رویه طراحی سریع برای فناوری جدید مبدلهای پوسته– لوله‌ای با بفلهای حلزونی

محمد رضا جعفری‌نصر[1] و امین شفقت[2]
۱- تهران ، شرکت پژوهش و فناوری پتروشیمی
۲- تبریز ، دانشگاه صنعتی سهند ، دانشکده مهندسی شیمی
1-m.jafarinasr@npc-rt.ir

چکیده

مبدل‌های پوسته لوله‌ای با بفلهای حلزونی از فناوری های جدید برای بهبود کارکرد مبدلهای مرسوم با بفلهای قطاعی(Segmental Baffles) هستند. با اینکه مزایا و قابلیتهای این نوع بفلها شناخته شده است و در بسیاری از کشورهای توسعه یافته به کار گرفته شده‌اند ، اما مطالب علمی و فنی در مورد طراحی آنها کمتر به چاپ رسیده است.

در این مقاله پس از معرفی برخی فناوری‌های موجود در زمینه بهبود کارکرد مبدلهای پوسته- لوله، به مزایای استفاده از بفلهای حلزونی بویژه در صنایع نفت اشاره شده است. سپس روابطی برای محاسبه ضرایب تصحیح روابط انتقال‌حرارت و افت‌فشار براساس روشBell-Delaware توسعه‌یافته، ارائه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد، حاصلضرب دو ضریب تصحیح مربوط به تغییر خصوصیات جریان متقاطع و افزایش آشفتگی در زاویه حدود°۴۲ به مقدار ماکزیمم حدود ۱٫۴ می‌رسد.

با استفاده از روابط ارائه شده و بر اساس رویه طراحی سریع(Rapid design Algorithem) ، رابطه‌ای براساس این روش برای بفلهای‌حلزونی توسعه داده شده است که ضریب انتقال حرارت را مستقیماً به افت فشار و سطح انتقال حرارت مربوط می کند. به کمک این رابطه، روش طراحی ارائه شده است.

در نهایت مقایسه‌ای بین مبدل با بفلهای قطاعی و حلزونی برای یک واحد صنعتی انجام شده و اثر به کارگیری وسایل بهبود دهنده انتقال حرارت داخل لوله بررسی شده است. سیستم با بفلهای‌حلزونی، به میزان ۳۶٪ ضریب انتقال حرارت بالاتر و به مقدار ۱۰٪ افت فشار پایین‌تر درمقایسه با سیستم بفلهای قطاعی را نشان داد.

Rapid Design Algorithm for New Technology: Shell and Tube Heat Exchangers with Helical Baffle

M.R. Jafari Nasr[1] and A. Shafeghat
(1)Petrochemical Research & Technology (NPC-RT), POBox: 14358, Tehran-Iran
(2)Chem.Eng.Dept., Sahand Univ. of Technology, Tabriz-Iran
1-Emai:m.jafarinasr@npc-rt.ir

ABSTRACT

"Shell and tube heat exchanger with helical baffles" is one of the new technologies used to improve the performance of common heat exchangers with segmental baffles. Although the advantages and efficiencies of these baffles are known well and they have been used in many developed countries, however, scientific and technical information concerning them have rarely been published.

In this article, after introducing some present technologies to improve the performance of shell and tube heat exchangers, the advantages of using helical baffles are pointed out. Then some relations for computation of correction factors of heat

heat transfer coefficient directly to pressure drop and heat transfer area. Design method is presented by using of this relation.
Finally a comparison is made between helical and segmental baffles in an industrial unit, and the effects of application of tube inserts are studied. In comparison with a unit with segmental baffles, it is found that the heat transfer coefficient was 36% higher and pressure drop was 10% lower in a system with helical baffles.

transfer and pressure drop coefficients are presented on the basis of developed method of Bell-Delaware. It is shown that the product of two correction factors of the "change in the cross flow characteristics" and "the turbulence enhancement", at about a 42-degree angle, reaches the maximum value about 1.4.
By using those relations and on the basis of Rapid Design Algorithm, a relation is presented for helical baffles that relate the

مقدمه

مبدل‌های‌حرارتی از مهمترین تجهیزاتی هستندکه درتمام صنایع از قبیل صنایع‌نفت، گاز، پتروشیمی، غذائی، صنایع تولید نیرو و . . . مورد استفاده قرارمی‌گیرند. دریک دسته‌بندی، مبدل‌های حرارتی را به دو بخش مبدل‌های فشرده و غیر فشرده تقسیم می‌کنند. (مبدل‌های فشرده نسبت سطح به حجم بالای ۷۰۰ ایجاد می کنند). مهمترین مبدل غیر فشرده که پر کاربردترین نوع در جهان می‌باشند، مبدل‌های پوسته- لوله‌ای هستند. این نوع مبدلها با اینکه در مقایسه با مبدل‌های فشرده از کارائی پائین‌تر و اندازه بزرگتری برخوردارند اما به دلیل مزایایی که فراهم می‌کنند، هنوزهم در بسیاری از موارد اولین انتخاب می‌باشند.

مهمترین مزایای مبدل‌های پوسته-لوله را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

-گستردگی اطلاعات طراحی مکانیکی و حرارتی و استانداردهای موجود

- کاربرد در گستره وسیعی از دماها و فشارها (تا ۳۰۰ بار در سمت پوسته و ۱۴۰۰ بار در سمت لوله و تا دماهای $800^{\circ}C$) [۱]

-در دسترس بودن روشهای ساخت

-نگهداری آسان شامل : تعمیرکردن ، توسعه‌دادن ، معاینه کردن و . . .

