهم است.

در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، خوردگی موضوع مهمی است که در طراحی باید به آن توجه کرد. خوردگی در مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله، به علت ضخامت زیاد دیواره لوله تا حدی مجاز است، اما در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، میزان مجاز خوردگی^۱ به علت ضخامت کم صفحات، بسیار کوچک است، بنابراین خوردگی قابل قبول نیست، اما دلایل بسیاری برای ایجاد برخی از انواع خوردگی در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای وجود دارد [۲۹ و ۳۰]. اطراف صفحات باید توسط واشر، جوش یا لحیم کاملاً آب‌بندی شوند تا جریان‌های فرآیند در آنها محبوس شوند، بنابراین خوردگی درزی^۲ می‌تواند به سادگی در زیر واشرها یا در مجاورت جوش‌ها اتفاق بیفتد. خوردگی موضعی به علت فرورنشست^۳ ذرات یونی مضر از روی جنس پلیمر واشر شروع یا تشدید می‌شود. برای نمونه یون‌های کلرید سبب خوردگی آلیاژهای استنلس استیل و نیکل شده و یون‌های فلوراید باعث

1 corrosion Margin

2 crevice Corrosion

3 Leaching

خوردگی تیتانیوم می‌شوند. خرابی بر اثر خوردگی تنشی^۱ نیز در مبدل‌های صفحه‌ای بویژه در مبدل‌هایی که شیارهای روی صفحات با سردکاری^۲ (تغییر شکل صفحات به کمک پرس‌های هیدرولیکی در دمای محیط) ساخته شده است، دیده می‌شود، بنابراین خوردگی در طراحی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای موضوع مهمی بوده و نیاز به توجه خاصی دارد.

۶-۲-۱- مکانیزم اصلی خوردگی

خوردگی، یک فرآیند الکتروشیمیایی می‌باشد که در آن یک فلز به حالت طبیعی خود مثلاً اکسید آهن^۳ یا زنگ^۴ بر می‌گردد. خوردگی طبق قوانین طبیعت صورت می‌گیرد و مسأله فقط سرعت انجام آن است. در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای برای نمونه می‌توان به حمله کلرید به استنلس استیل، حمله فلوراید به تیتانیوم و حمله آمونیاک به مس در یک مبدل حرارتی صفحه‌ای لحیم شده مسی اشاره کرد. یک سلول یا پیل خوردگی شامل یک آنود، یک کاتود و یک الکترولیت می‌باشد (شکل ۶-۹ را ببینید). یون‌های فلز داخل الکترولیت (محلول آبی) در آنود تجزیه می‌شود و ذرات باردار الکتریکی (الکترون‌ها) را به جای می‌گذارند. این الکترون‌ها به نقاط دیگر (کاتدها) فلز جریان می‌یابند که در آنها واکنش‌های الکترونی اتفاق می‌افتند. نتیجه این فعالیت، از دست دادن فلز در آنود و بیشتر به شکل تشکیل رسوب است. قابلیت هدایت الکترولیت، نقش اصلی را در سرعت فرآیند خوردگی دارا می‌باشند. یک محلول با قابلیت هدایت کم، یک واکنش خوردگی کند ایجاد می‌کند، در حالی که یک محلول با قابلیت هدایت بالا، باعث خوردگی سریع می‌شود. در صورت نبود الکترولیت، خوردگی اتفاق نمی‌افتد یا مقدار آن کم است. برای نمونه می‌توان به آهن اشاره کرد که در معرض هوای خشک بیابان قرار گرفته و شفاف و درخشانده باقی مانده است، زیرا آب لازم برای فرآیند زنگ زدن، وجود ندارد، اما از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای بیشتر در کاربردهای شامل مایعات

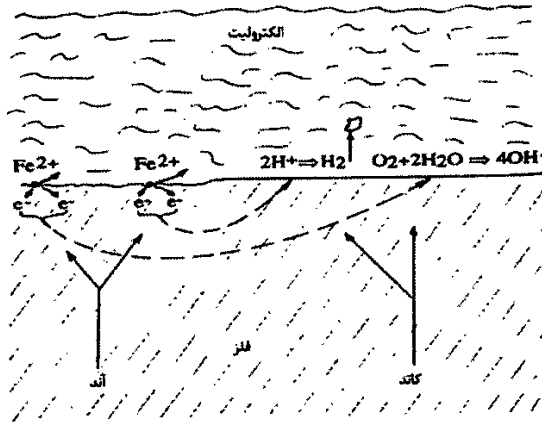
1 Stressed corrosion

2 cold-formed

3 Iron oxid

4 Rust

استفاده می‌شود و از این رو همیشه محیط اصلی برای خوردگی در آنها فراهم است.



شکل ۶-۹: سلول خوردگی الکتروشیمیایی

مکانیزم خوردگی را می‌توان با استفاده از آهن غوطه‌ور در آب شرح داد. واکنش‌های شیمیایی که در این فرآیند اتفاق می‌افتند، عبارتند از:

در آنود، فلز طبیعی تجزیه شده به یون‌های فلزی باردار و الکترون‌ها تبدیل می‌شوند:



در کاتد، الکترون‌ها با احیای اکسیژن تجزیه و به یون‌های هیدروکسیل^۱ از طریق واکنش زیر تبدیل می‌شوند:



یا یون‌های هیدروژن در صورت نبود اکسیژن به گاز هیدروژن تبدیل می‌شوند:

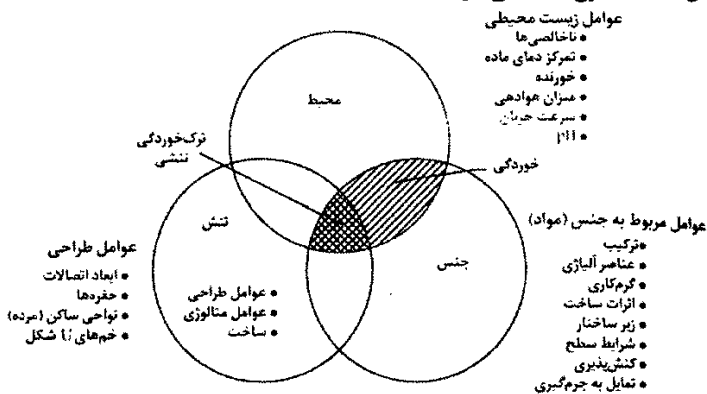


سرانجام واکنش‌های فوق به شکل زیر ادامه می‌یابند:



اما در حالت عملی، واکنش‌های الکتروشیمیایی بسیار پیچیده‌تر از واکنش‌های فوق هستند. پارامترهای مختلفی روی فرآیند خوردگی تأثیر می‌گذارند که از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به عوامل زیر اشاره کرد:

عوامل محیطی مانند غلظت مواد خوردنده (Ca^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , CL^- , O_2 , H^+)، مقادیر PH، سرعت، خلوص، تشکیل یک لایه محافظ، رسوب‌ها و دمای ماده. عوامل مرتبط با جنس ماده مانند ترکیب آلیاژ، ساختار آلیاژ (تک فاز، چند فاز، وجود ذرات غیرمحلول)، کار مکانیکی انجام شده روی آلیاژ (میزان سردکاری، وجود نقص) و تمایل به رسوب‌گیری و غیره. عوامل کاری مانند وجود فلزهای غیرمشابه، مشخصات طراحی تجهیزات (خم‌های تند، مناطق سکون و غیره)، تنش‌های موجود (فشاری یا کششی، استاتیکی یا دینامیکی، تنش‌های پسماند)، سابقه حرارتی و مکانیکی و سایر موارد. این عوامل مؤثر روی تشکیل خوردگی به طور کلی در شکل (۶-۱۰) نشان داده شده‌اند. بدیهی است که خوردگی نتیجه ترکیب تأثیر محیط و ماده است. همان‌طور که در ادامه توضیح داده خواهد شد، اشکال مختلفی از خوردگی بسته به مکانیزم‌های مربوط وجود دارند. از این رو، عوامل جزئی مؤثر برای هر نوع خوردگی متفاوت است که در بخش بعدی شرح داده می‌شوند.



شکل ۶-۱۰: عوامل مؤثر در خوردگی [21]

۶-۲-۲- انواع مختلف خوردگی

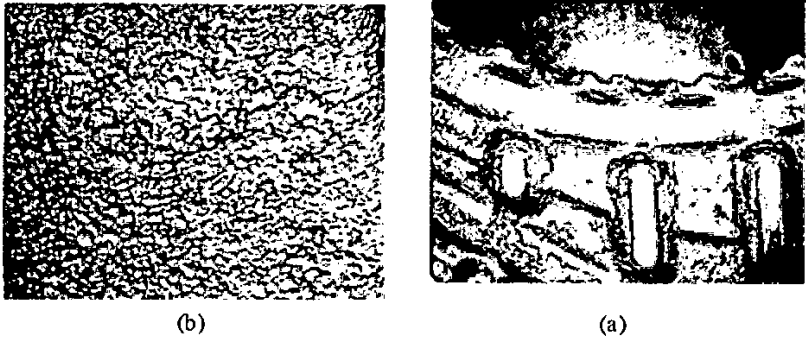
با توجه به نظر بیشتر دانشمندان و مهندسان، خوردگی را می‌توان به هشت دسته

بسته به نوع مکانیزم تقسیم کرد [۲۸]: خوردگی عمومی^۱، (خوردگی یکنواخت)، خوردگی حفره‌ای^۲، خوردگی درزی^۳، خوردگی تنش^۴، خوردگی سایشی^۵، خوردگی داخل دان‌های^۶، خوردگی گالوانیک^۷ و فرورنشست انتخابی^۸ خوردگی عمومی به صورت یکنواخت اتفاق می‌افتد و در سطح گسترده‌ای توزیع می‌شود. خوردگی‌های نوع دیگر محلی و موضعی بوده و توزیع یکنواختی ندارند. در ادامه، توضیحات کاملی درباره با هر کدام از انواع خوردگی ارائه می‌شود و بیشتر روی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای به جای مبدل‌های حرارتی دیگر تمرکز می‌یابد. بخش‌هایی از توضیحات ارائه شده در این قسمت براساس اطلاعات Walker [۲۷]، Fontuna و Greene [۲۸]، Novak [۳۱] می‌باشد و اطلاعات کامل‌تر را می‌توان در این منابع یافت. شکل‌های انواع مختلف خوردگی توسط آلفالووال ارائه شده که از این شرکت قدردانی می‌شود.

۶-۲-۱- خوردگی عمومی

خوردگی عمومی، متداول‌ترین شکل حمله خورنده به فلزات است. این نوع خوردگی با واکنش شیمیایی یا الکتروشیمیایی توصیف می‌شود که به طور یکنواخت در کل سطح در معرض قرار گرفته یا بخش قابل توجهی از آن انجام می‌گیرد. خوردگی کلی بدون حمله موضعی محسوس صورت می‌گیرد. این نوع خوردگی حاصل از تماس طولانی با یک محیط اسیدی قوی و نبود امکان جلوگیری از انفعال، می‌باشد. فلز به صورت فزاینده لاغرتر می‌شود و در نهایت به علت بارهای تنش اعمال شده به آن از بین خواهد رفت. خوردگی عمومی در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای در شکل ۶-۱۱a (شکل کلی) و در شکل ۶-۱۱b (نمای جزئی‌تر) نشان داده شده است.

-
- 1 General corrosion
 - 2 Pitting corrosion
 - 3 Crevice corrosion
 - 4 Stress corrosion
 - 5 Erosion corrosion
 - 6 Intergranular corrosion
 - 7 Galvanic corrosion
 - 8 Selective leaching



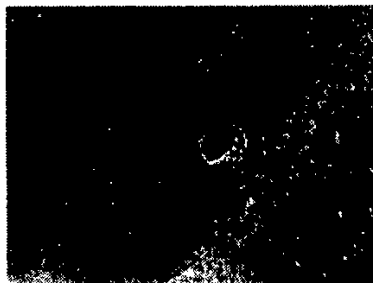
شکل ۱۱-۶: خوردگی عمومی صفحات [۳۱]: (a) نمای کلی و (b) نمای جزئی

در مقایسه با سایر اشکال خوردگی، کنترل خوردگی عمومی آسان‌تر از انواع دیگر می‌باشد [۲۷]. آهنگ تجزیه را می‌توان به کمک آزمایش‌ها غوطه ور کردن نمونه‌ها در سیال، بسادگی به دست آورد، بنابراین عمر وسیله را می‌توان پیش‌بینی کرد و با اضافه کردن یک حد مجاز خوردگی به ضخامت دیواره فلز برای تحمل فشار یا سایر بارهای تنش اعمالی، عمر را به میزان دلخواه افزایش داد. در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، خوردگی عمومی را باید تا حد امکان به علت کوچک بودن حد مجاز خوردگی، پایین نگه داشت.

