مقاله

استفاده از لوله‌های پیچشی در مبدل‌های حرارتی و مقایسهٔ آن با لوله‌های مسطح

آرش قنبری*
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک
پژوهشگاه صنعت نفت
ghanbariar@ripi.ir

رضا نج
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک
پژوهشگاه صنعت نفت
najr@ripi.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۱/۱۴

چکیده

مبدل‌های حرارتی پوسته - لوله[1] به‌طور معمول با لوله‌های مسطح[2] ساخته می‌شوند، اما وجود برخی محدودیت‌ها و مشکلات در این نوع لوله‌ها، شرکت‌ها و مراکز تحقیقاتی را برآن داشته است که با استفاده از فناوری‌های جدید بر این محدودیت‌ها و معایب غلبه کنند. دراین مقاله به بررسی عملکرد مبدل‌های پوسته - لوله با لوله‌های پیچشی[3] در هر دو سمت پوسته و لوله پرداخته خواهد شد. این نوع مبدل‌ها در قسمت پوسته دارای مزیت‌هایی نسبت به مبدل‌های با لوله‌های مسطح می‌باشند که شامل افزایش راندمان انتقال حرارت، کاهش میزان افت فشار در طول پوسته، کاهش میزان رسوبات و خوردگی به‌علت عدم وجود بافل‌ها و کاهش چشمگیر میزان ارتعاشات ناشی از عبور جریان است. نتایج تحقیقات روی لوله‌ها نشان می‌دهد میزان انتقال حرارت برای لوله‌های پیچشی در دبی‌های بالاتر (۱/۵ لیتر در دقیقه) حدود ۴۵ درصد بهتر است و افت فشار در طول لوله برای جریانهای آشفته (رینولدز ۶۰۰۰) حدود ۴۰ درصد بالاتر خواهد بود. این روند در دبی‌های پایین‌تر برعکس خواهد بود، به این صورت که میزان انتقال حرارت برای لوله‌های مسطح در دبی‌های پایین (۰/۲۵ لیتر بر دقیقه) حدود ۹ درصد بهتر است.

واژگان کلیدی: مبدل حرارتی پوسته - لوله، لولهٔ پیچشی، لولهٔ مسطح، انتقال حرارت

۱. مقدمه

در مبدل‌های حرارتی تمرکز اصلی به حداکثر رساندن میزان انتقال حرارت، کاهش اندازه مبدل و کاهش توان پمپاژ می‌باشد. برای این منظور از روش‌های مختلف برای اصلاح مبدل‌های با لوله‌های مسطح استفاده شده است. یکی از این تکنیک‌ها استفاده از لولهٔ پیچشی به‌جای مسطح می‌باشد، که در حال حاضر محدود به مبدل‌های پوسته –

