نگرشی بر روشهای بهبود کارکرد مبدل های حرارتی پوسته-لوله ای

امین شفقت*

محمد رضا جعفری نصر ، سیروس شفیعی

دانشگاه صنعتی سهند تبریز ، دانشکده مهندسی شیمی

چکیده:

مبدل های پوسته لوله ای پر کاربردترین نوع مبدلها درصنایع می باشند. این نوع مبدلها اگرچه دارای معایب و اشکالاتی هستند اما بدلیل مزایایی که فراهم می کنند همچنان در بسیاری از شرایط انتخاب اول می باشند. لذا با توجه به وسعت کاربرد این مبدلها ، محققین تلاشهای فراوانی در جهت توسعه کارایی آنها انجام داده اند تا بتوانند کارایی این مبدلها را به مبدلهای فشرده نزدیک سازند.

در این مقاله پس از معرفی مزایای مبدلهای پوسته – لوله ای، به انواع تکنولوژیهای موجود در زمینه بهبود کارکرد این مبدلها شامل استفاده از وسایل افزاینده انتقال حرارت در داخل لوله[1]، هندسه های توسعه یافته در سمت پوسته (بفلهای میله ای[2] و بفلهای حلزونی[3]) ولوله های ویژه (لوله های پره دار ، لوله های پیچشی و...) پرداخته شده است. در ادامه توسعه های نرم افزاری و پیش بینی های صورت گرفته در زمینه مبدلهای حرارتی ارائه شده و در نهایت مقایسه ای بین مبدل با بفلهای میله ای و بفلهای قطایی و اثر بکار گیری لوله های پره دار در آنها، با استفاده از نرم افزار Aspen انجام گرفته است.

کلمات کلیدی: مبدل پوسته- لوله ای ،تکنولوژیهای بهبود انتقال حرارت،بفلهای حلزونی

1-Insert
2- ROD Baffle
3- Helical Baffle

مقدمه

انتقال حرارت در سیالهای فرایندی یکی از ضروری‌ترین بخشهای اغلب فرایندهای شیمیایی می‌باشد. مبدلهای حرارتی در اندازه‌های بسیار کوچک و بسیار بزرگ ساخته می‌شوند. کاربرد مبدلهای حرارتی بسیار وسیع می‌باشد و در صنایع مختلف از جمله نیروگاههای تولید برق، پالایشگاهها، صنایع غذایی، داروسازی، صنایع پتروشیمی، سردخانه‌ها و سیستم‌های گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها و بطور کلی هر جا که مسئله تبدیل و تبادل انرژی مطرح باشد مورد استفاده قرار می‌گیرند. مرسوم‌ترین تجهیزات انتقال حرارتی که در اکثر جاها استفاده می‌شود، مبدل‌های حرارتی پوسته- لوله‌ای است. بیش از ۴۰ درصد مبدلهای حرارتی که در صنعت استفاده می‌شوند از نوع مبدلهای پوسته و لوله می‌باشند و طبق تحقیقات صورت گرفته در سال ۱۹۹۴ مبدلهای حرارتی پوسته و لوله از فروش سالیانه معادل ۶۵۰ میلیون دلار برخوردار بوده‌اند.

در حدود دهه‌های ۶۰ مبدلهای پوسته- لوله‌ای به‌طور نسبتاً خوبی گسترش یافته بودند و از آنها به‌عنوان تکنولوژی بدون تغییر یاد می‌شد. امّا ، از دهه ۶۰ به بعد تمایل زیادی به افزایش انتقال حرارت در مبدلهای پوسته – لوله‌ای صورت گرفت.

دو روشی که عموماً مورد استفاده قرار گرفت استفاده از لوله‌های با پره کوتاه جهت افزایش عملکرد در سمت پوسته و استفاده از وسایل افزاینده انتقال حرارت در داخل لوله جهت بهبود انتقال حرارت در داخل لوله بود.[1]

توسعه هایی نیز از آن به بعد صورت گرفت که از آن جمله معرفی بفلهای جدیدی به نام ROD بفلها بود که توسط شرکت فیلیپس انجام گرفت.

در دهه‌های ۸۰ و ۹۰ دیگر مبدلهای حرارتی پوسته – لوله‌ای ازجمله مبدلهای هلیکس[1] و مبدلهای لوله پیچی[2] توسعه یافتند.هر کدام از این طراحی ها میتوانند مزایای ویژه‌ای برای برخی کاربردهای خاص داشته باشند.

پیش‌بینی می‌شود که در طول ۵ تا ۱۰ سال آینده توسعه‌های مهمی در این نوع از مبدلها صورت گیرد البته ممکن نیست گفته شود که چه توسعه‌هایی را می‌توان انتظار داشت ولی در کل روشهای زیرکانه‌ای جهت مبدلهایی با صرفه اقتصادی بیشتر؛ با لوله‌های کوتاه تر پیش‌بینی می‌گردد. ضمناً توسعه‌هایی به جهت پیشرفت بیشتر در زمینه وسایل افزاینده انتقال حرارت صورت خواهد پذیرفت.

مزایای مبدلهای پوسته- لوله ای

در مقایسه با مبدلهای فشرده[3]، مبدلهای حرارتی لوله‌ای، بزرگتر، ضعیف‌تر و ناکارآمدتر هستند. بنابراین چه دلیلی دارد که بحث روی این مبدلها ادامه یابد؟ پاسخ این است که مبدلهای فشرده در برخی حالتها (بالاخص در فشارهای بالا) قابل کاربرد نیستند لذا این نوع مبدلها(مبدلهای حرارتی پوسته- لوله‌ای) در این حالتهای خاص دارای ویژگیهای خاصی نیز هستند.

مزایای این مبدلها به صورت زیر خلاصه می‌شوند :[2]

ـ گستردگی اطلاعات طراحی مکانیکی و حرارتی و استانداردهای موجود.

ـ قابل کاربرد برای رنج وسیعی از دماها و فشارها (فشارهای تا ۳۰۰ باردر پوسته وتا ۱۴۰۰ بار در سمت لوله و دماهای تا $^{\circ}$۸۰۰ سانتیگراد[3]).

ـ در دسترس بودن روشهای ساخت.

ـ نگهداری آسان : بازکردن ، معاینه‌کردن ، تمیزکردن ، تعمیرکردن ، توسعه‌دادن

ـ اطلاعات زیادی که از دانش و تجربه‌های صورت گرفته برای شرایط و حالتهای گوناگون در چندین دهه،وجود دارد.

ـ قابلیت ساخت از هر نوع فلز.

1- Helixchanger
2- Twisted – tube

۳- منظور از مبدلهای فشرده مبدلهای بغیر از مبدلهای پوسته=لوله ای است که نسبت سطح به حجم آنها بیشتر از(۱/m) ۷۰۰ باشد.

