ICHMT2017-P085

مطالعه تجربی اثر میزان چربی شیر بر عملکرد مبدل حرارتی صفحه‌ای

علی راهی[۱]، محمدباقر آیانی[۲]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی ali_rahi2008@yahoo.com
[۲] نویسنده مسئول: استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی mbayani@yahoo.com

چکیده

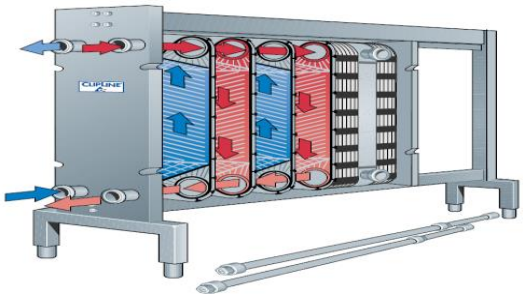
در تحقیق حاضر اثر میزان درصد چربی شیر بر عملکرد مبدل حرارتی صفحه‌ای با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بررسی و با روابط تئوری برای این نوع مبدل‌ها مقایسه شده است. برای این منظور شیر با دما، فشار، درصد چربی و سایر خواص فیزیکی معلوم وارد مبدل حرارتی صفحه‌ای شده و در خروجی آن تغییرات دما و فشار اندازه‌گیری شده است. میزان انتقال حرارت و افت فشارِ واقعی تطابق قابل قبولی با آنچه که از روابط تئوری برای مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای به‌دست آمده است دارد. چگالی و لزجت شیر با درصد چربی مختلف در دمای ورودی و خروجی اندازه‌گیری و با روابط تئوری تطابق خوبی دارند. حداکثر خطای چگالی برابر ۱٪ و برای لزجت برابر ۹٪ به‌دست آمده است. افزایش درصد چربی شیر از ۰/۵ تا ۷ درصد باعث کاهش مقدار ضریب هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی می‌شود در حالی که مقدار لزجت افزایش می‌یابد. همچنین افزایش درصد چربی شیر باعث تضعیف عملکرد مبدل حرارتی صفحه‌ای می‌شود به‌طوری که باعث کاهش میزان انتقال حرارت و افزایش میزان افت فشار در مبدل حرارتی صفحه‌ای می‌شود.

واژه های کلیدی

شیر، مبدل حرارتی صفحه‌ای، افت فشار، انتقال حرارت

مقدمه

در تولید لبنیات وسائل و تجهیزات مختلفی وجود دارد که هرکدام به نوبه‌ی خود نقش بسزایی در چرخه‌ی تولید فرآورده‌های مختلف شیر دارند. از جمله مهمترین دستگاه‌ها مبدل‌های حرارتی می‌باشند. از مبدل‌های حرارتی در پاستوریزاسیون شیر و خامه، عملیات حرارتی دما بالا، سرمایش شیر و خامه، عملیات حرارتی ماست، سرمایش ماست، گرمایش شیر، گرمایش و سرمایش کشک و عملیات حرارتی خامه اولیه برای کره‌گیری در صنعت لبنیات استفاده می‌شود. در صنعت لبنیات مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای مخصوص سردکردن و گرم کردن شیر درظرفیت‌ها وابعاد بسیار متنوع دیده می‌شوند. دستگاه پاستوریزاسیون صفحه‌ای چهارمرحله‌ای که تقریبا درتمام کارخانه‌های لبنی وجود دارد درحقیقت مجموعه‌ای ازچهار مبدل حرارتی صفحه‌ای است که به یکدیگر متصل شده‌اند. شکل ۱ شماتیکی از یک نوع مبدل حرارتی صفحه‌ای را نشان می‌دهد. تعیین خواص شیر و مشخص شدن مقادیر آن‌ها، یکی از عوامل مهم در طراحی مبدل‌های صفحه‌ای می‌باشد. در ایران برای طراحی مبدل-های حرارتی که در صنعت لبنیات به‌کار می‌روند، با تقریب مهندسی از خواص آب برای شیر استفاده می‌شود و در برخی از موارد، خامه که خاصیت کاملاً غیرنیوتنی دارد نیز با آب شبیه‌سازی می‌شود. مشکلاتی که این تقریب‌ها در طراحی‌ها ایجاد می‌کنند شامل: افزایش و یا کاهش مساحت مبدل مورد نیاز برای فرآیند، نصب شیرآلات اضافه برای کنترل جریان، سعی و خطا در ساخت و غیره می‌باشند.