- اطلاعات زیاد از تجربه‌های مختلف برای شرایط گوناگون عملکردی

با این وجود، مبدل‌های مرسوم دارای معایبی از جمله موارد زیر نیز هستند:

-ایجاد افت فشار بالا

-پتانسیل رسوب‌گذاری نسبتاً بالا

-ضریب انتقال حرارت کمتر در مقایسه با مبدل‌های فشرده

که این موارد سبب می‌شوند تا کارایی مبدل از لحاظ حرارتی، هیدرولیکی و عملیاتی کاهش یابد، بالاخص زمانی که سیال فرایند، سیالی با ویسکوزیته بالا مثل نفت‌خام باشد. بنابراین با توجه به مزایای بالقوه این نوع مبدل‌ها، محققین به فکر اصلاح و رفع نقایص آنها برآمدند. برخی از روش‌های بهبود کارکرد مبدل‌های پوسته – لوله به شرح زیر است:

-استفاده از لوله‌های پره دار[۱] (شامل انواع پره‌های کوتاه و بلند عرضی و طولی)

-استفاده از لوله‌هایی با پره‌های داخلی

-استفاده از وسایل افزاینده انتقال حرارت داخل لوله[۲]؛ که دارای هندسه‌های گوناگونی از جمله نوارپیچ، فنرپیچ ، شبکه‌ای، اختلاط استاتیکی و . . . می‌باشد.

-استفاده از بفلهای میله‌ای[۳]

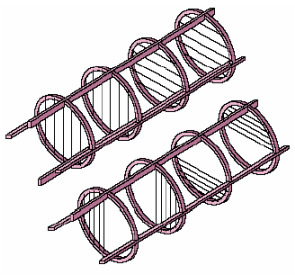
-استفاده از بفلهای حلزونی[۴]

۱-Fined Tubes
۲-Insert
۳-Rod Baffles
۴-Helical Baffles

-لوله‌های پیچشی[۱] و لوله‌های موج‌دار[۲] که این دو تکنولوژی، همزمان‌کارایی هر دو سمت لوله و پوسته را توسعه می‌دهند.

۵-Twisted Tubes
۶-Corrugated Tubes

(ب)



(الف)

(د)

(ج)

شکل ۱- اشکال متنوعی از برخی ابزارهای بهبود انتقال حرارت
(الف) : بفلهای میله ای (ب) : بفلهای حلزونی (ج) : لوله پره‌دار (د) : نوارتابیده

گاهی اوقات ممکن است از دو تکنولوژی به همراه هم استفاده شود تا ماکزیمم کارائی ممکن به دست‌آید. برخی از موارد استفاده شده شامل به کارگیری همزمان لوله‌های پره‌دار به همراه بفلهای‌حلزونی، بفلهای‌حلزونی به همراه وسایل افزاینده انتقال‌حرارت داخل‌لوله و... می‌باشد [۲].

روش‌ها و تکنولوژی‌های ارائه شده این مزیت را دارند که می‌توان هم در طراحی و هم برای اصلاح[۱] واحدها مورد استفاده قرارگیرند. بدین معنی که به راحتی می‌توان مبدل‌هایی را که در سرویس هستند با هزینه‌های ناچیز به این فناوری مجهز کرد تا کارایی بالاتری داشته باشند.

با اینکه هرکدام از این روشها از مکانیسم مختص به خود، برای بهبود عملکرد استفاده می‌کنند اما همه آنها به نحوی در نکات زیر مشترکند:

-حذف مناطق ساکن جریان سیال
-ایجاد آشفتگی بیشتر و کاهش ضخامت لایه آرام
-ایجاد سطح تماس (سطح انتقال حرارت) بیشتر
-و در نهایت میزان انتقال حرارت بیشتر به همراه افت فشار و رسوب‌گذاری کمتر

بفلهای حلزونی

در این مقاله روی بفلهای حلزونی، تمرکز شده است. لازم به ذکر است منظور از مبدلهای پوسته- لوله مرسوم، مبدلهایی هستند که درسمت پوسته آنها از بفلهای قطاعی[۲] برای افزایش زمان اقامت و آشفتگی سیال استفاده می‌شود. این نوع بفلها با ایجاد مسیرهای زیگزاگ و پرپیچ و خم برای سیال سمت پوسته، باعث افزایش آشفتگی می‌شوند. با این حال به دلیل جدایش جریان در لبه بفل و نیز وجود مناطق ساکن وجریانهای نشتی وکنارگذر (بسته به طراحی و ساخت)، عملکرد کلی پائینی نشان می‌دهند. بفلهای‌حلزونی یک راه چاره مناسب

۱-Retrofit

۲- Segmental Baffles

برای حل معضلات این نوع بفلهای مرسوم می‌باشند. این نوع بفلها قطعات شبه ربع دایروی شکل هستند که در داخل پوسته با زوایای خاصی آرایش می‌یابند تا جریان سیال سمت پوسته یک مسیر مارپیچ را طی کند. برخی از مزایایی که استفاده از بفلهای حلزونی در مقایسه با بفلهای مرسوم به ما دیکته می‌کند عبارتند از [۳،۴]:

-توسعه انتقال حرارت سمت پوسته

-افت فشار پائین‌تر برای یک نرخ جرمی ثابت

-کاهش رسوب‌گذاری

-کاهش اثرات جریان‌های کنارگذر و نشتی

-وکاهش لرزش القایی به دسته لوله

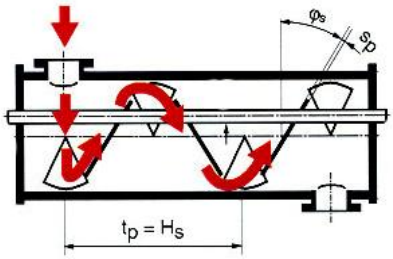
که در نهایت این موارد منجر به کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی و کاهش مصارف انرژی در واحدهای پایین‌دستی خواهد شد.