۶-۲-۲-۲- خوردگی حفره‌ای

خوردگی حفره‌ای پدیده‌ای است که در آن حمله موضعی شدید باعث تشکیل حفره‌هایی در سطح فلز شده که در نهایت دیواره را سوراخ می‌کند. خوردگی حفره‌ای معمولاً روی فلزات دارای یک لایه محافظ بسیار نازک که بر اثر فرآیند روکش کاری روی سطح فلز یا واکنش با محیط ایجاد شده، اتفاق می‌افتد [۲۱]. اندازه حفره‌ها متفاوت بوده و می‌توان آنها را براساس اهمیت‌شان تفکیک یا گروه‌بندی کرد. خوردگی حفره‌ای معمولاً در محیط کمی اسیدی-کمی بازی به وجود می‌آید که در آن متداول‌ترین عوامل تسریع‌کننده، هالیدها^۱ و اکسیدکننده‌ها^۱ هستند. در بیشتر مواقع، خوردگی

حفره‌ای حاصل از محتوای کلر بالا بوده و متناسب با غلظت کلر، دمای سیال و معکوس مقدار PH سیال می‌باشد. معمولاً برای شروع خوردگی حفره‌ای، یک دوره رشد^۲ لازم است، پس از آن سرعت خوردگی افزایش خواهد یافت و خوردگی حفره‌ای پخش می‌شود. خوردگی حفره‌ای در شکل ۶-۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۶-۱۲: خوردگی حفره‌ای صفحات

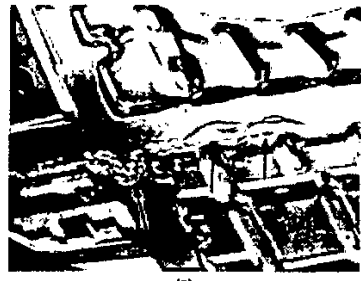
از جمله عوامل مؤثر در خوردگی حفره‌ای می‌توان به عوامل متالورژیکی و ساختاری، عوامل محیطی، پدیده قطبی شدن^۳، وجود محصولات خوردنده و غیره اشاره کرد، اما مکانیزم خوردگی حفره‌ای، بویژه شروع حفره در هر نقطه معین واضح و مشخص نمی‌باشد. اگرچه تحقیقات نشان می‌دهند که محل شروع حفره‌ها در سطوح فلزهای متعارف به طور کلی بستگی به ساختار معیوب فلز مانند جابه‌جایی^۴، مرزهای دانه‌ها^۵ یا در برداشتن ذرات غیرفلزی دارد.

۶-۲-۲-۳- خوردگی درزی

خوردگی درزی نیز مانند نوع حفره‌ای، خوردگی موضعی است که در محیط‌هایی متفاوت از محیط‌های سیال، اتفاق می‌افتد. مشخصه این نوع خوردگی، خوردگی موضعی شدید در درزها و سایر نواحی محافظت شده روی سطوح فلزی است که در تماس با

-
- 1 Oxidants
 - 2 Incubation period
 - 3 Polarization phenomena
 - 4 Dislocation
 - 5 Grain boundaries

سیالات خورنده را کد قرار دارند. در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای این حالت در مکان‌هایی اتفاق می‌افتد که در آن لایه‌ای از سیال ساکن و راکد مانند زیر واشرها وجود دارد؛ نقاط تماس صفحات با یکدیگر و زیر محل‌های رسوب گرفته است. این نوع خوردگی در شکل ۶-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۶-۱۳: خوردگی درزی صفحات [۳۱]: (a) نمای کلی و (b) نمای جزئی

مکانیزم خوردگی درزی، یک فرآیند پیچیده الکتروشیمیایی است. بسیاری بر این باورند که خوردگی درزی به علت تخلیه اکسیژن^۱ در استخر سیال راکد، که باعث خوردگی دیوارهای فلز مجاور درز می‌شود، اتفاق می‌افتد. آهنگ خوردگی با باریک شدن دهانه درز و بزرگ شدن سطح خارجی کاتد، افزایش می‌یابد.

فلزات و آلیاژهایی که به فیلم‌های اکسیدی یا لایه‌های سطحی غیرعامل برای مقاومت به خوردگی وابسته هستند، در معرض خوردگی درزی قرار دارند. این فیلم‌ها بیشتر توسط یون‌های کلرید یا هیدروژن حاصل از فرآیند الکتروشیمیایی در فیلم راکد تخریب می‌شوند. بویژه تماس بین یک سطح فلزی و غیرفلزی سبب خوردگی درزی قسمت فلزی خواهد شد. این دقیقاً همان پدیده‌ای است که معمولاً در محل اتصال صفحه و واشر در مبدل‌های صفحه و قاب روی می‌دهد.

مکانیزم پیشروی خوردگی درزی مشابه با مکانیزم پیشروی در خوردگی حفره‌ای می‌باشد، اما مکانیزم‌های شروع متفاوت هستند. خوردگی درزی در اثر اختلاف غلظت اکسیژن یا یون‌ها در الکترولیت شروع می‌شود، در حالی که خوردگی حفره‌ای فقط با

1 Depletion of oxygen

عوامل متالورژیکی و ساختاری آغاز می‌شود. بر حالت کلی، میزان خوردگی درزی که در درزها مانند زیررسوبات یا واشرها اتفاق می‌افتد به صورت قابل توجهی بزرگتر از خوردگی حفره ای است که روی سطح باز به وجود می‌آید.

۶-۲-۴- خوردگی تنش

خوردگی تنش به علت فعالیت همزمان محیط خورنده و تنش اتفاق می‌افتد. این نوع خوردگی معمولاً به دو دسته تقسیم می‌شود: ترک خوردگی تنش^۱ (SCC) که شامل اثرات تنش‌های استاتیکی و خوردگی می‌باشد، و خستگی خوردگی^۲ که حاوی تنش‌های متغیر و خوردگی است. ترک‌های حاصل از پدیده اول بیشتر بین دانه‌ای^۳ بوده و ترک‌های حاصل از پدیده دوم، در عرض دانه‌ها^۴ می‌باشد.

هنگامی که سطح تنش بالاتر از سطح حداقل آن قرارگیرد که به دما، ساختار آلیاژ و محیط بستگی دارد، SCC در ترکیبات خاصی از فلز- سیال، به وجود می‌آید. به زبان ساده، برای تشکیل SCC باید به صورت همزمان یک محیط مستعد، یک محیط خورنده و تنش کششی وجود داشته باشد. در بیشتر اوقات، این نوع خوردگی در محیط حاوی هالیدها، قلیاهای قوی، سولفید هیدروژن و آمونیاک اتفاق می‌افتد. گفتنی است که اتصالات جوش شده بیشتر در معرض SCC قرار می‌گیرند، زیرا از تنش کششی پسماند و تمرکز تنش برخوردار هستند و این موضوع در مورد مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای جوش شده، قابل توجه می‌باشد. SCC معمولاً از حفره‌های خوردگی کوچک آغاز می‌شود. سطح زیرین حفره مانند یک افزایش تنش رفتار می‌کند و بنابراین تمرکز تنش موضعی بسیار بالا بوده و باعث توسعه ترک خواهد شد. با نفوذ بیشتر ترک در فلز، سطح مقطع باقیمانده دیوار باید بار را تحمل کند، از این رو پس از پیشروی پیوسته ترک در فلز هنگامی که تنش به وجود آمده در فلز باقیمانده از استحکام نهایی^۵ آن بزرگتر شود، سرانجام فلز می‌شکند. در شکل ۶-۱۴، شروع ترک از حفره‌ها نشان داده شده است.

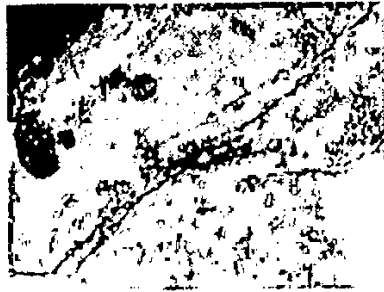
1 Stress Corrosion Cracking (SCC)

2 Corrosion Fatigue

3 Intergranular

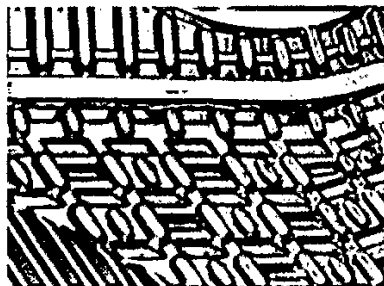
4 Transgranular

5 The Ultimate Strength



شکل ۶-۱۴: SCC در صفحات [31]

خستگی فرآیندی است که یک فلز، تحت اعمال بار نوسانی در سطوح تنشی که بسیار کمتر از نقطه تسلیم^۱ است، می‌شکند. گفتنی است، هنگامی که بار نوسانی در حضور یک محیط خورنده اعمال می‌شود، مشخصه‌های خستگی فلزات به شدت زیاد می‌شوند. هر گاه که یک فلز در معرض یک محیط خورنده و بار نوسانی قرار می‌گیرد، ترک خوردگی خستگی در سطح زیرین یک حفره خوردگی ایجاد می‌شود و با فعالیت مکانیکی و الکتروشیمیایی همزمان پیشرفت می‌کند. معمولاً، ترک خستگی مستقیم بوده و شاخه شاخه نمی‌باشد (شکل ۶-۱۵ را ببینید). همچنین با توجه به تحقیقات انجام شده، فرکانس نوسان تنش در خستگی خوردگی تأثیر به‌سزایی دارد، درحالی که در شکست‌های خستگی معمول، چندان حایز اهمیت نیست.



شکل ۶-۱۵: خستگی خوردگی صفحات [31]

۶-۲-۵- خوردگی سایشی

خوردگی سایشی، اصطلاحی است که برای توصیف خوردگی فزاینده حاصل از افزایش در حرکت نسبی بین یک سیال خورنده و یک دیواره فلزی، استفاده می‌شود. معمولاً هنگامی که یک فلز خورده می‌شود، فیلم خوردگی روی صفحه باقی می‌ماند و نرخ خوردگی بیشتر را کاهش می‌دهد. اما با حذف این فیلم خوردگی توسط سایش، سطح تازه فلز در معرض سیال قرار می‌گیرد و خورده می‌شود. در نتیجه، این سیکل به صورت مداوم تکرار می‌شود. اثر این دو، ترکیبی است و بیشتر از حالتی می‌باشد که هر کدام از پدیده‌های خوردگی یا سایش به تنهایی وجود دارند. بدیهی است که خوردگی سایشی به حذف فیلم سطحی حفاظت کننده یا محصولات خوردگی چسبنده به کمک تنش برشی سیال تحت تأثیر شرایط تلاطم زیاد بستگی دارد، بنابراین خوردگی سایشی تفاوت قابل توجهی با دیگر انواع خوردگی دارد و در آن آهنگ حمله تحت شرایط ساکن یا سرعت کم به بیشترین حد خود می‌رسد. به عنوان مثال می‌توان به آلیاژهای مس در آب دریا، تیتانیوم در مواد سوزآور^۱، آلیاژهای نیکل در اسید سولفوریک و غیره اشاره کرد. در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، این پدیده در ورودی نسبت به خروجی از اهمیت بیشتری برخوردار است. شکل ۶-۱۶ نشان دهنده خوردگی سایشی در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای است.

از جمله عوامل اصلی مؤثر در خوردگی سایشی، نوع فلز به کار رفته و شرایط سیال هستند. در مواد فلزی، فلزاتی که مقاومت به خوردگی آنها به تشکیل یک فیلم سطحی حفاظت کننده بستگی دارد، بیشتر در معرض این نوع خوردگی قرار می‌گیرند. آلومینیوم و فولادهای ضدزنگ در این دسته می‌باشند. فیلم حفاظت کننده توسط سایش مکانیکی، ساییده شده و سپس هسته نرم^۲ آن علاوه بر سایش مکانیکی پیوسته در معرض حمله شیمیایی یا الکتروشیمیایی قرار می‌گیرند. در خصوص شرایط جریان، خوردگی سایشی معمولاً هنگامی افزایش می‌یابد که سیال حاوی هوا یا ذرات جامد ساینده مانند ماسه باشد، افزایش سرعت نیز آهنگ خوردگی سایشی را افزایش می‌دهد. برای بسیاری از مواد، یک مقدار سرعت بحرانی وجود دارد که در سرعت بالاتر از آن

1 Caustics

2 Soft core

آهنگ حمله به شدت زیاد می‌شود. این مقادیر بحرانی را می‌توان در اغلب کتاب‌های مهندسی (به عنوان مثال، Walker [۲۷]) یافت، اگرچه بیشتر این مقادیر، نظری هستند. در هنگام طراحی مبدل حرارتی نباید از این مقادیر بحرانی فراتر رفت.

