دانشکده مهندسی مکانیک

رساله دوره دکتری مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

موضوع:

مطالعه تجربی افزایش انتقال حرارت در مبدل حرارتی با استفاده از لوله با موج مارپیچی و نانوذرات به طور همزمان

اساتید راهنما:

دکتر موسی فرهادی- دکتر کورش صدیقی

استاد مشاور:

دکتر روزبه شفقت

دانشجو:

احمدعلی ربیع نتاج درزی

تیرماه ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحيم

چکیده

در این رساله انتقال حرارت و افت فشار در یک مبدل حرارتی با لوله با موج مارپیچی بهمراه نانوسیال سیلیکا و آلومینا به صورت تجربی بررسی شده است. متغیرهای موجود شامل عدد رینولدز جریان، درصد حجمی نانوذرات، عمق و گام موج مارپیچی لوله‌ها می‌باشد. محدوده عدد رینولدز بین ۵۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰، عمق موج مارپیچی بین ۰/۵ تا ۱/۵ میلی متر، گام موج مارپیچی بین ۵ تا ۸ میلی متر و غلظت نانوذرات بین صفر تا ۱ درصد حجمی بوده است. نتایج به صورت عدد ناسلت، ضریب بی بعد اصطکاکی، عدد ناسلت نسبی و ضریب انتقال حرارت برای انرژی پمپاژ یکسان ارایه شده است. نتایج نشان دهنده افزایش انتقال حرارت با افزودن نانوذرات به سیال پایه می‌باشد بطوریکه تاثیر آن برای لوله‌ها با موج مارپیچی با عمق بزرگ‌تر و گام کوچک‌تر چشمگیرتر است. استفاده از لوله های با موج مارپیچی و نانوذرات به طور همزمان در اعداد رینولدز کوچک‌تر دارای راندمان انتقال حرارت (انتقال حرارت برای انرژی پمپاژ یکسان) بهتری می‌باشند. در صورتیکه استفاده از نانوذرات در لوله صاف در اعداد رینولدز بالاتر دارای راندمان بهتری می‌باشد. عدد ناسلت و راندمان انتقال حرارت با استفاده از نانوذرات آلومینا بیشتر از نانوذرات سیلیکا می‌باشد. مقدار انتقال حرارت و راندمان انتقال حرارت برای نانوسیال سیلیکا با درصد حجمی ۱٪ کمتر از درصد حجمی نیم درصد می‌باشد. علت آن تاثیر نامطلوب خوشه شدن نانوذرات سیلیکا می‌باشد. ماکزیمم مقدار انتقال حرارت برای انرژی پمپاژ یکسان (**R3**) برای لوله با موج مارپیچی حدود ۲۴۰٪ می‌باشد. حل عددی برای سه لوله مختلف تحت شار حرارتی ثابت بوسیله یک نرم افزار تجاری و با روش دوفازی مخلوط جهت مدلسازی نانوذرات آلومینا انجام شده است که نتیجه حائز اهمیت آن مشاهده جریان ثانویه در این لوله‌ها بوده است. نتایج عددی روند کلی تغییرات ضریب انتقال حرارت بدست آمده در نتایج تجربی را تایید می‌کنند.

کلمات کلیدی: نانوسیال، انتقال حرارت، ضریب بی بعد اصطکاکی، لوله با موج مارپیچی، مبدل حرارتی دو لوله ای

فهرست عناوین

۱- مقدمه ای بر مبدل‌های حرارتی، اصول انتقال حرارت و افت فشار ۲

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ دسته بندی مبدل‌های حرارتی ۲