افزایش انتقال حرارت، نتیجه مستقیمی از افزایش آشفتگی ناشی از مولفه‌های مماسی سرعت در مقطع عرضی مبدل می‌باشد. هندسه خاص بفل‌ها سبب می‌شود مناطق ساکن حذف شوند (و یا به نحو چشمگیری کاهش یابند). افت فشار کمتر به دلیل کاهش مسیرهای پرپیچ و خم و کاهش اثرات اصطکاکی می‌باشد. جدایش جریان در لبه‌بفلها و تغییرات شدید مومنتوم در این سیستم وجود ندارد. به دلیل طبیعت جریان در این سیستم، جریانهای نشتی و کنارگذر کاهش‌یافته و القای لرزش به دسته لوله نیز در اثر افزایش مولفه‌های افقی سرعت، کاهش بسزایی دارد.

درکنار این مزایا، تنها معایبی که از بفلهای حلزونی می‌توان ذکر کرد در مورد مشکلات ساخت (برش قطعات و سوراخ کاری آنها) و نصب آنها می‌باشد که تنها کمی سخت‌تر از سیستم بفلهای قطایی است. اما پر واضح است که افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای بفلهای حلزونی به سرعت با صرفه‌جویی‌هایی که در تجهیزات فرایندی (از جمله پمپها) و هزینه‌های تعمیرات و نگهداری صورت می‌گیرد جبران می‌شود.

زاویه پیچش و نوع آرایش بفلها می تواند به سه صورت هلیکس‌یگانه[۱]، دوگانه[۲] و همپوشانی[۳] بفلها باشد، از عوامل مهم طراحی در مبدل با بفلهای حلزونی است. مشابه با تغییرات فاصله بفلها[۴] و درصد پنجره‌ی باز بفل[۵] در مبدلهای با بفلهای قطاعی، تغییرات زاویه پیچش در سیستم بفلهای حلزونی می‌تواند دامنه گسترده‌ای از سرعتهای جریان را ایجاد کند. ضمناً همپوشانی بفلهای حلزونی، عاملی است که می‌تواند اساساً روی الگوی جریان سمت پوسته اثر بگذارد. زمانی که همپوشانی بفلها کم است، سطح آزاد بزرگ در گوشه بفلها، می‌تواند جریانهای کنارگذر با مؤلفه‌های سرعت محوری ایجاد کند.

φ_S زاویه پیچش بفلها است که زاویه بین بردار جریان و صفحه عمود بر محور مبدل می‌باشد و H_S فاصله بین دو بفل هم‌موقعیت است. این دو عامل در شکل۲ نشان داده شده است.

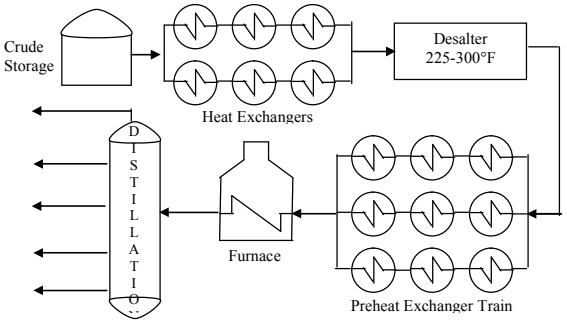


شکل ۲- شمایی از مبدل با بفلهای حلزونی (زاویه پیچش: φ و گام بفلها: H_S)

همان طور که گفته شد یکی از مزایای مبدل با بفلهای حلزونی کاهش میزان رسوب‌گذاری در سمت پوسته مبدل است. یکی از واحدهایی که در صنایع نفت با مشکل رسوب‌گذاری بالا روبروست، واحد پیش‌گرمکن نفت خام است. عموماً

۱-Single Helix
۲-Double Helix
۳-Over Lap
۴- Baffle Spacing
۵- Baffle Cut

رسوب‌های ته‌نشین شده به صورت پلیمرهای با وزن مولکولی بالا در شبکه‌های پیش‌گرمکن نفت‌خام صورت می‌گیرد. محصولات خوردگی و نمک‌های غیرآلی با پلیمرها مخلوط شده و میزان حجم رسوب را افزایش می‌دهند. اغلب انرژی ورودی در یک پالایشگاه، به واحد نفت‌خام می‌رود، جایی‌که نفت خام در مبدل‌های حرارتی پیش‌گرم می‌شود تا دمایش قبل از ورود به کوره بالا برود(شکل۳). عملکرد مبدل‌های پیش‌گرمکن در کاهش مصرف سوخت در کوره پائین‌دستی و فراهم شدن جریان خام یکنواخت به کوره، امری کاملاً ضروری است. بر اساس گزارشات ارائه شده از جایگزینی و به کارگیری مبدل با بفلهای حلزونی در این واحدها، میزان قابل توجهی صرفه‌جویی اقتصادی ناشی از افزایش فاصله زمانی تمیزکاری مبدلها و نیز کاهش مصارف انرژی در کوره پایین‌دستی حاصل شده است. از واحدهای فرایندی مهم دیگری که در پالایشگاهها با موضوع رسوب گذاری مواجه هستند، واحد هیدروتریتر و واحد ریفورمینگ را می‌توان نام برد. مبدل‌های با بفلهای حلزونی به دلیل ایجاد جریان یکنواخت در مبدل و حذف بسیاری از نقاط ساکن(که این نقاط ساکن، شرایط را برای رسوب‌گذاری فراهم می‌کند) می‌تواند به میزان بسیار زیادی روی کاهش رسوب‌گذاری در سمت پوسته مبدل مؤثر واقع شود.