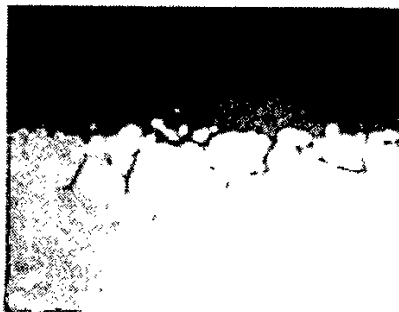


شکل ۶-۱۶: خوردگی ساییدگی در صفحات [31]

۶-۲-۲-۶- خوردگی بین دانه‌ای

نوعی خوردگی موضعی و خاص که در یک ناحیه باریک در امتداد مرزهای دانه^۱ یا در نزدیکی مناطق بدون خوردگی قابل توجه روی دانه اتفاق می‌افتد، خوردگی بین دانه ای نامیده می‌شود (شکل ۶-۱۷ را ببینید). به علت این نوع خوردگی، فلز مقاومت خود را از دست می‌دهد. خوردگی بین دانه ای معمولاً هنگامی اتفاق می‌افتد که یک خورنده به فاز مرزی دانه حمله می‌کند. مرزهای بین دانه‌ها از نظر شیمیایی نسبت به خود دانه‌ها بسیار فعال‌تر بوده و در صورتی که در معرض خوردگی قرار بگیرند، بسیار سریعتر خورده می‌شوند. جدا شدن یک المان آلیاژی خاص در طول مرزهای دانه معمولاً به علت عملیات گرمایی نامناسب یا گرمای حاصل از جوشکاری یا سایر عملیات دما بالا می‌باشد که باعث ته‌نشینی المان آلیاژی خاص در مرزدانه خواهند شد. در فولاد ضدزنگ آستنیتی نوع 304 با ترکیب 8-18 (18 درصد کروم و 8 درصد نیکل)، خوردگی بین دانه‌ای، معمول‌ترین نوع خوردگی بوده و مورد توجه قرار می‌گیرد. بسیاری از شکست‌های این نوع فولاد ضدزنگ به علت خوردگی بین دانه‌ای در محیط‌هایی که

مقاومت به خوردگی آن‌ها، بسیار عالی پیشبینی شده بود، اتفاق می‌افتد. مکانیزم خوردگی بین دانه‌ای، یک فرآیند الکتروشیمیایی حاصل از فعالیت سلول پیل محلی در مرزهای دانه می‌باشد. یک سلول پیل گالوانیک^۱ به علت اختلاف پتانسیل بین اجزای ریز فاز دوم و محلول جامد، که اجزا از آن تشکیل می‌شوند، به وجود می‌آید. رسوب کاربید و شبکه دانه‌ای تبدیل به کاتد منطقه مرزی دانه می‌شوند. بالا بودن نسبت سطح کاتد به آند سبب خوردگی سریع مواد در مرز دانه و تجزیه فلز می‌شود.



شکل ۶-۱۷: خوردگی بین دانه ای [31]

۶-۲-۲-۷- خوردگی گالوانیک

هنگامی که دو فلز غیر یکسان در یک محلول خورنده یا هادی الکتریکی غوطه‌ور می‌شوند، یک سلول پیل گالوانیک تشکیل می‌شود و ولتاژی (اختلاف پتانسیل) بین آنها به وجود می‌آید. این امر سبب خوردگی یکی از فلزات شده که تحت عنوان آند^۲ شناخته می‌شود. کاتد^۳ معمولاً تحت تأثیر خوردگی گالوانیک قرار نمی‌گیرد که آن را فلز نجیب^۴ نیز می‌نامند. خوردگی گالوانیک، همچنین در فلزات مشابه به علت نقص‌های موضعی یا ناهم‌هنگی در سطح فلز یا تغییر در ترکیب شیمیایی محلول، ایجاد می‌شود. در بیشتر اوقات، خوردگی گالوانیک به شکل شیارهایی روی فلز خورده شده در نقاط تماسش با

1 Galvanic cell

2 Anode

3 Cathode

4 Nobel metal

فلز نجیب ظاهر خواهد شد. برای آغاز تشکیل خوردگی گالوانیک باید چهار جزو اصلی حضور داشته باشند: آند، کاتد، الکترولیت^۱ و یک مسیر فلزی^۲ بین آند و کاتد که مدار را کامل می‌کند. در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، خوردگی گالوانیک بیشتر روی اتصالات جوش شده، اتصالات لحیم سخت و نرم شده، به وجود می‌آید. پارامتر تعیین کننده مقدار خوردگی گالوانیک، سری گالوانیک^۳ نامیده می‌شود. معمولاً فلزات و آلیاژهای مختلف را می‌توان برای کاهش یا افزایش مقاومت به خوردگی مرتب کرد. سری گالوانیک نمونه برای جنس صفحاتی که در آب دریا استفاده می‌شوند، در جدول ۳-۶ نشان داده شده و فهرست کاملتر را می‌توان در کتاب Walker [۲۷] یافت.

جدول ۳-۶: سری‌های گالوانیک در آب دریا [۳۱]

سری‌های گالوانیک	آلیاژ یا فلز
نجیب حداکثر	گرافیت
	فولاد ضدزنگ (غیرفعال)
	هستلوی
	تیتانیوم
	مس- نیکل ۹۰-۱۰
	مس
	فولاد ضدزنگ (فعال)
	چدن
	آلومینیوم
	روی
نجیب حداقل	منیزیم

۶-۲-۲-۸- فرو نشست انتخابی

فرونشست انتخابی اصطلاحی است برای توصیف یک فرآیند خوردگی که در آن یک المان از آلیاژ مادر خورده می‌شود و یک ساختار ضعیف باقی می‌ماند. این پدیده بویژه در

1 Electrolyte

2 Metallic path

3 Galvanic series

برنج‌های^۱ دارای روی^۲ زیاد (روی زدایی^۳) و در سایر آلیاژهایی اتفاق می‌افتد که از روی آنها آلومینیم، آهن، کبالت، کروم و دیگر المان‌ها برداشته می‌شوند. مکانیزم این نوع خوردگی، یک فرآیند الکتروشیمیایی چند مرحله‌ای می‌باشد که در آن ابتدا فلز در سیال خورنده حل می‌شود، سپس فلز نجیب بیشتری روی سطح باقی می‌ماند، درحالی‌که یون‌های آن‌دی در محلول به جا می‌مانند. مشخصه این فرآیند، رسوبات سطحی نرم و پرخلل و فرج روی عنصر نجیب است. عوامل اصلی مؤثر در این نوع خوردگی عبارتند از: عوامل متالورژیکی، محیطی و خصوصیات شیمیایی آب. اما در اینجا در مورد آنها بحث نخواهد شد، زیرا از خوردگی فرونشست معمولاً در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای به علت مواد معمول مورد استفاده صرف‌نظر شده است.

همچنین باید گفت که آسیب هیدروژنی^۴ یک فرآیند خوردگی می‌باشد. آسیب هیدروژنی، اصطلاح عمومی است که به مجموعه‌ای از فرآیندهای نامناسب گفته می‌شود که به علت قرار گرفتن در معرض هیدروژن فلز به وجود می‌آیند. شکنندگی هیدروژنی^۵ یکی از ایرادهایی است که در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای اتفاق می‌افتد. معمولاً دو موضوع درباره این ایراد مطرح می‌شود: ترکی که توسط هیدروژن شکل گرفته است و تغییر چقرمگی^۶ به خاطر ترد شدن ماده. این بدین دلیل است که اتم هیدروژن که در فولاد حل شده، می‌تواند به فرآیند معمولی تغییر شکل پلاستیک مربوط شود. برای تیتانیوم، شرایط زیر باید به صورت همزمان وجود داشته باشند تا شکنندگی هیدروژنی روی دهد [۳۱]: PH باید کمتر از 3 یا بالای 12 باشد یا فیلم غیرفعال باید به علت مکانیکی خراب شده باشد؛ دما باید بالای 80°C بوده و مکانیزم‌هایی برای تولید هیدروژن جدید وجود داشته باشند.

1 Brass

2 Zink

3 Dezincification

4 Hydrogen damage

5 Hydrogen embrittlement

6 Toughness

۶-۲-۳- کنترل خوردگی

خوردگی در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای به علت وجود صفحات نازک، مجاز نیست. در نتیجه کنترل خوردگی برای حفظ کارایی مناسب مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای بسیار حایز اهمیت می‌باشد. راه‌های مختلفی برای کنترل خوردگی در مبدل‌های حرارتی عمومی وجود دارد. بیان جزئیات همه این روش‌ها خارج از هدف این کتاب بوده و خوانندگان برای اطلاعات بیشتر می‌توانند به کتاب‌های خوردگی مراجعه کنند (به عنوان مثال Fontana و Greene [۲۸]). در اینجا فقط اطلاعات مختصری ارائه خواهد شد و تمرکز روی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای است.

دو روش اصلی برای کنترل خوردگی وجود دارد؛ یکی از این شیوه‌ها استفاده از فلزات مقاوم به خوردگی است و روش دیگر جداسازی ایزوله کردن فلز از محیط خورنده یا به کنترل درآوردن واکنش آندی یا کاتدی در محیط می‌باشد. روش‌های کنترل خوردگی که در دسته دوم قرار می‌گیرند، عبارتند از:

۱- کاهش واکنش آندی: اگر واکنش آندی کاهش یابد، خوردگی کاهش یافته یا خود به خود حذف می‌شود. یک راه حل کاتد کردن فلز به کمک یک جریان مناسب یا اتصال به فلزی که از فلز موجود در سلول (پیل) گالوانیک، آنودی تر (آنود فرا شونده^۱) می‌باشد. روش دیگر، تشکیل یک فیلم غیرفعال روی سطح فلز است که اجازه نمی‌دهد یون‌ها خورنده به فلز برسند.

۲- کاهش واکنش کاتدی: با استفاده از تغییر در محیط خورنده، مانند کاهش غلظت اکسیژن، کاهش H^+ (افزایش مقدار PH)، ایجاد رسوبات حفاظت کننده و غیره می‌توان از شکل‌گیری واکنش کاتدی جلوگیری کرد؛ این کار را می‌توان به کمک تصفیه آب با استفاده از مواد بازدارنده انجام داد.

۳- کاهش هر دو واکنش آندی و کاتدی: روش‌ها^۲ عموماً، فیلم‌های نسبتاً نازکی هستند که دو ماده واکنش دهنده یا یک فلز را از محیط جدا می‌کنند. استفاده از یک مانع حفاظتی بین محیط خورنده و ماده‌ای که باید تحت حفاظت قرار بگیرد، روش

1 Sacrificial anode

2 Coating



اصلی برای کنترل خوردگی می‌باشد. روکش‌ها می‌توانند فلزی، غیرآلی^۱ یا رنگ^۲ باشند. در روش اول که انتخاب مواد مقاوم به خوردگی است، شناخت انواع خوردگی که یک ماده مشخص تحت تأثیر آنها قرار می‌گیرد و شرایطی که برای تشکیل خوردگی لازم است، از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار می‌باشد. انواع متداول خوردگی و دلایل تشکیل آنها برای فولادهای ضدزنگ، تیتانیوم و نیکل که معمولاً در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای استفاده می‌شوند، در جدول ۶-۴ از مقاله Novak [۳۱] آمده است.

در حالت عملی، انتخاب مدل مناسب برای حداقل کردن مقدار خوردگی در یک شرایط خاص، هرگز کار آسانی نمی‌باشد؛ این کار را می‌توان با توجه به تجربیات موجود و تحقیقات انجام داد. در اینجا فهرستی با استفاده از کتاب‌های مختلف ارائه شده که در آن پیشنهادهایی را برای برخی کاربردهای نمونه وجود دارد. در انتخاب آلیاژها، انواع مختلفی از ترکیبات فلز طبیعی و محیط موجود را می‌توان در نظر گرفت. این ترکیبات معمولاً بیشترین مقاومت به خوردگی را با کم‌ترین هزینه ایجاد می‌کنند و همواره باید مورد توجه قرار گیرند. این فهرست شامل فولادهای ضدزنگ (اسید نیتریک، مس، نیکل) آب دریا و آب شور؛ نیکل و آلیاژهایش (سود سوزآور، مونل، اسید هیدروفلوئوریک^۳، هستلوی^۴ ها)، (اسید هیدروکلریک داغ، تیتانیوم) محلول‌های اکسیدکننده قوی داغ می‌باشد [۳۲]. همچنین برخی از ترکیبات فلز و محیط نیز وجود دارند که بسادگی توسط خوردگی مورد حمله قرار می‌گیرد و باید از آنها اجتناب کرد؛ از جمله این ترکیبات می‌توان به آمونیاک و محلول‌های آمونیاکی، مس و آلیاژهای آن، هالوژن‌ها و هالیدها، فولادهای ضدزنگ آستنیتی^۴؛ جیوه^۵، مس و آلیاژهای مس، مونل؛ سولفور و سولفیدها (در دماهای بالا)، نیکل و آلیاژهای نیکل اشاره کرد [۳۲]. به طور خلاصه، در حالت عملی بهترین روش برای جلوگیری از خوردگی که توسط Cross پیشنهاد شده است [۳۳]، استفاده از ماده ای می‌باشد که توسط سیال منتقل کننده حرارت خورده نمی‌شود.

