



واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

درس مبدل های حرارتی

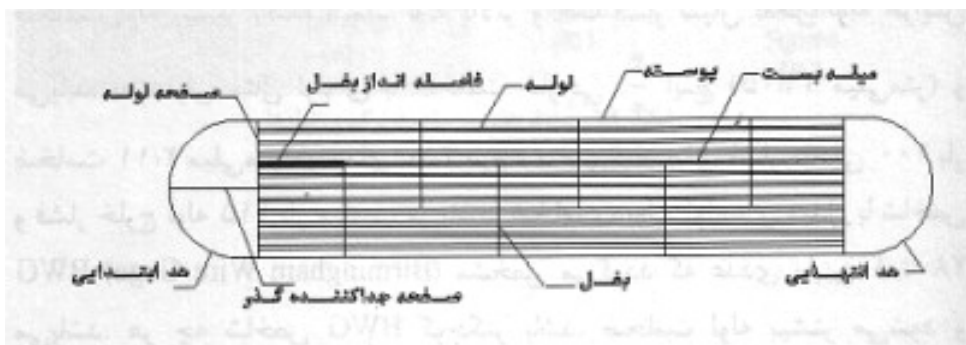
فصل سوم- اجزای مبدل های حرارتی پوسته و لوله

دکتر قاسم عرب

مقدمه

۲

- مبدل های پوسته و لوله از یک سری لوله که بصورت موازی در داخل یک پوسته استوانه ای قرار دارند تشکیل شده اند.
- اجزای اصلی عبارتند از:



- لوله
- پوسته
- صفحه لوله
- هد ابتدایی و انتهایی
- میله بست
- صفحه جدا کننده گذر
- بغل و فاصله انداز بغل

لوله ها – قطر و طول لوله

۳

- لوله ها سطح انتقال حرارت بین سیال جاری داخل لوله ها و سیال خارج آنها (داخل پوسته) را تشکیل می دهند.
- این لوله ها با لوله هایی که در خطوط جریان در فرایندها مورد استفاده قرار می گیرند به لحاظ ضخامت متفاوت می باشد.
- قطر لوله مبدل های حرارتی بین 0.25 in (16.35 mm) تا 2 in (58 mm) می باشد.
- معمولا در صنایع از لوله هایی با قطر 1 in , 0.75 استفاده می گردد.
- هر چه قطر لوله کمتر باشد هزینه ساخت مبدل حرارتی کاهش خواهد یافت اما افت فشار سیال سمت لوله با کاهش قطر افزایش می یابد.
- در صورتی که سیال سمت لوله رسوب زا باشد بهتر است از قطرهای بزرگتر استفاده شود.
- برای داشتن مبدلی ارزاتر با سطح مورد نیاز خواسته شده، باید قطر مبدل را تا حد امکان کوچک و طول لوله های آنرا تا حد امکان زیاد کرد.
- بایستی دقت کرد که نسبت طول به قطر مبدل بایستی در محدوده مجاز ۵ تا ۱۰ قرار داشته باشد.
- صرف نظر از نوع مبدل، باید در محل نصب مبدل حداقل دو برابر طول لوله ها فضا باشد تا بتوان لوله ها را تعویض نمود.
- طول های استاندارد لوله ها عبارتند از: 1 m, 1.5 m, 2 m, 3 m , ...

مبدل های حرارتی – دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

لوله ها- ضخامت لوله ها

۴

- ضخامت لوله ها بایستی به گونه ای انتخاب گردد تا در مقابل خوردگی، تنش های ناشی از فشار کاری مبدل و ارتعاش مقاومت کافی را داشته باشد.
- هر چه ضخامت لوله بالاتر باشد قیمت لوله بالاتر و افت فشار سیال داخل لوله افزایش می یابد.
- لوله ای با ضخامت خارجی $\frac{3}{4}$ اینچ (19.05 mm) و ضخامت 2.11 mm در دمای 350 oC برای فشار داخلی 200 bar و فشار خارج لوله 115 bar مناسب می باشد.
- ضخامت دیواره لوله های مبدل با شاخص BWG (Birmingham Wire Gage) مشخص می گردد که عددی بین ۱ تا ۲۸ می باشد. هرچه شاخص BWG کوچکتر باشد ضخامت لوله بیشتر می شود و بالعکس.
- متداولترین ضخامت استاندارد لوله های مبدل که مورد استفاده قرار می گیرند عبارتند از:
0.89 mm, 1.24 mm, 1.65 mm, 2.11 mm, 2.77 mm & 3.4 mm