شکل ۳- شمایی از یک واحد پیش‌گرمکن

با توجه به مزیت چندگانه مبدل با بفلهای حلزونی که افزایش در انتقال حرارت را به همراه کاهش در افت فشار و رسوب‌گذاری دارد، این نوع مبدل، سطح مورد نیاز کمتری در مقایسه با مبدل با بفلهای قطاعی ارائه می‌کند. این موضوع، بالاخص زمانی‌که از این فناوری در نرخهای بالای‌جریانهای-حرارتی استفاده شود(که نیاز به استفاده از چندین مبدل به صورت سری یا موازی می‌باشد)، چشمگیرتر بوده و صرفه‌جویی‌های بسیار قابل توجهی صورت خواهد پذیرفت.

در بخش بعدی، روش Bell-Delaware برای طراحی مبدلهای پوسته- لوله با بفلهای حلزونی جهت تعیین ضرایب تصحیح انتخاب شده است.

ضریب انتقال حرارت

عدد ناسلت برای سمت پوسته سیستم بفلهای حلزونی توسط رابطه زیر داده شده است:

$$Nu = 0.62(0.3 + \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{tur}^2})\prod_{1}^{8} Y_i \qquad (۱)$$

که y_1: ضریب تصحیح خصوصیات ترموفیزیکی، y_2: ضریب تصحیح برای افزایش مقیاس از یک ردیف لوله به دسته‌لوله، y_3: گرادیان معکوس دمائی، y_4: ضریب تصحیح برای جریانهای نشتی بفل- لوله و بفل- پوسته، y_5: ضریب تصحیح برای جریان‌های کنارگذر، y_6: برای فاصله‌های ابتدایی و انتهایی، y_7: ضریب تصحیح برای تغییر خصوصیات جریان متقاطع و y_8: ضریب تصحیح افزایش آشفتگی.

در مقایسه با بفلهای قطایی، دو ضریب تصحیح جدید به روابط ضریب انتقال حرارت و افت فشار برای تغییر الگوی عبوری جریان در مبدل به ضرایب تصحیح دیگر اضافه شده است (y_7 و y_8)، و یک ضریب تصحیح هم که در واقع مربوط به عبور جریان متقاطع از پنجره بفل می‌باشد، برای این نوع بفلها حذف شده است زیرا نحوه آرایش قطعات شبه ربع دایروی شکل در این مبدل به نحوی است که یک کانال حلزونی برای

گذر سیال از میان پوسته ایجاد می‌شود و شرایط جریان محوری و متقاطع، به مانند مبدل با بفلهای قطاعی وجود ندارد. با استفاده از اطلاعاتی که از نوشتجات استخراج شد، برخی از ضرایب تصحیح فوق الذکر برای جریان آشفته به صورت رابطه ارائه شد که نمایش گرافیکی برخی از روابط تصحیح و روابط آنها در ادامه آورده شده است.[۱]

$$y_5 = 0.885 - 0.43\frac{S_{sS}}{S_{2Z}} + 0.51\frac{t_t.n_{PT}}{D_1} \quad (۲)$$

$$y_6 = 0.872 - 0.52\frac{l_{tc} - l_{to}}{l_{tc}} + 0.27\left(\frac{H_S}{D_1}\right)^{0.5} \quad (۳)$$

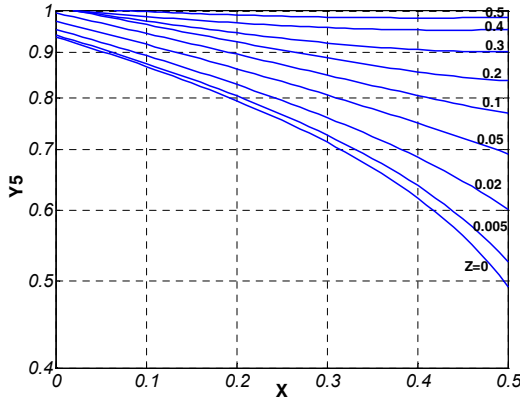
$$y_7 = 1.0077 - 2.3 * 10^{-6}\varphi^3 \quad (۴)$$

$$y_8 = (1.006 - 0.05\varphi + 0.00064\varphi^2)/(1 - 0.048\varphi + 0.00061\varphi^2) \quad (۵)$$

نکات زیادی می‌توان از این نمودار ها دریافت کرد. در اینجا به طور خلاصه فقط به ضرایب تصحیح مختص مربوط به بفلهای حلزونی (y_7 و y_8) اشاره می‌شود.