مبدلهای حرارتی فشرده، سایز کوچکتر، وزن کمتر و دارای کارایی بالاتری هستند و جریان مخالف کامل ایجاد می‌کنند. مبدلهای حرارتی پوسته- لوله‌ای با اینکه می‌توانند به صورتی آرایش یابند که جریان کاملاً مخالف داشته باشند امّا نمی‌توانند نسبت سطح به حجم مبدلهای فشرده را داشته باشند. به‌هرحال، کاربرد وسایل افزاینده انتقال حرارت و هندسه‌های جدید مبدلهای لوله‌ای می‌تواند عملکرد آنها را به مبدلهای فشرده نزدیک سازد درحالیکه مزایای ذکر شده بالا را هم خواهد داشت.

جهت رسیدن به ضرایب انتقال حرارت بالا، سرعت سیال عبوری از سطوح مبدل باید ماکزیمایز شود البته با توجه به افت فشار مجاز. اما ،حتی اگر افت فشار رعایت شود، توانایی مبدلهای لوله‌ای جهت ایجاد انتقال حرارت مؤثر ممکن است ناشی از موارد زیر محدود شود:

- سیالات ویسکوز که در جریان آرام هستند، حتی در افت فشارهای بالا.
- نیاز به چندگذرلوله که باعث ایجاد پنالتی روی نیروی محرکه دمایی می‌شود.
- لرزش لوله که توسط سرعتهای جریان متقاطع سمت پوسته ایجاد می‌شود.
- جریانهای کنارگذر (نشتی) سمت پوسته که توسط افت فشارهای بالاتر تقویت می‌شوند.
- افت فشار ناشی از چند گذر لوله و گذرهای متقاطع سمت پوسته.

طراح مبدل حرارتی نیاز دارد تا بین این فاکتورها تعادلی برقرار کند و یک طراحی معرفی کند تا شرایط افت فشار را مرتفع سازد در حالیکه لرزش هم نباشد.

جهت افزایش انتقال حرارت باید یک راهی برای فشرده‌شدن و کاراترشدن برای حرارتی لوله‌ای پیدا کرد.لذا در بسیاری از حالتها نیاز داریم که از دو یا چند تکنولوژی افزایش انتقال حرارت به صورت همزمان استفاده کنیم.

تکنولوژی های بهبود انتقال حرارت در مبدلهای پوسته- لوله‌ای

همانطور که گفته شد،کارایی حرارتی مبدلهای لوله ای، می‌تواند با استفاده از وسایل افزاینده انتقال حرارت بهبود یابد. در بسیاری از حالتها، این وسایل افزاینده انتقال حرارت می‌توانند برای اصلاح تجهیزات موجود بکار روند.

برخی از کاربردهای این وسایل می‌تواند برای شرایط زیر باشد :

- طراحی مبدلهای حرارتی جدید برای کاهش سایز، وزن و هزینه.
- سازگاری تجهیزات جدید تا بار جدیدی را در حداقل هزینه انجام دهند.
- اصلاح با افزاینده‌های انتقال حرارت جهت رفع گلوگاه‌ها[1].

جهت ماکزیمم شدن میزان کارایی مبدل حرارتی با داشتن کمترین هزینه های عملیاتی و سرمایه گذاری ، سه دیدگاه در مبدل مورد نیاز است:[3]

۱- ضرایب انتقال حرارت بالاتر و سطح انتقال حرارت بیشتر . این دو فاکتور نرخ انتقال حرارت را برای یک اختلاف دمای داده شده ، افزایش می دهند. ضریب انتقال حرارت بالا میتواند با استفاده از سطوح انتقال حرارتی که باعث افزایش آشفتگی جریان میشود بدست آید.

۲- افت فشار کمتر . هزینه های پمپاژ وابسته به افت فشار درون مبدل است. بنابراین افت فشار کمتر به معنای هزینه های عملیاتی کمتر است.عموماً وسایل ویا سطوحی که ضرایب انتقال حرارت بالا فراهم میکنند گرادیان فشار بالایی ایجاد می کنند.

۳- آرایش جریان مخالف خالص . جهت بدست آوردن ماکزیمم اختلاف دمای متوسط ، نیاز به جریان مخالف خالص داریم. هر تغییری از این حالت جریان باعث کاهش اختلاف دمای متوسط خواهد شد ولازم است یک فاکتور تصحیح برای اختلاف دمای متوسط لگاریتمی اضافه شود. بیشتر مبدل های فشرده ، جریان مخالف خالص فراهم می

1- debottlenecking

کنند.

به طور کلی ، دو را ه اصلی برای افزایش انتقال حرارت در مبدلهای مرسوم وجود دارد:

- افزایش سطح انتقال حرارت.
- افزایش ضریب انتقال حرارت.

برای مبدلهای پوسته- لوله‌ای هر دو این راهها قابل دسترس است. هر دو روش فوق را می‌توان برای سمت پوسته مبدلهای حرارتی استفاده نمود، ولی در سمت لوله ، افزایش سطح بسیار محدود است، بنابراین بهبود انتقال حرارت در این بخش از مبدل معمولاً با افزایش ضریب انتقال حرارت امکان‌پذیر است. در بیشتر موارد این هدف با استفاده از وسایل افزاینده انتقال حرارت داخل لوله[1] تحقق می‌یابد.اما در سمت پوسته، برای نمونه لوله های پره کوتاه می‌توانند سطح تماس با سیال پوسته را افزایش دهند، و یا با نصب مبدلهای ویژه‌ای مثل مبدلهای حلزونی می‌توان سرعت در سمت پوسته را افزایش داد که بموجب آن ضرایب فیلمی افزایش می‌یابد.

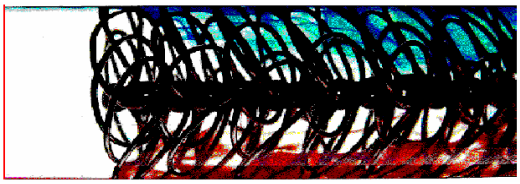
در ادامه به برخی از روشهاوتکنیکهای بهبود کارکرد مبدل های پوسته-لوله ای که امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است، اشاره می گردد.

وسایل افزاینده انتقال حرارت در داخل لوله

یکی از معمولترین فن‌آوری‌های بهبود انتقال حرارت مورد استفاده در مبدلهای حرارتی که به‌عنوان مهمترین دستگاههای مصرف‌کننده انرژی در صنایع فرایندی می‌باشند، وسایل افزاینده انتقال حرارت داخل لوله[2] می‌باشد. بارزترین سودمندی استفاده از این وسایل، کاهش سطح انتقال حرارت در مبدلهای حرارتی است. از فوائد دیگر استفاده از این وسایل، می‌توان به کاهش هزینه ساخت اولیه و بهبود عملکرد مبدلها، کاهش رسوب گرفتگی در لوله‌های مبدلها، بهبود عملکرد جوش‌آورها، تبخیرکننده‌ها و نیز بهبود توزیع جریان در لوله‌های مبدلهای حرارتی اشاره کرد. یک جنبه مفید دیگر استفاده از این وسایل، اینست که براحتی می‌توانند برای اصلاح تجهیزات موجود بکار روند. از دیگر ویژگیهای این ابزار می توان به کاهش رسوب گذاری ناشی از بکارگیری آنها اشاره کرد که در بسیاری از نوشتجات به آنها اشاره شده است. بحث رسوب گذاری یکی از دغدغه های اصلی در زمینه مبدلهای حرارتی می باشد. طبق بررسی های انجام شده، نشان داده شده است که میزان مقاومت در مقابل انتقال حرارت ناشی از رسوب گرفتگی برای Insert های مختلف ،متفاوت است.[11]