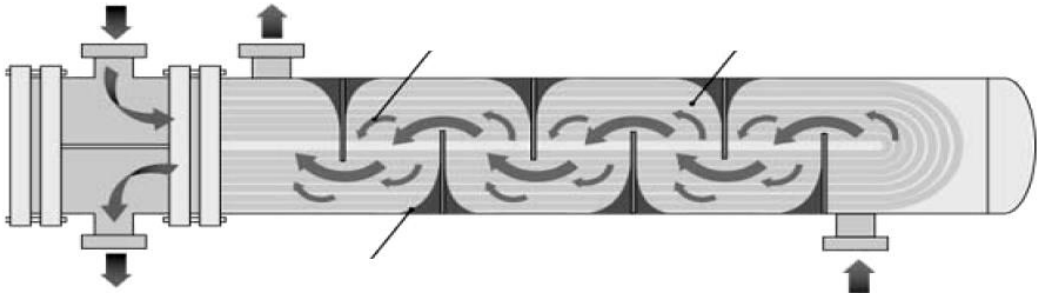
لوله با کاربرد عبور مستقیم و طولانی[۴] و جریانهای آشفته می‌باشد. هدف اصلی از این مطالعه مقایسه عملکرد مبدل حرارتی لوله مسطح با پیچشی در جنبه های مختلف برای امکان سنجی استفاده در کاربردهایی گوناگون در صنایع می‌باشد. مطالعات گوناگونی در زمینه مبدل‌های با لولهٔ پیچ‌خورده انجام شده است. در یک نمونه از مطالعات تأثیر پارامترهای هندسی بر روی انتقال حرارت صورت پذیرفته که نتایج نشان می‌دهد با افزایش نسبت قطرهای سطح مقطع هر دو ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک افزایش میابد [۱]. در حالی‌که هر دوی این ضرایب با افزایش گام لوله کاهش خواهد یافت [۲]. در تحقیق دیگری تاثیر زاویه بین پروفیل سرعت و دما بر انتقال حرارت بررسی شده است که نتایج نشان میدهد هرچه این زاویه بیشتر باشد نرخ انتقال حرارت همرفت در شرایط یکسان بالاتر خواهد بود [۳]. در یک تحقیق دیگر پدیده رسوب گرفتگی[۵] در داخل لوله های پیچ خورده بررسی شده است. نتایج نشان میدهد که در گستره سرعت‌های ۱ تا ۲ متر بر ثانیه و در حرارت‌های ورودی مختلف میزان رسوب در لوله ها بطور مداوم افزایش می یابد [۴]. از نقطه نظر ضرایب انتقال حرارت، لوله های پیچ خورده نسبت به لوله های مسطح دارای ضریب انتقال حرارت بالاتری میباشند و از طرفی افت فشار به علت عدم وجود بافل‌ها[۶] در سمت جریان پوسته کمتر می باشد. تحلیل کلی کارکرد مبدل نیز نشان میدهد برای جریانهای با سرعت بیشتر در هر دو سمت پوسته و لوله، راندمان کلی لوله های پیچ خورده بالاتر میباشد [۵].

در مطالعات صورت گرفته اکثر موضوعات در حیطه انتقال حرارت و افت فشار بر روی یک نوع جریان با دبی ثابت متمرکز شده بود در این تحقیق ارزیابی کارایی مبدلهای با لوله های پیچ خورده در دبی های مختلف و جریانهای آرام و آشفته (اعداد رینولدز متغیر) انجام خواهد شد و با لوله های مسطح مقایسه خواهند شد و حیطه کاربرد بهینه آنها برای جریانهای آرام و آشفته و در دبی های مختلف مشخص میگردد.

۲. مبدل‌های حرارتی پوسته – لوله با لوله‌های مسطح

مبدلهای پوسته – لوله رایج در صنعت از مجموعه ای از لوله های مدور و مسطح که توسط تیوب شیتها[۷] در دو انتها حفظ شده اند، تشکیل شده است. به کل این سیستم مجموعه لوله‌ها[۸] گفته میشود که در داخل یک سیلندر به اسم پوسته قرار گرفته است. سایز لوله و پوسته و طول آنها میتواند بر اساس نیازهای مختلف طراحی و پس از محاسبات گرمایی تعیین گردد. مساحت سطح انتقال حرارت می تواند از چند متر مربع تا بیش از ۲۵۰۰۰ متر مربع متفاوت باشد. مجموعه لوله ها معمولاً شامل تعدادی بافل است که در امتداد لوله ها و در جهت عمود بر آنها قرار گرفته اند. این بافل ها دو وظیفه اصلی بر عهده دارند، یکی به عنوان یک تکیه گاه نگهدارنده برای لوله ها عمل میکنند و از طرف دیگر وظیفه هدایت جریان را ایفا میکنند به صورتی که جریان داخل پوسته عمود بر لوله ها حرکت کند نه در امتداد آنها در نتیجه بیشترین انتقال حرارت صورت پذیرد. البته به علت اینکه در این حالت بیشتر انرژی سیال صرف معکوس کردن جریان میشود لذا انتقال حرارت کاهش یافته و از طرف دیگر افت فشار در طول مسیر بالا میرود. در انتها جریان سیال حول بافل ها یک جریان غیر یکنواخت خواهد شد که منجر به ایجاد نواحی جریان کم[۹] و نقاط مرده[۱۰] خواهد شد که در نتیجه این عوامل، مبدل مستعد تجمع رسوب، خوردگی و انتقال حرارت کمتر میگردد. در شکل ۱ نمایی از یک مبدل حرارتی با لوله های مسطح دیده میشود [۶]. تاثیر حرارتی[۱۱] (ξ) در مبدل‌های حرارتی معمولی پوسته – لوله با فرض اختلاط کامل شعاعی و نه محوری جریان سمت پوسته محاسبه میشود ولی در عمل اختلاط محوری قابل ملاحظه ای در فواصل بین دو تیغه صورت میپذیرد. این تاثیرات با فرار جریان