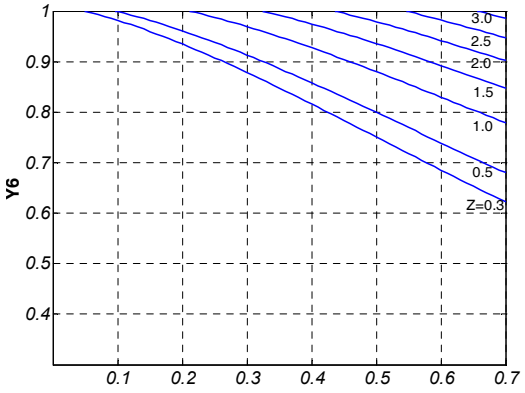
در نمودار۳ که بیانگر ضریب تصحیح برای تغییر خصوصیات جریان متقاطع است، مقدارy_7 در زوایای کمتر از 18° برابر ۱ است. این به معنای آنست که در زوایای کوچک بفلهای‌حلزونی؛ خصوصیات جریان متقاطع ایده‌آل را داریم. از این زاویه به بعد به دلیل رشد کافی مولفه سرعت محوری، مقدار ضریب تصحیح، شروع به کاهش می‌کند. این مسأله تصدیقی است بر این موضوع که جریان متقاطع در مکانیسم انتقال حرارت موثرتر از جریان محوری است.

در نمودار۴که مربوط به ضریب‌تصحیح افزایش‌آشفتگی است، در زوایای کوچکتر از 25° تقریباً هیچ افزایش آشفتگی ملاحظه نمی‌شود ولی از آن به بعد نمودار شیب سریعی می‌گیرد و در حدود زوایای 42° به ماکزیمم مقدار می‌رسد. نکته قابل توجه در مورد حاصل ضربy_7y_8 است که در واقع بیانگر خصوصیات بفلهای حلزونی است. در زوایای بین ۱۸ تا 25° این حاصل ضرب مقادیر کمتر از ۱ را می‌دهد که در واقع از بی‌ثباتی جریان در این زوایا به عنوان یک توجیه برای این نتیجه می‌توان استفاده کرد. در زاویه حدود 30° این



نمودار۱- ضریب تصحیح جریانهای کنارگذر پوسته- دسته‌لوله برای مبدل با بفلهای حلزونی

$$Z = \frac{t_t.n_{PT}}{D_1} \quad \text{و} \quad X = \frac{S_{sS}}{S_{2Z}}$$



نمودار ۲- ضریب تصحیح فاصله‌های ابتدائی و انتهائی برای مبدل با بفلهای حلزونی

$$Z = \frac{H_S}{D_1} \quad \text{و} \quad X = \frac{l_{tc} - l_{to}}{l_{tc}}$$

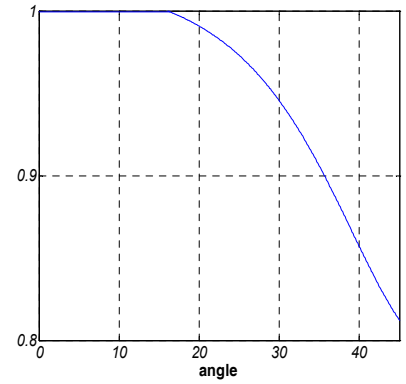
حاصل ضرب به مقدار ۱ نزدیک می‌شود و از آن به بعد شروع به افزایش می‌کند که در نهایت در زاویه حدود42° به یک مقدار ماکزیمم حدود ۱/۴ می‌رسد.

۱- روابط و گرافهای ارائه شده در اینجا برای اعداد Re بالای ۱۰۰ میباشد .

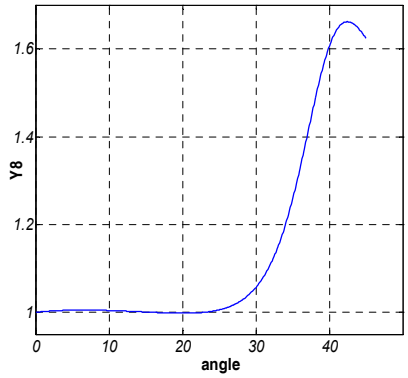
افت فشار

رابطه کلی افت فشار برای بفلهای حلزونی به صورت زیر ارائه شده است:

$$\Delta P = (\Delta P_1 + \Delta P_2).\prod_{i=1}^{4} Z_i \qquad (۶)$$



نمودار۳- ضریب تصحیح برای تغییر خصوصیات جریان متقاطع



نمودار۴- ضریب تصحیح افزایش آشفتگی

که در مقایسه با بفلهای قطایی مرسوم، ترم افت فشار ناشی از پنجره بفل را ندارد:

$$\Delta P_1 = 2 f n_r \rho u^2 \frac{l_{to}}{H_S} \qquad (۷)$$

$$\Delta P_2 = 2 f n_r \rho u^2 Z_5 \qquad (۸)$$

که Z_1:ضریب تصحیح خصوصیات ترموفیزیکی؛ Z_2: ضریب تصحیح جریانهای نشتی و کنارگذر؛ Z_3: ضریب تصحیح فاصلههای ابتدایی و انتهایی؛ Z_4: ضریب تصحیح تغییر خصوصیات جریان متقاطع و Z_5: ضریب تصحیح افزایش آشفتگی می‌باشد.

روابط مربوط به هرکدام از این ضرایب تصحیح (همانند روابط مربوط به ضرایب انتقال حرارت)، استخراج شده است و از این طریق افت فشار کل مبدل مورد محاسبه قرار می‌گیرد.