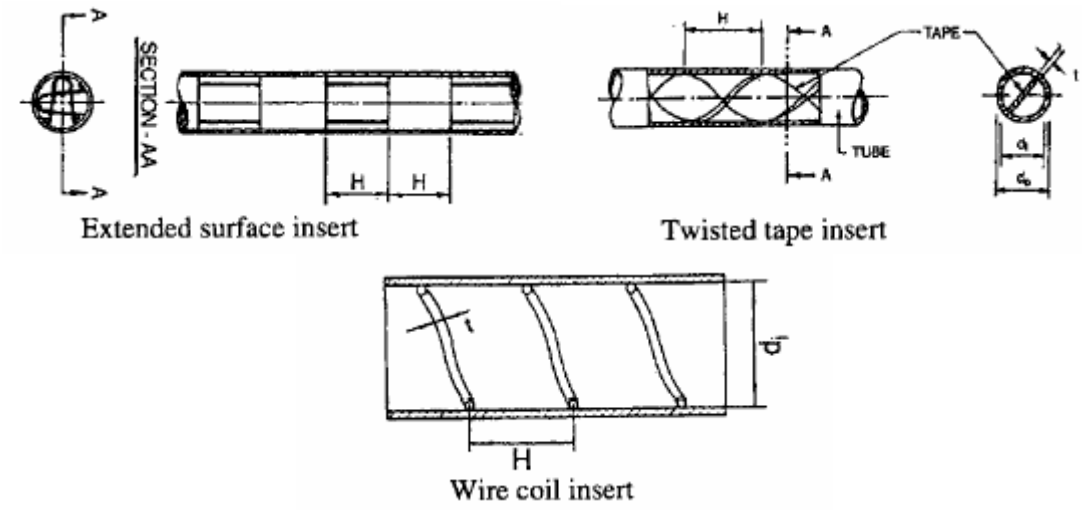
انواع مختلفی از وسایل افزاینده انتقال حرارت داخل لوله موجود می‌باشد که هر یک عملکرد مخصوص به خودشان رادارند.

وسایل افزاینده انتقال حرارت داخل لوله شامل، اینزرت‌های نوارپیچ[3]، اینزرت‌های فنرپیچ[4]، اینزرت‌های سطوح گسترده[5]، اینزرت‌های شبکه‌ای[6] و... می‌شوند.[4] که در شکل زیر نشان داده شده اند:



Mesh Insert

1- Inserts
2- Tube Inserts
3 - Twisted tape Inserts
4 - Wire coil Inserts
5- Extended surface Inserts
6 - Mesh Inserts



شکل ۱ : چند نوع اینزرت مرسوم

هندسه‌های گوناگونی از وسایل افزاینده انتقال حرارت داخل لوله موجود هستند، امّا twisted tape ها و شبکه‌های سیمی مرسوم‌تر هستند. مبنای عمومی عملکرد آنها توسعه رژیم جریان و ایجاد انتقال حرارت آشفته در شرایط جریان آرام است.

۱- نوارهای تابیده (twisted tape) : Twisted tape ها سبب ایجاد جریان حلزونی در طول لوله (چرخش جریان داخل لوله) می‌شوند. آنها عموماً تماس حرارتی خوبی با دیواره لوله ندارند.

۲- مفتولهای پیچشی[1] : این وسایل به صورت حلقوی بر روی جداره داخلی لوله‌ها قرار گرفته و سبب ازبین رفتن لایه مرزی حرارتی شده و منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت داخل لوله می‌گردند.

۳- شبکه‌های سیمی[2] : این وسایل شامل شبکه‌های متعدد سیمی که به دور یک هسته مرکزی بافته شده‌اند، می‌باشند. این وسایل چندین مکانیزم بهبود انتقال حرارتی ایجاد می‌کنند، این عناصر دارای قطر بیشتری نسبت به لوله هستند. لبه این سیم‌ها با دیواره لوله در نقاط منظمی تماس پیدا می‌کنند. در شرایط جریان آرام لایه مرزی را کاهش می‌دهند و اختلاط توده بیشتر می‌شود. تحت شرایط جریان آشفته آنها به‌عنوان ایجادکننده اغتشاش بطوریکه لایه مرزی دیواره را از بین می‌برند عمل می‌کنند. این وسایل برای جریانهای آرام داخل لوله پیشنهاد می‌شوند. ایجاد دمای یکنواخت برای سیال داخل لوله و افزایش اختلاط سیال داخل لوله از مکانیزمهای افزایش انتقال حرارت این وسایل می‌باشد.

۴- لوله های مرکزی (Core tubes) : لوله‌ها یا میله‌هایی هستند که در مرکز لوله قرار می‌گیرند و می‌توانند هم قطر هیدرولیکی و هم سطح جریان را کاهش دهند. کاهش سطح جریان باعث افزایش سرعت می‌شود. کاهش قطر هیدرودینامیکی هم سبب توسعه انتقال حرارت می‌گردد.

۵- Extended Surface Inserts : این سطوح قالبی شکل در داخل لوله جای می گیرند. بین دیواره لوله و اینزرت تماس خوبی وجود دارد . این اینزرت ها باعث کاهش قطر هیدرولیکی می شوند و به عنوان سطوح اضافی عمل می کنند.

در برخی مقالات اشاره شده است که اینزرت‌ها twisted tape و wire coil کاربرد بیشتری نسبت به انواع دیگر اینزرت دارند. این گستردگی کاربرد محتمل هم به‌نظر می‌رسد زیرا Extended surface ها هزینه‌های نسبتاً بالایی را می‌طلبد و اینزرت‌های شبکه‌ای هم افت فشار و رسوب‌گذاری بالا را در پی دارند.اما در برخی دیگر از مقالات آمده است که استفاده ازاینزرت های twisted tape و شبکه‌های سیمی مرسوم‌تر است.