سمت پوسته از فضای مابین تیغه ها و لوله ها و یا فضای بین تیغه ها و بدنه پوسته پیچیده تر میگردد زیرا که این نوع فرار جریانها هیچ نوع تاثیری در فرایند انتقال حرارت نخواهند داشت.

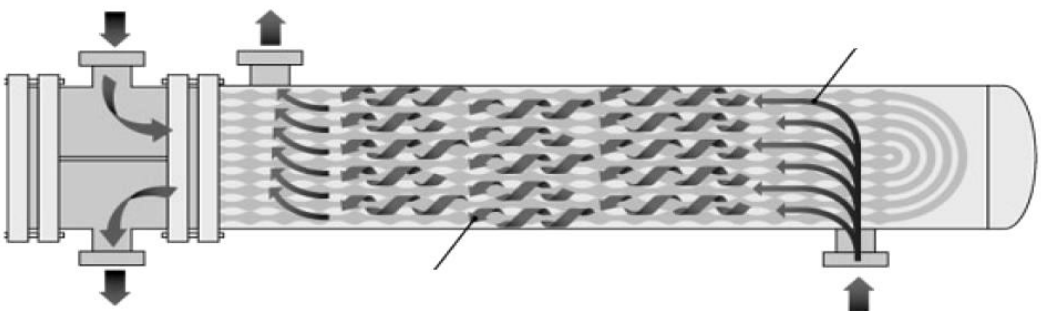


شکل ۱. نمایی از مبدل پوسته – لوله با لوله مسطح [۶]

۳. مبدل‌های حرارتی با لوله‌های پیچشی

منشاء پیدایش مبدل‌های حرارتی با لوله های پیچشی در اروپای شرقی بوده است ولی استفاده تجاری آن اولین بار در کشورهای حوزه اسکاندیناوی در سال ۱۹۸۰ صورت گرفته است. این مبدلها ابتدا برای حل محدودیتهای ذاتی موجود در مبدلهای رایج به صنعت ارائه شدند. کاربرد اولیه این نوع مبدلها در فرایندهای یک فازی و برای فرایندهای تراکمی در صنایع کاغذ و فرایندهای حرارتی با سطح انتقال حرارت محدود در صنایع فرایندی بوده است. ولی با گذشت زمان حیطه کاربرد آنها در صنایع دیگر نیز گسترش یافت.

این مبدلها از یک مجموعه ای از لوله های شکل یافته تشکیل شده اند که بدون استفاده از تیغه ها تشکیل مجموعه لوله ها را داده اند. در شکل ۲ نمایی از ساختار این نوع مبدلها مشاهده میشود [۶].