قطر خارجی لوله (میلیمتر)	ضخامت جداره (میلیمتر)				
16	1.2	1.6	2	-	-
20	-	1.6	2	2.6	-
25	-	1.6	2	2.6	3.2
30	-	1.6	2	2.6	3.2
38	-	-	2	2.6	3.2
50	-	-	2	2.6	3.2

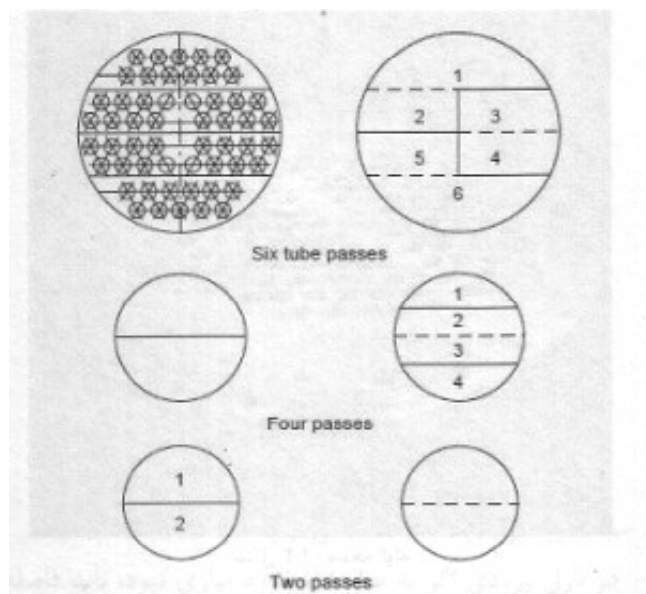
- مشخصات انواع لوله ها در جدول ارائه شده است.

مبدل های حرارتی – دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

-

تعداد و گام لوله ها

- مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد پادگار امام خمینی (ره) (شهرری)



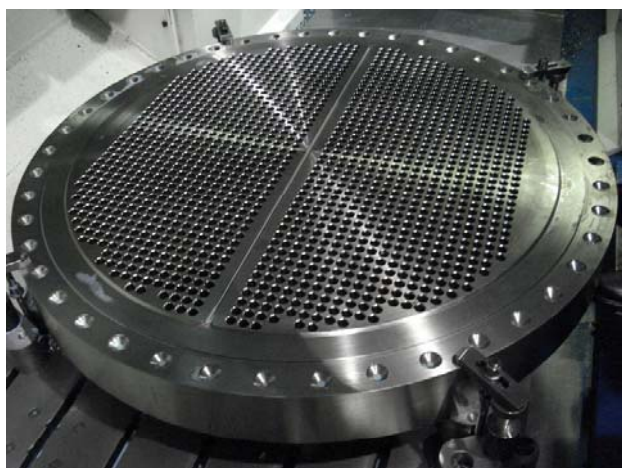
- تعداد گذرهای لوله می تواند هم زوج و هم فرد باشد اما معمولاً زوج هستند.
- تعداد گذرهای لوله از ۱ تا ۱۶ گذر می تواند باشد. با توجه به نوع مبدل تعداد لوله های گذر در زیر ارائه شده است.

مجاز (غیر معمول)	مجاز (معمول)	نوع مبدل حرارتی
3, 5, 10, 12, 14	1, 2, 4, 6, 8	Fixed tube sheet
6, 8	2, 4	U- type
10, 12, 14	1, 2, 4, 6, 8	Floating Head

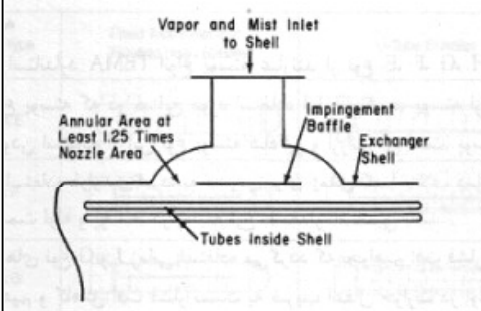
مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

صفحه لوله

- صفحه لوله برای نگهداری لوله ها در دو انتهای مبدل حرارتی پوسته و لوله بکار می رود که تعداد سوراخ هایی برابر تعداد لوله های مبدل می باشد. بر اساس آرایش و گام لوله ها، تعداد سوراخ ها در یک قطر معین تغییر می کند. برای جلوگیری از نشتی سیال سمت لوله به سیال سمت پوسته، لوله ها را به صفحه لوله جوش داده یا Expand می کنند.



مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)



این صفحه جلوی دهانه نازل ورودی سمت پوسته نصب می گردد. اگر سیالی که وارد پوسته می شود دارای سرعت بالا یا ذرات ریز باشد در هنگام ورود به لوله هایی که در نزدیکی سیال ورودی قرار دارند آسیب وارد کرده و موجب می گردد تا لوله ها بسرعت فرسوده شوند. برای جلوگیری از چنین آسیبی از صفحه برخورد استفاده می شود تا بتوان آسیب وارد به لوله ها را به کمترین مقدار ممکن رساند.

قطر این صفحه از دهانه ورودی نازل پوسته بیشتر است. ضخامت صفحه برخورد در حدود 6 mm است. فاصله صفحه برخورد از دهانه نازل ورودی از رابطه روبرو بدست می آید.

$$h_{in} = \frac{d_{in}}{4}$$

$$h_{out} = \frac{d_{out}}{6}$$

فاصله آخرین ردیف لوله ها با دهانه نازل خروجی عبارتست از:

نکات:

- همه گازها، مخلوطهای مایع و بخار و بخارات اشباع حتما نیاز به صفحه برخورد دارند.
- در نازل ورودی در صورتی که به صفحه برخورد نیازی نباشد فاصله اولین ردیف لوله تا نازل ورودی $d_{in}/6$ باشد.
- در صورتی که دسته لوله قابلیت دوران ۱۸۰ درجه داشته باشد باید فاصله $d_{in}/4$ از هر دو طرف ورودی و خروجی رعایت شود.

$\rho V^2 \left(\frac{lb}{ft^2 s} \right)$	$\rho V^2 \left(\frac{kg}{m^2 s} \right)$	
1500	2230	سیالات تک فاز غیر خورنده و غیرساینده
500	744	تمامی سیالاتی که در نقطه جوش خود وارد می شوند
0	0	گازها یا بخارات مخلوط مایع و بخار اشباع

بررسی نیاز به صفحه برخورد

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

پوسته

- بر اساس استاندارد TEMA انواع پوسته عبارتند از نوع E, F, G, H, J, X, K.
- رایجترین نوع مورد استفاده بعلت سادگی و ارزانی در صنایع E است.
- نوع F در زمانی که اختلاف دمای ایجاد شده بین سیال سمت لوله و پوسته برای نوع E نامناسب باشد استفاده می شود.
- از پوسته های J, G زمانی استفاده می شود که بخواهیم افت فشار سمت پوسته را کاهش دهیم و کاهش افت فشار نسبت به ضریب انتقال حرارت در اولویت قرار گیرد.
- پوسته نوع X برای کندانسورها، جریان های گازی فشار پایین و تقطیر در خلا مناسب می باشد. افت فشار در نوع X نسبت به پوسته نوع E و J کمتر می باشد.
- پوسته نوع H برای سیستم هایی که سیال سمت پوسته فشار عملیاتی پایینی داشته باشد مناسب است.
- پوسته نوع K زمانی استفاده می گردد که در طرف پوسته جوشش اتفاق می افتد. بنابراین این نوع پوسته در جوش آور نوع Kettle کاربرد دارد.