هزینه ساخت وسایل افزاینده انتقال حرارت داخل لوله بسیار پائین می‌باشد و نصب آنها در داخل لوله‌های مبدلهای حرارتی به آسانی صورت می‌گیرد. این وسایل برای افزایش توان عملکردی مبدلهایی که جریان سمت لوله در آنها احتیاج به

1- Helically coiled wire Insert
2- Wire Matrix Insert (Mesh Insert)

عملکرد حرارتی بالاتری دارند می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر آن، در مواقعی که تمیز کردن لوله‌های مبدلهای حرارتی مدنظر باشد، این نوع وسایل افزاینده انتقال حرارت را براحتی می‌توان از لوله‌های مبدل خارج نمود. مبدلهای حرارتی جدیدی که به همراه وسایل افزاینده انتقال حرارت داخل لوله طراحی می‌شوند، فشرده‌تر (کم‌حجم‌تر) از مبدلهای حرارتی با لوله ساده می‌باشند. وجود لوله‌های کوتاهتر در مبدلهایی که در لوله‌های آنها از این وسایل استفاده شده است، می‌تواند سبب جبران شدن هزینه افزایش افت فشار ناشی از بکارگرفتن این وسایل گردد.[12]

عمده‌ترین فایده استفاده از وسایل افزاینده انتقال حرارت داخل لوله، کاهش هزینه اولیه ساخت مبدلها می‌باشد، زیرا استفاده از این وسایل سبب کاهش سطح انتقال حرارت لازم در مبدلها می‌گردد. کاهش سطح انتقال حرارت در مبدلها منجر به کاهش تعداد لوله‌ها و یا کاهش تعداد پوسته‌های موردنیاز در مبدل‌ها می‌شود. این وسایل همچنین می‌توانند سبب استفاده کامل‌تر از افت فشار مجاز سمت لوله‌های مبدلهای حرارتی گردند (از ماکزیمم مقدار افت فشار مجاز، معمولاً در طراحی‌ها استفاده بهینه نمی‌گردد). از فوائد دیگر استفاده از این وسایل می‌توان به افزایش توان عملکردی مبدلهای حرارتی، کاهش میزان رسوب‌گیری در سمت لوله‌های مبدل‌ها، افزایش بازیافت حرارت مبدلها و بهبود توزیع جریان سیال در داخل لوله‌های مبدل اشاره نمود.

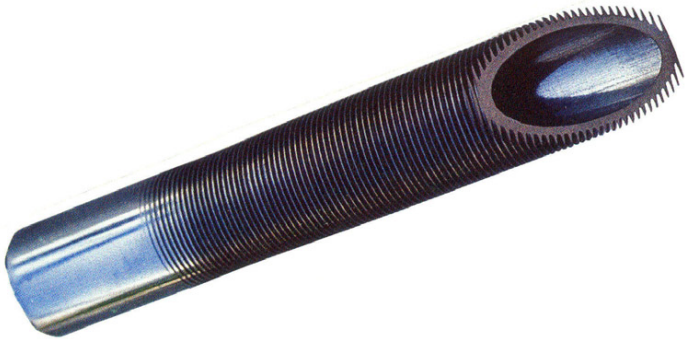
لوله های پره دار

استفاده از لوله‌های پره‌دار راهی است تا سطح تماس سمت پوسته مبدلهای پوسته – لوله‌ای افزایش یابد.لوله های پره دار را در واقع می توان به سه دسته تقسیم کرد:

۱- لوله های با پره کوتاه . ۲- لوله های با پره بلند . ۳- لوله های شیار دار.

در لوله های با پره بلند، پره ها به صورت مجزا روی لوله ها نصب می شوند(جوش خورده یا پرچ می شوند). پره‌ها در واقع جهت افزایش سطح مؤثر لوله‌های مبدل استفاده می‌شوند.

لوله‌های پره‌دار معمولاً زمانیکه ضرایب انتقال حرارت در سمت بیرون لوله نسبت به داخل لوله کم است استفاده می‌شوند، به‌عنوان مثال در انتقال حرارت از یک مایع به یک گاز، از قبیل مبدلهای حرارتی air-cooled (هواخنک). کارایی پره تابعی است از ابعاد پره و هدایت حرارتی (جنس) پره. بنابراین معمولاً پره‌ها از موادی با هدایت حرارتی بالا استفاده می‌شوند. برای مس و آلومینیوم کارایی عموماً بین 0.9 تا 0.95 است.[5]



شکل۲ : لوله با پره کوتاه

در حالت‌هایی که مقاومت‌های طرف پوسته خیلی بیشتر از سمت لوله است، لوله‌های با پره کوتاه می‌توانند ضریب انتقال حرارت کلی را با افزایش سطح خارجی لوله‌ها توسعه دهند. استفاده از این لوله‌ها می‌تواند سطح خارجی لوله را در مقایسه با لوله‌های لخت تا ۲/۶ برابر افزایش دهد. لوله‌های پره‌دار از لوله‌های لخت، طی یک فرآیند ساخت، شکل می‌گیرند و لوله در واقع قطر مشابه با لوله لخت را که در شروع از آن ساخته شده است، حفظ می‌کند.

این تکنولوژی به ویژه برای سیستم‌هایی که از فلزات گران نظیر تیتانیوم و آلیاژهای بالای نیکل استفاده می‌کنند، مؤثرتر و نیز باصرفه‌تر است. لوله‌های fine – fin وقتی از جنس مواد گران قیمت ساخته می‌شوند به میزان زیادی هزینه‌ها را کاهش می‌دهند، به طوری که مثلاً وقتی جنس لوله از تیتانیوم باشد هزینه هر فوت مربع از سطح انتقال حرارت تا ۵۰٪ کاهش می‌یابد.[6]

بفلهای میله ای (ROD Baffle)

مبدلهای ROD بفل توسط شرکت نفتی Phillips در سال ۱۹۷۰ جهت برطرف کردن مشکل لرزش مبدلها توسعه داده شد. در این هندسه توسعه‌یافته سمت پوسته، بفلهای قطایی با یک سیستم شبکه‌ای، جهت ساپرت لوله‌ها جانشین شده‌اند. جریان محوری روی لوله‌ها، باعث افت فشار کمتر و لرزش کم خواهد شد. در این مبدلها، بفلهای میله‌ای با آرایش خاصی به حلقه بفل در دور دسته لوله جوش خورده‌اند. این بفلها به صورت دسته ۴ تایی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

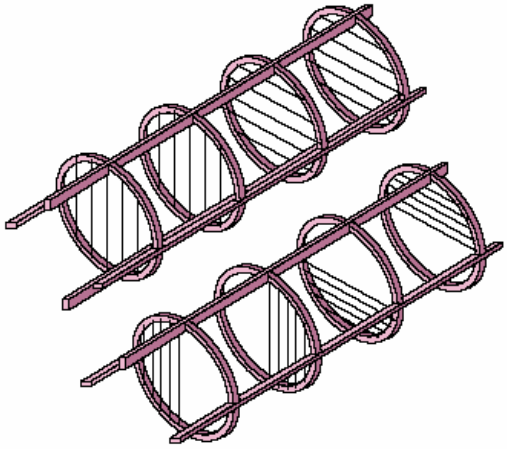
Rod بفلها علاوه بر حل مشکل لرزش دسته لوله‌ها، سبب کاهش در افت فشار و رسوب‌گذاری می‌شوند و همزمان کارایی حرارتی را هم بالا می‌برند و نیز جریان خالص مخالف در طراحی‌های با یک گذر لوله بدست می‌آید.