شکل ۱: شماتیکی از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای

اندازه‌گیری و تعیین خواص فیزیکی و شیمیایی مختلف شیر توسط محققین زیادی مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفته است. برای تعیین چگالی شیر، واتسون و تیتلستر[۱] به روش تجربی برای تعیین چگالی شیر گاو در محدوده دمایی ۱ تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد روابطی را پیشنهاد دادند. آزمایش در سه دمای ۰/۹۵، ۴/۹۵ و ۹/۸۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. روابط تجربی برای محاسبه چگالی شیر از داده‌های اندازه‌گیری شده به روش حداقل مربعات[۱] به‌دست آمده-اند. تلاش‌های بسیاری برای توسعه معادلات تجربی چگالی شیر با محتوای مختلف چربی و تغییر دما (دو متغیر بسیار مهم) صورت گرفته است که در این زمینه می‌توان به رابطه پیشنهادی برتچ و همکاران[۲] برای محدوده دمایی ۶۵ الی ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد و درصد وزنی ۰ الی ۱۵ درصد چربی اشاره نمود. تعیین ظرفیت گرمایی ویژه شیر یکی دیگر از زمینه‌های تحقیقی پژوهشگران بوده است. برتچ و همکاران[۳] تاثیر دما بر ظرفیت گرمایی ویژه شیر بدون

[1] Least Squares

چربی[1] و شیر کامل[2] (شیر با ۴٪ چربی) را به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده‌اند. محدوده دمایی برای اندازه‌گیری ظرفیت گرمایی ویژه شیر بدون چربی ۵۲ تا ۱۳۴ و شیر کامل ۵۳ تا ۱۴۳ درجه سانتی‌گراد بوده است. مارتین[۴] ظرفیت گرمایی ویژه شیر بدون چربی، شیر نیمه‌چرب و شیر کامل را اندازه‌گیری کرد و با برازش منحنی بر داده‌های آزمایشگاهی به‌دست‌آمده رابطه‌ای تجربی برای تعیین ظرفیت گرمایی ویژه برحسب مقدار آب موجود در شیر، دما و مواد جامد کلی[3] پیشنهاد نمود. برای تعیین ضریب هدایت حرارتی شیر روابط تجربی مختلفی پیشنهاد شده است. مور و پراسد[۵] رابطه‌ای با دقت بالا برحسب دما و درصد مواد جامد کلی برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی شیر کامل در محدوده دمایی ۴۰ الی ۹۰ درجه سانتی‌گراد و مواد جامد کلی ۳۷ الی ۷۲ درصد پیشنهاد دادند. مارتین و مونتس[۶] ضریب هدایت حرارتی شیر با محتوی درصد چربی بالا (۲۰، ۳۰ و ۴۰٪) را در چندین دما در محدوده‌ی دمایی ۵ الی ۷۵ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری کردند. مطالعات مختلفی برای اندازه‌گیری و استخراج روابط ریاضی جهت تعیین لزجت شیر برحسب دما، درصد مواد جامد کلی، درصد چربی و غیره انجام شده است. برای محاسبه لزجت شیر، مارتین[۷] تاثیر دما و سایر اجزاء سازنده شیر را بر میزان لزجت آن مورد مطالعه قرار داده است. لزجت شیر بدون چربی، شیر کم‌چرب و شیر کامل با غلظت مواد جامد کلی تا ۳۰ درصد، در محدوده دمایی صفر تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد تعیین شده است. یک رابطه کلی برای لزجت استخراج شده است تا بتوان در هر دمایی بین صفر تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد و برای هر درصدی از مواد جامد کلی بین صفر تا ۳۰ درصد مقدار آن را به‌دست آورد. بکشی و اسمیث[۸] اثر درصد چربی و دما را بر لزجت شیر بررسی کرده‌اند. آنها لزجت‌های شیر بدون چربی، شیر با ۱٪ چربی، شیر با ۲٪ چربی، شیر کامل و خامه را در دماهای در محدوده صفر تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری کردند. مقدار لزجت به‌طور نمایی با دما و به‌صورت خطی با درصد چربی تغییر می‌کرد. برتچ و کریف[۹] لزجت شیر و خامه را در محدوده دمایی ۷۰ تا ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری کردند. درصد چربی از ۰/۰۳ تا ۱۵/۵٪ متغیر بوده است. یک رابطه برحسب درصد چربی و دما برای تعیین لزجت استخراج شده است که برای شیر و خامه از دقت بالایی برخوردار است.

در تحقیق حاضر هدف اصلی بررسی اثر میزان درصد چربی شیر بر عملکرد مبدل حرارتی صفحه‌ای با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و مقایسه با روابط تئوری برای این نوع مبدل‌ها می‌باشد. برای این منظور شیر با دما، فشار، درصد چربی (۰/۵، ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد) و سایر خواص فیزیکی معلوم وارد مبدل حرارتی صفحه‌ای می‌شود و در خروجی آن تغییرات دما، فشار و سایر خواص فیزیکی ثبت می‌شود. میزان انتقال حرارت و افت فشارِ واقعی تعیین می‌شود و با آنچه که از روابط تئوری برای مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای به‌دست می‌آید مقایسه می‌شود. خواص فیزیکی شیر همانند لزجت و چگالی به‌صورت آزمایشگاهی تعیین و با مقادیر به‌دست آمده از روابط تجربی برای شیر از منابع مختلف مقایسه خواهند شد. برای تعیین ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب هدایت حرارتی شیر از روابط تجربی مناسب استفاده خواهد شد.