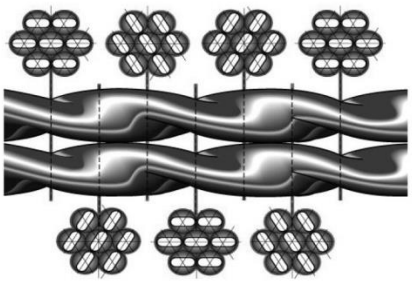
شکل ۲. نمایی از مبدل پوسته– لوله با لوله پیچشی [۶]

لوله‌ها با تکنیکی منحصر به فرد شکل یافته اند که دارای سطح مقطع بیضوی و ساختار مارپیچی در امتداد لوله‌ها میباشند که جریان مارپیچی سیال را در امتداد لوله ها موجب میشوند (شکل ۳). فرایند شکل دهی این نوع لوله ها به گونه ای طراحی شده است که ضخامت یکسان در طول لوله ها را ضمانت میکند و تنش تسلیم در امتداد لوله ها از حد مجاز فراتر نخواهد رفت. انتهای لوله ها به صورت مدور ساخته میشوند که امکان اتصال رایج بین لوله ها و تیوب شیتها را فراهم سازد.

گستره وسیعی از مواد شامل فولاد کربنی، فولاد ضد زنگ، آلیاژهای کروم – مولیبدن، داپلکس و یا سوپرداپلکس مانند تیتانیوم، زیرکونیوم میتوانند در ساخت این نوع لوله ها به کار گرفته شوند. لوله ها نیز در اندازه های مختلف میتوانند ساخته شوند.

شکل ۳. مسیر جریان سمت لوله [۶]

لوله ها در یک آرایش مثلثی که هر لوله با چرخش مناسب، خود را با پیچش در امتداد طول لوله ها سازگار نماید، روی هم قرار گرفته اند. این تنظیم پیچش به این منظور است که هر لوله با لوله های مجاور خود در امتداد طول لوله ها در چندین نقطه در تماس قرار گیرد (شکل ۴) [۷]. با وجود چندین نقطه تماس هر لوله با لوله های مجاور خود یک مجموعه کاملی از لوله ها که بصورت خیلی محکم در جهت محیطی بسته شده اند و اجازه هیچ گونه حرکت اضافی به لوله ها را نمیدهند، تشکیل میشود. در ادامه این مجموعه قوی در دو انتها توسط تیوب شیتها ثابت میگردند.

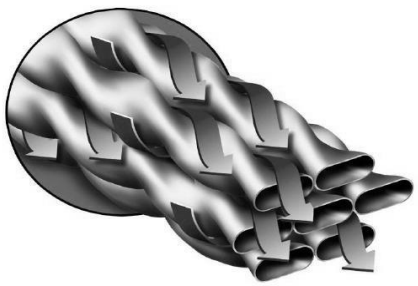


شکل ۴. تنظیم پیچش لوله ها و تکیه گاه آنها [۷]

جریان سیال داخل پوسته پیچیده و عمدتا در راستای محوری می باشد (شکل ۵). در این نوع مبدلها معمولا مساحت جریان داخل پوسته با مساحت جریان داخل لوله ها یکسان است. مجموعه لوله ها توسط بدنه پوسته به نحوی پوشانده شده است تا فرار جریان به حداقل خود برسد و به علت وجود لوله های پیچشی امکان جریان چرخشی سیال درون پوسته را فراهم می آورد تا بدینوسیله انتقال حرارت را بهبود بخشد.

۴. مزایای استفاده از مبدل با لوله‌های پیچشی

استفاده از این نوع مبدلها به علت نوع ساختار و حذف بافل ها، مزیتهایی را در قسمت پوسته مبدل فراهم اورده است که در ادامه به آن اشاره خواهد شد ولی برای بررسی کارایی این نوع مبدلها در قسمت لوله باید تحلیلهایی صورت پذیرد که در قسمت بعد به آن پرداخته خواهد شد.



شکل ۵. جریان چرخشی داخل پوسته [۶]

۴-۱. کارایی هیدرولیکی و گرمایی

حذف بافل ها و استفاده از لوله های پیچشی و به تبع آن جایگزینی جریان پیچشی سمت پوسته با جریان رفت و برگشتی ناشی از وجود بافل ها امکان ضریب انتقال حرارت بیشتر را در هر واحد افت فشار فراهم می آورد و بالعکس افت فشار برای ضریب انتقال حرارت ثابت تا ۵۰ درصد کاهش خواهد داشت. بعلاوه در این نوع لوله ها به علت وجود جریان چرخشی، همانند لوله های مسطح به هنگام استفاده از نوار پیچشی یا برهم زننده جریان ضرایب انتقال حرارت بهبود خواهد یافت. نتیجه این تاثیرات کاهش سطح انتقال حرارت مورد نیاز در لوله های پیچشی در مقایسه با لوله های مسطح برای یک مقدار انتقال حرارت ثابت خواهد بود که راندمان را افزایش داده و باعث کاهش اندازه مبدل خواهد گردید.

۴-۲. ضریب تاثیر حرارتی بالاتر

همانگونه که اشاره شد به علت وجود لوله های پیچشی و حذف بافل، جریان پیچشی حول لوله ها شکل گرفته که باعث میشود فرار جریان به حداقل مقدار خود رسیده و

جریان سمت پوسته بیشترین تماس و انتقال حرارت را با لوله ها داشته باشند و در نتیجه اختلاف مقدار انتقال حرارت واقعی با انتقال حرارت محاسبه شده به حداقل خود رسیده و ضریب تاثیر حرارتی مجموعه بهبود یابد.

۴-۳. کاهش میزان رسوبات

حذف نقاط مرده در داخل پوسته و افزایش توربولانس در هر دو سمت لوله و پوسته منجر به کاهش میزان رسوبات میگردد. خصوصیات رسوبات در این نوع مبدلها بیشتر شبیه مبدلهای صفحه ای است. کمتر بودن افت فشار در سمت پوسته به معنای امکان افزایش بیشتر سرعت میباشد که باعث کاهش گرفتگی و مسدود شدن مسیر میگردد.

۴-۴. کاهش میزان ارتعاشات

ارتعاشات ناشی از عبور جریان در مبدلهای با لوله مسطح با وجود هرگونه تمهیدات پیشگیرانه مانند تکیه گاه های بیشتر برای لوله ها همچنان رخ میدهد. خطرناکترین نوع ارتعاشات، ناپایداری الاستیک–سیال میباشد که میتواند در عرض چند ساعت کارکرد منجر به خرابی گردد. امکان این نوع ناپایداری در مبدلهای با لوله پیچشی بوسیله جریان پیچشی کاملا برطرف شده است زیرا لوله ها توسط لوله های مجاور در فاصله هر ۵ سانتیمتر در طول لوله ها محکم گردیده اند. البته در ورودی و خروجی جریان مقداری جریان عرضی وجود خواهد داشت ولی با توجه به تکیه گاههای مناسب ارتعاشات ناشی از آنها ناچیز خواهد بود.

۴-۵. کاربرد

تاکنون تعداد بسیار زیادی از این نوع مبدلها در صنایع مختلف به کار گرفته شده اند. لیستی از کاربردهای این نوع مبدلها در جدول ۱ مشاهده میشوند. جدول ۲ یک مقایسه کلی بین مبدل با لوله پیچشی و لوله مسطح را در زمینه کاربردهای واقعی اعم از انتقال حرارت، سطح تماس و صرفه جویی در هزینه ها را ارائه میدهد. لازم به ذکر است که اطلاعات ارائه شده در جدول ذیل برای مبدل از جنس فولاد کربنی می باشد.

جدول ۱. کاربرد مبدلهای با لوله های پیچشی در صنعت [۶]

کاربرد	صنایع
سرمایش اسید سولفوریک	شیمیایی
پیش گرمایش آمونیاک	
سرمایش و گرمایش پراکسید هیدروژن	
سرمایش یا گرمایش گازهای با فشار بالا	نفت
گرمایش نفت خام	
گرمایش قیر طبیعی	
گرمایش گاز طبیعی مایع	
سرمایش یا گرمایش مایع سیاه	کاغذ
سرمایش یا گرمایش روغن	
توربین تراکم بخار	نیروگاه برق
گرمایش آب تغذیه کننده دیگ بخار	
خنک کاری روغن روانکاری	
سرمایش روغن خنک کاری فولاد	فولاد
سرمایش گازهای متراکم شده	
خنک کاری روغن روانکاری	
گرمایش آب مدار بسته	گرمایش مرکزی

جدول ۲. مقایسه بین مبدل با لوله پیچشی و لوله مسطح [۶]

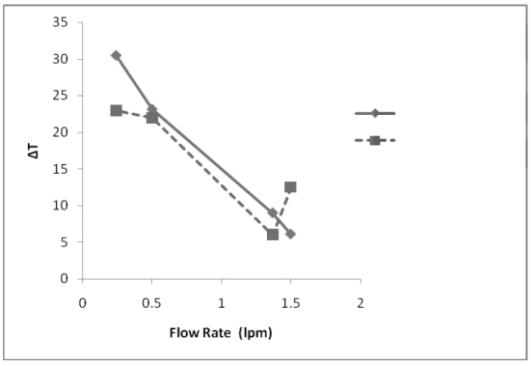
سمت پوسته					
دما	ورودی	۱۲۱	۱۱۸	۵۰	۱۲۷
	خروجی	۵۹	۵۷	۳۶	۸۲
سمت لوله					
دما	ورودی	۳۸	۳۶	۱۸	۵۲
	خروجی	۹۴	۹۴	۲۳	۷۹
سطح انتقال حرارت	مسطح	۸۹۳	۱۰۷	۸۳۴	۲۰۰
	پیچشی	۴۴۱	۷۱	۵۱۲	۱۰۲
قیمت (هزار دلار)	مسطح	۱۳۰	۳۵	۲۱۵	۴۰
	پیچشی	۹۰	۲۵	۱۷۰	۳۰

۵. مقایسه بین مبدلهای با لوله پیچشی و مسطح

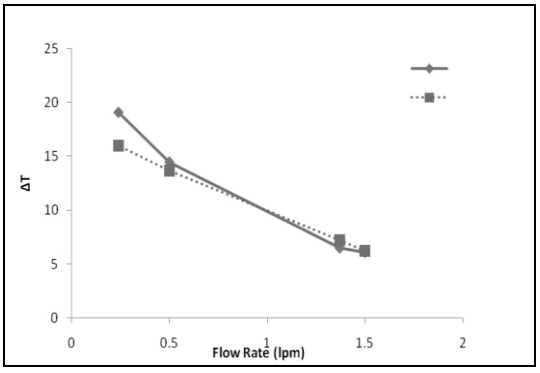
برای مقایسه دقیقتر بین این دو نوع مبدل یک آنالیز تحلیلی بین دو نوع لوله صورت گرفته است و کارایی انتقال حرارت دو نوع مبدل با بررسی سرعت و توزیع دما انجام گردیده و در نهایت با نتایج حاصل از تست میدانی و آزمایشکاهی [۸] مقایسه میگردد. در انتها مشخص خواهد شد علیرغم مزیتهای گفته شده برای لوله های پیچشی آیا این نوع مبدلها در همه شرایط بازدهی بهتری خواهند داشت یا خیر؟ پس از بررسی روشهای تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی نتایج زیرحاصل گردیده اند:

در شکل ۶ منحنی اختلاف دما بر حسب نرخ جریانهای مختلف حاصل از آزمایش [۹] نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده میشود در شدت جریان پایین عملکرد مبدل با لوله مسطح حدود ۹٪ بهتر از لوله پیچشی است ولی در شدت جریان بالاتر راندمان مبدل با لوله پیچشی حدود ۴۵٪ بهتر از لوله مسطح می باشد. دلیل این پدیده اینست که در شدت جریان پایین آشفتگی جریان کمتر بوده و پروفیل سرعت در مسیر پیچشی لوله بطور کامل توسعه نمی یابد ولی در لوله های مسطح با وجود اینکه آشفتگی جریان پایین بوده ولی پروفیل سرعت و لایه مرزی گرمایی بطور کامل توسعه یافته پس راندمان انتقال حرارت بالاتری خواهد داشت.

در جریانهای آشفته با شدت جریان بالاتر، در لوله های پیچشی، جریان فرصت کافی جهت تکامل پروفیل سرعت را خواهد داشت و در نتیجه جریان کاملا به دیواره داخلی لوله چسبیده و راندمان انتقال حرارت در مقایسه با لوله مسطح بالاتر خواهد بود. شکل ۷ نتایج حاصل از محاسبات تحلیلی نشان داده شده است که میتواند با نتایج حاصل از آزمایش مقایسه گردد. همانطور که مشهود است هر دو منحنی یک روند یکسان را طی میکنند.

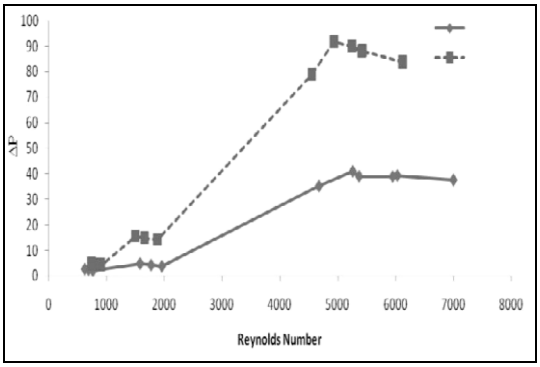


شکل ۶. مقایسه آزمایشگاهی انتقال حرارت بر حسب دبی بین لوله های مسطح و پیچشی



شکل ۷. مقایسه تحلیلی اختلاف دما بر حسب دبی بین لوله های مسطح و پیچشی

در شکل ۸ مشاهده میشود که میزان افت فشار در داخل لوله های پیچشی بیشتر است . اگرچه این اختلاف در نرخ جریانهای پایین به علت وجود جریان آرام، اندک است ولی هرچه نرخ جریان بالاتر رود میزان افت فشار نیز تا حدود ۴۰٪ افزایش می یابد و علت این امر آشفتگی جریان از یک سو و پیچشی بودن مسیر جریان و بالاتر بودن ضریب اصطکاک نیز از سوی دیگر می باشد.



شکل ۸ مقایسه افت فشار در لوله های مسطح و پیچشی

۶. نتیجه‌گیری

در این تحقیق کارایی انتقال حرارتی و افت فشار مبدلهای با لوله های پیچشی و مسطح مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. نتایج این تحقیق در دو بخش مورد ارزیابی قرار میگیرد. در ابتدا همانگونه که اشاره گردید استفاده از لوله های پیچشی در مبدلها مزیتهایی را برای سمت پوسته فراهم می اورد که شامل افزایش کارایی هیدرولیکی و گرمایی، ضریب تاثیر حرارتی بالاتر، کاهش میزان رسوبات، کاهش افت فشار در پوسته و کاهش میزان ارتعاشات میباشد. ولی برای قسمت لوله ها مهترین نتایج بدست آمده به شرح ذیل میباشد:

برای انتقال حرارت بهتر لوله های پیچشی لازم است که نسبت ابعاد قطرهای سطح مقطع لوله ها بالاتر و گام پیچش لوله ها کمتر باشد. برای اتصال انتهای لوله ها به تیوب شیتها در دو انتهای پوسته، از آنجایی که در عمل امکان اتصال با سطح مقطع بیضوی در دو انتها مشکل است معمولا سطح مقطع دو انتها بصورت مدور ساخته میشوند. هنگام عبور جریان در لوله ها، سیال تلاش دارد تا مسیر مارپیچی را طی کند ولی به علت اینکه گام پیچش کم است و در نتیجه طول نیز کوتاه خواهد بود امکان ایجاد پروفیل سرعت به صورت کامل وجود ندارد و در دو انتها نیز که سطح مقطع مدور میباشد به محض ایجاد پروفیل حدودی سرعت به قسمت مارپیچی میرسد که دوباره پروفیل جریان بر هم میخورد. لذا امکان ایجاد پروفیل سرعت بطور کامل کم بوده که تاثیر منفی در انتقال حرارت بر جا خواهد گذاشت. در دبی های پایینتر عملکرد لوله های مسطح در حدود ۹٪ بهتر از لوله های پیچشی است در حالی که در دبی های بالاتر این عملکرد برای لوله های پیچشی در حدود ۴۵٪ بهتر میباشد. علت این امر نیز آشفتگی جریان و امکان ایجاد پروفیل سرعت بصورت کامل میباشد. نتیجه این مقایسه نشان میدهد که برای دبی های پایین استفاده از لوله های مسطح مقرون به صرفه تر بوده ولی در کاربردهایی مثل رادیاتور یا تهویه مطبوع به علت وجود دبی بالاتر استفاده از لوله های پیچشی معقولتر به نظر میرسد. همچنانکه در این نوع کاربردها کاهش اندازه مبدل خیلی مهم به نظر میرسد.

۷. مآخذ

[1] Özden Ağra, Hakan Demir , Ş. Özgür Atayılmaz, Fatih Kantaş, Ahmet Selim Dalkılıç," Numerical investigation of heat transfer and pressure drop in enhanced tubes", International Communications in Heat and Mass Transfer 38 (2011) 1384–1391.

[2] Xiang-hui Tan, Dong-sheng Zhu, Guo-yan Zhou, Li-ding Zeng," Experimental and numerical study of convective heat transfer and fluid flow in twisted oval tubes", International Journal of Heat and Mass Transfer 55 (2012) 4701–4710

[3] Z.Y. Guo a, W.Q. Tao b, R.K. Shah," The field synergy (coordination) principle and its applications in enhancing single phase convective heat transfer", International Journal of Heat and Mass Transfer 48 (2005) 1797–1807

[4] Luai M. Al-Hadhrami, Aftab Ahmad & Abdullah Al-Qahtani," Experimental Study of Fouling Resistance in Twisted Tube Heat Exchanger", Heat Transfer Engineering, 33 (2012):1024–1032

[5] Sheng Yang, Li Zhang, Hong Xu," Experimental study on convective heat transfer and flow resistance characteristics of water flow in twisted elliptical tubes", Applied Thermal Engineering 31 (2011) 2981-2991

[6] R. Donald Morgan, "Twisted tube heat exchanger technology", Houston, Texas, Brown Fintube Company, 2001. http://www.atimetals.com/businesses/business-units/wahchang/Documents/Tech-Serv-Library/2001-Conf-Proceedings/2001007.pdf

[7] Smith Eiamsa, Pongjet Promvonge," Performance assessment in a heat exchanger tube with alternate clockwise and counter-clockwise twisted-tape inserts", International Journal of Heat and Mass Transfer 53 (2010) 1364–1372

[8] Li Zhang, Sheng Yang, Hong Xu," Experimental study on condensation heat transfer characteristics of steam on horizontal twisted elliptical tubes", Applied Energy 97 (2012) 881–887

[9] Vandita Thantharate, D.B.Zodpe, "Experimental and Numerical Comparison of Heat Transfer Performance of Twisted Tube and Plain Tube Heat Exchangers", International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 4, Issue 7 (2013), 1107-1113

پی‌نوشت

1. Shell and tube heat exchangers
2. Plain tubes
3. Twisted tube
4. long and straight passage
5. Fouling
6. Baffle
7. Tubesheet
8. Bundle
9. low flow
10. dead spots
11. thermal effectiveness