در کل می‌توان مزایای Rod بفل‌ها را به صورت زیر خلاصه نمود :

ـ مبدلهای Rod بفل مشکل مربوط به لرزش لوله‌ها را از بین می‌برد و باعث کاهش افت فشار سمت پوسته و افزایش عملکرد حرارتی مبدل می‌گردد.

ـ افت فشار کمتر در پوسته در این نوع مبدلها باعث ذخیره انرژی قابل توجهی بالاخص در سیستمهای گازی می‌شود.

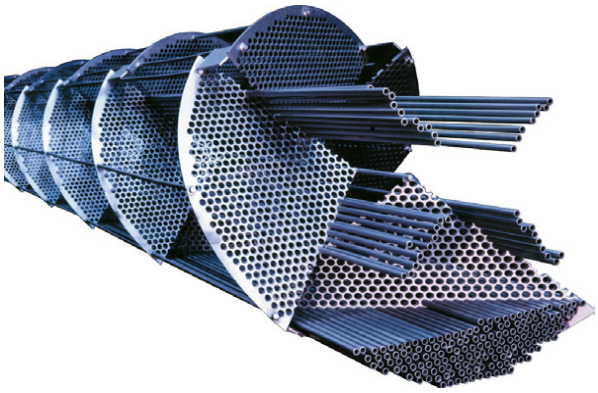
ـ پوسته مبدل B-R به شکلهای استاندارد E ، F و H ، g و k و x می‌تواند ساخته شود و در ساختن لوله و بفلها از آلیاژهای معمول استفاده می‌گرد. ضمناً لوله‌ها می‌توانند به صورت پره‌دار کوتاه نیز طراحی و مورد استفاده قرار گیرند. جنس بفل‌ها هم با توجه به نوع سیال سمت پوسته انتخاب می‌شود.[7]



شکل۳ : شماتیکی از مبدل با بفلهای میله ای

بفلهای حلزونی (Helical Baffle)

هندسه توسعه داده شده دیگر سمت پوسته، جایگذاری بفلهای قطایی، توسط یک سیستم بفل قطایی با زاویه‌های خاص می‌باشد که سبب ایجاد الگوی جریان حلزونی در داخل پوسته می‌شود. این تکنولوژی سبب کاهش میزان افت فشار، کاهش لرزش و کاهش تمایل به رسوب‌گذاری می‌شود.مبدل‌های پوسته- لوله‌ای با بفلهای حلزونی در جمهوری چک توسعه داده شد. این مبدلها که به مبدلهای هلیکس معروفند، نواقص عمده مبدلهای با بفلهای قطایی راحداقل می‌کند. بفلهای حلزونی، صفحاتی هستند که با یک زاویه خاص نسبت به محور لوله‌ها، در سمت پوسته قرار می‌گیرند و ضرایب انتقال حرارت بالایی در سمت پوسته ایجاد می‌کنند. اینها اثری مشابه با اینزرت‌های نوار پیچ در داخل لوله دارند.در شکل زیر یک سیستم با بفلهای حلزونی نشان داده شده است.



شکل۴ : شماتیکی از مبدل با بفلهای حلزونی

تستهایی که انجام شده است نشان‌دهندهٔ کاهش بسزایی در میزان رسوب‌گذاری (در این مبدلها) می‌باشد. این نوع بفلها باعث افزایش کارایی انتقال حرارتی، کاهش در مقدار سطح موردنیاز و نیز مهمتر از آن کاهش قطر پوسته خواهند شد. نتیجه اینست که این نوع بفلها باعث می‌شوند، مبدلی ارزان‌تر و کوچکتر داشته باشیم. یک مقایسه‌ای که بین رسوب‌گذاری مبدلهای حرارتی با بفلهای حلزونی و مبدل حرارتی با بفلهای مرسوم صورت گرفت (جایگزینی دسته لوله حلزونی به جای دسته لوله مرسوم در یک واحد نفت خام) نشان داد که استفاده از بفلهای حلزونی باعث شد تا زمان تمیزکاری به سه سال افزایش یابد و این در حالی بود که همین واحد با استفاده از بفلهای مرسوم طی مدت عملکرد ۱۰ ماه، باید از فرایند خارج می‌شد. [8]

اولین کاربرد بفلهای حلزونی در مبدل‌های حرارتی، در سال ۱۹۸۰ بود که در یک نیروگاه هسته‌ای در چک اسلواکی به عنوان یک مبدل جایگزین مورد استفاده قرار گرفت. در سال ۱۹۹۵ شرکت ABB Lummus Heat Transfer لیسانس جهانی را برای تکنولوژی بفلهای حلزونی خریداری کرد و مطالعات در این زمینه را با گستردگی بیشتری انجام داد. در حال حاضر ۹۰۰ مبدل حرارتی با بفل حرارتی حلزونی در سراسر دنیا در واحدهای متفاوتی نصب شده و در حال کار هستند.

فیدبک گسترده که توسط شرکت ABB Lummus از عملکرد واحدها در عملیاتهای گوناگون دریافت شده، تأئید و تصدیقی جهت ادامه بررسی خصوصیات و کار روی مبدل‌های Helixchanger شده است.

برخی از مزایای مبدل های Helix به ترتیب زیر است:

۱ـ مبدل در بازه‌های زمانی دیرتری احتیاج به تمیز کردن خواهد داشت به طوری که این مدت زمان در برخی سرویس‌ها به ۳ تا ۴ برابر افزایش می‌یابد.

۲ـ کارایی و عملکرد بسیار خوبی بالاخص در سیستم‌های بزرگ که upgrade می‌شوند بدست می‌آید.

۳ـ صرفه‌جویی هزینه سرمایه‌گذاری خوبی حاصل می‌شود.

۴ـ صرفه‌جویی انرژی بالایی ناشی از هزینه‌های پائین‌تر کمپرسورها و پمپ‌ها و تجهیزات پائین دستی حاصل می‌شود.

۵ـ لرزش دسته لوله نیز کاهش می‌یابد (یک دلیل آن ناشی از کوتاه شدن طول لوله ساپرت نشده است)

۶ـ میزان رسوب‌گذاری در این مبدل‌ها به دلیل از بین رفتن فضاهای مرده بسیار کاهش می‌یابد.

از میان کاربردهای صنعتی این نوع مبدل‌ها، یک سیستم سردکننده کمکی در یک نیروگاه هسته‌ای انتخاب شده است تا برخی از مزایای استفاده از این مبدل‌ها نشان داده شود.

شرایط بدین گونه است:

دماهای ورودی و خروجی جریان گرم به ترتیب $270°C$ و $55°C$ می‌باشد. دمای جریان سرد ورودی $44°C$ می‌باشد. میزان انتقال حرارت باید ۱۵MW باشد و ضمناً افت فشار مجاز برای کل سیستم ۸۰Kpa است.