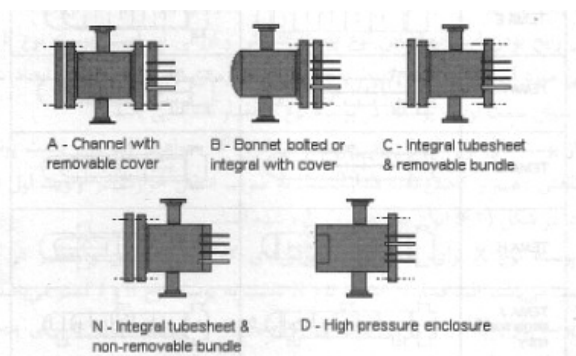
مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

Shell Type	Fixed Tubesheet and Floating Head Bundles	U-Tube Bundles
TEMA E		
TEMA F		
TEMA G		
TEMA H		
TEMA J single nozzle entry		
TEMA J double nozzle entry		
L longitudinal flow		
TEMA X cross flow		

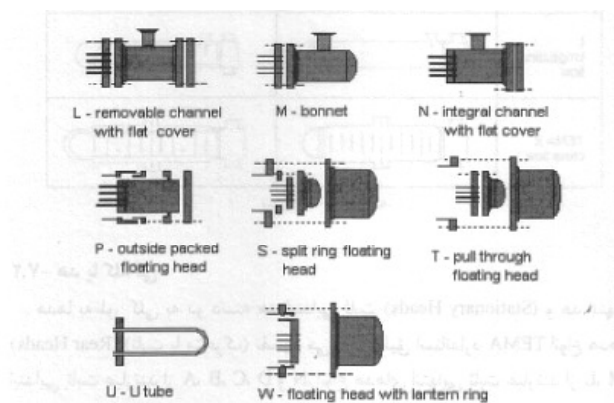
مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

هد یا کله گی

انواع هدهای ابتدایی



انواع هدهای انتهایی



□ به دو دسته هدهای ابتدایی ثابت و هد انتهایی (ثابت یا متحرک) تقسیم می شوند.

□ هد نوع A: قابل باز شدن، جهت تمیز کاری و تعمیر اتصالات

□ هد B: سیال تمیز.

□ هد C, N: استفاده در سیستم های فشار بالا

□ هد D: قابل استفاده در سیستم های با فشار بسیار بالا

□ هدهای انتهایی نوع N, M, L: استفاده در مبدل

های Fixed tube sheet

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

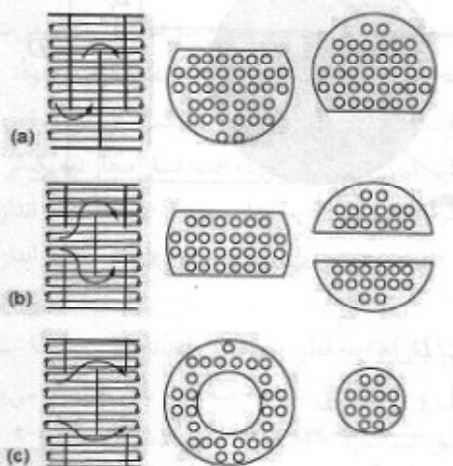
- میله ای توپر است که سیال درون آن حرکت نمی کند. میله بست از دو طرف روی صفحه لوله پیچ شده است و با کمک آن، بغل ها در جای خودشان استقرار می یابند. وظیفه اصلی میله بست، جلوگیری از ارتعاش دسته لوله می باشد.
- تعداد میله بست بستگی به قطر پوسته دارد. هر چه قطر پوسته بیشتر باشد تعداد میله بست بیشتر می شود.

قطر پوسته		قطر میله بست		تعداد کمین میله بست
in	mm	in	mm	
6-15	152-381	3/8	9.5	4
16-27	406-686	3/8	9.5	6
28-33	711-838	1/2	12.7	6
34-48	864-1219	1/2	12.7	8
49-60	1245-1524	1/2	12.7	10
60-100	1549-2540	5/8	15.9	12

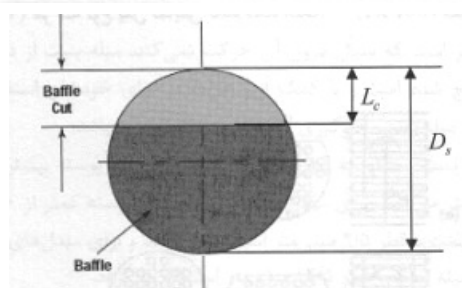
مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