رویه طراحی سریع برای بفلهای حلزونی

این نوع الگو های طراحی در حقیقت آخرین و جدیدترین روش طراحی مبدلهای‌حرارتی به‌شمار می‌رود و یک روش ساده و جالب است. فلسفه این روش، استفاده از حداکثر مقدار افت فشار مجاز برای هر دو جریان سرد و گرم است. استفاده کامل از افت فشارها سبب می شود تا مبدل در حداکثر سرعتهای ممکن و نتیجتاً حداکثر ضرایب انتقال حرارت عمل کند و لذا مبدل کوچکترین اندازه را برای یک سرویس خاص خواهد داشت و در نهایت از لحاظ اقتصادی هم صرفه‌جویی خواهد شد. در این روش سعی بر این است که روابط ساده‌ای بین افت فشار و ضریب انتقال حرارت برقرار شود. رویه طراحی سریع مبدل حرارتی روشی است که در زمینه عملکرد و بهینه‌سازی مبدل نیز جواب قابل قبولی به ما می‌دهد. روش کلی طراحی بدین صورت است که ابتدا روابط ساده‌ای بین ΔP و h (افت فشار و ضریب انتقال‌حرارت) در هر دو سمت لوله و پوسته تولید شده که در آنها کمیت سطح مبدل-حرارتی نیز وجود داشته باشد. یعنی:

$$\Delta P = f(h, A)$$

سپس این روابط به همراه دو معادله دیگر با هم تلفیق می‌شوند که در نهایت با حل یک معادله غیر خطی بر حسب A، سطح مبدل حرارتی به دست می‌آید. پیش از این روابطی برای سمت لوله و پوسته‌مبدل با بفلهای مرسوم داده شده است. روابط برای سمت لوله، به صورت زیر ارائه شده است [۵]:

$$\Delta P_t = K_t . A h_t^{3.5} \qquad (۹)$$

$$K_t = 1/(0.023)^{2.5} D^{0.5} \mu_t^{11/6} / (M_t \rho_t k_t^{7/3} C_{pt}^{7/6})(D/D_t)[(\mu_t/\mu)^{-0.14}]^{4.5} \qquad (۱۰)$$

روابط مشابهی برای سمت پوسته بر اساس روشهای Kern (توسط Jegede و Polley [۶]) و Bell [۱۰] برای بفلهای قطاعی ارائه شده است. در اینجا چنین رابطه‌ای برای سمت پوسته‌ی بفلهای حلزونی بر اساس روش Bell توسعه‌یافته، ارائه شده است:

$$\Delta P = 2fn_r\rho u^2 Z_1 Z_2 Z_3 Z_4 (\frac{l_{to}}{H_S} + Z_5) \quad (۱۱)$$

(۱۲)

$$h = 0.62(0.3 + \frac{0.037\,\mathrm{Re}^{0.7}\,\mathrm{Pr}}{1 + 2.443\,\mathrm{Re}^{-0.1}(\mathrm{Pr}^{0.67} - 1)}) \prod_{i=1}^{8} y_i . \frac{\lambda_2}{l}$$

رابطه بین افت فشار و ضریب انتقال حرارت برای رژیم جریان آشفته و بر اساس رویه طراحی سریع که در آن حذف سرعت و ایجاد عبارت سطح انتقال حرارت تکنیک به کاررفته برای به دست آمدن این روابط بود، به صورت زیر به دست آمد:

$$\Delta P = (K_1 h + K_2)^{2.857} . (K_3 A + K_4) \quad (۱۳)$$

$$K_1 = [\pi d(1 + 2.443\,\mathrm{Re}^{-0.1}(\mathrm{Pr}^{0.67} - 1))] / [0.046 c_p \mu^{0.3} \rho^{0.7} D^{0.7} \prod_{i=1}^{8} y_i] \quad (۱۴)$$

(۱۵)

$$K_2 = [8.105\lambda(1 + 2.443\,\mathrm{Re}^{-0.1}(\mathrm{Pr}^{0.67} - 1))] / [c_p \mu^{0.3} \rho^{0.7} D^{0.7}]$$

$$K_3 = [2fn_r\rho Z_1 Z_2 Z_3 Z_4] / [n\pi d H_S] \quad (۱۶)$$

$$K_4 = 2fn_r\rho \prod_{i=1}^{5} Z_i \quad (۱۷)$$

روابط زیر را داریم:

$$Q = U.A.F_T.\Delta T_{LM} \quad (۱۸)$$

$$U^{-1} = \frac{1}{h_s} + \frac{1}{h_t} + R_D \quad (۱۹)$$

$$\Delta P_s = f(A, h_s) \quad ، \quad h_s = f(A, \Delta P_s) \quad (۲۰)$$

$$\Delta P_t = f(A, h_t) \quad ، \quad h_t = f(A, \Delta P_t) \quad (۲۱)$$

با جایگزینی رابطه (۱۸) در (۱۹) و با داشتن ΔP_t و ΔP_s رابطه (۲۲) به دست می‌آید:

$$(\frac{Q}{A.F_t.\Delta T_{LM}})^{-1} = \frac{1}{h_s} + \frac{1}{h_t} + R_D \quad (۲۲)$$

معادله فوق یک معادله غیرخطی بر حسب A است که با حل این معادله سطح مورد نیاز برای مبدل به دست می‌آید و از روی آن h_s و h_t محاسبه می‌شود. به همین ترتیب، دیگر عوامل مربوط به مبدل محاسبه می‌شوند. نکته قابل توجه این است که وقتی مبنای طراحی بر اساس روش Kern باشد، دستیابی به جواب در یک مرحله امکان‌پذیر است. اما وقتی مبنای طراحی براساس روش Bell انتخاب شده باشد، به دلیل زیاد ی عوامل موجود در روابط این روش، نیاز به برخی حدس‌های اولیه از جمله برای قطر پوسته خواهیم داشت.