سه طراحی مختلف برای سیستم مورد نظر انجام شده است:[10]

۱ـ بفلهای قطایی

۲ـ بفلهای حلزونی با زاویه پیچ $20°$

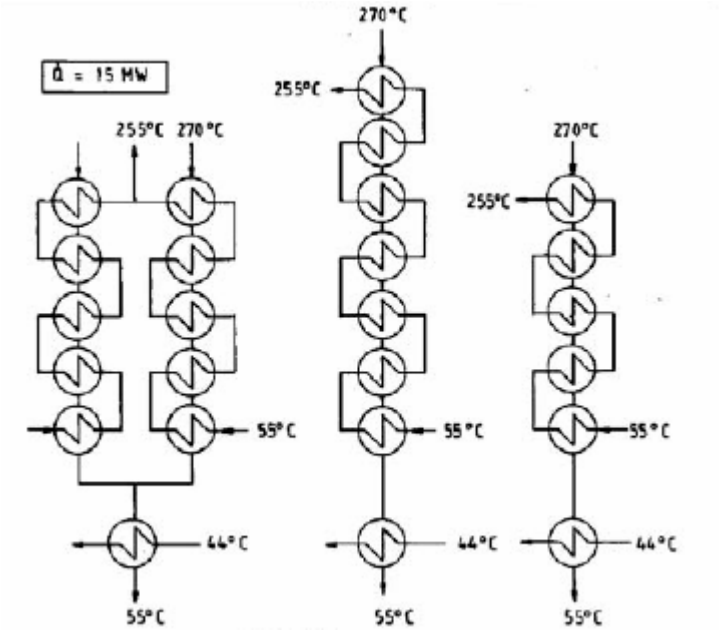
۳ـ بفلهای حلزونی با زاویه پیچ $45°$

نتایج در جدول ۱ خلاصه شده است.(از آنجایی که محدودیت افت فشار بسیار ضروری است لذا برای طراحی سیستم با بفلهای قطایی نیاز به شاخه‌دارشدن جریان بود.)

در نتایج ارائه شده برای وزن مبدل‌ها، وزن حاصل از لوله‌کشی هم احتساب شده است. ملاحظه می‌گردد که وزن سیستم مورد استفاده از بفلهای حلزونی با زاویه $40°$ در حدود ۴۶٪ وزن سیستم با بفلهای قطایی است.

جدول ۱ : مقایسه بکار گیری فناوری بفلهای حلزونی با بفلهای قطایی

Shell ID	Tube length	Tube OD ×thickness	No. of shells		Baffle type	Total weight
mm	mm	mm	Exch.	Tot.		Kg.
428	5350	16×1.5	2×5	11	segmental	51400
428	5350	16×1.5	1×7	8	H 20 deg.	37380
370	4960	12×1.4	1×5	6	H 40 deg.	23650



شکل۵: سیستم مبدلهای خنک کننده با سه طراحی مختلف

لوله های پیچشی (Twisted – tubes)

توسعه دیگری که در زمینه مبدلهای حرارتی پوسته- لوله‌ای صورت گرفته است مبدلهایی با لوله‌های پیچشی می‌باشد. این لوله ها، بوسیله یک فرایند ویژه شکل‌دهی، تولید می‌شوند و در دسته لوله قرار می‌گیرند. لوله‌های استفاده شده در مبدلهای Twisted – tube طی یک فرایند تک‌گامی شکل گرفته‌اند، لوله‌های تولیدی یک مقطع بادامی‌شکل دارند و پیچش به آنها اضافه می‌شود. این لوله‌ها هر یک توسط دیگری در طول مبدل ساپرت می‌شوند. اگرچه Twisted tube ها با یکدیگر تماس دارند، امّا فاصله کافی بین آنها برای جریان سمت پوسته وجود دارد. جریان سمت پوسته همانند درون لوله یک حرکت چرخشی خواهد داشت. این باعث افزایش آشفتگی هر دو سمت لوله و پوسته (بخوبی) می‌شود. این لوله‌ها به نحوی به هم قفل می‌شوند که نیازی به بفلهای حمایت‌کننده نمی‌باشد. این واحدها جریان کاملاً محوری و بدون فضاهای مرده دارند و تمایلی به لرزش در این واحدها وجود ندارد. همانطور که بیان شد هیچ بفلی برای این واحدها مورد نیاز نیست. توسعه انتقال حرارت در هر دو سمت لوله و پوسته اتفاق خواهد افتاد و نسبتهای بالاتر سطح به حجم بدست می‌آید (در مقایسه با دسته لوله‌های مرسوم). اصطکاک کمتری در سمت پوسته وجود خواهد داشت و جریان خالص مخالف می‌تواند در حالتهای یک‌گذر لوله و دوگذر پوسته ـ دوگذر لوله حاصل شود. لوله‌های پیچشی درواقع هدفشان ترقی‌دادن انتقال حرارت در هر دو طرف لوله و

پوسته می‌باشد که توسط توسعه و بهبود میدان جریان در دو سمت مبدل صورت مـی‌گیـرد. ایـن چنـین افـزایش‌دهنـده‌هـای دوتایی[1] را، می‌توان با ترکیب استفاده از اینزرت‌ها و مثلاً لوله‌های پره‌کوتاه مقایسه کرد.

عموماً طراحی‌های با Twisted tubeها به میزان 40% ضرایب انتقال حرارت بالاتری نسبت به مبدلهای لوله‌ای با بفلهای قطایی در افت فشار مشابه را می‌دهد. لیسانس این نوع مبدلها به صورت تجاری دراختیـار شـرکتهای Allard سـوئد و Brown Fin tube امریکا قرار دارد. این مبدلها همچنین می‌توانند به صورت ترکیب با دسته لوله‌های معمولی برای نیازهای ویژه انتقـال حرارتی و افت فشاری مورد استفاده واقع شوند.[3]

مبدلهای Corrugated – tube

این نوع مبدلها توسط APV توسعه داده شده‌اند که ضرورتاً برای مبدلهای دبل‌پایپ (دولوله‌ای) و یا دولوله‌ای چنـدتایی است. مشابه با Twisted tubeها این مبدلها هم، انتقال حرارت هر دو سمت پوسته و لوله را بهبود می‌بخشند. این مبدلها به‌طـور ویژه برای سیستم‌های ویسکوز و مایعات غیرنیوتنی طراحی شده‌اند.

تکنولوژیهای مشترک

گاهی اوقات با توجه به شرایط موجود و احتیاجات طراحی گاهی ممکن است لازم باشد دو روش توسعه انتقال حـرارت در سمت پوسته باهم بکار رود. اگر توسعه تکنولوژیکی در هر دو طرف پوسته و لولهٔ مبدل حرارتی بکـار رود، مـاکزیمم مزایـای عملیاتی و هزینه‌ای بدست می‌آید.

توسعه نرم افزاری

در میان دهه‌های ۷۰ و ۸۰ شرکت‌های نرم‌افزاری در زمینه انتقال حرارت، شاهد حضور پر قدرت یک شرکت آمریکـایی بنام B.JAC شدند. در نزدیکی دههٔ ۹۰ اکثر مبدلهای حرارتی با کمک نرم‌افزارهای B.JAC , HTRI , HTFS طراحی می‌شدند.