۱-۳ افت فشار در لوله‌ها ۶

۱-۳-۱ افت فشار در جریان آرام توسعه یافته ۷

۱-۳-۲ افت فشار در جریان مغشوش توسعه یافته: ۷

۱-۴ اصول انتقال حرارت (در مبدل‌ها) ۱۰

۱-۴-۱هدایت حرارتی ۱۱

۱-۴-۲انتقال حرارت جابجایی ۱۱

۱-۴-۳اصل تشابه و کاربرد آن در انتقال حرارت ۱۴

۱-۴-۴اختلاف دمای متوسط لگاریتمی ۱۷

۱-۴-۵ تاثیر درجه حرارت بر خواص فیزیکی در جریان آرام: ۱۷

۱-۴-۶ جریان مغشوش داخل مجاری ۱۸

۱-۴-۷جریان مغشوش مایعات ۱۹

۱-۵ روشهای افزایش انتقال حرارت ۲۰

۱-۵-۱سطوح پره دار ۲۱

۱-۵-۲تاثیر مغشوش کننده‌ها بر ضریب انتقال حرارت ۲۳

۱-۵-۳استفاده از سطوح زبر، شیار دار و موج دار ۲۴

۱-۵-۴اثر نانو ذرات بر روی انتقال حرارت ۲۵

۲- فصل دوم - مروری بر تحقیقات انجام شده ۴۰

۲-۱ مروری بر استفاده از نانوسیالها در مبدل‌های لوله ای ۴۰

۲-۲ مروری بر لوله های زبر، شیار دار و موج دار ۴۳

۲-۲-۱ لوله با زبری گودی شکل ۴۴
۲-۲-۲ لوله های با شیار مارپیچی شکل در داخل ۴۸
۲-۲-۳ لوله های موجدار (مارپیچی) ۵۰
۲-۳ مروری بر استفاده همزمان (ترکیبی) از نانوسیال و مکانیزم‌های غیر فعال دیگر ۶۲
۲-۴ تعریف موضوع ۶۶
۳-فصل سوم- چیدمان دستگاه و روش آزمایش ۶۹
۳-۱ ساخت لوله های با موج مارپیچی ۶۹
۳-۲ ساخت پوسته خارجی مبدل ۷۰
۳-۳ مخزن آب گرم: ۷۱
۳-۴ مخزن سرد (مخزن نانوسیال): ۷۲
۳-۵ پمپ‌ها : ۷۲
۳-۶ دبی سنج ۷۴
۳-۷ مخزن خنک کننده: ۷۵
۳-۸ لوله کشی: ۷۶
۳-۹ فشار سنج: ۷۷
۳-۱۰ نحوه نصب ترموکوپل‌ها: ۷۸
۳-۱۱ تهیه نانوسیال ۸۱
۳-۱۲ طریقه آزمایش : ۸۶
۳-۱۳ اندازه گیری ضریب انتقال حرارت جابجایی: ۸۸
۳-۱۳-۱ روش ویلسون پلات ۸۸
۳-۱۳-۲ روش اندازه گیری مستقیم : ۹۱
۳-۱۴ محاسبه عدم اطمینان ۹۲
۴- فصل چهارم- نتایج **۱۰۰**
۴-۱ صحت آزمایشات انجام شده ۱۰۰

۴-۲-۱اندازه گیری ویسکوزیته نانوسیال..... ۱۰۱
۴-۲-۲ضریب انتقال حرارت هدایتی نانوسیال..... ۱۰۴
۴-۲-۳ نتایج برای استفاده از الومینا..... ۱۰۴
۴-۳ نتایج برای نانوذرات سیلیکا..... ۱۰۴
۴-۴حل عددی..... ۱۰۴
جمع بندی و پیشنهادات..... ۱۰۴
مراجع..... ۱۶۶

فهرست اشکال

شکل۱-۱ منحنی مودی [۲] ۹

شکل۱-۲ نمونه ای از مبدل و لوله پره دار [۸] ۲۱

شکل۱-۳ نمونه ای از مبدل لوله ای بهمراه سیم فنری [۹] ۲۳

شکل۱-۴ شماتیکی از مبدل حرارتی با نوار پیچیده شده [۱۰] ۲۴

شکل۱-۵ نمونه‌هایی از لوله های زبر، شیاردار، موجدار[۱۱] ۲۵

شکل۱-۶ طرز کار پایدار کننده‌ها[۱۶] ۳۰

شکل۱-۷ حرکت براونی[۳۱] ۳۳

شکل۱-۸ پدیده ترموفورز[۳۳] ۳۴

شکل۱-۹ شماتیک نانولایه تشکیل شده به دور نانو ذره[۳۴] ۳۵

شکل۱-۱۰ خوشه ای شدن نانو ذرات ۳۷

شکل۲-۱ لوله با زبری گودی شکل [۶۰] ۴۴

شکل۲-۲ لوله استفاده شده در تحقیق ونگ و همکاران[۶۱] ۴۵

شکل۲-۳ نمودارهای تغییرات نسبی عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و کارآیی در تحقیق ونگ و همکاران [۶۱] ۴۶