1 Inorganic

2 Paint

3 Hydrofluoric acid

4 Austenitic stainless steel

5 Mercury

۶-۳- ساییدگی

به سایش جرم از سطح یک جسم توسط جریان یک سیال که حاوی ذرات می‌باشد، ساییدگی یا خوردگی مکانیکی گفته می‌شود. سرعت بالا معمولاً علت اصلی ایجاد ساییدگی می‌باشد و انسداد جریان، سرعت‌های موضعی بالا ایجاد می‌کند. در مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله، سایش بیشتر در ورودی لوله‌ها و در سطح خارجی لوله‌های زیر نازل‌های سمت پوسته، اتفاق می‌افتد. در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، ساییدگی در منطقه گلویی ورودی و ناحیه توزیع به وجود می‌آید (شکل ۶-۱۸ را ببینید). در موارد حاد، پورت ورودی صفحه ساییده و باعث نشی می‌شود. برای جریان‌های دوفاز، این پدیده به علت سرعت بالای حاصل از چگالی کم، متداول است. در حالت کلی سایش به سرعت سیال، یک فاز یا دو فازی بودن جریان، خواص سیال، خواص ماده و استحکام بستگی دارد. [۱۱]. افزون بر این ساییدگی معمولاً همراه خوردگی اتفاق می‌افتد و یکدیگر را تحت تاثیر قرار می‌دهند. این پدیده، خوردگی ساییدگی نامیده می‌شود که ترکیبی از تجزیه الکتروشیمیایی و سایش مکانیکی می‌باشد و قبلاً در قسمت انواع خوردگی به آن اشاره شده است. خوردگی سایشی برخلاف سایش خالص، مختص خواص سرعت بالا نبوده و می‌توان آن را در مناطق سرعت پایین نیز مشاهده کرد. یک شیوه متداول برای جلوگیری از ایجاد سایش، حذف ذرات ساینده از سیال منتقل کننده حرارت به کمک فیلتر کردن می‌باشد و می‌توان با استفاده از صافی یا وسیله‌ای مشابه هر گونه ذرات بزرگ عامل توزیع نامناسب را حذف کرد. در طول طراحی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، باید به سرعت سیال در پورت ورودی و منطقه گلویی صفحات، توجه کرد. تنظیماتی نیز باید صورت گیرد تا سرعت در مناطق سرعت بالا کاهش یابد که این مهم یا با کاهش جریان سیال و یا با اضافه کردن تعداد صفحات مبدل حرارتی امکان پذیر می‌باشد.

جدول ۴-۶: خوردگی [۳۱]

نوع خوردگی	تسریع کننده‌ها	علت
* خوردگی فولاد زنگ نزن		
P, SCC C	اکسیدکننده، PH کم، دما	هالوژنیدها (کلرها، برومیدها)
G	دما، هالوژنیدها	اسیدهای غیرآلی قوی
G, P, C	هالوژنیدها، اکسیدکننده، دما	اسیدهای آلی قوی
G و SCC	دما، تنش	بازهای قوی (KOH, NaOH)
SCC, IG	اسیدها، اکسیدکننده‌ها، دما	حساس سازی در HAZ (کاربیدهای کروم)
C, P	نبود شرایط جریان	فعالیت میکروارگانیزم‌ها
* خوردگی تیتانیوم و آلیاژهای تیتانیوم		
G	کلاً مناسب نیست	اسید هیدروفلوئوریک
, C, SCC G	محیط اسیدی، دما	فلورایدها
G, EC	غلظت زیاد، سرعت بالا، دمای بالا	بازهای قوی (KOH, NaOH)
G	غلظت، سرعت، دما	اسیدهای غیراکسیدکننده، غیرآلی
G	عدم حضور اکسیدکننده‌ها	اسیدهای آلی قوی
HE	انواع دیگر خوردگی‌ها	هیدروژن (جدید)
* خوردگی آلیاژهای نیکل		
G, EC C, P, G	هالوژنیدها، دما اکسیدکننده‌ها، PH پایین، دما	اسیدهای غیرآلی قوی (سولفوریک، کرومیک و فسفوریک) (آب خنک کننده، آب شور)، کلر، فلوریدها، برومیدها
G, S	دما، اکسیدکننده‌ها	بازهای قوی

توجه:

C=خوردگی درزی

G =خوردگی عمومی

IG=خوردگی بین دانه ای

S=خوردگی انتخابی

EC =خوردگی سایشی

HE=شکنندگی هیدروژن

P=خوردگی حفره ای

SC=ترک خوردگی تنشی

علائم:

h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، $W/(m^2 \cdot K)$

K ضریب هدایت حرارتی، $W/(m \cdot K)$

m جرم، kg

Q نرخ انتقال حرارت، W

R مقاومت به رسوب، $(m^2 \cdot K)/W$

t زمان، s

U ضریب انتقال حرارت کلی، $W/(m^2 \cdot K)$

ΔT اختلاف دما، K

علائم یونانی

δ ضخامت صفحه، m

زیرنویس

1 جریان سیال 1

2 جریان سیال 2

c تمیز

d رسوب

f رسوب

m متوسط

p صفحه

r برداشتن

مراجع فصل ۶:

- [1] Kaka, S. and Liu, Heat Exchanger: Selection, Rating and Thermal Design, CRC press, Boca Raton, FL, 1997.
- [2] Chenoweth, J.W., Fouling problems in Heat Exchangers, in Heat Transfer In High Technology and Power Engineering, ed. W.K. Yang and Y. Mori, Hemisphere, New York, PP. 406-419, 1987.
- [3] Chenoweth, J.M., Final Report of the HRTI/TEMA Joint Committee to Review the Fouling Section of the TEMA Standards, Heat Transfer Researc Inc., Alhambra, CA, 1988.
- [4] Bott, T.R., Fouling of Heat Exchangers, Elsevier, Amsterdam, 1995.
- [5] Epstein, N., Thinking about Heat Transfer Fouling: A 5 5 Matris, Heat Transfer Engineering, vol. 4, no. 1, PP. 43-54, 1983.
- [6] Kho, t., Effect of Flow Distribution on Scale Formation in Plate Heat Exchangers, PhD Thesis, University of Surrey, Surrey, UK, 1998.
- [7] Kern, D.Q. and Seaton, R.E., A Theoretical Analysis of Thermal Surface Fouling, British Chemical Engineering, vol. 4, no. 5, PP. 258-262, 1959.
- [8] Epstein, N., Fouling in Heat Exchangers, in Low Reynolds Number Flow Heat Exchangers. Ed. S. Kakac, R.K. Shah, and A.E. Bergles, Hemisphere, New York, 1981.
- [9] Watkinson, A.P. and Epstein, n., Particulate Fouling of Sensible Heat Exchangers, Proceeding of the 4th International Heat Transfer Conference, Paris, vol. 1, HE 1.6, 1970.
- [10] Cooper, A., Suito, J.W., and Usher, J.D., Cooling Water Fouling in Plate Heat Exchangers, Heat Transfer Engineering, vol. 1, no. 3, PP. 50-55, 1980.
- [11] Gupta, J.P., Working with Heat Exchangers, Hemisphere, New York, 1990.
- [12] Muller-Steinhagen, H. and Middis, J., Particulate Fouling in Plate Heat Exchangers, Heat Transfer Engineering, vol. 10, no. 4, PP. 584-591, 1989.
- [13] Thonon, B., Grandgeorge, S., and Jallut, C., Effect of Geometry and Flow Conditions on Particulate Fouling in Plare Heat Exchangers, Heat Transfer Engineering, vol. 20, no. 3, PP. 12-20, 1999.
- [14] Bansal, B. and Muler-Steinhagen, H., Crystalization Fouling in Plate Heat Exchangers, ASME Jurnal of Heat Transfer, vol. 115, PP. 584-591, 1993.
- [15] Bansal, B. and Muler-Steinhagen, H., and Chen, X.D., Effect of Suspeded Particles on Crystalization Fouling in Plare Heat Exchangers, ASME Jurnal of Heat Transfer, vol. 117. PP. 568-574, 1997.
- [16] Novak, L., Comparison of the Rhine River and the Oresund Sea Water Fouling and its Removal by Chlorination, ASME Jurnal of Heat Transfer, vol. 104, PP. 663-669, 1982.
- [17] shibuya, H., Morohashi, m., Levy, W., and Costa, C., Fouling Tests Using Pilot- Scale Packinox Heat Exchangers with Untreated Straight-rum Gas Oils, in Fouling Mitigation of Industrial Heat Exchanger, ed. C. Panchal T. Bott, ESomerscales, and S . Toyama, Begell House, New York, PP. 525-539, 1997.
- [18] Paterson, W.R and Fryer, P.J., A Reaction Engineering Approach to the Analysis of fouling, Chemical Engineering science, vol. 43, PP. 1714-1717, 1988.
- [19] DeJong, p., Bouman, S., van Der Linden, J.J.L.J., Fouling of Heat Treatment

- Equipment in Relation to the Denaturation of β -Lactoglobulin, *Journal of the Society of Dairy Technology*, vol. 45, PP. 3-8, 1992.
- [20] Zubair, S.M. and Shah, R.K., Fouling in Plate-and-Frame Heat Exchangers And Cleaning Strategies, in *Compact Heat Exchangers and Enhanced Technologies for the Process Industries*, ed. R.k. Shah, a.W. Deakin, H. Honda, and T.M., Rudy, Begell House, New York, PP. 553-565, 2001
- [21] Kuppan, T., *Heat Exchanger Design Handbook*, Marcel Dekker, New York, 2000.
- [22] Cho, Y.I., Choi, B.G., and Derazner, B.J., Electronic Anti-fouling Technology to Mitigate precipitation Fouling in plate and Heat Exchangers, *International Journal of Heat Mass Transfer*, vol. 41, no. 17, PP. 2565-2571, 1998.
- [23] Bornhorst, A., zhao, Q., and Muller-Steinhagen, H., Reduction of Scale Formation by Ion Implantation and Magnetron Sputtering on Heat Transfer Surface, *Heat Transfer Engineering*, vol. 20, no. 2, PP. 6-14, 1999.
- [24] Novak, I., Fouling in Plate Heat Exchangers and Its Reduction by proper Design, in *Heat Exchangers: Theory and Practice*, Hemisphere, Ed. D. Yugosl, Washington, PP. 871-883, 1983.
- [25] Marriott, J., Where and How to Use Plate Heat Exchangers, *Chemical Engineering*, vol. 78, no. 8, PP. 127-134, 1971.
- [26] Zettler, H., Kho, T., and Muller-Steinhagen, H., Parametric Study of Fouling and Excess Heat Transfer Area in Plate Heat Exchangers, in *Proceedings of an International Conference on Mitigation of Heat Exchanger Fouling and Its Economic and Environmental Implications*, Ed. T.R. Bott, A.P. Watkinson, and C.B. Panchal, Banff, Begell House Redding, CT, PP. 50-58, July 1999.
- [27] Walker, G., *Industrial Heat Exchangers: A Basic Guide*, Hemisphere, New York, 1982.
- [28] Fontana, M.G. and Greene, N.D., *Corrosion Engineering* 2nd edn, McGraw-Hill, New York, 1978.
- [29] Turissini, R.L., Bruno, T.V., Dahlberg, E.P., and Setterlund, R.B., Corrosion Failures in Plate Heat Exchangers, *Materials Performance*, vol. 37, no. 1, PP. 59-61, 1998.
- [30] Turissini, R.L., Bruno, T.V., Dahlberg, E.P., and Setterlund, R.B., prevent Corrosion Failures in Plate Heat Exchangers, *Chemical Engineering progress*, vol. 93, no. 9, PP. 44-50, 1998.
- [31] Novak, L., Corrosion in Compact Heat Exchangers, Internal Presentation at Alfa Laval Lund AB, Lund, Sweden, 2001.
- [32] Moore, R.E., Selecting Materials to Meet Environmental Conditions, in *Materials Engineering: Selecting Materials for process Equipment*, ed. K.J. McNaughton, McGraw-Hill, New York, PP. 19-22, 1980.
- [33] Cross, P.H., Preventing Fouling in Plate heat Exchangers, *Chemical Engineering*, vol. 86, no.1, PP. 87-90, 1979.

شرکت طها قالب توس در راستای خود کفایی ایران اسلامی، طراحی و ساخت مبدل‌های حرارتی صفحه ای را از سال ۱۳۷۹ در شهرک صنعتی توس، واقع در مشهد مقدس آغاز نموده است. این شرکت با بهره جستن از اساتید دانشگاه، کادر متخصص و تجهیزات مدرن از قبیل: ماشین آلات CNC و کارگاههای مجهز قالب سازی، توانسته است این مهم را در کشور امکان پذیر نماید. در همین راستا و به منظور تولید مبدل هایی با ابعاد کوچک، متوسط و بسیار بزرگ به پرس‌های هیدرولیکی متنوعی از تناژ کم تا پرس عظیم چند هزار تنی مجهز می‌باشد، که نمونه این پرس‌ها با این تناژ در شرق کشور موجود نمی‌باشد. به علاوه، بخش‌های طراحی، کنترل کیفیت و تولید شرکت مجهز به پیشرفته ترین و به روزترین نرم افزارها و دستگاه‌های تولیدی می‌باشند. این تجهیزات سبب گردیده است که صفحات و واش‌های تولیدی ما از حداکثر کیفیت لازم برخوردار بوده و مطابق با انواع استانداردهای داخلی و جهانی باشد. با بهره جستن از تمامی امکانات فوق و بیش از ۱۶ سال تجربه در این عرصه امروزه شرکت طها قالب توس قادر به طراحی و تولید اکثر مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای موجود در دنیا می‌باشد.