اصول مبدل و خواص شیر

با استفاده از قانون اول ترمودینامیک برای سیستم‌های باز در شرایط پایا و ناچیز فرض کردن تغییرات انرژی پتانسیل و جنبشی و با فرض ثابت بودن ظرفیت گرمایی ویژه می‌توان رابطه زیر را برای مقدار حرارت انتقال یافته به شیر در مبدل صفحه‌ای نوشت.

$$Q = \dot{m} c_p \left(T_{out} - T_{in} \right) \quad (۱)$$

در رابطه فوق، $\dot{m}$ نرخ جریان جرم، T دما و c_p ظرفیت گرمایی ویژه شیر است. زیرنویس‌های in و out نیز به‌ترتیب مربوط به ورودی و خروجی مبدل حرارتی می‌باشند. مقدار انتقال حرارت عملی با استفاده رابطه (۱) به‌دست آمده می‌آید. میزان انتقال حرارت تئوری یک مبدل را براساس ضریب انتقال حرارت کلی نیز به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$Q = U\, A\, LMTD \quad (۲)$$

در رابطه فوق U ضریب کلی انتقال حرارت، A سطح انتقال حرارت کل در مبدل، و $LMTD$ اختلاف دمای لگاریتمی می‌باشد. ضریب کلی انتقال حرارت در مبدل صفحه‌ای به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} + \frac{e}{k_{plate}} + R_i + R_o \quad (۳)$$

که در آن e، k_{plate}، R_i و R_o به‌ترتیب ضخامت، ضریب هدایت حرارتی، مقاومت رسوب طرف داخل و مقاومت رسوب طرف خارج صفحه مبدل می‌باشند. h_i و h_o نیز به‌ترتیب ضریب انتقال حرارت جابجایی در سمت شیر و بخار آب هستند. از آنجا که در مبدل حرارتی صفحه‌ای مورد مطالعه سیال گرم بخار آب می‌باشد، می‌توان مقدار $1/h_o$ را تقریبا ناچیز فرض کرد. همچنین فرض می‌شود که مقدار مقاومت رسوب نیز قابل چشم‌پوشی باشد، بنابراین مقدار ضریب کلی انتقال حرارت را می‌توان از رابطه زیر به‌دست آورد:

$$U = \left(\frac{1}{h_i} + \frac{e}{k_{plate}} \right)^{-1} \quad (۴)$$

h_i را می‌توان از رابطه زیر به‌دست آورد:

$$h_i = \frac{k\, Nu}{D_h} \quad (۵)$$

که در آن k ضریب هدایت حرارتی شیر و D_h قطر هیدرولیکی هر کانال است که رابطه آن برای مبدل‌های صفحه‌ای در مرجع[۱۰] آمده است. Nu عدد ناسلت می‌باشد که از رابطه زیر به‌دست می‌آید[۱۰]:

$$Nu = j\, Re\, Pr^{0.33} \quad (۶)$$

در رابطه فوق، Re عدد رینولدز، Pr عدد پرانتل و j متغیر تشابه‌ی کولبرن می‌باشد که روابط مربوط به آن با توجه به مقدار عدد

[1] Skimmed milk
[2] Whole milk
[3] Total solids

رینولدز توسط فوک و همکاران[۱۱] ارائه شده است.

اختلاف دمای لگاریتمی توسط رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود[۱۲].

$$LMTD = F_{LMTD}\frac{\left(T_{h,in}-T_{c,in}\right)-\left(T_{h,out}-T_{c,out}\right)}{\ln\left(\frac{\left(T_{h,in}-T_{c,in}\right)}{\left(T_{h,out}-T_{c,out}\right)}\right)} \quad (۷)$$

در رابطه فوق، زیرنویس c نشان‌دهنده سیال سرد یا همان شیر و زیرنویس h نشان‌دهنده سیال گرم یا همان بخار آب می‌باشد. F_{LMTD} (ضریب تصحیح اختلاف دمای لگاریتمی)، را با توجه به مطالعات شاه[۱۲] می‌توان به‌دست آورد.

افت فشار تئوری کل مبدل حرارتی را می‌توان از رابطه زیر به‌دست آورد[۱۰]:

$$\Delta P = \frac{n_{pass}}{2}\rho f\frac{L_p}{D_h}u_{ch}^{\ 2} \quad (۸)$$

که در آن L_P طول صفحه مبدل و n_{pass} تعداد گذر مبدل در سمت شیر، ρ چگالی شیر، u_{ch} سرعت متوسط شیر در هر کانال مبدل صفحه‌ای و f ضریب افت اصطکاکی می‌باشد. مقدار f با توجه به مقدار عدد رینولدز در مرجع[۱۱] ارائه شده است. افت فشار تجربی نیز از اندازه‌گیری فشار هنگام آزمایش به‌دست می‌آید.

مقدار چگالی شیر را می‌توان از رابطه زیر به‌دست آورد. این رابطه مقدار چگالی شیر را برحسب دما و درصد چربی محاسبه می‌کند و برای محدوده دمایی ۶۵ الی ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد و درصد وزنی صفر الی ۱۵ درصد معتبر است[۲].

$$\begin{aligned}\rho = &-0.2307\times10^{-2}T^2-0.2655T+1040.51\\ &-Fat\left(-0.478\times10^{-4}T^2+0.969\times10^{-2}T+0.967\right)\end{aligned} \quad (۹)$$

که در آن Fat درصد جرمی چربی شیر می‌باشد.

برای محاسبه ظرفیت گرمایی ویژه شیر می‌توان از رابطه زیر که توسط مارتین[۴] ارائه شده است، استفاده کرد.

$$c_p = 41.8Water+\left(13.71+0.1129T\right)TS \quad (۱۰)$$

که در آن TS و $Water$ به‌ترتیب درصد جرمی مواد جامد کلی و آب موجود در شیر می‌باشند. رابطه فوق برای شرایطی که $8\%<TS<40\%$ و نسبت Fat/SNF در بازه $0.01<Fat/SNF<0.4$ (SNF درصد مواد جامد بدون چربی[۱] موجود در شیر می‌باشد) و دما در محدوده ۴۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد باشد، دارای اعتبار است.

برای ارائه رابطه تجربی برای ضریب هدایت حرارتی شیر، کوئواس و چریان[۱۳] با بررسی شیرهای با درصد TS و دمای مختلف رابطه‌ی زیر را برحسب دما و درصد مواد جامد کلی برای ضریب هدایت حرارتی شیر پیشنهاد کردند.

$$k = \left(0.565+0.00180T-0.0000058T^2\right)\left(1-0.005TS\right) \quad (۱۱)$$

برتچ و کریف[۹] رابطه‌ای مفصل برحسب دما و درصد چربی به صورت زیر برای محاسبه لزجت شیر به‌دست آوردند. این رابطه برای وقتی که درصد چربی از ۰/۰۳ تا ۱۵ درصد و دما از ۷۰ تا ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد تغییر کنند، معتبر است.

$$\begin{aligned}\ln(\mu) = &\,3.92\times10^{-5}T^2-1.951\times10^{-2}T+0.666\\ &+Fat(-9.53\times10^{-6}T^2+1.674\times10^{-3}T-4.37\times10^{-2})\\ &+Fat^2(9.75\times10^{-7}T^2-1.739\times10^{-4}T+9.83\times10^{-3})\end{aligned} \quad (۱۲)$$

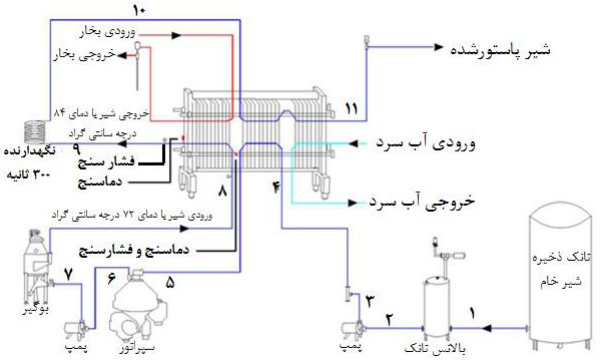
رابطه بین Fat، SNF و TS به‌صورت زیر می‌باشد:

$$TS = Fat+SNF \quad (۱۳)$$

با توجه به رابطه فوق به مجموع چربی و مواد جامد بدون چربی در شیر مواد جامد کلی گفته می‌شود.

بستر آزمایشگاهی

شکل ۲ بستر آزمایشگاهی که برای انجام آزمایش در کارخانه محل انجام آزمایش (کارخانه صنایع لبنی شیر سرایان واقع در استان خراسان جنوبی) را نشان می‌دهد. دستگاه پاستوریزاسیون مورد استفاده در کارخانه از سه مبدل حرارتی صفحه‌ای تشکیل شده است. شیر پس از تخلیه از تانک ذخیره و گذر از بالانس تانک به سمت مبدل حرارتی صفحه‌ای میانی یا همان پیش‌گرم‌کن پمپ می‌شود و تا دمای حدود ۷۲ درجه سانتی‌گراد حرارت می‌بینند و پس از عبور از خامه‌گیر[۲] و بوگیر وارد مبدل اصلی (که در تحقیق حاضر مورد مطالعه قرار گرفته است) می‌شود. یک عدد فشار سنج از نوع بردون[۳] و دماسنج از نوع PT100 در ورودی و خروجی مبدل اصلی نصب شده است تا دما و فشار با استفاده از آنها اندازه‌گیری شوند. شیر پس از عبور از مبدل اصلی و گذر از نگهدارنده ۳۰۰ ثانیه وارد قسمت سردکن دستگاه پاستوریزاسیون می‌شود و به‌وسیله آب سرد تا ۴ درجه سانتی‌گراد سرد شده و برای تولیدات مختلف در کارخانه مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۲: بسترآزمایشگاهی در کارخانه محل انجام آزمایش

خواص فیزیکی و ترموفیزیکی شیر

درصد مواد جامد بدون چربی و آب موجود در شیر و همچنین مقدار چگالی آن توسط دستگاه آنالایزر موجود در کارخانه محل انجام آزمایش و مقدار لزجت در آزمایشگاه بیوفیزیک پارک علم و فن‌آوری مشهد واقع در «شهرک صنعتی توس مشهد» اندازه‌گیری شدند. جدول ۱ خواص فیزیکی و ترموفیزیکی شیر را برحسب درصد چربی در دماهای ورودی و خروجی مبدل حرارتی صفحه‌ای مورد آزمایش

[1] Solids not fat

[2] Seperator
[3] Bourdon-Manometer

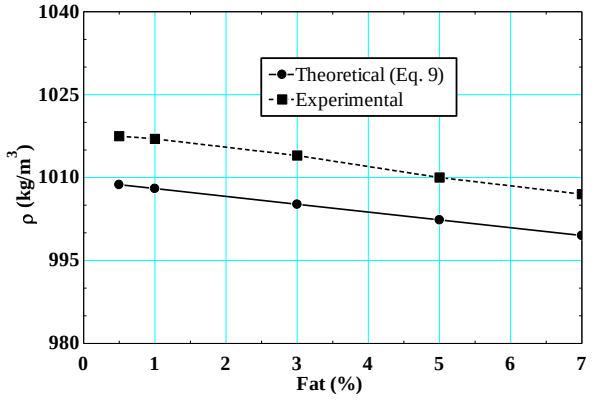
نشان می‌دهد. مقدار TS را می‌توان از رابطه (۱۳) به‌دست آورد.

جدول ۱: خواص فیزیکی و ترموفیزیکی شیر برحسب درصد چربی در دماهای ورودی و خروجی مبدل

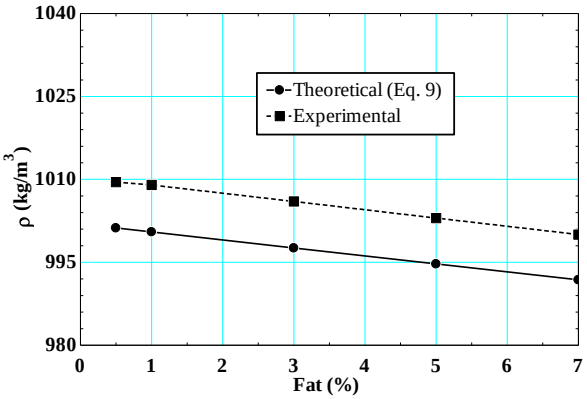
μ $(mPa.s)$	*Water* (%)	*SNF* (%)	ρ $(\frac{kg}{m^3})$	T $(^\circ C)$	*Fat* (%)
۰/۶۲	۹۱/۰۶	۸/۴۴	۱۰۱۸	۷۲	۰/۵
۰/۶۴	۹۰/۶۸	۸/۳۲	۱۰۱۷	۷۲	۱
۰/۷۴	۸۸/۷۶	۸/۳۵	۱۰۱۴	۷۲	۳
۰/۸۵	۸۷/۴۱	۷/۵۹	۱۰۱۰	۷۲	۵
۰/۹۴	۸۵/۴۲	۷/۵۸	۱۰۰۷	۷۲	۷
۰/۵۳	۹۱/۲۶	۸/۲۴	۱۰۱۰	۸۴	۰/۵
۰/۵۵	۹۰/۵۱	۸/۴۹	۱۰۰۹	۸۴	۱
۰/۶۵	۸۸/۵۲	۸/۴۸	۱۰۰۶	۸۴	۳
۰/۷۶	۸۷/۰۱	۷/۹۹	۱۰۰۳	۸۴	۵
۰/۸۴	۸۵/۲۵	۷/۷۵	۱۰۰۰	۸۴	۷

نتایج

در شکل ۳ تغییرات چگالی شیر برحسب درصد چربی در دمای ورودی رسم شده و با نتایج ارائه شده توسط برتچ و همکاران[۲] (رابطه ۹) مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود با افزایش درصد چربی شیر مقدار چگالی کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که مقادیر اندازه‌گیری شده در مطالعه حاضر با مقادیر محاسبه شده از رابطه ۹ تطابق خوبی دارند و خطای آن کمتر از ۱٪ است. شکل ۴ نیز مقادیر چگالی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه آنالایزر و رابطه ۹ را در دمای خروجی از مبدل، در درصدهای مختلف چربی نشان می‌دهد. در این دما نیز اختلاف چگالی بین مقادیر اندازه گیری شده و نتایج ناشی از رابطه ۹ حداکثر ۱٪ است که می‌توان با تقریب خوبی از رابطه ۹ در محاسبات استفاده نمود. با مقایسه شکل‌های ۳ و ۴ ملاحظه می‌شود که افزایش دما باعث کاهش اندک چگالی شیر می‌شود، البته تغییرات چگالی شیر با تغییر دما ناچیز است و می‌توان چگالی را در طول مبدل ثابت فرض کرد.

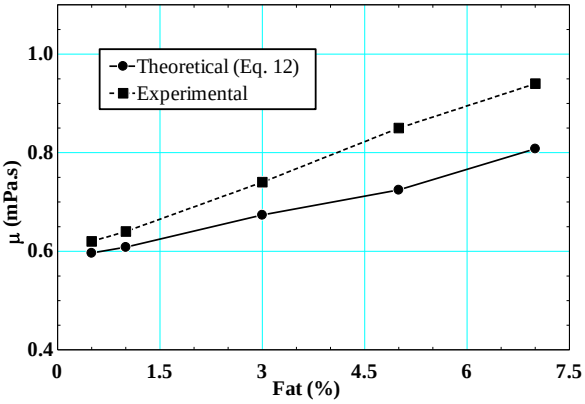


شکل ۳: مقایسه بین چگالی اندازه‌گیری شده و مقدار محاسبه شده در دمای ورودی به مبدل

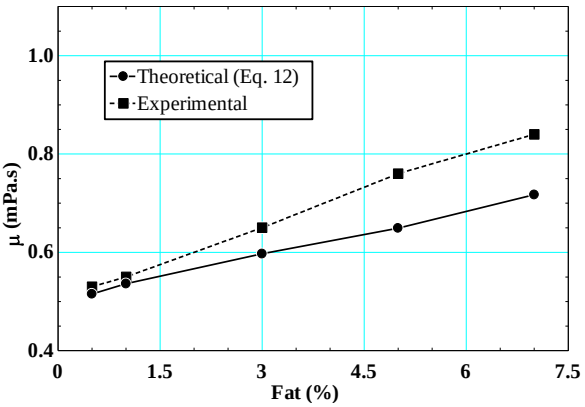


شکل ۴: مقایسه بین چگالی اندازه‌گیری شده و مقدار محاسبه شده در دمای خروج از مبدل

در شکل ۵ تغییرات مقدار لزجت شیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده از رابطه ۱۲ (برتچ و کریف[۹]) بر حسب درصدهای مختلف چربی در دمای ورودی به مبدل نشان داده شده است. در شکل ۶ نیز همان تغییرات در دمای خروج از مبدل نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش درصد چربی مقدار لزجت شیر افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش درصد چربی اختلاف بین مقدار اندازه‌گیری شده لزجت و مقدار به‌دست آمده از رابطه تجربی افزایش پیدا می‌کند و در چربی ۷ درصد مقدار خطا به ۱۵٪ می‌رسد. در درصدهای چربی کمتر تطابق خوبی بین مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار محاسبه شده از رابطه تجربی وجود دارد. با توجه هم‌زمان به شکل‌های ۵ و ۶ ملاحظه می‌شود که تغییرات دما در درصدهای کم چربی تاثیر بیشتری بر مقدار لزجت نسبت به درصدهای بالای چربی دارد و هرچه دما افزایش می‌یابد مقدار لزجت کاهش می‌یابد. بنابراین فرض دمای متوسط برای تعیین لزجت در مبدل حرارتی در درصدهای بالای چربی فرضی معقول‌تر است و هرچه درصد چربی بیشتر شود تاثیر دما بر میزان لزجت کمتر می‌شود و فرض دمای متوسط عاقلانه‌تر است. در تحقیق حاضر در محاسبات مربوط به مبدل از فرض ثابت بودن لزجت در طول مبدل با متوسط‌گیری از مقادیر لزجت در دمای ورودی و خروجی استفاده شده است.



شکل ۵: مقایسه بین لزجت اندازه‌گیری شده و مقدار محاسبه شده در دمای ورودی به مبدل



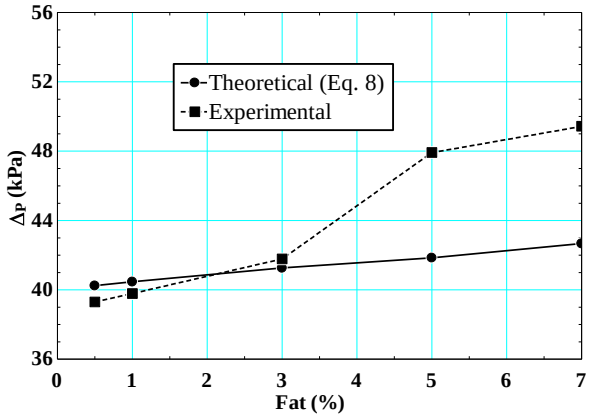
شکل ۶: مقایسه بین لزجت اندازه‌گیری شده و مقدار محاسبه شده در دمای خروج از مبدل

با توجه به نتایج قبلی برای لزجت و چگالی که مقادیر اندازه-گیری شده با نتایج حاصل از روابط پیشنهادی، تطابق خوبی دارند، بنابراین برای تعیین ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه از روابط تجربی استفاده شد. ضریب هدایت حرارتی با استفاده از رابطه ۱۱، [۱۳] و ظرفیت گرمایی ویژه با استفاده از رابطه ۱۰، [۴] در دماهای ورودی و خروجی شیر به مبدل حرارتی و درصدهای مختلف چربی به‌دست آمدند. فرض ثابت بودن ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب هدایت حرارتی نیز در طول مبدل فرضی معقولانه است که در این تحقیق از آن استفاده شده است. در جدول ۲ مقادیر میانگین خواص مورد نیاز برای محاسبه میزان انتقال حرارت و افت فشار را در مبدل حرارتی صفحه‌ای مورد آزمایش درج شده‌اند.