مقایسه بین بفلهای حلزونی و قطاعی (اثر به کار گیری برخی وسایل افزاینده انتقال حرارت داخل لوله)

در این مقایسه ارزیابی عملکرد (Rating) یک مبدل صنعتی در حال کار برای هندسه‌های متفاوت سمت پوسته شامل بفلهای حلزونی و بفلهای قطاعی انجام شده و اثر استفاده از وسایل افزاینده انتقال حرارت داخل لوله مورد بررسی قرار گرفته است. شرایط عملکردی مبدل، در ادامه ارائه شده است.

سیال گرم وارد پوسته می‌شود، ضریب رسوب گذاری در سمت لوله ۰٫۰۰۲ و در سمت پوسته ۰٫۰۰۱ می باشد، قطرخارجی لوله‌ها ۱ اینچ و آرایش آنها به صورت مربعی بوده و نسبت گام ۱٫۲۵ است. طول لوله‌ها ۱۲۰ اینچ و قطر پوسته ۳ فوت می‌باشد. مشخصات مبدل و جریانهای ورودی آن در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- مشخصات مبدل و جریانهای ورودی آن

	سیال	نرخ جریان (lb/hr)	دمای ورودی (°F)	افت فشار مجاز (Psi)	تعداد گذر	قطر نازل (in)	جنس
پوسته	Naphtha		۳۹۰	۵	۱	۳	C.S.
لوله	Crude	۱۲۵۹۰۰۰	۹۰	۱۰	۲	۱۴	C.S.

جدول ۲ - نتایج حاصل از اثر به کارگیری تکنولوژیهای بهبود انتقال حرارت برای یک مبدل صنعتی در حال کار

	بفلهای قطاعی	قطاعی/ اینزرت‌نوارپیچ	قطاعی/اینزرت شبکه‌ای	بفلهای حلزونی	حلزونی/اینزرت نوارپیچ	حلزونی/اینزرت شبکه‌ای
C°دمای خروجی پوسته	۱۴۹	۱۲۹	۱۳۲	۱۳۶	۱۱۶	۱۱۹
C° دمای خروجی لوله	۱۰۱٫۰۳	۱۰۱٫۹۶	۱۰۱٫۸	۱۰۱٫۶۳	۱۰۲٫۵۴	۱۰۲٫۳۹
ضریب انتقال حرارت سمت پوسته(W/m^2K)	۶۸	۶۸	۶۸	۹۲	۹۲	۹۲
ضریب انتقال حرارت سمت لوله(W/m^2K)	۱۵۳٫۴۴	۵۶۰٫۳	۳۸۳٫۸۸	۱۵۳٫۴۴	۵۶۰٫۳	۳۸۳٫۸۸
افت‌فشار سمت پوسته(kPa)	۰٫۲۸۸	۰٫۲۸۸	۰٫۲۸۸	۰٫۲۵۸	۰٫۲۵۸	۰٫۲۵۸
افت فشار سمت لوله(kPa)	۷٫۶۶	۱۷٫۰۶	۱۰۱٫۲۸	۷٫۶۶	۱۷٫۰۶	۱۰۱٫۲۸
افزایش ضریب کلی انتقال حرارت	۰	٪۳۴٫۳۸	٪۱۴٫۰۴	٪۲۰٫۰۸	٪۷۴٫۱۲	٪۶۱٫۳۵

مقایسه برای ۶ حالت، انجام شد تا بتوان در حین مقایسه بین مبدل با بفلهای حلزونی و قطاعی، اثر به کارگیری برخی از ابزارهای بهبود انتقال حرارت را هم دید. در سه حالت از بفلهای قطاعی و در سه حالت دیگر از بفلهای حلزونی استفاده شده است. از وسایل افزاینده انتقال حرارت داخل لوله برای بررسی اثر آنها در عملکرد مبدل استفاده شده است. نتایج به دست آمده در جدول ۲ خلاصه شده است.

نتایج از سه دیدگاه با هم مقایسه شده‌اند. از نظر ضرایب انتقال حرارت در سمت پوسته وقتی از بفلهای حلزونی استفاده می‌شود افزایش ٪۳۶[1] حاصل شده و در سمت لوله وقتی از وسایل افزاینده انتقال حرارت داخل لوله با هندسه‌های پیچشی و شبکه‌ای استفاده شده، به ترتیب افزایش ۲٫۶۵ و ۱٫۵ رابری صورت گرفته است. در زمینه افت‌فشار برای سمت پوسته، برای حالتی که از بفل های‌حلزونی استفاده شد، کاهش ۱۰ درصدی حاصل شد. اما برای سمت لوله، وقتی از وسایل افزاینده انتقال حرارت داخل لوله استفاده شده افت فشار بالا رفته است و برای هندسه‌های پیچشی و شبکه‌ای به ترتیب ۱٫۲۲ و ۱۲٫۲۲ برابر در مقایسه با لوله‌های خالی افزایش افت فشار ملاحظه شد. نکته قابل توجه در مورد خطای افت فشار ایجاد شده توسط وسایل افزاینده انتقال حرارت داخل لوله که برخی افراد آن را دلیل عدم به کارگیری در واحدهایشان یادمی‌کنند ،این مقایسه افت‌فشاری است که در سرعتهای یکسان صورت نمی‌گیرد و نیز اینکه ایجاد افت فشارتحمیلی می‌تواند سبب استفاده از حداکثر افت فشار مجاز شود [۷]. اما ردیف انتهایی جدول ۲ نسبت افزایش ضریب انتقال‌حرارت‌کلی برای مبدلها را (در مقایسه مبدل با بفلهای قطاعی و بدون ابزار بهبود دهنده انتقال حرارت) نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است در کلیه حالتها ، میزان بهبود قابل توجهی وجود دارد ولی بهترین