Established in 2000, Taha Ghaleb Toos (TGT) Co. is the first manufacturer of plate heat exchangers (PHEs) in the Middle East region. TGT's production line is equipped with modernized and optimized systems. In our two manufacturing sites, high-tech software and hardware are utilized to satisfy all demands. Our major goal is to pursue the cutting edge heat transfer technology and to produce high quality products. We therefore, try our best to live up to our customer's expectations by providing plate heat exchangers in various sizes and ranges. The large, medium, small and mini-sized plates are fabricated by our 1500, 5000 and 25000 ton hydraulic presses. We have always believed in our production, and this is why our plate heat exchangers are now broadly used in numerous applications throughout the world



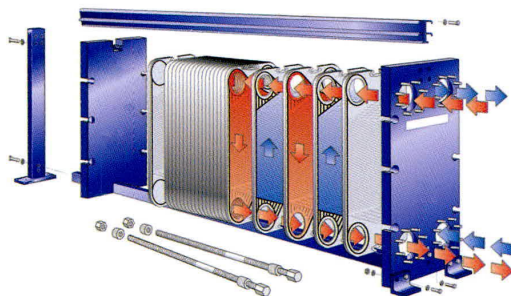
معرفی مبدلهای حرارتی صفحه‌ای

Introducing Plate Heat Exchanger



TGT Co.

وقتی دو جسم با دماهای متفاوت در مجاورت یکدیگر قرار می‌گیرند، بین آنها پدیده‌ای به نام انتقال حرارت صورت می‌گیرد که براساس این پدیده گرما از جسم با دمای بیشتر به جسم با دمای کمتر منتقل می‌شود. مبدل‌های صفحه‌ای نسل نسبتاً جدیدی از مبدل‌های حرارتی هستند که در آن سیال‌های گرم و سرد بین صفحات شیاردار جریان دارند، بطوری که سطح گسترده‌ای برای انتقال حرارت بوجود می‌آید.



When two bodies with different temperature placed next to each other, heat transfer occurs between them and always heat will be transferred from warmer body to the cold medium. Plate Heat Exchangers almost are new types of heat exchanger that hot and cold fluids flow through the corrugated plates and wide surface will be available for heat transferring

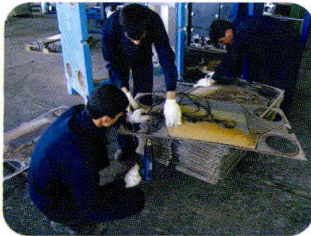
خصوصیات ویژه این مبدل‌ها

Special Specification

- ▶ Better heat transfer area compared to exchangers
 - ▶ Ability to change heat transfer area
 - ▶ High efficiency, Saving energy
 - ▶ PHE size & installation space are less than other type of heat exchangers
 - ▶ Easy repair, clean & maintenance
 - ▶ Low fluidre main in PHE
- ◀ انتقال حرارت بهتر نسبت به سایر انواع مبدل‌ها
 - ◀ توانایی تغییر اندازه سطح انتقال حرارت
 - ◀ بازده بالا، صرفه جویی در مصرف انرژی
 - ◀ مبدل کوچکتر و فضای نصب کمتر نسبت به سایر انواع مبدل‌ها
 - ◀ تعمیر، رسوب زدایی و نگهداری آسان
 - ◀ حجم کم مایع ذخیره شده در مبدل

تعمیرات و نگهداری آسان

Easy Maintenance & Repair



مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای بدون باز کردن قابل تمیز کردن در محل می‌باشند، مبدل‌های صفحه‌ای را می‌توان به راحتی ديمونتاژ کرد و سطوح داخلی آن را تمیز نمود. به همین دلیل مدت زمان زیادی می‌توان از مبدل‌های صفحه‌ای بدون هیچ مشکلی استفاده کرد. حتماً برای باز کردن مبدل‌های صفحه‌ای با سازنده مشورت کنید و از افراد متخصص کمک بگیرید.

Easy Maintenance & Repair

The Clearing-In-Place (CIP) equipment permits cleaning of the plate heat exchanger without opening it. Plate heat exchanger can easily reassembled and clean internal area. For this reason, PHE works without any problem for long time. For opening of the PHE contact with the manufacturer

رسوب کم در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای

Low Fouling in PHE



تشکیل رسوب در مبدل‌های صفحه‌ای به دلایل زیر کم است:
 - تلاطم شدید سیال، ذرات جامد را به حالت تعلیق نگه می‌دارد.
 - فضای مرده در مبدل‌های صفحه‌ای وجود ندارد.
 - سهولت در تمیز کردن صفحات

به دلیل تشکیل رسوب کم، دوره‌های تمیز کردن در مبدل‌های صفحه‌ای طولانی است

PHE is considered to foul less than other HE:

- » High turbulence ⇨ High shear stress ⇨ less fouling
- » Low wall temperatures due to efficient heat transfer
- » No zone of low velocity

کاربرد های مدل های صفحه ای

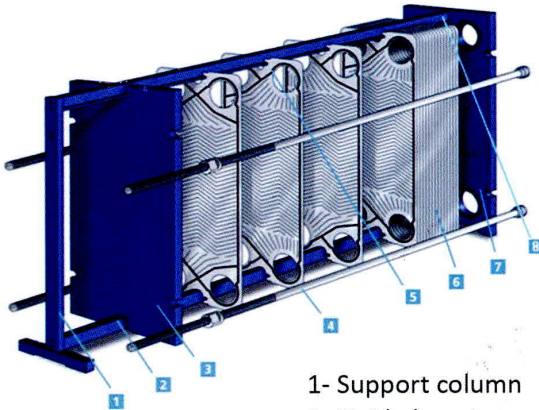
PHE Application



TGT Co.



- « صنایع نفت، گاز و پتروشیمی
- « کاربردهای HVAC
- « صنایع شیمیایی
- « صنایع داروسازی
- « صنایع مواد غذایی
- « سیستمهای کندانسور و اواپراتور
- « سیستم گرمایش استخرها، جکوزی و دوش
- « صنایع قند و شکر
- « صنایع دریایی
- « صنایع نساجی
- « خنک کاری روغن های هیدرولیک



اجزای تشکیل دهنده

Components of PHE

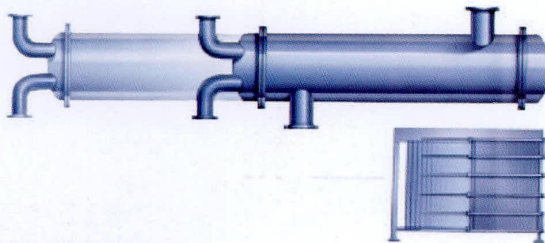
- 1- Support column
- 2- Guide bar
- 3- Movable cover
- 4- Tightening bolts
- 5- Gasket
- 6- Heat Plates
- 7- Fixed cover
- 8- Carrying bar

- ۱- پایه
- ۲- میله راهنما
- ۳- قاب متحرک
- ۴- پیچ های فشاری
- ۵- واشر
- ۶- صفحات حرارتی
- ۷- قاب ثابت
- ۸- میله حمل کننده صفحات

مقایسه مبدل های حرارتی با مبدل های پوسته و لوله

PHE Advatages Compared to Shell & Tube HE

- مبدل صفحه‌ای نسبت به مبدل‌های پوسته و لوله معادل کوچکتر بوده و وزن کمتری دارند.
- مبدل‌های صفحه‌ای برای نصب و تعمیرات و نگهداری نسبت به مبدل‌های پوسته لوله به فضای کمتری نیاز دارند.
- راندمان حرارتی در مبدل صفحه‌ای در مقایسه با مبدل‌های پوسته و لوله به دلیل اغتشاش بالا دو برابر بوده و خوردگی آن کمتر می‌باشد.
- در مبدل صفحه‌ای، احتمال اختلاط دو سیال سرد و گرم وجود ندارد. ولی در مبدل‌های لوله ای در شرایط غیر عادی (نقص فنی) این امکان وجود دارد.
- در یک مبدل صفحه‌ای با اضافه کردن مقدار صفحات می‌توان به راحتی شرایط مبدل را تغییر داد. این امر در مورد مبدل‌های لوله‌ای امکان پذیر نیست.
- مبدل‌های صفحه‌ای در مقایسه با مبدل‌های لوله‌ای معادل، نیاز به عایقکاری ندارند.



- » Compact unit and less weight
- » Easy installation and repairs less floor area, total accessibility for mechanical cleaning
- » Double heat transfer efficiency and Corrosion resistance
 - ✓ High turbulence
 - ✓ True counter-current flow
 - ✓ High thermal efficiency
- » No cross contamination
- » Possible to expansion of capacity
- » No need to insulation

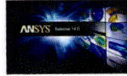
طراحی و تولید مبدل‌های حرارتی

Designing and Manufacturing of Plates and Gaskets



در واحد طراحی و مهندسی با استفاده از نرم افزارهای روز دنیا همچون Solid works, CATIA, ANSYS مدل صفحات تحلیل و طراحی می‌شود و قالب‌های طراحی شده در واحد قالب سازی با تکنولوژی CAD/CAM و نرم افزارهای MASTERCAM, POWERMILL ساخته می‌شود.

PHE plates will be analyzed and designed with Solid Works ,CATIA and ANSYS in the engineering department and dies & moulds will be made by CAD/CAM technology and MASTERCAM and POWERMILL softwares



پارامترهای موثر

Effective Parameters

پارامترهای موثری که در انتخاب مبدل‌های حرارتی دخالت دارند به شرح زیر است:

- دبی جریان عبوری از مبدل حرارتی
- خصوصیات فیزیکی سیالات عبوری از مبدل حرارتی
- دماهای ورودی و خروجی در مبدل حرارتی
- افت فشار مجاز سیال در عبور از مبدل حرارتی
- بیشترین دمای کارکرد
- بیشترین فشار کارکرد

The most effective parameters that needs for the selection of a PHE are as follows:

The flow rate to be transferred

The physical specification of the flow

The inlet and outlet temperatures on the primary and secondary sides

The maximum allowable pressure drop on the primary and secondary sides

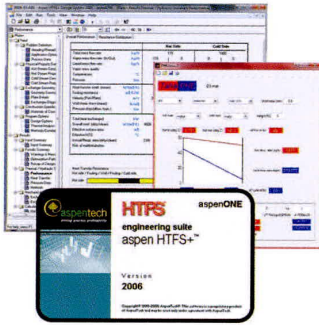
The maximum operating temperature

The maximum operating pressure

نحوه انتخاب مبدل

Choosing The Heat Exchanger

با توجه به اطلاعاتی که مشتری از شرایط کاری Operating Condition در اختیار واحد مهندسی قرار می‌دهد، محاسبات توسط کارشناسان انجام گرفته و با استفاده از نرم افزارهای پیشرفته، محاسبات مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای کنترل می‌شود و در نهایت بهترین نوع مبدل پیشنهاد می‌گردد.



Our engineers calculate the best size and type of the PHE according to the customer request and validate this calculation using the state of the art of engineering softwares .

کتابچه فنی

Final Data Book

هر مبدل با یک کتابچه فنی شامل نقشه مونتاژ، نتیجه تست، تاییدیه مواد، کاتالوگ، دفترچه راهنما، دفترچه اسیدشویی و کارت گارانتی به مشتری تحویل داده می‌شود.



Each PHE is delivered with documents including assembly or general drawing, test report, material certification, catalogue, PHE manual, pickling manual and guaranty card.

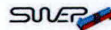
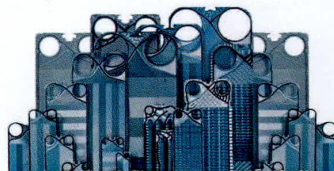
انواع صفحات

Plates



در شرکت طاهها قالب انواع صفحات با شیپارهای افقی و عمودی و صفحات جریان آزاد (Free Flow and) wide Gap) برای سیال های دارای ذرات جامد) موجود می باشد. این شرکت قادر است انواع صفحات که در شرایط مختلف استفاده می شوند و مطابق با خواست مشتری و منطبق با صفحات شرکت های معتبر سازنده مبدل های صفحه ای مانند ... Alfalaval, Kelvion, Tranter, Hisaka را طراحی و تولید کند.

The plates are specially selected from various patterns, such as vertical and horizontal herringbone and wash board patterns, to achieve optimum area and cost effective heat exchanger for each unit according to the Alfa Lval, GEA, Tranter, Hisaka , ... plates and gaskets.



جنس صفحات

Plate Material

- انتخاب جنس صفحات بستگی به سیال داخل مبدل دارد. پرکاربردترین صفحات در مبدل ها عبارتند از:
- فولادهای ضد زنگ SS ۳۰۴, SS ۳۱۶
 - تیتانیوم GR۱, GR۲, ...
 - نیکل و آلیاژهای نیکل (HASTELLOY)

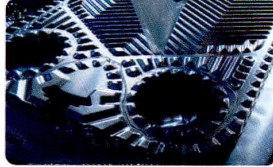
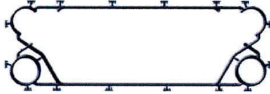
Materials selection for PHE focuses upon the fluid type .