برنامه‌های کامپیوتری انتقال حرارت هر کدام به صورت جداگانه کار می‌کردند امّا طراحان به زودی متوجه شدند کـه در صورت پیوستن به هم، (لینک‌شدن) کار طراحان بسیار آسانتر خواهـد شـد. B.JAC در لینـک‌شـدن نـرم‌افزارهـای حرارتـی و مکانیکی کاملاً موفق عمل کرد. بعدها برنامه‌های شـبیه‌سـاز بـا نـرم‌افزارهـای مبـدلهای حرارتـی لینـک شـدند. درواقـع، همـه نرم‌افزارهای شبیه‌ساز یک نرم‌افزار ساده مبدل داشتند. این کار توسعه سریعی داشت به نحوی که HTFS بخشی از یک شرکت نرم‌افزاری شبیه‌ساز بنام Hyprotech شد. همچنین B -JAC نیز بخشی از شرکت دیگری بـه نـامAspen Tech شـد. بعـدها در سال ۲۰۰۲ دو شرکت Hyprotech و Aspen Tech به هم پیوستند.

به نظر می‌رسد توسعه‌های بعدی در زمینه لینک‌شدن شـدن نـرم‌افزارهـای حرارتـی و فراینـدی، لینـک‌شـدن آنهـا بـا نرم‌افزارهای CFD باشد. چنین لینک‌هایی ممکن است برای عمده طراحی‌ها مفید نباشـد (تفـاوتی نکنـد)، امّـا بـرای مبـدلهای بحرانی که به صورت تجربی هم مشکل‌زا هستند بسیار مفید خواهند بود. یک مثال از زمـانی کـه مـا احتیـاج بـه CFD داریـم، مطمئن‌شدن از توزیع مناسب جریان در یک مبدل حرارتی که احتیاج به کارایی خیلی بالای حرارتی دارد می‌باشد. دیگر مثـال می‌تواند در یک مبدل حرارتی باشد که ما از مسأله لرزش آن در تردید باشیم.

خلاصه‌ای از پیش بینی ها یی که در زمینه انتقال حرارت درسالهای آینده می شود در ادامه آمده است :

۱- لینک‌های بیشتری بین نرم‌افزارهای فرایندی و حرارتی ایجاد خواهد شد و نهایتاً منجر به بهترشدن یکپارچـه‌سـازی فرایند خواهد شد.

۲- لینک‌های بهتری بین نرم‌افزارهای طراحی حرارتی و CFD جهت طراحی‌هـای بحرانـی یـا مشـکل، صـورت خواهـد گرفت.

۳- مبدل حرارتی فشردهٔ جدیدی، طراحی نخواهد شد امّا توسعه‌های انواع موجود از این مبدلها ادامه خواهد یافت.

۴- توسعه‌هایی در زمینه مبدلهای پوسته – لوله‌ای که باعث اقتصادی‌تر شدن آنها و داشـتن لولـه‌هـای کوتـاهتر اسـت، صورت خواهد گرفت.

۵- تمایل بیشتری به استفاده از وسایل افزاینده انتقال حرارت وجود خواهد داشت.

1- Double Enhancement

۶- استراتژیهای جدیدتری برای طراحی مبدلهای حرارتی با رسوب‌گذاری‌های کمتر معرفی خواهند شد.

۷- از مبدلهای multi – stream استفاده‌های گسترده‌تری خواهد شد.

مقایسه بین بفلهای Rod و Segment (با لوله های صاف و پره دار) با نرم افزار Aspen

مقایسه ای که در این قسمت انجام شده است در واقع نوعی Rating با هندسه های متفاوت مبدلهاست. بدین صورت که اطلاعات ورودی جریان گرم و سرد موجود است وبرای ۴ حالت زیر ، نتایج ارائه گردیده است.

۱- مبدل پوسته- لوله ای با بفلهای قطایی و لوله های صاف (معمولی)

۲- مبدل پوسته- لوله ای با بفلهای قطایی و لوله های پره دار

۳- مبدل پوسته- لوله ای با بفلهای میله ای و لوله های صاف

۴- مبدل پوسته- لوله ای با بفلهای میله ای و لوله های پره دار

شرایط جریانها و مشخصات کلی مبدل به قرار زیر است :

Stream	Name	Flow rate(lb/hr)	Temp. (˚ F)	Press.(psi)	Side
Hot	Styrene	150000	300	50	Shell
Cold	Toluene	125000	100	90	Tube

جنس	قطر پوسته (in)	قطر لوله (in)	تعداد لوله ها	BWG	طول لوله (ft)	تعداد بفلها
C.S.	۳۹	۰/۷۵	۱۰۳۴	۱۴	۱۶	۳۸

۱	Pitch(in)	مربعی	آرایش لوله ها
۰/۰۰۲	ضریب رسوب(سمت پوسته)	۰/۰۰۲	ضریب رسوب (سمت لوله)
۲/۵	قطرنازل سمت پوسته (in) (ورودی وخروجی)	۴	قطرنازل سمت لوله (in) (ورودی وخروجی)
۸	تعداد گذر سمت لوله	۱	تعداد گذر سمت پوسته
۳۷/۸۵	قطر داخلی حلقه بفل(ROD)(in)	۰/۲۵	B.C.(segmental)
۳۸/۸۵	قطرخارجی حلقه بفل(ROD)(in)	۰/۷۵	قطر میله بفل(in)

شرایط ارائه شده به عنوان ورودی نرم افزار Aspen وارد شد و نتایج به صورت زیر بدست آمد:

جدول ۲ : نتایج بدست آمده برای هندسه متفاوت سمت پوسته و اثر بکار گیری لوله های پره دار

	Segment B. bare Tube	ROD B. Bare Tube	Segment B. Fin Tube	ROD B. Fin Tube
Heat duty(Btu/hr)	8944707.49	7442010.37	9518202.28	9621844.71
Shell, Temp. out(˚F)	173.2547	195.8465	164.4755	162.8558
Tube,Temp.out(˚F)	260.1698	235.457	269.3976	271.0558
Shell Pressure Out(psi)	42.5852	45.0175	41.5854	45.1064
Shell Pressure Drop(psi)	2.5044	0.0049	3.5296	0.0131
Tube Pressure Out(psi)	85.9112	85.9441	88.4423	88.4413
Tube Pressure Drop(psi)	3.5299	3.5078	0.9946	0.9948
Actual Exchanger area(ft^2)	3248.413	3248.413	8121.017	8121.017
Avg. heat transfer coef. (Dirty)(Btu/hr-ft^2-R)	63.6991	33.0270	34.5833	36.7389
Avg. heat transfer coef. (Clean) (Btu/hr-ft^2-R)	89.9991	38.9375	45.6214	49.4242
LMTD (corrected) (˚F)	43.2276	69.3664	33.8905	32.2494
LMTD correction factor	0.7880	0.8762	0.7456	0.7374
NTU	2.9198	1.7110	3.7268	3.9116
Shell, nuzzle pressure drop	4.9103	4.9775	4.8849	4.8803
Tube, nuzzle pressure drop	0.5588	0.5480	0.5630	0.5637

Shell Re. No. cross	38586.40	------	43224.44	------
Shell Re. No. window	22636.33	------	25106.44	------
Tube side Re. No.	33965.88	31721.33	27135.80	27261.59
Overall U(Btu/hr-ft^2-R)	63.9651	33.2264	34.5642	36.6659
Tube wall Temperature(˚F)	203.734	182.422	210.260	212.860

در کار فوق، مشخصات لوله های پره دار استفاده شده به صورت زیر است :

ارتفاع پره : 0.024 in ؛ چگالی تعداد پره : (1/in) 5 ؛ کارایی پره : 0.8 .