شکل۲-۴ منحنی تغییرات ضریب بازده حرارتی در تحقیق وب و همکاران[۶۵] ۴۹

شکل۲-۵ افزایش عدد ناسلت لوله موجی مارپیچی نسبت به لوله صاف در تحقیق ویسنته و همکاران [۷۳] ۵۴

شکل۲-۶ منحنی راندمان حرارتی برای قدرت پمپاژ یکسان در تحقیق ویسنته و همکاران [۷۳] ۵۵

شکل۲-۷ منحنی راندمان عملکرد های مختلف لوله های موجدار مارپیچی در تحقیق دونگ و همکاران [۷۸] ۵۶

شکل۲-۸ منحنی انتقال حرارت جابجایی در تحقیق نافن و همکاران[۷۹] ۵۷

شکل۲-۹ منحنی عدد ناسلت نسبی لوله‌ها با موج مارپیچی نسبت به لوله ای صاف در تحقیق نافن و همکاران[۷۹] ... ۵۸

شکل۲-۱۰ منحنی ضریب اصطکاک نسبی لوله‌ها با موج مارپیچی نسبت به لوله ای صاف در تحقیق نافن و همکاران [۷۹] ۵۹

شکل۲-۱۱ منحنی عدد ناسلت، عدد ناسلت نسبی، ضریب اصطکاک نسبی و ضریب عملکرد حرارتی در تحقیق پتکول و همکاران [۸۱] ۶۱

شکل۲-۱۲ نوار پیچی شکل استفاده شده در تحقیق سورش و همکاران [۸۶]..... ۶۳
شکل۲-۱۳ نوار تابیده شده مورد استفاده در تحقیق ونگچاری و ایامسا- آرد [۸۷]..... ۶۴
شکل۲-۱۴ عدد ناسلت در تحقیق ونگچاری و ایامسا- آرد[۸۹]..... ۶۵
شکل۲-۱۵ روند تحقیقات انجام شده در زمینه انتقال حرارت از مبدل‌ها ۶۷
شکل۳-۱ مقایسه لوله استفاده شده در تحقیق نافن و همکاران[۷۹] و لوله ساخته شده در این آزمایش ۶۹
شکل۳-۲ نمونه لوله های با موج مارپیچی ساخته شده..... ۷۰
شکل۳-۳ نحوه اتصال لوله داخلی به مسیر جریان در خارج پوسته ۷۱
شکل۳-۴ مخزن آب گرم..... ۷۱
شکل۳-۵ تابلو برق و ترموستات‌ها جهت کنترل دمای مخزن سرد و گرم..... ۷۲
شکل۳-۶ نحوه اتصال پمپ سرد به مخزن نانوسیال..... ۷۳
شکل۳-۷ پمپ آب گرم بهمراه منحنی مشخصه‌اش..... ۷۳
شکل۳-۸ مسیر باز برای اندازه گیری دبی نانو سیال ۷۵
شکل۳-۹ مخزن خنک کننده ساخته شده ۷۶
شکل۳-۱۰ فشار سنج ایندیامرت مدل ۳۰۵۱ ..... ۷۷
شکل۳-۱۱ نحوه آب بندی ترموکوپل با غلاف ۷۸
شکل۳-۱۲ نحوه نصب ترموکوپل برای اندازه گیری دما در ورودی و خروجی ۷۹
شکل۳-۱۳ ترموکوپل بدون غلاف و با غلاف ۷۹
شکل۳-۱۴ دیتالاگر امگا ۸۰
شکل۳-۱۵ منحنی کالیبراسیون ترموکوپل‌ها ۸۱
شکل۳-۱۶ همزن مغناطیسی ۸۲
شکل۳-۱۷ لایه اکمن ۸۲
شکل۳-۱۸ ارتعاش بوسیله آلتراسونیک ۸۳
شکل۳-۱۹ نمونه ای از نانوسیال آلومینا تهیه شده بعد ۳۰ دقیقه ۸۳
شکل۳-۲۰ نمونه ای از نانوسیال ۱٪ تهیه شده بعد از زمانهای مختلف ۸۴

شکل۳-۲۱ نمونه ای از نانوسیال ۱٪ بهمراه پایدار کننده بعد از زمان‌های مختلف ۸۵
شکل۳-۲۲ تایر پایدارکننده ها بر روی عدد ناسلت در لوله صاف ۸۵
شکل۳-۲۳ شماتیک دستگاه آزمایش ۸۶
شکل۳-۲۴ نمودار نهایی روش ویلسون-پلات [۹۰]..... ۹۰
شکل۳-۲۵ نحوه نصب ترموکوپل‌ها در تحقیق نافن و همکاران[۷۹] ۹۲
شکل۳-۲۶ مقدار خطا در آزمایش ۹۳
شکل۳-۲۷ مقدار خطای رندم در آزمایش..... ۹۳
شکل۴-۱ مقایسه کار حاضر در مقایسه با کار نافن [۷۹] برای لوله صاف ۱۰۱
شکل۴-۲ مقایسه کار حاضر در مقایسه با کار نافن و همکاران[۷۹] برای لوله با موج مارپیچی(e=1.25,p=5) ۱۰۱
شکل۴-۳ دستگاه اندازه گیری ویسکوزیته سیال ۱۰۲
شکل۴-۴ تغییرات ویسکوزیته نانوسیال بر حسب دما..... ۱۰۲
شکل۴-۵ مقایسه تغییرات ویسکوزیته نسبی..... ۱۰۳
شکل۴-۶ ضریب هدایت نسبی نانوسیال آلومینا به آب ۱۰۴
شکل۴-۷ تغییرات عدد ناسلت برای لوله صاف..... ۱۰۵
شکل۴-۸ تغییرات عدد ناسلت نسبی برای لوله صاف ۱۰۶
شکل۴-۹ مقایسه صحت معادله بدست آمده برای ضریب انتقال حرارت در لوله صاف ۱۰۶
شکل۴-۱۰ تغییرات عدد ناسلت برای لوله با مشخصات (e=0.75mm و p=5mm) ۱۰۷
شکل۴-۱۱ تغییرات عدد ناسلت برای لوله با مشخصات (e=1mm و p=5mm) ۱۰۸
شکل۴-۱۲ تغییرات عدد ناسلت برای لوله با مشخصات (e=1.25mm و p=5mm) ۱۰۸
شکل۴-۱۳ تغییرات عدد ناسلت برای لوله با مشخصات (e=0.75mm و p=6mm) ۱۰۹
شکل۴-۱۴ تغییرات عدد ناسلت برای لوله با مشخصات (e=1mm و p=6mm) ۱۰۹
شکل۴-۱۵ تغییرات عدد ناسلت برای لوله با مشخصات (e=1.25mm و p=6mm) ۱۱۰
شکل۴-۱۶ تغییرات عدد ناسلت برای لوله با مشخصات (e=0.75mm و p=7mm) ۱۱۰
شکل۴-۱۷ تغییرات عدد ناسلت برای لوله با مشخصات (e=1mm و p=7mm) ۱۱۱

شکل۴-۱۸ تغییرات عدد ناسلت برای لوله با مشخصات (e=1.25mmو p=7mm) ۱۱۱
شکل۴-۱۹ تغییرات عدد ناسلت برای لوله با مشخصات (e=1mmو p=8mm) ۱۱۲
شکل۴-۲۰ تغییرات عدد ناسلت برای لوله با مشخصات (e=1.25mmو p=8mm) ۱۱۲
شکل۴-۲۱ تغییرات عدد ناسلت برای لوله با مشخصات (e=1.5mmو p=8mm) ۱۱۳
شکل۴-۲۲ مقایسه صحت معادله بدست آمده برای ضریب انتقال حرارت در لوله با موج مارپیچی ۱۱۵
شکل۴-۲۳ تغییرات عدد ناسلت نسبی برای لوله با مشخصات (e=0.75mmو p=5mm) ۱۱۷
شکل۴-۲۴ تغییرات عدد ناسلت نسبی برای لوله با مشخصات (e=1mmو p=5mm) ۱۱۸
شکل۴-۲۵ تغییرات عدد ناسلت نسبی برای لوله با مشخصات (e=1.25mmو p=5mm) ۱۱۸
شکل۴-۲۶ تغییرات عدد ناسلت نسبی برای لوله با مشخصات (e=1mmو p=6mm)..... ۱۱۸
شکل۴-۲۷ تغییرات عدد ناسلت نسبی برای لوله با مشخصات (e=1mmو p=6mm) ۱۱۹
شکل۴-۲۸ تغییرات عدد ناسلت نسبی برای لوله با مشخصات (e=1.25 mmو p=6mm) ۱۱۹
شکل۴-۲۹ تغییرات عدد ناسلت نسبی برای لوله با مشخصات (e=0.75mmو p=7mm) ۱۲۰
شکل۴-۳۰ تغییرات عدد ناسلت نسبی برای لوله با مشخصات (e=1mmو p=7mm) ۱۲۰
شکل۴-۳۱ تغییرات عدد ناسلت نسبی برای لوله با مشخصات (e=1.25mmو p=7mm) ۱۲۱
شکل۴-۳۲ تغییرات عدد ناسلت نسبی برای لوله با مشخصات (e=1mmو p=8mm) ۱۲۱
شکل۴-۳۳ تغییرات عدد ناسلت نسبی برای لوله با مشخصات (e=1.25mmو p=8mm) ۱۲۲
شکل۴-۳۴ تغییرات عدد ناسلت نسبی برای لوله با مشخصات (e=1.5mmو p=8mm) ۱۲۲
شکل۴-۳۵ ضریب بی بعد اصطکاک برای لوله صاف ۱۲۴
شکل۴-۳۶ ضریب بی بعد اصطکاک برای لوله با مشخصات (e=0.75mmو p=5mm)..... ۱۲۴
شکل۴-۳۷ ضریب بی بعد اصطکاک برای لوله با مشخصات (e=1mmو p=5mm)..... ۱۲۵
شکل۴-۳۸ ضریب بی بعد اصطکاک برای لوله با مشخصات (e=1.25mmو p=5mm)..... ۱۲۵
شکل۴-۳۹ ضریب بی بعد اصطکاک برای لوله با مشخصات (e=0.75mmو p=6mm)..... ۱۲۶
شکل۴-۴۰ ضریب بی بعد اصطکاک برای لوله با مشخصات (e=1mmو p=6mm)..... ۱۲۶
شکل۴-۴۱ ضریب بی بعد اصطکاک برای لوله با مشخصات (e=1.25mmو p=6mm)..... ۱۲۷

شکل۴-۴۲ ضریب بی بعد اصطکاک برای لوله با مشخصات (e=0.75mmو p=7mm).....۱۲۷
شکل۴-۴۳ ضریب بی بعد اصطکاک برای لوله با مشخصات (e=1mmو p=7mm).....۱۲۸
شکل۴-۴۴ ضریب بی بعد اصطکاک برای لوله با مشخصات (e=1.25mmو p=7mm).....۱۲۸
شکل۴-۴۵ ضریب بی بعد اصطکاک برای لوله با مشخصات (e=1mmو p=8mm).....۱۲۹
شکل۴-۴۶ ضریب بی بعد اصطکاک برای لوله با مشخصات (e=1.25mmو p=8mm).....۱۲۹
شکل۴-۴۷ ضریب بی بعد اصطکاک برای لوله با مشخصات (e=1.5mmو p=8mm).....۱۳۰
شکل۴-۴۸ ضریب R3 برای لوله با مشخصات (e=0.75mmو p=5mm).....۱۳۱
شکل۴-۴۹ ضریب R3 برای لوله با مشخصات (e=1mmو p=5mm).....۱۳۲
شکل۴-۵۰ ضریب R3 برای لوله با مشخصات (e=1.25mmو p=5mm).....۱۳۲
شکل۴-۵۱ ضریب R3 برای لوله با مشخصات (e=0.75mmو p=6mm).....۱۳۳
شکل۴-۵۲ ضریب R3 برای لوله با مشخصات (e=1mmو p=6mm).....۱۳۳
شکل۴-۵۳ ضریب R3 برای لوله با مشخصات (e=1.25mmو p=6mm).....۱۳۴
شکل۴-۵۴ ضریب R3 برای لوله با مشخصات (e=0.75mmو p=7mm).....۱۳۴
شکل۴-۵۵ ضریب R3 برای لوله با مشخصات (e=1mmو p=7mm).....۱۳۵
شکل۴-۵۶ ضریب R3 برای لوله با مشخصات (e=1.25mmو p=7mm).....۱۳۵
شکل۴-۵۷ ضریب R3 برای لوله با مشخصات (e=1mmو p=8mm).....۱۳۶
شکل۴-۵۸ ضریب R3 برای لوله با مشخصات (e=1.25mmو p=8mm).....۱۳۶
شکل۴-۵۹ ضریب R3 برای لوله با مشخصات (e=1. 5mmو p=8mm).....۱۳۷
شکل۴-۶۰ تغییرات عدد ناسلت برای لوله صاف و نانوذرات سیلیکا.....۱۳۹
شکل۴-۶۱ تغییرات عدد ناسلت برای نانوذرات سیلیکا و لوله با مشخصات (e=0.5mmو p=5mm) ۱۳۹
شکل۴-۶۲ تغییرات عدد ناسلت برای نانوذرات سیلیکا و لوله با مشخصات (e=0.75mmو p=5mm) ۱۴۰
شکل۴-۶۳ تغییرات عدد ناسلت برای نانوذرات سیلیکا و لوله با مشخصات (e=1.25mmو p=5mm) ۱۴۰
شکل۴-۶۴ تغییرات عدد ناسلت برای نانوذرات سیلیکا و لوله با مشخصات (e=1.25mmو p=7mm) ۱۴۱
شکل۴-۶۵ تغییرات عدد ناسلت برای نانوذرات سیلیکا و لوله با مشخصات (e=1.25mmو p=8mm) ۱۴۱