Most applicable plates material listed below :

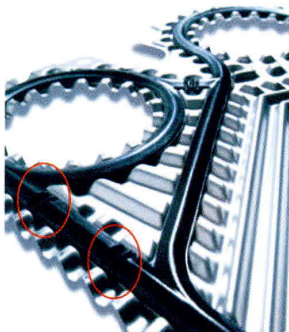
Stainless Steel 316 ,304 ,...

Titanium (Gr1,Gr2) ,...

Nickel and Nickel alloys (Hastelloy)



جنس Material	Application	کاربرد
EPDM	بخار و مصارف عمومی تاسیسات حرارتی (HVAC) Steam and Public Application & HVAC کاربرد در محیط های اسیدی و بازی و شیمیایی مقاوم در برابر آب دریا Application in Acidic and Chemical Fluid, Resistance in Sea Water	
NBR	لبنیات، آب میوه ها، دارو سازی، نفت، بنزین و حلال های هیدروکربنی Milk Products, Fruitsjuice, oil & Hydrocarbo Solvers	
HNBR	محلول دارای هیدروژن سولفید Hydrogen Sulfide in fluid	
VITON	محلول های مایع در درجه حرارت های بسیار بالا حلال های ارگانیک، روغن های معدنی، حیوانی و گیاهی Oil, Organic solvers and Fluid at high temperature	



خصوصیات واشرها

Gasket Specification

یکی از مزیت های استفاده از مبدل های صفحه ای این است که در صورت خرابی واشر آب بندی، سیال به خارج صفحات نشت کرده و باعث تشخیص سریع عیب و محل آن می شود و هیچگونه اختلاط دو سیال رخ نمی دهد.

Special venting ports are an integral part of the gasket design to prevent cross contamination. If the gasket fails, leakage is detected on the outside.



واحد تحقیق و توسعه (R&D)

Research & Development

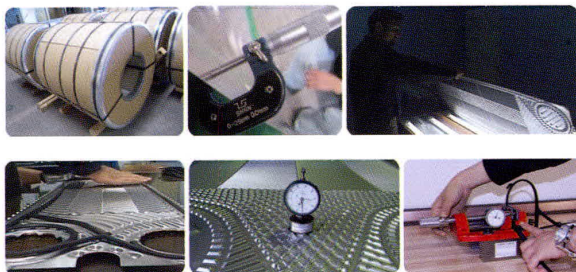


واحد (R&D) شرکت طهاها قالب اهداف ذیل را دنبال می کند:

- ۱- طراحی و تولید پروفایل های جدید صفحات و واشرها جهت افزایش راندمان
- ۲- بهینه سازی جنس و نوع شورون صفحات و واشرهای موجود جهت افزایش محدودیت فشار کارکرد مبدل ها تا ۳۰ Bar
- ۳- انجام پروژه های مشترک تحقیقاتی در سطح کارشناسی ارشد و دکترا با دانشگاه های معتبر
- ۴- انتشار و چاپ کتاب و مقالات علمی در کنفرانس ها و مجلات علمی - پژوهشی داخل و خارج از کشور
- ۵- ساخت دستگاه تست عملکردی مبدل ها

The TGT's R&D dept. follow these targets:

1. Design and produce new pattern for plate and gasket to increase efficiency.
2. Optimize plate chevron angle and material, gasket design to increase working pressure in PHE up to 30 bar.
3. Joint research projects in PhD's and master's level with country's credible university.
4. Publishing and writing books, papers at international conferences and reasearch scientific journals.
5. Exprimtent investigation(Test rig) for PHE performance.



کنترل کیفیت

Quality Control

تمام مراحل تولید از ورود مواد اولیه تا تست و ارسال مبدل، با بازرسی و نظارت واحد کنترل کیفیت انجام می گیرد.

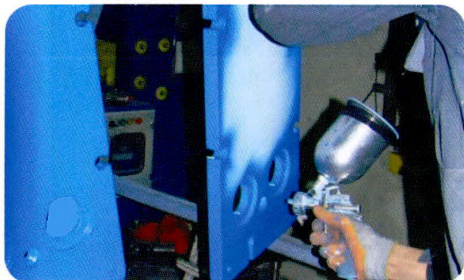
All stages of production are controlled by QC department accuracy such as raw material, plate pressing, gasket manufacturing, assembling, hydrotest and packing.

Protective Coating Paint System

تمامی فریم‌ها در شرایط استاندارد رنگ آمیزی شده و ماندگاری، به مدت طولانی در شرایط مطلوب، در معرض نور آفتاب و یا شرایط نامساعد آب و هوایی (مانند منطقه عسلویه) بدون خوردگی و تغییر قام دارند. ضخامت و مشخصات رنگ بر اساس درخواست مشتری و یا بر اساس استاندارد شرکت طاهها قالب تعیین می‌شود، هر یک از لایه‌ها قابل اندازه گیری با گیج ضخامت سنج می‌باشد.

مشخصات فنی سیستم رنگ به شرح زیر می‌باشد:

- آماده سازی سطح: سند بلاست (SA 2½)
- لایه اول (آستر): زینک ریچ اپوکسی
- لایه دوم (پوشش میانی): اپوکسی پلی آمید
- لایه سوم (پوشش نهایی):
- رویه پلی اورتان یا اپوکسی جهت فضای بیرونی و داخلی (قام بر اساس رنگ RAL)



All frames are painted under standard conditions and are subjected to humid, sunlight and adverse weather condition for long time with no corrosion and change in color.

The thickness of each layer is measured with a thickness gauge

Technical specifications for painting system are as follow:

Surface preparation: Sandblasting) (SA 2 ½)

First layer (Primer) : Zinc Rich Epoxy

Second layer (Mid Coat) : Epoxy Polyamide

(Third layer (Finish Coat) : Epoxy Polyamide(indoor) or Polyurethane (outdoor)



مشخصات فنی مبدل

Name Plate



هریک از مبدل های ساخته شده توسط شرکت طاها قالب توس دارای مشخصات فنی می باشد که بر روی پلاک مبدل حک شده و بر روی فریم جلویی نصب می شود. این مشخصات شامل فشار و دمای طراحی، فشار تست، جنس، ماکزیمم فشار کاری در سمت سرد و گرم مبدل، وزن، سال ساخت، شماره سریال سازنده، شماره دستگاه و نام مشتری می باشد.

All plate type heat exchangers supplied by TGT are provided with a nameplate. This plate is fitted on the outside of the PHE fixed plate. The name plate is stamped with important information. On this plate the following details are specified: Design pressure and temperature, test pressure in hot and cold sides, total empty weight, year built, manufacturer's serial no., equipment no. and name of client.



انجام تست قبل از ارسال

Testing

تمامی مبدل هایی که در شرکت طاها قالب توس ساخته می شوند در شرایط استاندارد (مطابق با استاندارد API 662) تا فشار مشخص شده (فشار تست) تست می شوند و سپس برای مشتری ارسال می گردند.



All of the PHEs which have been produced at Taha Ghaleb Toos Co. have been tested based on the standard condition (according to API standard) and delivered to customer

بسته بندی جهت ارسال

Packing

بعد از انجام تست، میدل باید به صورت دقیق و کامل بسته بندی شود. بنابراین میدل بر روی پالت ثابت شده و تمام سطح میدل با پلاستیک پوشانده می شود. بسته بندی صفحات و واشر یدکی در داخل جعبه های چوبی انجام می شود.

After completing of the test and inspections, the PHEs before shipment and transition to the site, should be packing correctly. For this purpose, the PHE is carefully placed and screwed on the pallet. Lifting screws and belt assemble on PHE then all surfaces should be wrapped in protective plastic. Spare parts including plates and gaskets are packed inside the wooden box.



خدمات پس از فروش

Service After Sale

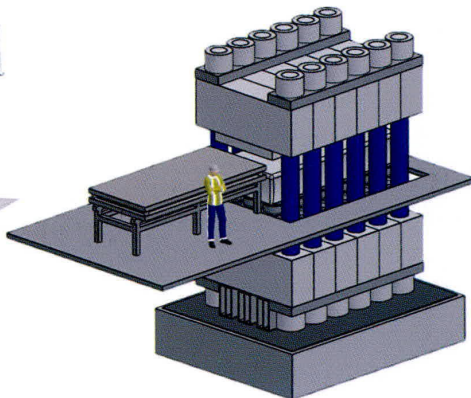
تمامی میدل های شرکت طاهها قالب توس دارای یکسال گارانتی و ۱۰ سال خدمات پس از فروش می باشند. قطعات یدکی میدل شامل انواع واشرها و صفحات نیز در دسترس هستند.

All types of Taha Ghaleb PHEs, have guaranty for one year and have service after sale for 10 years. All the spare parts consist of gaskets and plates are available.



شرکت طاهای قالب توس برای ساخت مبدلهای حرارتی خود، به پیشرفته ترین و مدرن ترین تجهیزات روز مجهز می باشد. این تجهیزات سبب می شود که کیفیت صفحات و واشرهای تولیدی این شرکت از حداکثر کیفیت لازم برخوردار باشد. با توجه به اینکه جهت تولید پلیت با سایزهای متنوع نیاز به پرسهایی با تناژ بالا است لذا شرکت طاهای قالب توس به صورت انحصاری دارای پرسهایی با تناژ ۱۵۰۰، ۵۰۰۰ و ۲۵۰۰۰ تن می باشد که نمونه آنها در خاورمیانه وجود ندارد و همچنین این شرکت مجهز به دستگاه برش CNC جهت برشکاری فریم های مبدل در ابعاد کوچک و بسیار بزرگ (مبدل هایی با طول 4m) می باشد.

TAHA GHALEB TOOS (TGT) is the first company which produced PHE in the middle east. TGT's production facilities are equipped with modernized and optimized system for manufacturing heat exchangers. The quality of heat plate is directly related to the performance of PHE. We therefore, try our best to live up to customer's expectation by providing with a various range of heat exchangers with large, medium, small and mini-sized plates fabricated by 1500, 5000, 25000 ton hydraulic presses and also, the company is equipped with the CNC machine for frames cutting in small and large size of PHE



PHE Unit for Hot Water Production

سیستم پکیج تولید آب گرم به منظور بهینه سازی انرژی، حداقل رساندن زمان مورد نیاز جهت نصب در محل، کارکرد مناسب، تعمیرات و نگهداری آسان طراحی شده است. یک مجموعه آماده پکیج شامل میدل حرارتی صفحه‌ای همراه با اجزای ذیل می‌باشد:

- پمپ
- سنسور
- شیرهای کنترلی
- گیج های دما و فشار
- لوله ها

این مجموعه بر روی یک فریم نصب می‌شوند و جابجایی توسط بالابر صورت گرفته و نصب سریع و آسان مجموعه در سیستم‌های HVAC امکان پذیر می‌باشد. همه لوله ها و اتصالات برای حداکثر عملکرد، طراحی می‌شوند. جوشکاری و مونتاژ توسط جوشکار مورد تایید و پرسنل آموزش دیده انجام می‌شود. قبل از ارسال پکیج به محل نصب، مطابق با روش های موجود، تست روی سیستم پکیج انجام شده و کیفیت آنها کنترل می‌شود. پکیج آماده تولید آب گرم در رستوران، ساختمان های اداری، هتل، بیمارستان، آپارتمان و پالایشگاه به منظور کاهش مصرف انرژی و هزینه قابل نصب می‌باشد.

hot water packaged system is designed with focus on energy optimizing, minimal site installation time, easy operation, service and maintenance.

A PHE Unit is a combination of a plate heat exchanger with:

Pump , Sensor , Valve , Temperature and Pressure Controller and Pipe

The unit is constructed and assembled on a compact stable frame which is easy to move and transport by a fork-lift or a pallet lift to the installation area. All tubes and fittings are designed and dimensioned for maximum performance. Welding and assembly is undertaken by approved welder and personnel. Before dispatch all units are firmly tested according to QC procedures. PHE unit for HVAC is applicable for restaurant, office building, hotel, hospital, apartment building and refinery, mostly to save energy and cut the operating cost.



مبدل حرارتی تمام جوشی Plate & Shell با همکاری شرکت Vahterus فنلاند

Plate & Shell heat exchanger in cooperation with Vahterus Oy

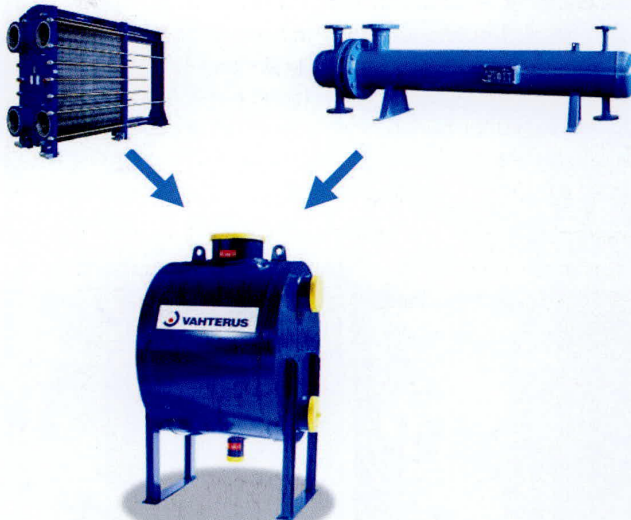


مهمترین ویژگی مثبت مبدل های حرارتی پوسته - لوله، فشار و دمای کاری بالای این نوع مبدل ها است. همچنین مهمترین ویژگی مثبت مبدل حرارتی صفحه ای اندازه کوچک و بازده حرارتی بالای آن است. با ترکیب ویژگی مثبت مبدل صفحه ای (اندازه کوچک) و مبدل پوسته لوله (فشار و دمای کاری گسترده)، مبدل Plate & Shell طراحی شده است. شرکت طاها قالب توس با همکاری شرکت Vahterus فنلاند که ابداع کننده و دارای پتنت این نوع مبدلهاست، انواع مبدل های Plate & Shell را تولید می کند.