تحلیل نتایج

نتایج حاصله نشان می دهد Duty بدست آمده برای مبدل میله ای همراه با لوله های پره دار در مقایسه با انواع دیگر ، بیشتر است. این در حالیست که زمانی که از لوله های صاف استفاده میشود مبدل با بفلهای قطایی میزان Duty بالاتری در مقایسه با مبدل با بفلهای میله ای نشان میدهد. این می تواند نشان دهنده اثر بسزای افزایش سطح ناشی از لوله های پره دار باشد چرا که وقتی ضریب انتقال حرارت کلی مبدل ها را با هم مقایسه می کنیم مشخص است که مبدل با بفلهای قطایی و لوله های صاف دارای ضریب انتقال حرارت کلی بالاتری است ولی در واقع سطح اضافی حاصل از پره ها این کمبود را جبران کرده است، لذا می توان این نتیجه را گرفت که امروزه برای طراحی و تصمیم گیری در زمینه انتخاب مبدل، باید حتما مزایای ابزار بهبود انتقال حرارت را در نظر گرفت چرا که این ابزار میتوانند در شرایط گوناگون اثرات مختلفی نشان دهند.

نکته قابل توجه دیگر در این بررسی؛ در زمینه افت فشار سمت پوسته است. همانطور که مشخص است مقادیر افت فشار در مبدلهای ROD به میزان بسزایی پایین تر از مبدل بابفلهای قطایی است و این مساله بالاخص در جاهاییکه از لحاظ افت فشار مجاز محدود می شویم حائز اهمیت است.در واقع در مبدل با بفلهای میله ای بخش اعظم واصلی افت فشار کلی مربوط به افت فشار نازلها می باشد و افت فشار در پوسته مبدل بدلیل نوع جریان محوری بسیار کم می باشد.

نتیجه گیری

۱- استفاده از تکنولوژیهای بهبود انتقال حرارت در مبدلهای پوسته – لوله ای سبب افزایش ضرایب انتقال حرارت، افزایش سطح انتقال حرارت، کاهش سایز و وزن مبدل، کاهش بسزای رسوب گذاری، کاهش افت فشار(در برخی تکنولوژیها) و در نهایت کاهش هزینه های عملیاتی و سرمایه گذاری که هدف اصلی از بهینه سازی واحد ها می باشد، خواهد شد.

۲- مزایای بالفطره مبدلهای پوسته لوله ای در کنار استفاده از تکنولوژیهای بهبود انتقال حرارت در آنها، سبب شده است این مبدلها همچنان به عنوان پر مصرف ترین مبدل بالاخص در صنایع بزرگ باشند و توسعه و تحقیق در این زمینه کماکان ادامه یابد.

۳- هر کدام از تکنولوژیهای بهبود انتقال حرارت در شرایط خاصی می توانند مورد توجه قرار گیرند. بفلهای میله ای در شرایطی که نیاز به افت فشار بسیار پایین داریم خیلی کارامد هستند، اینزرتها زمانیکه شرایط جریان آرام در داخل لوله حاکم است کاراتر هستند، بفلهای حلزونی سبب کاهش بسزایی در رسوب گذاری میشوند همراه با اینکه نسبتهای بالاتری از انتقال حرارت به افت فشار را (در مقایسه با بفلهای قطایی) حاصل میکنند و در نهایت لوله های پیچشی می توانند سبب توسعه کارایی در هر دو طرف پوسته و لوله مبدل شوند.

۴- با توجه به مزایای فراوان وسایل افزاینده انتقال حرارت، می باید در طراحی های جدید و اصلاح واحد های موجود حتما استفاده از این وسایل را مد نظر قرار داد. در ضمن بسته به نیاز می توان از دو تکنولوژی بهبود انتقال حرارت،به صورت همزمان استفاده کرد. به طور نمونه استفاده از اینزرتها در سمت لوله و بفلهای حلزونی در سمت پوسته و یا استفاده از بفلهای میله ای به همراه لوله های پره دار.

۵- با تحلیل نتایج حاصل از نرم افزارهای CFD میتوان گامهای سریعتری در زمینه توسعه مبدلهای پوسته – لوله ای برداشت.

منابع

[1] David Butterworth, Process Heat Transfer 2010, Applied Thermal Engineering 24 (2004) 1395-1407.

[2] Ian Gibbard, The Application of Heat Transfer Enhancement to Tubular Heat Exchangers in the Gas Processing Industry, Engineering Solution Division,

[3] Petr Stehlik & Vishwas V. Wadekar, Different Strategies to Improve Industrial Heat Exchange, Heat Transfer Engineering,23(6),2002

[4] Lieke Wang & Bengt Sunden, Performance Comparison of Some Tube Inserts, Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol.29, No.1, pp.45-56, 2002

[5] Coulson & Richardson, Chemical Engineering, volume 6, third Edition, (1999)

[6] HELIFIN Heat Exchangers. ABB Lummus Heat Transfer.

[7] عباس رضایی، عباس میرزایی.(استاد راهنما: دکتر محمد رضا جعفری نصر) طراحی مبدلهای حرارتی با بفلهای میله ای. پایان نامه کارشناسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب.(۱۳۸۰)

[8] S.J. Pugh, Emerging Heat Exchanger Technologies for the Mitigation of Fouling in Crude Oil Pre-Heat Trains.

[9] Bashir I. Master, Krishnan S. Chunangad, Bert Boxma, Dalibor Kral and Petr Stehlik, Most Frequently Used Heat Exchangers from Pioneering Research to Application Worldwide, CHISA/PRES 2004

[10] J.Lutcha and J. Nemcansky, Performance Improvement of Tubular Heat Exchangers by Helical Baffles. Transe IChemE, Vol. 68, Part A, May 1990.

[11] مهدی مجیدی (استاد راهنما: دکتر محمد رضا جعفری نصر) مدلسازی رسوب نفت خام در مبدلهای پیش گرمکن واحد تقطیر اتمسفریک. پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی سهند تبریز.(۱۳۸۳)

[12] محمد رضا جعفری نصر، مهدی طهماسبی. افزایش توان عملکردی جوش آورهای ترموسیفون عمودی با استفاده از فناوری بهبود انتقال حرارت داخل لوله . (۱۳۸۳) نهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران .