Archive of SID

توسعه یک مدل ترکیبی به‌منظور ارزیابی حرارتی مبدل‌های پوسته و لوله

وحید نصیرپور، نورالله کثیری*+

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، آزمایشگاه تحقیقاتی مهندسی فرایند به کمک کامپیوتر

چکیده: *توزیع دما در مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله، یکی از مهم‌ترین اطلاعات لازم برای بررسی عملکرد این تجهیزات است. برای مدل‌سازی مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله، تاکنون مدل‌های بسیاری ارایه شده که بیشتر آنها یا به علت پیچیدگی زیاد و یا به دلیل استفاده بیش از حد از رابطه‌های همبسته، در عمل کم‌تر مورد استفاده قرار گرفته و یا از دقت کافی برخوردار نیستند. در این پژوهش، ابتدا مدل‌سازی یک مبدل حرارتی پوسته و لوله بدون در نظر گرفتن بفل‌ها و با فرض جریان قالبی برای سیال سمت پوسته و سپس مدل‌سازی مبدلی دارای جریان متقاطع خالص و بدون در نظر گرفتن جریان‌های نشتی ارایه شده است که با حل این دو مدل محدوده عملکرد حرارتی مبدل پوسته و لوله مشخص خواهد شد. در ادامه مدل ترکیبی جدیدی برای پیش بینی انتقال‌حرارت واقعی و محاسبه‌های توزیع دما در مبدل حرارتی با ترکیب مدل‌های بر پایه جریان قالبی و جریان متقاطع سیال سمت پوسته ارایه شده که سهم هر یک از دو مدل اولیه در مدل ترکیبی جدید به وسیله‌ی نتیجه‌های حاصل از آنالیز جریان سیال سمت پوسته قابل محاسبه است. برای بررسی صحت مدل‌سازی مقایسه‌ای میان نتیجه‌های حاصل از شبیه‌سازی و نتیجه‌های آزمایشگاهی دانشگاه دلاوار برای دو مبدل دارای پوسته نوع E صورت گرفته که مدل ترکیبی ارایه شده از دقت مناسبی در محاسبه دمای سیالات خروجی از مبدل حرارتی دارا بوده است.*

واژه‌های کلیدی: *مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله، مدل‌سازی، جریان متقاطع، مدل ترکیبی، ضریب انتقال حرارت.*

KEY WORDS: *Shell and tube heat exchangers, Modeling, Cross flow, Combined model, Heat transfer coefficient.*

مقدمه

مبدل حرارتی، وسیله‌ای است که انرژی حرارتی را از سیالی به یک یا چند سیال دیگر که دارای دمای متفاوتی هستند، منتقل می‌کند. کاربرد مبدل‌های حرارتی بسیار وسیع است و در صنایع متفاوت از جمله نیروگاه‌های تولید برق، پالایشگاه‌ها، صنایع غذایی، داروسازی، صنایع پتروشیمی، سردخانه‌ها و سیستم‌های گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها و به‌طور کلی هرجا که مسأله تبادل انرژی مطرح باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین لزوم صرفه‌جویی در مصرف انرژی و جلوگیری از اتلاف آن و توجه به مسایل آلودگی محیط زیست، نقش مبدل‌های حرارتی را پر رنگ‌تر می‌کند. مبدل‌های حرارتی به‌صورت‌های متفاوت مانند کندانسورها، جوش‌آورها، تبخیر کننده‌ها، کوره‌ها، گرم‌کن‌ها، سردکن‌ها و غیره موجود است. در این میان، نقش مبدل‌های پوسته و لوله بسیار چشم‌گیر می‌باشد به‌طوری که این مبدل‌ها حدود نیمی از کل بازار مبدل‌های حرارتی را شامل می‌شوند.

مدل‌سازی مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله با پیچیدگی‌ها و دشواری‌های ویژه‌ای همراه است که هریک به‌نحوی در توسعه

*عهده دار مکاتبات

+E-mail: capepub@cape.iust.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

مدل یا حل آن اثرگذار خواهند بود. نامشخص بودن مسیر جریان سیال سمت پوسته به‌واسطه پیچیدگی‌های هندسی و وجود جریان‌های نشتی و جانبی، گستردگی در انواع مبدل‌های پوسته و لوله و تفاوت در ساختار هندسی آنها، امکان دوفازی شدن سیالات سمت پوسته و لوله و پیچیدگی رابطه‌های حاکم در مقایسه با حالت تک‌فاز و همچنین وجود پدیده رسوب‌گرفتگی و تأثیر آن بر انتقال حرارت و افت فشار درون مبدل حرارتی از مهم‌ترین مشکلات و پیچیدگی‌های موجود بر سر راه مدل‌سازی این تجهیزات هستند.

تاکنون روش‌های متفاوتی برای پیش‌بینی انتقال‌حرارت و افت فشار تهیه و منتشر شده که هر یک دارای محاسن، معایب، محدودیت‌ها و دقت‌های متفاوتی هستند. تمامی این روش‌ها را می‌توان به‌صورت زیر طبقه‌بندی کرد:

۱ـ روش‌های اولیه که براساس عبور جریان از دسته لوله به صورت ایده‌آل و یا فرض سیستم تک لوله‌ای به دست آمده‌اند که می‌توان به روش *زوکاسکاس* [۱] اشاره کرد.

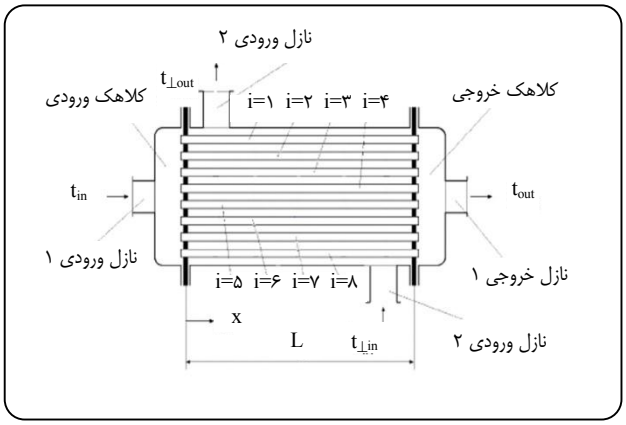
۲ـ روش‌های انتگرالی که در آنها جریان عرضی ایجاد شده به وسیله بفل با وجود یک پنجره توجیه می‌شود که در این روش‌ها تأثیر جریان‌های نشتی و جانبی در نظر گرفته نشده است. از میان این روش‌ها می‌توان به روش *داناهیو* [۲] و روش *کرن* [۳] اشاره کرد که دارای بیش از ۵۰ درصد خطا هستند.

۳ـ روش‌هایی که براساس مدل *تینکر* [۴] و آنالیز جریان ارایه شده‌اند که معروف‌ترین آن‌ها روش‌های *پالن* و *تبورک* [۵] با ۳۰± درصد خطا، روش *ویلس* و *جانستون* [۶] با ۱۵ درصد خطا و روش *دل‌کول* [۷] با ۲۰± درصد خطا هستند.

۴ـ روش‌هایی که از مدل *تینکر* [۴] به عنوان پایه کلی و بدون حدس‌زدن مجدد استفاده می‌کنند، مثل روش *بل* [۸]، روش *گدیس* و *جنی‌یلینسکی* [۹] با ۳۵± درصد خطا و روش *کاپال* و *چاند* [۱۰] با ۲ تا ۴ درصد خطا.

۵ ـ روش‌های پیش‌گویی عددی بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی که روش‌هایی بسیار پیچیده ولی بسیار دقیق هستند مثل روش *اندروز* و *پریتی‌ویراج* [۱۱] و روش *ژینگهوا* و *همکاران* [۱۲] که دارای ۵ تا ۱۰ درصد خطا هستند.

۶ـ افزون بر روش‌های ذکرشده، روش‌های دیگری نیز برای شبیه‌سازی مبدل‌های حرارتی موجود است و در دسته‌بندی‌های ذکر شده نمی‌گنجد که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از: روش *بس* و *رازل* [۱۳]، روش *رازل* و *رانانونگ* [۱۴] و روش *ایوب* [۱۵].



شکل ۱ـ مبدل حرارتی پوسته و لوله [۱۲].

از میان روش‌های ذکر شده فقط روش‌های بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی و دو روش بیان شده در مراجع [۱۳] و [۱۴] قابلیت محاسبه توزیع دمای سیالات سمت پوسته و لوله را دارا هستند و مابقی فقط توانایی محاسبه دما یا فشار خروجی از مبدل را دارند و هیچ‌گونه اطلاعاتی از نحوه تغییرهای دما یا فشار در طول مبدل حرارتی را در دسترس قرار نمی‌دهند.

معادله‌ها و رابطه‌های حاکم

مدل‌سازی حرارتی مبدل پوسته و لوله با فرض جریان قالبی برای سیال سمت پوسته

مدل‌سازی مبدل با فرض جریان قالبی سمت پوسته، نخستین بار توسط *رازل* و *رانانونگ* [۱۴] صورت گرفته است. فرضیه‌های حاکم در این مدل‌سازی عبارت‌اند از:

۱ـ سرعت جریان سیال در هر ردیف لوله مقداری ثابت است ولی می‌تواند از ردیف لوله‌ای به ردیف لوله دیگر متفاوت باشد.

۲ـ جریان سیال سمت پوسته قالبی در نظر گرفته می‌شود.

۳ـ ضریب کلی انتقال‌حرارت به صورت ثابت و یکنواخت در نظر گرفته می‌شود.

با در نظر گرفتن جریان قالبی در نزدیکی هر یک از لوله‌های مبدل حرارتی، معادله سمت لوله‌ها به صورت زیر خواهد بود:

$$\left(\frac{w_i}{\overline{w}}\right)\frac{dT_i}{d\zeta} + NTU(T_i - \upsilon) = 0 \qquad (۱)$$

معادله‌ی انرژی سیال سمت پوسته به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{d\upsilon}{d\zeta} + NTU_{\perp}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} T_i - \upsilon\right) = 0 \qquad (۲)$$

www.SID.ir

Archive of SID

از معادله‌های (۱) و (۲)، n+۱ معادله تولید می‌شود که با تعریف شرایط مرزی مناسب می‌توان این دستگاه معادله‌های دیفرانسیل را حل کرد. شرایط مرزی به‌صورت تعریف می‌شوند:

برای مبدل‌های با جریان همسو و ناهمسو:

$$@\ \zeta = ۰: \qquad T_i = ۰ \qquad i = ۱,۲,...,n \qquad (۳)$$

برای مبدل با جریان ناهمسو:

$$@\ \zeta = ۱: \qquad \upsilon = ۱ \qquad (۴)$$

برای مبدل با جریان همسو:

$$@\ \zeta = ۰: \qquad \upsilon = ۱ \qquad (۵)$$

دستگاه n+۱ معادله‌ی دیفرانسیلی که از معادله‌های (۱) و (۲) با شرایط مرزی (۳) و (۴) برای مبدل ناهمسو و (۳) و (۵) برای مبدل همسو حاصل می‌شود، به‌وسیله‌ی یک روش عددی مناسب قابل حل خواهد بود و توزیع دمای سیالات سمت پوسته و لوله محاسبه خواهد شد. همچنین ذکر این نکته ضروری است که اگر مبدل همسو باشد دستگاه معادله‌های حاصل از نوع مقدار اولیه و اگر ناهمسو باشد دستگاه حاصل از نوع مقدار مرزی خواهد بود.

مدل‌سازی حرارتی مبدل پوسته و لوله با فرض جریان متقاطع برای سیال سمت پوسته

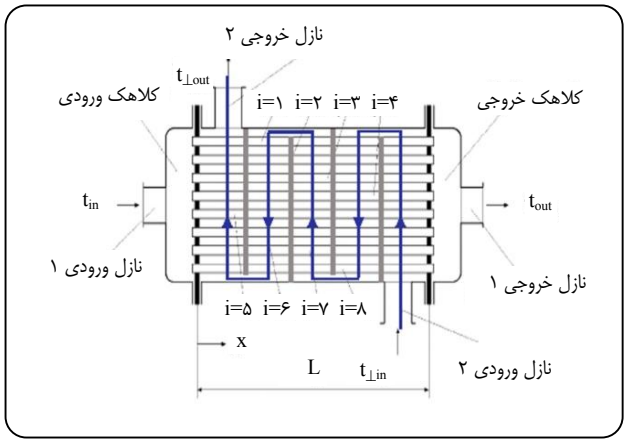
در این بخش ابتدا به بررسی مدل‌سازی یک جریان متقاطع شامل n لوله که توسط *بس* و *رازل* [۱۳] ارایه شده پرداخته و سپس از تعمیم این مدل به مبدل پوسته و لوله که توسط *نصیرپور* و *کثیری* [۱۶] ارایه شده استفاده می‌شود. فرضیه‌های مورد استفاده در این مدل عبارت‌اند از:

۱ـ ضریب انتقال‌حرارت کلی برای هر ردیف لوله مقداری ثابت است.

۲ـ دمای سیال درون هر لوله به صورت پیوسته در جهت حرکت سیال متغیر است و به‌واسطه‌ی وجود اختلاط کافی در سیال سمت لوله، دمای اطراف لوله‌ها به صورت یکنواخت خواهد بود.

۳ـ دمای سیال عبوری از روی لوله‌ها در جهت عمود بر لوله‌ها متغیر است.

۴ـ توزیع جریان برای هر یک از ردیف لوله‌ها یکسان فرض می‌شود، به عبارت دیگر شدت جریان حرارتی برای کلیه ردیف لوله‌ها برابر خواهد بود.



شکل ۲ـ مبدل حرارتی پوسته و لوله با جریان متقاطع.

با در نظر گرفتن یک لوله از دسته لوله و اعمال موازنه انرژی برای جریان سیالات داخل و خارج لوله دستگاه معادله‌های دیفرانسیلی ـ تفاضلی زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{cases} -\dfrac{dT_i}{dS} = B(T_i - \upsilon_{i-۱/۲}) \\ \upsilon_{i+۱/۲} - \mu\upsilon_{i-۱/۲} = (۱-\mu)T_i \end{cases} \qquad (۶)$$

دستگاه معادله‌ی (۶) با در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب قابل حل می‌باشد. جزییات این مدل‌سازی و همچنین معادله‌هایی برای محاسبه مقدارهای μ و B در مرجع [۱۳] ارایه شده است.

مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله در حقیقت شامل مجموعه‌ای از مبدل‌های جریان متقاطع هستند. بنابراین، با تعمیم مدل‌سازی صورت گرفته برای مبدل‌های پوسته و لوله می‌توان به مدل‌سازی این‌گونه مبدل‌ها در حالتی‌که جریان سمت پوسته ایده‌آل باشد، دست یافت. بدین منظور افزون بر فرضیه‌های ذکر شده برای مبدل‌های متقاطع، برای تعمیم مدل‌سازی ذکر شده به مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله فرضیه‌های دیگری نیز در نظر گرفته شده که عبارت‌اند از:

– از اثر جریان‌های نشتی سمت پوسته صرف‌نظر می‌شود.

– سیال سمت پوسته به طور کامل مخلوط شده در نظر گرفته می‌شود.

– ضریب کلی انتقال‌حرارت و همچنین کلیه ویژگی‌های فیزیکی ثابت فرض می‌شوند.

با در نظر گرفتن فرضیه‌های ذکر شده و با توجه به شکل ۲، دستگاه معادله‌ی (۶) برای مسیر متقاطع شماره j به صورت معادله‌ی (۷) خواهد بود:

www.SID.ir

Archive of SID

$$\begin{cases} -\dfrac{dT_{i,j}}{dS} = B\left(T_{i,j} - \upsilon_{i-1/2,j}\right) \\ \upsilon_{i-1/2,j} - \mu\,\upsilon_{i+1/2,j} = (1-\mu)T_{i,j} \end{cases} \qquad (7)$$

برای تبدیل معادله‌ی اول موجود در دستگاه معادله‌ی (۷) به شکل گسسته، آن‌را با استفاده از تفاضل پس‌رو بسط داده و پس از ساده‌سازی رابطه‌های حاصل، دستگاه معادله‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{cases} T_{i,j} = \left(\dfrac{1}{1+B\Delta S}\right)T_{i,j-1} + \left(\dfrac{B\Delta S}{1+B\Delta S}\right)\upsilon_{i-1/2,j} \\ \upsilon_{i+1/2,j} = (1-\mu)T_{i,j} + \mu\,\upsilon_{i-1/2,j} \end{cases} \qquad (8)$$

که ΔS فاصله بدون بعد میان دو بفل مجاور هم است.

اگر مبدل حرارتی مورد نظر همسو باشد، شرایط مرزی به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} @\ \zeta = 0 & , T_{i,o} = 0 \\ @\ \zeta = 0 & , \upsilon_{1/2,1} = 1 \end{cases} \qquad (9)$$

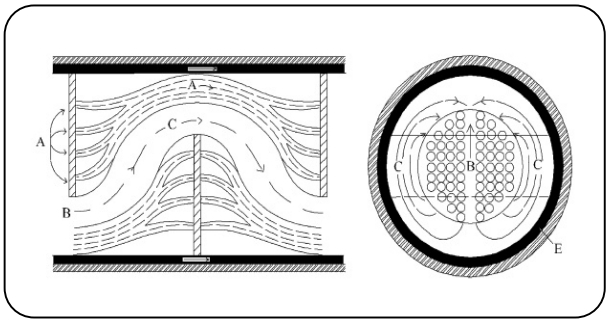
و اگر مبدل حرارتی ناهمسو باشد، شرایط مرزی به صورت زیر تعریف می شود:

$$\begin{cases} @\ \zeta = 0 & , T_{i,o} = 0 \\ @\ \zeta = 1 & , \upsilon_{n+1/2,m} = 1 \end{cases} \qquad (10)$$

با در نظر گرفتن معادله‌ی (۸) و شرایط مرزی (۹) یا (۱۰) توزیع دمای سیالات سمت پوسته و لوله قابل محاسبه خواهد بود. جزییات این مدل‌سازی و همچنین رابطه‌های تکمیلی در مرجع [۱۶] ارایه شده است.

مدل‌سازی ترکیبی پیشنهادی برای پیش‌بینی توزیع دما

جریان سیال سمت پوسته در حقیقت ترکیبی از جریان محوری و جریان متقاطع است. از این‌رو، انتقال‌حرارت واقعی صورت‌گرفته نیز ترکیبی از انتقال‌حرارت جریان محوری و جریان متقاطع خواهد بود که مدل‌سازی هریک به‌طور مجزا در بخش‌های قبلی ارایه شده است. البته می‌بایست به این نکته توجه داشت که سهم انتقال‌حرارت هریک از جریان‌های متقاطع و قالبی



شکل ۳ـ جریان‌های مؤثر سمت پوسته طبق مدل تینکر.

در انتقال‌حرارت واقعی انجام شده با یکدیگر متفاوت است و این سهم به وسیله‌ی روش‌هایی که توانایی محاسبه‌های آنالیز جریان را دارند قابل محاسبه است. دراین روش‌ها معادله‌های حاکم بر جریان‌های سیال سمت پوسته به‌وسیله‌ی حدس و خطا حل‌شده و دبی هریک از جریان‌های مؤثر سمت پوسته محاسبه می‌شود. در این پژوهش، از روش *ویلس* و *جانستون* [۶] برای محاسبه‌های آنالیز جریان سیال سمت پوسته استفاده شده که در عین سادگی از دقت بالایی برخوردار است.

بنابراین، سهم هریک از جریان‌های نمایش‌داده شده در شکل ۳ پس از انجام محاسبه‌های آنالیز جریان به‌صورت زیر محاسبه خواهدشد:

$$E_t = \frac{\dot{M}_t}{\dot{M}_T} \qquad (11)$$

$$E_c = \frac{\dot{M}_c}{\dot{M}_T} \qquad (12)$$

$$E_b = \frac{\dot{M}_b}{\dot{M}_T} \qquad (13)$$

$$E_s = \frac{\dot{M}_s}{\dot{M}_T} \qquad (14)$$

از ترکیب رابطه‌های بالا سهم جریان‌های قالبی و متقاطع به‌صورت زیر قابل محاسبه است:

$$E^{Plug} = E_t + E_s \qquad (15)$$

$$E^{Cross} = E_c + E_b \qquad (16)$$

بنابراین، انتقال‌حرارت واقعی انجام شده برای سیال سمت پوسته به‌صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$Q^{Actual} = E^{Plug}\,Q^{Plug} + E^{Cross}\,Q^{Cross} \qquad (17)$$

www.SID.ir

Archive of SID

انتقال حرارت جریان‌های متقاطع و قالبی در معادله‌ی (۱۷) به وسیله‌ی دو مدل ارایه شده در بخش‌های قبلی قابل محاسبه است. معادله‌ی (۱۷) برای یک مبدل دارای جریان همسو و شمارنده تعداد مسیر متقاطع (j) زوج به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\upsilon^{Actual}(i+1,j)=\upsilon^{Actual}(i,j) \quad (18)$$
$$-E^{Cross}(\upsilon^{Cross}(i,j)-\upsilon^{Cross}(i+1,j))$$
$$-E^{Plug}(\upsilon^{Plug}(1,j)-\upsilon^{Plug}(1,j+1))$$

دمای سیال سمت لوله در این حالت به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T^{Actual}(i,j)=(\frac{1}{1+B\Delta S})T^{Actual}(i,j-1)+ \quad (19)$$
$$(\frac{B\Delta S}{1+B\Delta S})\upsilon^{Actual}(i+1,j)$$

سایر معادله‌های منتج از مدل ترکیبی در حالتی‌که شمارنده تعداد مسیر متقاطع (j) فرد و یا مبدل حرارتی ناهمسو باشد نیز به راحتی قابل دست‌یابی است.

برای استفاده از معادله‌های (۱۸) و (۱۹) ابتدا باید توزیع دمای سیالات سمت پوسته و لوله را با استفاده از دو مدل ارایه شده با فرض جریان متقاطع و قالبی محاسبه کرده، سپس با جانشینی در دو معادله‌ی فوق توزیع دما با استفاده از مدل ترکیبی محاسبه خواهد شد.

بررسی درستی مدل‌سازی در مقایسه با نتیجه آزمایشگاهی

در دهه ۵۰ و ۶۰ میلادی، انجمن مهندسین مکانیک آمریکا و دانشگاه دلاوار برنامه‌ای پژوهشی را برای پژوهش در زمینه جریان سیال سمت پوسته و انتقال‌حرارت درون مبدل‌های پوسته و لوله هدایت کردند. این پژوهش‌ها شامل بررسی اثرهای بریدگی بفل‌ها، جریان‌های نشتی و جریان‌های جانبی روی افت فشار و انتقال‌حرارت مبدل با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده از آزمایش‌های تجربی است. تعدادی از این نتیجه‌های آزمایشگاهی در گزارش نهایی دانشگاه دلاوار توسط *بل* [۱۷] ارایه شده است. درستی و اعتبار مدل‌سازی ارایه شده در این پژوهش، در مقایسه با دو نتیجه آزمایشگاهی برای جریان آشفته سیال سمت پوسته مورد بررسی قرار گرفته است.

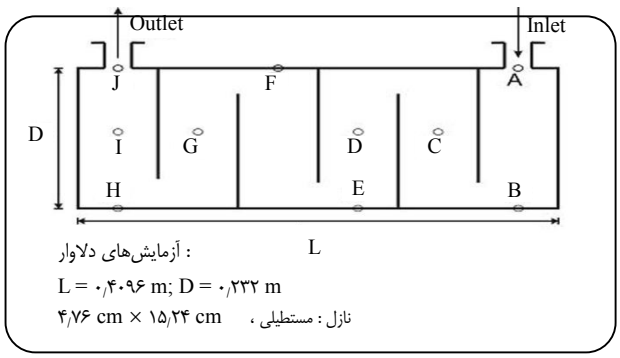
شکل ۴ و جدول ۱ نمایانگر ویژگی‌های هندسی مبدل‌حرارتی مورد استفاده در آزمایش‌های دلاوار هستند.

جدول ۱ـ ویژگی‌های هندسی مبدل حرارتی دانشگاه دلاوار.

توضیح	متغیر
نفت ۸۹۶ خلیج	سیال سمت پوسته
آب	سیال سمت لوله
۰٫۴۰۹۶ m	طول لوله
۰٫۲۳۲ m	قطر داخلی پوسته
۰٫۰۰۶۳۵ m	قطر خارجی لوله
۰٫۰۰۱۲۴۴۶ m	ضخامت لوله
۴۲۷	تعداد لوله‌ها
۵	تعداد بفل‌ها
۰٫۰۶۷۱ m	فاصله بفل‌های مرکزی
۰٫۰۰۱۵۸۷۵ m	ضخامت بفل‌ها
۰٫۰۱۳۵۹ m	لقی بین پوسته و دسته لوله

جدول ۲ـ خلاصه شرایط عملیاتی برای شبیه‌سازی.

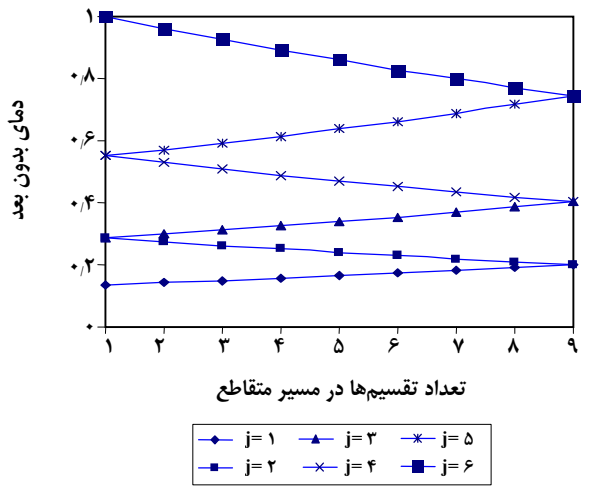
شماره آزمایش	۱۰-TL5-1-H-7	۱۰-TL5-1-C-1
دبی سمت پوسته (kg/m)	۱۱٫۱۴	۱۱٫۱۳
دبی سمت لوله (kg/m)	۱۴٫۵۶	۱۴٫۴۹
دمای ورودی پوسته (°C)	۶۲٫۶۱	۶۸٫۳۳
دمای ورودی لوله (°C)	۸۰٫۱۱	۵۰٫۷۸
درصد بریدگی بفق	۲۰٫۴	۲۰٫۴
لقی بفل ـ پوسته (mm)	۲٫۰۳	۲٫۰۳
لقی بفل ـ لوله (mm)	۰٫۲۵۴	۰٫۲۵۴



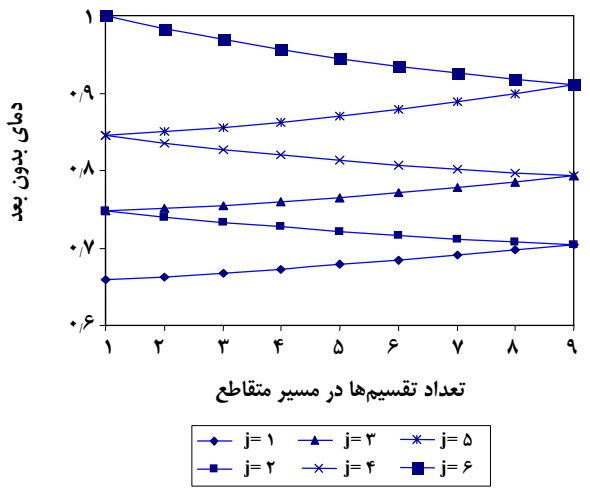
شکل ۴ـ مبدل حرارتی مورد استفاده در آزمایش‌های دانشگاه دلاوار.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۵ ـ توزیع دمای سمت پوسته با فرض مدل جریان متقاطع برای آزمایش ۱۰-TL۵-۱-H-۷.

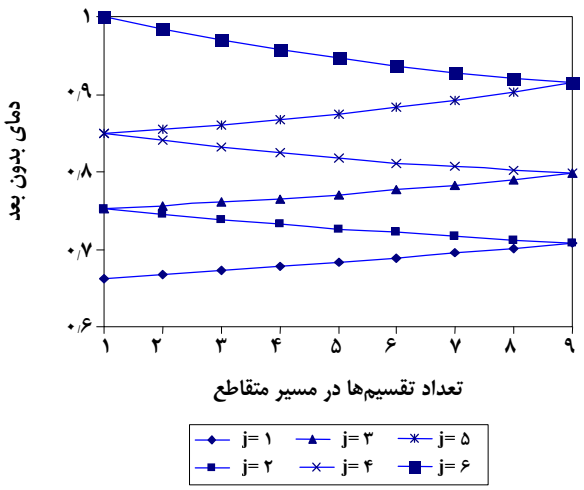


شکل ۶ ـ توزیع دمای سمت پوسته با در نظر گرفتن مدل ترکیبی برای آزمایش ۱۰-TL۵-۱-H-۷.

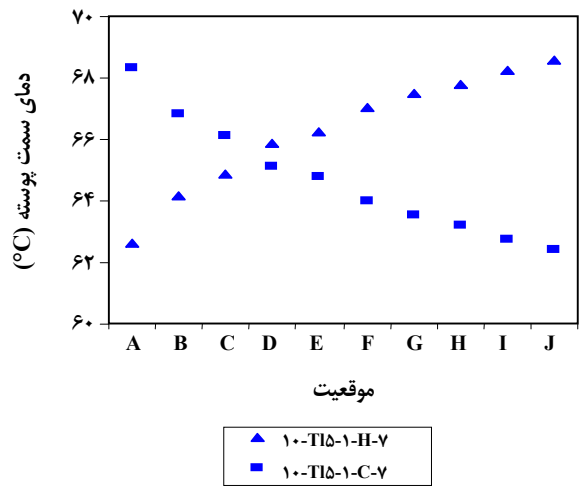
جدول ۲ خلاصه‌ای از شرایط عملیاتی، مقدارهای بریدگی بفل و لقی‌ها را در دو آزمایش انتخاب شده نمایش می‌دهد.

توزیع دمای سیال سمت پوسته با فرض مدل جریان متقاطع برای آزمایش ۱۰-TL۵-۱-H-۷ در شکل ۵ ارایه شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، به‌دلیل وجود جریان ناهمسو در مبدل حرارتی گرادیان دما در طول مبدل حفظ می‌شود، همچنین ملاحظه می‌شود که انتقال‌حرارت بسیار زیادی در مبدل با فرض جریان متقاطع رخ می‌دهد که این مسأله حاکی از بازده حرارتی بسیار بالاتر این مبدل در مقایسه با مبدل‌های واقعی است و در عمل حد بالای عملکرد مبدل حرارتی را نشان می‌دهد. توزیع دمای سیال سمت پوسته با در نظر گرفتن مدل ترکیبی برای آزمایش ۱۰-TL۵-۱-H-۷ در شکل ۶ نمایش داده شده است.

این شکل نمایانگر انتقال‌حرارت واقعی براساس بررسی واقعی جریان‌ها در مبدل حرارتی می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود انتقال حرارت در مبدل حرارتی واقعی کم‌تر از انتقال حرارت در مبدل با فرض جریان متقاطع است. شکل ۶ همچنین نحوه تغییرهای توزیع دمای سیال سمت پوسته در شش مسیر متقاطع موجود درون مبدل حرارتی را نشان می‌دهد. توزیع دمای سیال سمت پوسته با فرض مدل جریان متقاطع برای آزمایش ۱۰-TL۵-۱-C-۱ در شکل ۷ ارایه شده است.



شکل ۷ـ توزیع دمای سمت پوسته با در نظر گرفتن مدل ترکیبی برای آزمایش ۱۰-TL۵-۱-C-۱.



شکل ۸ ـ مقایسه توزیع دما درطول مبدل برای آزمایش‌های ۱۰-TL۵-۱-H-۱ و ۱۰-TL۵-۱-C-۱.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۳ـ مقایسه نتیجه‌های انتقال‌حرارت با اطلاعات آزمایشگاهی.

شماره آزمایش	۱۰-TL۵-۱-H-۷	۱۰-TL۵-۱-C-۱
دمای خروجی سمت پوسته (°C)	۶۸٫۶	۶۲٫۴
دمای آزمایشگاهی خروجی سمت پوسته (°C)	۶۸٫۴	۶۲٫۹
درصد خطا	−۰٫۲	−۰٫۸
دمای خروجی سمت لوله (°C)	۷۶٫۴	۵۴٫۵
دمای آزمایشگاهی خروجی سمت لوله (°C)	۷۸٫۰	۵۲٫۸
درصد خطا	−۲	+۳٫۱

جدول ۴ـ مقایسه تعداد واحدهای انتقال سیالات سمت پوسته و لوله.

شماره آزمایش	NTU⊥	NTU
۱۰-TL۵-۱-H-۷	۰٫۴۷۵۲	۰٫۱۹۱۳
۱۰-TL۵-۱-C-۱	۰٫۴۶۹۲	۰٫۱۹۰۳

خلاصه‌ی نتیجه‌های حاصل از شبیه‌سازی برای مقایسه در جدول‌های ۳ و ۴ ارایه شده است. شکل ۸ نیز مقایسه‌ای میان توزیع دما برای دو آزمایش ۱۰-TL۵-۱-C-۱ و ۱۰-TL۵-۱-H-۷ را نمایش می‌دهد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، محاسبات دمای خروجی از مبدل در مقایسه با دو نتیجه آزمایشگاهی دانشگاه دلاوار دارای خطایی در محدوده ۰٫۸ تا ۳٫۱ درصد است. با توجه به این‌که خواص فیزیکی در طول محاسبه‌ها ثابت درنظر گرفته شده، می‌توان گفت در نتیجه‌های حاصل از مدل‌سازی جدید تفاوت دمای سیالات ورودی و خروجی از مبدل حرارتی کم‌تر از ۴ درجه سانتی‌گراد برای سیال سمت لوله و کم‌تر از ۶ درجه سانتی‌گراد برای سیال سمت پوسته است. بنابراین، با توجه به تغییرهای کم دما، فرض ثابت بودن ویژگی‌های فیزیکی قابل قبول بوده و موجب خطای بزرگی در محاسبه‌ها نخواهد شد.

ذکر این نکته نیز ضروری است که داده‌های تجربی دانشگاه دلاوار دارای ۵ تا ۱۰ درصد خطا در اندازه‌گیری دما می‌باشند، همچنین اثرهای افت انرژی از پوسته مبدل به محیط اطراف نیز در این داده‌ها گزارش نشده است.

تعیین دقت مدل ارایه شده به‌صورت دقیق نیازمند جمع‌آوری اطلاعات بیشتر آزمایشگاهی و صنعتی و مقایسه آنها با نتیجه‌های حاصل از مدل جدید است که این مهم در حال انجام است.

نتیجه‌گیری نهایی

مدل‌سازی جدید بر پایه ترکیب دو مدل حدی یکی با فرض جریان قالبی و دیگری با فرض جریان متقاطع برای سیال سمت پوسته ارایه شده است که با استفاده از نتیجه‌های آنالیز جریان سیال سمت پوسته سهم هریک از دو مدل در مدل ترکیبی مشخص می‌شود. مدل ترکیبی توانایی محاسبه توزیع دمای سیالات سمت پوسته و لوله را داراست. همچنین با استفاده از نمودارهای توزیع دما طول مؤثر مبدل حرارتی به‌راحتی قابل محاسبه خواهد بود که این امر گامی است به‌سوی طراحی بهینه مبدل‌های حرارتی و کاهش هزینه ساخت این تجهیزات.

مدل ارایه شده از سادگی بسیار زیادی در مقایسه با مدل‌های بر پایه دینامیک سیالات محاسبه‌هایی برخوردار است و بنابراین، انجام محاسبه‌های مربوط به شبیه‌سازی مبدل حرارتی به‌وسیله‌ی مدل ترکیبی دارای سرعت بیشتری خواهد بود. مبدل‌های حرارتی در شرایط عملیاتی متفاوتی به‌کار گرفته می‌شوند و همچنین دارای پارامترهای هندسی بسیاری هستند که تعیین اثر هریک از این پارامترها بر نحوه تغییرهای توزیع دما و یا دمای خروجی از مبدل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

با استفاده از این روش، ابتدا به‌وسیله‌ی آنالیز جریان سیال سمت پوسته سهم هر یک جریان‌های مؤثر مشخص شده و اثر پارامتر هندسی روی سهم جریان‌های قالبی یا متقاطع محاسبه می‌شود و سپس با استفاده از مدل ترکیبی، تأثیر آن بر عملکرد حرارتی مبدل به‌سادگی مشخص خواهد شد.

مقایسه میان نتیجه‌های حاصل از شبیه‌سازی و نتیجه‌های آزمایشگاهی دانشگاه دلاوار برای دو مبدل دارای پوسته نوع E بیانگر دقت قابل قبول مدل ترکیبی در پیش‌بینی عملکرد حرارتی مبدل‌های پوسته و لوله است.

فهرست علایم

سطح انتقال حرارت (m^2)	A
پارامتر کمکی معادله‌ی (۶)	B
شدت جریان حرارتی (W/K)	C
شدت جریان حرارتی برای یک لوله (W/K)، c=C/n	c
سهم هر جریان از کل جریان سمت پوسته	E

www.SID.ir

Archive of SID

طول مبدل حرارتی (m)	L
تعداد مسیرهای متقاطع	m
دبی جرمی هر یک از جریان‌های موجود در سمت پوسته (kg/s)	$\dot{M}$
تعداد ردیف لوله‌های موجود در دسته لوله	n
تعداد واحدهای انتقال (بدون بعد)، $NTU=kA/C$	NTU
تعداد واحدهای انتقال سیال سمت پوسته به ازای یک لوله، $ntu_{\perp}=NTU_{\perp}/n$	$ntu_{\perp}$
حرارت منتقل شده (W)	Q
مسیر بدون بعد حرکت سیال سمت لوله، $s=x/l_o$	S
دمای بدون بعد سیال سمت لوله، $T=(t-t_{in})/(t_{\perp in}-t_{in})$	T
دمای سیالات سمت لوله و پوسته (°C)	$t_{\perp}$,t
سرعت سیال سمت لوله (m/s)	w
سرعت متوسط سیال سمت لوله (m/s)	$\overline{w}$
جهت حرکت سیال سمت لوله (m)	x

علایم یونانی

طول بدون بعد ($\zeta=x/L$)	ζ
پارامتر کمکی معادله (۶)	μ
دمای بدون بعد سیال سمت پوسته ($\upsilon=t_{\perp}-t_{in}/t_{\perp in}-t_{in}$)	υ

زیرنویس‌ها

اشاره به جریان متقاطع (جریان B درمدل *تینکر*)	b
اشاره به جریان متقاطع جانبی (جریان C درمدل *تینکر*)	c
شمارنده تعداد ردیف لوله‌ها	i
شمارنده تعداد مسیرهای متقاطع	j
محدوده میان ردیف لوله‌های i و i+۱ یا i و i−۱	$i\pm1/2$
ورودی	in
خروجی	out
اشاره به جریان نشتی میان بفل و پوسته (جریان E درمدل *تینکر*)	s
اشاره به جریان نشتی میان بفل و لوله (جریان A درمدل *تینکر*)	t
اشاره به دبی جرمی سیال سمت پوسته	T
اشاره به سیال سمت پوسته	$\perp$

بالانویس‌ها

اشاره به جریان واقعی	Actual
اشاره به جریان متقاطع	Cross
اشاره به جریان قالبی	Plug

تاریخ دریافت: ۸۵/۱۲/۱۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۸۶/۲/۱۰

مراجع

[1] Zukauskas, A., "Heat Transfer from Tubes in Cross Flow", Academic Press, **8**, pp. 93-158, New York, (1972).

[2] Donohue, D.A., Heat Transfer and Pressure Drop in Heat Exchangers, *Ind. Eng. Chem*., **41**, p. 2499 (1949).

[3] Kern, D.Q., "Process Heat Transfer", Mc Grow-Hill, New York, (1950).

[4] Tinker, T. "Shell Side Characteristics of Shell and Tube Heat Exchangers", General Discussion on Heat Transfer, Institution of Mechanical Engineers, pp. 97-116, London, (1951).

[5] Palen, J.W. and Taborek, J., "Solution of Shell Side Flow Pressure Drop and Heat Transfer by Stream Analysis Method", Chemical Engineering Progress Symposium Series, **65** (92), pp. 53-63, (1969).

www.SID.ir

Archive of SID

[6] Wills, M.J.N. and Johnston, D., "A New and Accurate Hand Calculation Method for Shell Side Pressure Drop and Flow Distribution", 22nd National Heat Transfer Conference, HTD No. 36, ASME, New York, pp. 67-79, (1984).

[7] Del Col, D., Muzzolon, A., Piubello, P. and Rossetto, L., "Measurement and Prediction of Evaporator Shell-Side Pressure Drop", *International Journal of Refrigeration*, **28**, p. 320 (2005).

[8] Bell, K.J., "Delaware Method for Shell Side Design", Kakac, S., Bergles, A.E. and Mayinger, F. (Eds.), "Heat Exchangers Thermal Hydraulic Fundamentals and Design", Hemisphere, New York, pp.581-618, (1981).

[9] Gaddis, E.S. and Gnielinski, V., "Pressure Drop on the Shell Side of Shell and Tube Heat Exchangers with Segmental Baffles", Chemical Engineering and Processing, No. 36, pp. 149-159 (1997).

[10] Kapale, U.C. and Chand, S., "Modeling for Shell-Side Pressure Drop for Liquid Flow in Shell-and-Tube Heat Exchanger", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **49**, p. 601 (2006).

[11] Prithiviraj, M. and Andrews, M.J., "Three Dimensional Numerical Simulation of Shell and Tube Heat Exchangers", *Taylor & Francis*, Volume 33, pp.799-828, (1998).

[12] Xinghua, H., Qijie, W. and Zhen, L., "Three Dimensional Numerical Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer in Shell and Tube Heat Exchanger", *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, **51**, p. 297 (2000).

[13] Bes, T. and Roetzel, W., "Thermal Analysis of Co-Directed Cross Flow Heat Exchangers", In Afghan, N.F., Carvalho, M.D., Cohen, A.B. and Roetzel, W., (Eds.), "New Developments In Heat Exchangers", Gordon & Breach Publishers, (1996).

[14] Roetzel, W. and Na Ranong, Ch., "Axial Dispersion Model for Heat Exchangers", *International Journal of Heat Technology*, **18**, p. 7 (2000).

[15] Ayub, Z.H., "A New Chart Method for Evaluating Single-Phase Shell Side Heat Transfer Coefficient in a Single Segmental Shell and Tube Heat Exchanger", *Applied Thermal Engineering*, **25**, p. 2412 (2005).

[۱۶] نصیرپور، وحید ؛ کثیری، نوراله ؛ توسعه یک مدل جدید به منظور ارزیابی حرارتی مبدل‌های پوسته و لوله، دهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، ص ص ۳۵۵۶_۳۵۴۳، (۱۳۸۴).

[17] Bell, K.J., "Final Report of the Cooperative Research Program on Shell and Tube Heat Exchangers", Bulletin No.5 University of Delaware Engineering Experimental Station, Newark, Delaware, (1963).

www.SID.ir