The most important advantage of shell & tube heat exchanger is its high working temperature & pressure. While the most important advantages of plate heat exchanger are their compact size and high efficiency.

Plate & shell heat exchanger is designed by combing positive advantages of plate heat exchanger and shell & tube heat exchanger.

T.G.T. Co. manufactures all types of plate & shell heat exchangers in cooperation with Vahterus Oy that is the inventor of these type of heat exchanges and has its patent.



سامانه مانیتورینگ عملکرد مبدل حرارتی (طاها پایش)

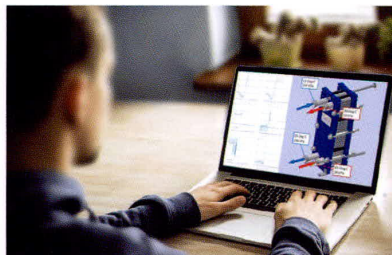
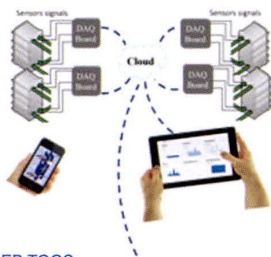
Heat exchanger performance monitoring system

رسوب در مبدل‌های حرارتی یک مشکل مزمن صنایع مختلف فرآوری است. میزان هزینه‌های تحمیلی این پدیده در کشورهای صنعتی %۰.۲۵ تولید ناخالص ملی برآورد شده است. تعیین زمان دقیق سرویس و رسوب زدایی مبدل پارامتر مهمی در میزان کاهش هزینه‌ها است. همچنین اعلام هشدار در صورت خروج مبدل از شرایط مجاز کارکرد عامل مهمی در جلوگیری از آسیب به مبدل است. سامانه تحت وب مانیتورینگ عملکرد مبدل حرارتی شرکت طاها قالب توس (طاها پایش) به شما این امکان را می‌دهد که از ویژگی‌های عملکردی مبدل خود (دماها، فشارها و دبی‌ها) به صورت برخط (آنلاین) آگاه شده و با پایش شرایط کاری علاوه بر جلوگیری از آسیب رسیدن به مبدل حرارتی در شرایط بحرانی فشار و دما از زمان دقیق سرویس مطلع شوید. علاوه بر این با سرویس مبدل حرارتی در زمان درست شما از بهره‌وری و سودآوری اطمینان حاصل می‌کنید.

Fouling in heat exchangers is a chronic problem in different processing industries. Costs have been estimated that 0.25% of the GNP of industrial countries.

Determining exact service and descaling time of heat exchanger is an important parameter for reducing costs. Meanwhile alarm announcement in case of exceeding allowable operating conditions is an important factor to prevent heat exchanger damage.

T.G.T. web-based heat exchanger performance monitoring system gives you the opportunity to be informed online of your heat exchanger functional data including temperatures, pressures and flow rates. By monitoring working conditions you will be able to prevent heat exchanger damage in temperature and pressure critical situations in addition to determining exact service time. Also, servicing heat exchanger in exact time makes you sure of optimization and profitability.



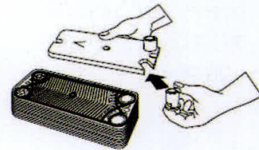
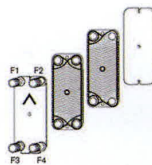
مبدل حرارتی صفحه ای واشردار فشرده پارسه

Compact Plate Heat Exchanger (Parseh)



مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای واشردار فشرده ترکیبی از مبدل‌های صفحه‌ای واشردار معمولی (GPHE) و مبدل‌های حرارتی فشرده‌ی لحیم شده (BPHE) می‌باشند که از واشر به عنوان آب‌بندی صفحات به جای جوش استفاده می‌شود به علت ابعاد کوچک، دارای نگهدارنده فریم نمی‌باشد و برای جریان کم تا متوسط سیال مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مدل، اتصالات مربوطه در داخل شکاف‌های از پیش طراحی شده در فریم قرار می‌گیرند و در زمان مونتاژ مبدل اتصالات در موقعیت خود قفل می‌شوند.

براساس نوع کاربرد، دو پیچ فشاری (یکی در هر انتها) یا سه پیچ فشاری (یک پیچ اضافی در وسط مبدل) استفاده می‌شود.



The Compact plate heat exchanger is a hybrid between classic gasketed plate heat exchanger (GPHE) and compact brazed heat exchanger (BPHE) sealed by gaskets rather than brazing. It is small, so it does not need the typical support frame. It can be used for applications with small and moderate flows. The frame plate has specially designed slots in which the connections can be inserted. When the plate package is assembled, the connections are locked into position. Based on application, two (one at each end) or three (with extra bolt in the middle of the plate) tightening bolts may be located in this model of PHE

مبدل حرارتی تمام جوشی Funke Block با همکاری شرکت Funke آلمان

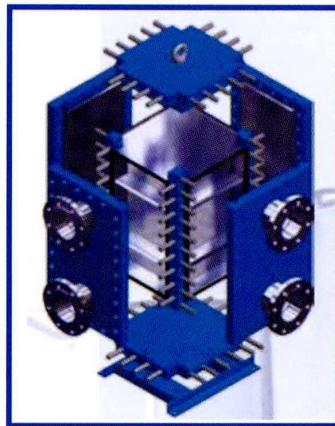
FunkeBlock full-welded heat exchanger in cooperation with Funke

در این نوع مبدل ها آب بندی بدون استفاده از واشر و با جوش صورت می گیرد. این نوع مبدل ها در مواقعی که سیالات خورنده و یا دما و فشار بالاتر از حد تحمل واشر است، مورد استفاده قرار میگیرد. فشار کاری این نوع مبدل ها بین ۱- تا ۴۰ بار و دمای کاری آن ها بین 40°C - تا 600°C است. شرکت طاهها قالب توس با همکاری شرکت آلمان انواع مبدل های تمام جوشی FunkeBlock را تولید می کند.

In this type instead of gasket, the heat exchanger is sealed by welding. Usually when fluids are corrosive, incompatible with gasket or temperature and pressure is out of gasket tolerate range, this type of heat exchanger is used.

Operating pressure is in -1 to 40 Bar interval and working temperature range is between -40°C to 600°C .

T.G.T. Co. manufactures all FunkeBlock heat exchangers types in cooperation with Funke.



مبدل حرارتی تمام جوشی Platular با همکاری شرکت Barriquand فرانسه

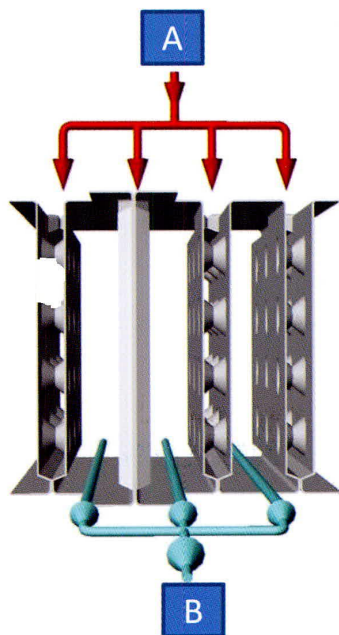
Platular full-welded heat exchanger in cooperation with Barriquand



این نوع مبدل ها عملکردی مشابه مبدل های Plate & Shell دارند و برای سیالات با ویسکوزیته بالا و یا سیالات دارای ذرات معلق (صنایع قند) بسیار مناسب است. همچنین این نوع مبدل دارای کاربردهای فراوانی در صنعت نفت و گاز و پتروشیمی است. شرکت طاها قالب توس با همکاری شرکت Barriquand فرانسه انواع مبدل های Platular را تولید می کند.

These type of heat exchangers have a function similar to plate & shell heat exchangers and are suitable for high viscosity fluids or fluids with suspended particles (suspension fluids). Also, Platular heat exchangers have a wide range of applications in oil and gas industries.

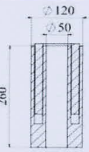
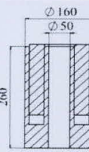
T.G.T. Co. manufactures all types of Platular heat exchangers in cooperation with Barriquand.

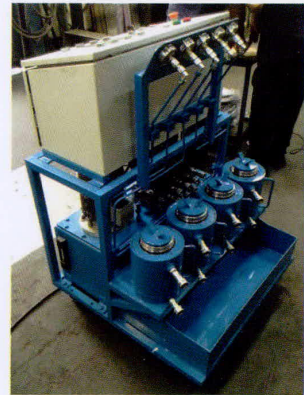


barriquand

TECHNOLOGIES
THERMIQUES

به منظور تسهیل باز بینی ، تعمیر و تعویض صفحات و گسکت های مبدل های حرارتی صفحه ای متخصصین شرکت طاهها قالب توس پکیج قابل حمل جک های هیدرولیکی فشرده کننده را طراحی کرده اند که با کمک آن به سادگی می توان با تحت فشار قراردادن فریم و صفحات مبدل حرارتی صفحه ای ، به سادگی و بدون نیاز به آچار های بادی تورک بالا، تای بولت های مبدل های حرارتی تا طول مشخص شده طبق استاندارد محکم کرد.

TGT80/4	TGT160/4	مدل Model
۸۰ تن 80 Tons	۱۶۰ تن 160 Tons	ظرفیت Capacity
4	4	تعداد جک ها No. of jacks
۴۰۰ بار، ۱ لیتر بر دقیقه (۱ عدد) 400 bar, 1 liter/min	۴۰۰ بار، ۱ لیتر بر دقیقه (۲ عدد موازی) 400 bar, 1 liter/min (two parallel)	مشخصات پمپ Pump specification
		ابعاد جک ها Jacks dimensions
۱۰ سانتی متر 10 cm	۱۰ سانتی متر 10 cm	کورس جک ها Jack stroke
۵۰ لیتر 50 liter	۹۰ لیتر 90 liter	حجم مخزن Tank volume



To facilitate inspection, repair and replacement of plates and gaskets in plate heat exchangers, TGT experts and engineers have designed hydraulic bolt tensioner that without high torque wrench can easily tighten bolts in a plate heat exchanger.

دستگاه اسیدشویی مبدل‌های حرارتی در محل

Cleaning In Place Unit For Heat Exchangers



یکی از مشکلاتی که تقریباً در همه صنایع رایج است، انباشتگی رسوب بر روی سطوح انتقال دهنده حرارت می‌باشد. شرکت طاه‌ها قالب توس دستگاه‌های شوینده متنوعی را برای رسوب زدایی و بازگرداندن عملکرد به سطوح بهینه فراهم آورده است.



به این ترتیب با استفاده از واحدهای اسیدشویی در محل (CIP) طاه‌ها قالب توس می‌تواند از عملیات زمان‌بر باز کردن صفحات مبدل‌های حرارتی اجتناب کرد. دستگاه‌های CIP شرکت طاه‌ها قالب توس را می‌توان برای انواع مبدل‌های حرارتی اعم از مبدل‌های حرارتی اسپیرال، مبدل‌های حرارتی پوسته‌لوله و مبدل‌های حرارتی صفحه‌های (گسکت دار، جوشی و بریز) به کار برد.

One of the most biggest problems that is common in all industries is fouling in heat exchangers. Taha Ghaleb Toos (T.G.T) Co. has designed and manufactured different types of cleaning in places units (CIPs)

CIPs are suitable for all kinds of heat exchangers including: spiral heat exchangers, shell and tube heat exchangers, gasket plate heat exchangers, welded and brazed heat exchangers.

CIP 800L	CIP 400L	
دو جداره (لایه داخلی 316L، لایه خارجی 304) 1000*1000*800 mm (L*W*H) Two layers (inner SS316L, outer SS304)	دو جداره (لایه داخلی 316L، لایه خارجی 304) 1000*800*500 mm (H*L*W) Two layers (inner SS316L, outer SS304)	مخزن Tank
استیل 304، الکتروپمپ ۷٫۵ کیلووات (دبی ۷۰۰ لیتر بر دقیقه در هد ۲۵ متر) SS304, 7.5kW (700 liter/min, 35m head)	استیل 304، الکتروپمپ ۷٫۵ کیلووات (دبی ۷۰۰ لیتر بر دقیقه در هد ۲۵ متر) SS304, 7.5kW (700 liter/min, 35m head)	الکتروپمپ Electro pump
304 استیل، 2*12 kW 2*12 kW, SS304	304 استیل، 2*12 kW 2*12 kW, SS304	هیتر الکتریکی Electric heater
✓	✓	کنترل دما Temperature control
✓	✓	تایمر نشست Washing timer
۲ عدد 0-6 بار 2 each 0-6 bar	۲ عدد 0-6 بار 2 each 0-6 bar	گیج فشار Pressure gauge
2000*1200*1800 mm	1600*900*1800 mm	ابعاد دستگاه (L*W*H) Dimensions

پتروشیمی - نفت و گاز (Petrochemical - Oil & Gas)

فاز ۳ و ۲ پارس جنوبی - فاز ۴ پارس جنوبی - فاز ۹ و ۱۰ پارس جنوبی - فاز ۱۴ پارس جنوبی - فاز ۱۵ و ۱۶ پارس جنوبی، فاز ۱۹ پارس جنوبی - نفت و گاز مارون - نفت و گاز آغاجری - نفت و گاز غرب - پتروشیمی مارون - پتروشیمی تندگویان - پتروشیمی خراسان - پتروشیمی جم - پتروشیمی امیر کبیر - پتروشیمی اراک - پتروشیمی مبین - پتروشیمی پردیس - پتروشیمی مروارید - پتروشیمی پلیمر کرمانشاه - پتروشیمی کاویان - شرکت نفت پارس - شرکت انرژی و پالایش خرد - نیروگاه طرشت - نیروگاه حرارتی شانزد اراک - SPEC کالای پتروشیمی - پتروپارس - نیر پارس - مدیریت طرح طرح‌های صنعتی ایران IPMI - پتروشیمی اروند - پلی پروپیلن جم - پتروشیمی سهند - نیروگاه برق و بخار دماوند - نیروگاه امیرآباد - نیروگاه نکا و ...



فولاد و صنایع وابسته (Steel and related Ind.)

فولاد مبارکه اصفهان - آلیاژ نشکن ساز تهران - مس قائم اصفهان - صنایع ملی فولاد کوثر - ذوب آهن اصفهان - فولاد سامان یزد - فولاد هرمزگان - فولاد شاهرود - فولاد معراج کردکوری - ذوب آهن البرز غرب فولاد اسپرینس - فولاد خراسان - فولاد مازندران - فولاد کیمیای صبا - فولاد خوزستان - فولاد غرب آسیا - شمش روی کیمیا - شمس ریزان البرز - ذوب آهن آسیا - ذوب آهن و نورد کرمان پارس آلیاژ کاوه - صنایع ریخته گری پرلیت آسیا - نورد و لوله اهواز - صنایع گسترش ذوب هامون - فارس ریزان مواد - ریخته گری ماشین سازی تبریز - ریخته گری ایران خودرو - ریخته گری توحید خراسان - ریخته گری فولاد طهرستان - کارخانه روی زنجان - شرکت آلومینیوم رضا - قوطی سازی آلومینیوم کاوه - شرکت آلومینیوم توس - شرکت خطوط لوله هامون - سامان ذوب - ایران ذوب اصفهان - فرآوری و ساخت قطعات - چدن پارس - صنایع ملی مس ایران - صنایع هفت الماس - مواد کاران - لوله و پروفیل کرمان - شرکت گداز نوین - شرکت آلیاژ نشکن ساز - کنترل گاز اکباتان - لوله سازی و ماشین سازی ایران - لوله و اتصالات کلاچ - شرکت نیپک - لوله و پروفیل آمل - لوله و پروفیل اراک - لوله و پروفیل کچو - لوله و پروفیل صبا - شرکت فرو آلیاژ کرمان - فولاد نطنز - صفا فولاد - فولاد یاسوج - فولاد ذوب دیاموند - ذوب فلز شرق - ذوب آهن کوروش کبیر - کاوه فولاد آریا - فولاد امیر کبیر کاشان - فولاد کاوه جنوب - فولاد سازان کابین - فولاد سینا - صدر فولاد و ...

برخی از مشتریان شرکت طاها قالب توس

Some of Customer



IGT Co.

تاسیسات (Heating, Ventilation and Air Conditioning)



فرودگاه های مهرآباد تهران و شهید هاشمی نژاد مشهد - آستان قدس رضوی - هتل مدینه الرضا - هتل پردیسان مشهد - جهاد دامپزشکی مشهد - مجتمع صنعتی گوشت مشهد - مجتمع خوابگاهی دانشگاه فردوسی مشهد - دانشگاه علوم پزشکی مشهد - دانشگاه آزاد اسلام شهر رضا - بیمارستان رضوی مشهد - هتل جم مشهد - متل توریست توس مشهد - باشگاه بانک صنعت و معدن تهران - استخر و مجتمع های آبی در شهر های مشهد، نیشابور، قم، خرم آباد، سنندج - زندان مشهد - رستوران پسران کریم مشهد - بیمارستان ۲۲ بهمن - صداوسیما خراسان رضوی - شرکت توانیر - فرماندهی انتظامی خراسان رضوی - شرکت آب منطقه ای خراسان - شرکت توسعه حریم حرم امام رضا - دانشگاه فردوسی مشهد - دانشگاه آزاد مشهد - پژوهشکده کاربرد پرتوها - دانشگاه آزاد گرگان - دانشگاه آزد بیرجند - دانشگاه آزاد تهران - دانشگاه فارابی - سردخانه آستان قدس - وزارت علو و تحقیقات - مرکز بین المللی مالی اقتصادی مشهد (پاژ) - پدیده شاندیز و ...

صنایع دارویی و غذایی و شیمیایی

(Chemical & Food & Pharmacy Ind.)

داروسازی ثامن - داروسازی تهران نیل - داروسازی اکتیورکو - دارویی سیناژن - داروسازی رها - شهید ایران - خوشگوار - پیسی - شیر پگاه خراسان - شیر پگاه گلپایگان - ساسان تهران - نیسان شرق - استیل صنعت ایران - بخار صنعت - غذایی عالیا گلستان - قند اصفهان - قند فیروز کوه - کشت و صنعت دعبل خزائی - کشت و صنعت امیر کبیر - خمیر پایه رضوی - کشت و صنعت نوشینه - کشت و صنعت خاوردشت - کشت و صنعت میرزا کوچک خان - اکسیژن سامان اراک - گاز کربنیک شهر کرد - پاینده گاز تهران - گروه صنعتی معدنی زر مهر - صنایع شیمیایی فارس - ژلاتین آریا - صنایع اوجان ایران - داروسازی سها - شیراز دینا و ...



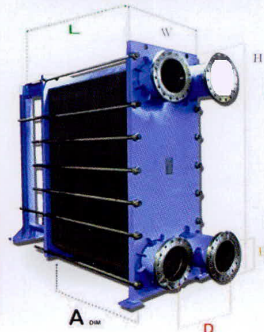
مخصات برخی ازمدل های صفحه ای شرکت طاها قالب توس



TGT Co.

PHE Specifications

Model	Flow Rate (m ³ /h)	H (mm)	W (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	Connection Design	Connection Diameter (in)
TP0	5	200	110	154	40	25	Studded	3/4
T10	45	1055	360	795	150	148	Studded	2 1/2
TV10	60	330	930	692	118	150	Flanged Nozzle	2
TV20	90	1270	442	868	212	240	Flanged Nozzle	3
TV40	200	1800	535	1227	257	279	Flanged Nozzle	4
TV80	500	2200	750	1525	382	310	Flanged Nozzle	6
TV180	2200	3140	1135	2155	540	490	Flanged Nozzle	16
TV100	200	1930	540	1520	262	240	Flanged Nozzle	4
TV150	500	1510	640	1092	314	230	Flanged Nozzle	6
TV250	900	2272	895	1406	420	350	Flanged Nozzle	10
TV350	2000	3113	1135	2030	560	440	Flanged Nozzle	14
TM3	15	480	180	357	60	61.5	Studded	1 1/4
TM6	60	920	320	640	140	140	Studded	2
TM10	200	1084	470	719	225	215	Flanged Nozzle	4
TM15	300	1885	650	1294	298	275	Flanged Nozzle	6
TM20	700	2260	780	1478	353	380	Flanged Nozzle	8
TM25	900	2895	920	1939	439	435	Flanged Nozzle	8-10
TM30	1800	2882	1150	1842	596	470	Flanged Nozzle	12-14
TTS6	60	704	400	380	203	136	Flanged Nozzle	2
TTS20	600	1405	800	698	364	360	Flanged Nozzle	8
TT255	600	2260	780	1478	353	285	Flanged Nozzle	8
TL10	200	1981	480	1338	218	215	Flanged Nozzle	4
TS16	60	990	356	592	135	150	Flanged Nozzle	2
TS26	200	1265	450	779	226	220	Flanged Nozzle	4
TS42	200	1675	450	1189	226	290	Flanged Nozzle	4
TS60	640	1692	825	919	420	350	Flanged Nozzle	8
TS64	500	2000	626	1320	285	300	Flanged Nozzle	6
TS91	500	2490	626	1800	285	300	Flanged Nozzle	6
TS118	400	2971	626	2280	292	300	Flanged Nozzle	6
TS85	1000	1985	1060	1140	570	360	Flanged Nozzle	12
TS145	1800	2856	1060	1720	570	360	Flanged Nozzle	12
TH-11	640	2100	760	1480	360	320	Flanged Nozzle	8
TH-15	200	1485	590	1000	250	250	Flanged Nozzle	4
TH-996	2000	3537	1300	2476	600	410	Flanged Nozzle	14
TH-90	1800	2239	1015	1520	360	320	Flanged Nozzle	12
TD143	350	1346	580	936	292	210	Flanged Nozzle	6
TDX30-S	1800	1878	1040	1178	540	350	Flanged Nozzle	12
TV13	60	805	310	625	130	107	Flanged Nozzle	2
TV20	60	1079	310	900	130	107	Flanged Nozzle	2
TV128	200	1236	502	882	514	190	Flanged Nozzle	4
TV45	350	1428	360	1302	234	250	Flanged Nozzle	6
TR6	750	1476	710	1175	431	300	Flanged Nozzle	8



افتخارات شرکت طاها قالب توس

دوازدهمین جشنواره ملی فن آفرینی شیخ بهایی ۲۳ اردیبهشت سال ۱۳۹۵ با حضور وزیر علوم، تحقیقات و فناوری و معاون علمی و فناوری رئیس جمهوری در هتل عباسی اصفهان آغاز شد و شامگاه شنبه ۲۵ اردیبهشت با معرفی و تجلیل از برگزیدگان طراحان کسب و کار، فن آفرینان و سرمایه گذاران برتر کشور به کار خود پایان داد.

این جشنواره بزرگ ملی که با حمایت معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری و همچنین وزارت علوم و به همت شهرك علمی و تحقیقاتی اصفهان برگزار شد بزرگترین جشنواره در کشور است که به ارزیابی شرکت های دانش بنیان می پردازد.

شرکت طاها قالب توس در بخش شرکت های رشد یافته (فن آفرینان) به خاطر ارائه طرح «ساخت انواع قالب و تولید مبدل حرارتی صفحه ای» پس از ۵ مرحله داوری موفق به دریافت تندیس زرین جشنواره شد.



برگزیده دوازدهمین جشنواره شیخ بهایی در بخش شرکت های رشد یافته (فن آفرینان) با ارائه طرح «ساخت انواع قالب و تولید مبدل حرارتی صفحه ای» در اردیبهشت سال ۱۳۹۵



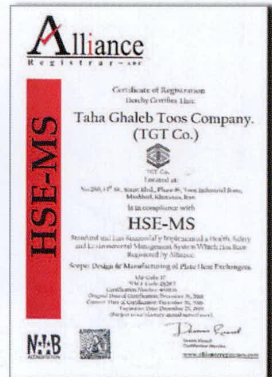
T.G.T. ISO9001:2015 Certificates



گواهی استاندارد کارخانه ای تولید مبدل حرارتی صفحه ای



T.G.T. CE Certificates



TGT HSE-MS Certificate





مشهد . شهرک صنعتی توس . فاز یک ا
انتهای بلوار صنعت . خیابان ۱۳ قلعه ۳۰۰
تلفن : ۳۴۱۳۱۷۴ - ۳۴۱۳۱۷۴ - ۳۴۱۳۱۷۴ (۰۵۱)
مستقیم بازرگانی : ۳۴۱۳۱۷۴ - ۳۴۱۳۱۷۴ (۰۵۱)
فاکس : ۳۴۱۳۱۷۴ (۰۵۱)

No.300,13th, Sanaat Blvd, 1 St Phase,Toos
Industrial, Estate, Mashhad, Iran
Tel: (+9851) 35410161 - 35413174 - 35410264
Fax: (+9851) 35413700
Commercial tel: (+9851) 35410445 - 35412098
Email: info@tgt-phe.com

www.tgt-phe.com





TGT Co.

Plate Heat Exchangers

Design | Application | Performance

Dr. Anooshirvan Farshidianfar

Professor of Ferdowsi University of Mashhad

Dr. Ardeshir Farshidianfar

Lecturer of Islamic Azad University of Mashhad

هدف کلی این کتاب تشریح جامع انواع مبدل‌ها، مزایا و معایب آنها، طراحی هیدرولیکی و حرارتی کامل آنها و نیز ارزیابی پیشرفته‌ترین دستاوردها در خصوص این نوع مبدل‌ها می‌باشد.



9 78 6007 219140