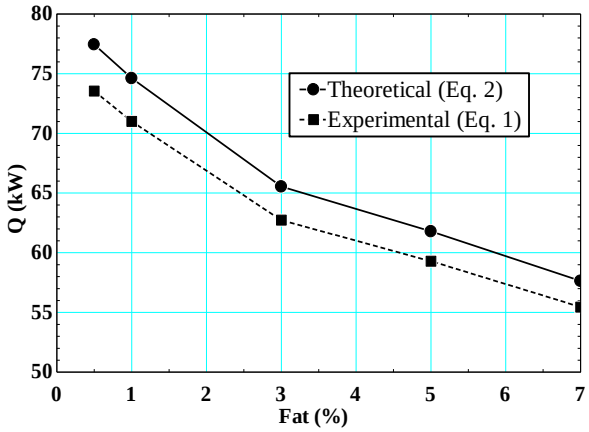
جدول ۲: مقدار میانگین خواص در ورودی و خروجی مبدل

$k_{The.}$ $(\frac{W}{m.K})$	$c_{P,The.}$ $(\frac{J}{kg.K})$	$\mu_{The.}$ $(mPa.s)$	$\mu_{Exp.}$ $(mPa.s)$	$\rho_{The.}$ $(\frac{kg}{m^3})$	$\rho_{Exp.}$ $(\frac{kg}{m^3})$	درصد چربی
۰/۶۴۰	۴۰۰۹	۰/۵۵۶	۰/۵۷۵	۱۰۰۵	۱۰۱۴	۰/۵
۰/۶۳۸	۳۹۹۹	۰/۵۷۲	۰/۵۹۵	۱۰۰۴	۱۰۱۳	۱
۰/۶۳۲	۳۹۶۱	۰/۶۳۶	۰/۶۹۵	۱۰۰۱	۱۰۱۰	۳
۰/۶۲۷	۳۹۳۳	۰/۶۸۷	۰/۸۰۵	۹۹۸/۵	۱۰۰۷	۵
۰/۶۲۱	۳۸۹۷	۰/۷۶۳	۰/۸۹۰	۹۹۵/۵	۱۰۰۴	۷

شکل ۷ مقایسه‌ای بین افت فشار اندازه‌گیری شده با نصب فشارسنج در مسیر ورودی و خروجی شیر به مبدل حرارتی صفحه‌ای و مقدار محاسبه شده از روابط تئوری را بر حسب درصد چربی شیر نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش درصد چربی مقدار افت فشار در مبدل افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که میزان افت فشار عملی در درصدهای چربی کم تطابق خوبی با میزان محاسبه شده از روابط تئوری دارد و با افزایش درصد چربی افت فشار عملی بیشتر از مقدار محاسبه شده می‌شود. بیشترین اختلاف بین افت فشار عملی و محاسبه شده در درصد چربی ۷٪ اتفاق می‌افتد که به ۱۵٪ می‌رسد. شکل ۸ مقدار انتقال حرارت از بخار آب به شیر در مبدل صفحه‌ای را به‌صورت تئوری و اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد چربی شیر مقدار انتقال حرارت در مبدل کاهش می‌یابد. مقدار انتقال حرارت واقعی اندکی کمتر از مقدار محاسبه شده می‌باشد. تطابق خوبی بین مقدار عملی انتقال حرارت و مقدار محاسبه شده از روابط تئوری وجود دارد و حداکثر اختلاف ۵/۳٪ می‌باشد. تطابق خوب نتایج آزمایشگاهی و محاسباتی میزان افت فشار انتقال حرارت در مبدل صفحه‌ای این مساله را آشکار می‌کند که می‌توان از روابط تئوری برای طراحی و انتخاب مبدل حرارتی مناسب استفاده کرد و سعی و خطا را در انتخاب مبدل حرارتی مناسب که زمان‌بر و هزینه‌بردار است کنار گذاشت. در مجموع افزایش درصد چربی شیر تاثیر منفی بر عملکرد مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای می‌گذارد. با توجه به شکل-های ۷ و ۸ ملاحظه می‌شود افزایش درصد چربی باعث افزایش افت فشار و کاهش انتقال حرارت در مبدل حرارتی صفحه‌ای می‌شود.



شکل ۷: افت فشار محاسباتی و اندازه‌گیری شده در مبدل حرارتی



شکل ۸: انتقال حرارت محاسباتی و اندازه‌گیری شده در مبدل حرارتی

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

مهمترین نتایجی که از این تحقیق عملی به‌دست آمدند را می‌توان به‌صورت زیر جمع‌بندی کرد:

۱- ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه با افزایش دما مقدارشان افزایش می‌یابد در حالی که با افزایش درصد چربی کاهش می‌یابد. البته میزان تغییر این دو خاصیت برحسب تغییر

محتوی درصد چربی اندک است و در صورتی که مقدار ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه ثابت فرض شود خطای قابل ملاحظه‌ای را وارد محاسبات نخواهد کرد.

۲- چگالی شیر با افزایش درصد چربی و دما کاهش می‌یابد. مقدار چگالی اندازه‌گیری شده با مقداری که از رابطه تجربی به‌دست آمده است تطابق خیلی خوبی دارد.

۳- لزجت شیر برخلاف سایر خواص با افزایش درصد چربی افزایش می‌یابد. دما تاثیر معکوس بر لزجت دارد به‌طوری‌که افزایش دما سبب کاهش لزجت می‌شود. مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی لزجت توسط آزمایشگاه بیوفیزیک پارک علم و فن‌آوری مشهد تطابق نسبتا خوبی با مقدار لزجت که از روابط تجربی به‌دست می‌آید دارد و بیشترین اختلاف بین مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار محاسبه شده از روابط تجربی در درصدهای بالای چربی اتفاق می‌افتد.

۴- محاسبه اعداد به‌دست آمده برای میزان افت فشار و انتقال حرارت از محاسبات با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که اختلاف اندکی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده وجود دارد که در حوزه مهندسی بسیار مطلوب به نظر می‌رسد و می‌توان با استفاده از روابط تئوری موجود برای مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای و خواص شیر به انتخاب و طراحی مبدل حرارتی صفحه‌ای مناسب در صنعت لبنیات پرداخت و از هزینه‌های زیادی که به‌خاطر سعی و خطا در انتخاب مبدل هدر می‌رود جلوگیری کرد.

۵- اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده برای افت فشار با افزایش درصد چربی زیاد می‌شود و حداکثر اختلاف در چربی ۷٪ اتفاق مشاهده شده است که ۱۵٪ می‌باشد. حداکثر اختلاف بین مقدار عملی و تئوری برای انتقال حرارت ۵/۳٪ می‌باشد.

مراجع

[1] Watson, P., and Tittsler, R., 1961. "The Density of Milk at Low Temperatures1," *Journal of Dairy Science*, vol. 44, pp. 416-424.

[2] Bertsch, A., Bimbenet, J., Cerf, O., Lelubre, A., Vermeire, D., Degas, A., *et al.*, 1982. "La masse volumique du lait et de crèmes de 65° C à l40° C," *Le Lait*, vol. 62, pp. 250-264.

[3] Bertsch, A., Lelubre, A., and Cavarroc, M., 1982. "La chaleur massique du lait entier et écrémé de 50° C à 140° C," *Le Lait*, vol. 62, pp. 265-275.

[4] Fernandez-Martin, F., 1972. "Influence of temperature and composition on some physical properties of milk and milk concentrates. I. Heat capacity," *Journal of Dairy Research*, vol. 39, pp. 65-73.

[5] More, G., and Prasad, S., 1988. "Thermal conductivity of concentrated whole milk," *Journal of Food Process Engineering*, vol. 10, pp. 105-112.

[6] Fernandez-Martin, F., and Montes, F., 1977. "Thermal conductivity of creams," *Journal of Dairy Research*, vol. 44, pp. 103-109.

[7] Fernandez-Martin, F., 1972. "Influence of temperature and composition on some physical properties of milk and milk concentrates. II. Viscosity," *Journal of Dairy Research*, vol. 39, pp. 75-82.

[8] Bakshi, A., and Smith, D., 1984. "Effect of Fat Content and Temperature on Viscosity in Relation to Pumping Requirements of Fluid Milk Products1," *Journal of Dairy Science*, vol. 67, pp. 1157-1160.

[9] Bertsch, A., J., and Cerf, O., 1983. "Dynamic viscosities of milk and cream from 70 to 135 C," *Journal of Dairy Research*, vol. 50, pp. 193-200.

[10] Martin, H., 1996. "A theoretical approach to predict the performance of chevron-type plate heat exchangers," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 35, pp. 301-310.

[11] Focke, W., Zachariades, J., and Olivier, I., 1985. "The effect of the corrugation inclination angle on the thermohydraulic performance of plate heat exchangers," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 28, pp. 1469-1479.

[12] Shah, R., 1989. "Multipass Plate Heat Exchangers Effectiveness-NIU Results and Guidelines for Selecting Pass Arrangements," *ASME J. Heat Transfer*, vol. 111, pp. 300-313.

[13] Cuevas, R., and Cheryan, M., 1978. "Thermal conductivity of liquid foods—a review," *Journal of Food Process Engineering*, vol. 2, pp. 283-306.

بسمه تعالی

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

سومین کنفرانس انتقال حرارت و جرم ایران

سومین کنفرانس انتقال حرارت و جرم ایران
گواهی پذیرش مقاله

بدین وسیله تایید می‌شود مقاله ذیل جهت چاپ در مجموعه مقالات سومین کنفرانس انتقال حرارت و جرم ایران که در تاریخ ۱ الی ۲ آذرماه در دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل برگزار می‌گردد، پذیرفته شده است.

عنوان مقاله:

مطالعه تجربی اثر میزان چربی شیر بر عملکرد مبدل حرارتی صفحه‌ای

نویسندگان:

علی راهی، محمدباقر آیانی

دکتر رضوان عالمیان
دبیر اجرایی سومین کنفرانس انتقال حرارت و جرم ایران

دکتر مومنی فرهادی
دبیر سومین کنفرانس انتقال حرارت و جرم ایران