۱- $\frac{92.3-68}{68}*100=36\%$

نتایج؛ از بفلهای‌حلزونی به دست آمده است. قابل توجه است با این که سمت پوسته کنترل‌کننده می‌باشد (به دلیل h کمتر) اما استفاده از ابزارهای بهبود انتقال حرارت در سمت لوله کمک به سزایی در بالا رفتن ضریب انتقال حرارت کلی کرده است. برای محاسبه بهبود کلی کارکرد مبدل نیاز است تا از رابطه‌ای شامل هر سه ترم ضریب انتقال‌حرارت، افت فشار و رسوب‌گذاری استفاده‌کرد اما به هر حال کاملاً روشن است که بفلهای حلزونی به دلیل مزایایی که در کنار هم ایجاد می‌کنند از مناسب‌ترین روشهای بهبود کارکرد مبدلهای مرسوم هستند. در زمینه میزان کاهش رسوب‌گذاری توسط این بفلها گزارشاتی داده شده است [۸].

نتیجه گیری

بر اساس مطالعات صورت گرفته و نتایج ارائه شده، بی‌شک؛ مبدلهای با بفلهای حلزونی، جایگزین مناسبی برای مبدلهای مرسوم است و بسیاری از نقاط ضعف مربوط به آنها را پوشش می‌دهند.

حاصل ضرب دو ضریب تصحیح y_8y_7 در نزدیکی زاویه 42° به ماکزیمم مقدار ۱٫۴ می‌رسد و مهمترین اثر در افزایش مقدار h برای بفلهای‌حلزونی دارای ضریب تصحیح افزایش آشفتگی (y_8)است که مقادیر بزرگتر از ۱ را می‌دهد.

رابطه رویه طراحی سریع برای بفلهای حلزونی و در رژیم جریان آشفته به صورت زیر ارائه شد:

$$\Delta P = (K_1 h + K_2)^{2.857}.(K_3 A + K_4)$$

در مقایسه‌ای که صورت گرفت یک مبدل صنعتی با بفلهای حلزونی در مقایسه با همان مبدل با بفلهای قطاعی افزایش ۳۶ درصدی ضریب انتقال‌حرارت را به همراه کاهش ۱۰ درصدی افت فشار نشان داد که این موارد به همراه رسوب‌گذاری کمتر در این نوع مبدلها، کاهش قابل توجهی را در هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی در پی خواهد داشت.

استفاده همزمان از دو یا چند تکنولوژی بهبود کارکرد مبدلها می‌تواند اثرات بمراتب بهتری داشته باشد و باید در طراحی‌های جدید از ابتدا نقش ابزارهای بهبود دهنده انتقال حرارت را در نظر گرفت تا نهایتاً مبدل طراحی شده اندازه کوچکتر و کارایی بالاتری داشته باشد.

علائم

D_1 : قطر داخلی پوسته

f : ضریب اصطکاک

H_S : گام بفلهای مارپیچ

$k_t(W/mK)$: ضریب هدایت حرارتی سیال لوله

l_{to} : طول دسته لوله منهای فاصله های ابتدایی و انتهایی

l_{tc} : طول لوله

n_r : تعداد ردیفهای لوله در خط مرکزی

n_{pt} : تعداد نوارهای آب بندی

S_{sS} : سطح کنار گذر پوسته- دسته لوله برای یک بفل

S_{2Z} : سطح جریان متقاطع عبوری از میان بفلها

t_t : گام لوله

u : سرعت

y_i : ضریب تصحیح برای انتقال حرارت

Z_i : ضریب تصحیح برای افت فشار

φ: زاویه بفل

ρ : دانسیته سیال

μ : ویسکوزیته سیال

l_2 (W/mK): ضریب هدایت حرارتی سیال لوله

منابع

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

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

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

[4] P. Stehlik & J. Nemcansky & D.Kral & L.W. Swanson, "Comparison of Correction Factors for Shell and Tube Heat Exchangers", Heat Transfer Engineering, vol.15 , no.1, 1994.

[5] Uday V. Shenoy, "*Heat Exchanger Network Synthesis*", 1995, Gulf Publishing Company.

[6] Jegede.F.O. & Polley.G.T., "*Optimum Heat Exchanger Design"*, Trans IChemE,Vol.70, part A, March, pp. 133-141, 1992.

[7]G.T.Polley, "Application of Heat Transfer Enhancement", www.pinchtechnology.com, Nov. 2001.

[8] B.I. Master, Krishnan S. Chunangad and Venkateswaran Pushpanthan,"Fouling Mitigation Using Helixchanger Heat Exchangers", ABB Lummus Heat Transfer, 2002.

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

[10] G.T Polley, M.H. Panjeh shahi, M. Picon Nunez, Rapid Design Algorithm for Shell and Tube and Compact Heat Exchangers" , Trans. IchemE, p. 435-444,vol.69, part A, Nov. 1991.