بغل

- بغل ها وظیفه هدایت جریان سیال در پوسته را بر روی لوله ها بر عهده دارند تا سرعت سیال و ضریب انتقال حرارت را افزایش دهند.
- بغل ها به سه دسته تقسیم می شوند:
- ۱ تکه ۲ تکه ۳ تکه
- بغل های یک تکه نسبت به بغل های دو تکه و سه تکه افت فشار بیشتری دارند که دلیلش را می توان طول بیشتر مسیر متقاطع نسبت به دو نوع دیگر دانست.
- پنجره بغل (Baffle cut): عموماً ارتفاع پنجره بغل بین ۱۵ تا ۴۵٪ ارتفاع بغل می باشد. اگر ارتفاع پنجره بغل زیاد انتخاب شود بغل ها همپوشانی کافی نداشته و در نتیجه توزیع سیال سمت پوسته مناسب نخواهد بود و ایجاد جریان های ساکن می کند.
- جهت داشتن انتقال حرارت مناسب، مقدار بهینه پنجره بغل حدود ۲۰ تا ۲۵٪ می باشد.



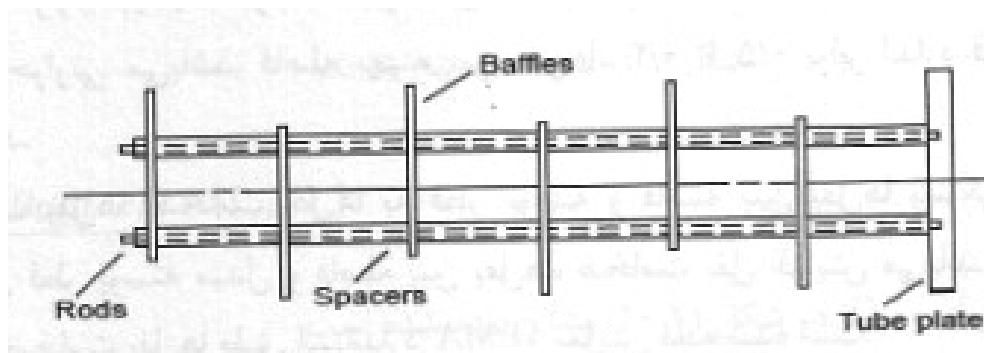
شکل ۹-۲ - انواع بغل ها (a) یک تکه، (b) دونکه، (c) سه تکه



$$Baffle\ cut = \frac{L_c}{D_s} * 100$$

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

- قطعاتی از لوله با قطر بیشتر از میله بست با طول های کوتاه هستند که بر روی میله بست قرار می گیرند و وظیفه آنها حفظ فاصله بین دو بغل مجاور هم می باشد.



مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

الزامات طراحی مبدل ها

- ۱- سرعت سیال داخل لوله و پوسته
- ۲- افت فشار داخل لوله و پوسته
- ۳- اختلاف دمای سیال خنک کننده
- ۴- سیال داخل لوله و پوسته
- ۵- پنجره بافل
- ۶- فاصله بین بافل ها
- ۷- قطر لوله
- ۸- آرایش لوله ها
- ۹- نسبت طول به قطر مبدل حرارتی

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

- هر چه سرعت سیال داخل لوله یا پوسته افزایش یابد، افت فشار و ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد و رسوب دهی سیال کمتر خواهد بود.
- برای افزایش سرعت با محدودیت میزان افت فشار مجاز روبرو هستیم.
- افزایش سرعت تا زمانی که در محدوده افت فشار مجاز قرار داشته باشیم باعث می ود تا هزینه ساخت مبدل طراحی شده کاهش یابد. بنابراین بایستی سعی شود تا سرعت سیال در بالاترین مقدار ممکن انتخاب گردد.
- محدوده سرعت مناسب بصورت زیر است:

مایعات

سیال داخل لوله: $1 - 2 \text{ m/s}$ سیال داخل پوسته: $1 - 0.3 \text{ m/s}$

بخار و گازها:

در شرایط خلاء: $50 - 70 \text{ m/s}$ فشار اتمسفریک: $10 - 30 \text{ m/s}$
فشارهای بالا: $5 - 10 \text{ m/s}$

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

افت فشار داخل لوله

- طراحی بایستی به گونه ای باشد که در محدوده افت فشار مجاز قرار گیریم.
- میزان افت فشار مجاز بستگی به نوع سیال و شرایط فرایندی دارد.
- میزان افت فشار مجاز مایعات

شرایط فرایندی	میزان افت فشار (بار)
گرانروی کمتر از 1 cp	0.35
گرانروی بین 1 cp تا 10 cp	0.5 - 0.7

- میزان افت فشار مجاز گازها و بخارات داخل پوسته

شرایط فرایندی	میزان افت فشار (بار)
خلاء زیاد	0.4 - 0.8
خلا متوسط	فشار مطلق 0.1
۱ - ۲ فشار بر حسب بار	فشار نسبی سیستم 0.5
۱۰ > فشار بر حسب بار	فشار نسبی سیستم 0.1

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

□ کمینه اختلاف دمای آب خنک کننده (Cooling water) در حدود ۵ تا ۷ درجه سانتیگراد است.

□ کمینه اختلاف دمای سیال خنک کننده حدود ۳ تا ۵ درجه سانتیگراد است.

□ بیشینه اختلاف دمای آب خنک کننده نباید بیش از ۳۰ درجه سانتیگراد باشد.

□ سیال داخل لوله و پوسته:

□ خوردگی: سیال خورنده داخل لوله فرستاده می شود تا در صورت ایجاد خوردگی فقط لوله تعویض گردد. اگر به داخل پوسته فرستاده شود پوسته و لوله بصورت همزمان خورده می شوند و هزینه نگهداری افزایش می یابد.

□ رسوب: سیالی که تمایل به رسوب زایی بیشتری دارد در داخل لوله فرستاده می شود زیرا سرعت داخل لوله بیشتر است و افزایش سرعت تا حدی رسوب دهی را کنترل می کند و ثانیا لوله قابل تمیز کردن می باشد.

□ دمای سیال: سیال با دمای بالاتر داخل لوله فرستاده می شود. زیرا اتلاف دما کاهش و ایمنی فرایند بیشتر می شود.

□ فشار: سیال با فشار بالاتر داخل لوله فرستاده می شود زیرا هزینه ساخت لوله با فشار بالاتر کمتر از ساخت پوسته با فشار بیشتر است.

□ افت فشار: در یک افت فشار یکسان، ضریب انتقال حرارت سمت لوله از ضریب انتقال حرارت سمت پوسته بیشتر است. از اینرو اگر محدودیت افت فشار برای یک سیال وجود داشته باشد آن سیال با این محدودیت داخل لوله فرستاده می شود.

□ گرانروی: افت فشار با طول لوله رابطه مستقیم و با قطر لوله نسبت عکس دارد. لذا سیال با گرانروی بیشتر بخاطر قطر بیشتر و افت فشار کمتر به داخل پوسته فرستاده می شود.

□ دبی جریان: معمولا سیال با دبی کمتر به داخل پوسته فرستاده می شود زیرا هزینه ساخت را کمتر می کند.

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

پنجره بفل

□ هر چه ارتفاع پنجره بفل بیشتر باشد افت فشار سیال سمت پوسته و ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد و در صورتی که ارتفاع را کاهش دهند افت فشار و ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد. مقدار بهینه پنجره بفل بین ۲۰ تا ۲۵ درصد قطر پوسته است.

□ فاصله بین بفل ها:

□ معمولا فاصله بین بفل های مرکزی بین ۰.۲ تا ۱ برابر قطر پوسته است. مقدار بهینه این فاصله بین ۰.۴ تا ۰.۵ برابر قطر پوسته است.

□ در طراحی کندانسورها در صورتی که میعان در سیال سمت پوسته اتفاق بیفتد فاصله بین بفل ها افزایش می یابد. این فاصله برای کندانسورها معمولا برابر قطر پوسته است.

□ قطر لوله:

□ در طراحی مبدل های حرارتی پوسته و لوله استفاده از لوله با قطر خارجی ۰.۷۵ in رایجتر است.

□ آرایش لوله ها:

□ وقتی بخواهند ضریب انتقال حرارت سمت پوسته افزایش یابد از آرایش مثلثی استفاده می شود.

□ اگر سیال سمت پوسته رسوب زا باشد از آرایش مربعی استفاده می شود.

□ نسبت طول به قطر مبدل حرارتی

□ نسبت مناسب طول به قطر مبدل در بازه ۵ تا ۱۰ می باشد. این مقدار بایستی به ۱۰ نزدیکتر باشد. هر چه مبدل دارای قطر کمتر و طول بیشتر باشد هزینه ساخت آن در یک سطح حرارتی یکسان از مبدلی با قطر بیشتر و طول کمتر، ارزانتر است.

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)