شکل۴-۶۶ تغییرات عدد ناسلت نسبی برای نانوذرات سیلیکا و لوله با مشخصات (e=0.5mm و p=5mm).....۱۴۲
شکل۴-۶۷ تغییرات عدد ناسلت نسبی برای نانوذرات سیلیکا و لوله با مشخصات (e=0.75mm و p=5mm) ۱۴۳
شکل۴-۶۸ تغییرات عدد ناسلت نسبی برای نانوذرات سیلیکا و لوله با مشخصات (e=1.25mm و p=5mm) ۱۴۳
شکل۴-۶۹ تغییرات عدد ناسلت نسبی برای نانوذرات سیلیکا و لوله با مشخصات (e=1.25mm و p=7mm) ۱۴۴
شکل۴-۷۰ تغییرات عدد ناسلت نسبی برای نانوذرات سیلیکا و لوله با مشخصات (e=1.25mm و p=8mm) ۱۴۴
شکل۴-۷۱ ضریب بی بعد اصطکاک برای نانوذرات سیلیکا و لوله با مشخصات (e=0.5mm و p=5mm) ۱۴۵
شکل۴-۷۲ ضریب بی بعد اصطکاک برای نانوذرات سیلیکا و لوله با مشخصات (e=0.75mm و p=5mm) ۱۴۶
شکل۴-۷۳ ضریب بی بعد اصطکاک برای نانوذرات سیلیکا و لوله با مشخصات (e=1.25mm و p=5mm) ۱۴۶
شکل۴-۷۴ ضریب بی بعد اصطکاک برای نانوذرات سیلیکا و لوله با مشخصات (e=1.25mm و p=7mm) ۱۴۷
شکل۴-۷۵ ضریب بی بعد اصطکاک برای نانوذرات سیلیکا و لوله با مشخصات (e=1.25mm و p=8mm) ۱۴۷
شکل۴-۷۶ ضریب R3 برای نانوذرات سیلیکا و لوله با مشخصات (e=0. 5mm و p=5mm).....۱۴۸
شکل۴-۷۷ ضریب R3 برای نانوذرات سیلیکا و لوله با مشخصات (e=0. 75mm و p=5mm).....۱۴۸
شکل۴-۷۸ ضریب R3 برای نانوذرات سیلیکا و لوله با مشخصات (e=1.25mm و p=5mm).....۱۴۹
شکل۴-۷۹ ضریب R3 برای نانوذرات سیلیکا و لوله با مشخصات (e=1.25mm و p=7mm).....۱۴۹
شکل۴-۸۰ ضریب R3 برای نانوذرات سیلیکا و لوله با مشخصات (e=1.25mm و p=8mm).....۱۵۰
شکل۴-۸۱ وابستگی حل به تعداد شبکه ۱۵۱
شکل۴-۸۲ شبکه بندی لوله با موج مارپیچی در نرم افزار گمبیت ۱۵۲
شکل۴-۸۳ بررسی صحت حل برای لوله صاف و با آب خالص ۱۵۳
شکل۴-۸۴ تایید نتایج حاصل از شبیه سازی با کار ویسنته برای لوله با موج مارپیچی و با استفاده از آب خالص ۱۵۳
شکل۴-۸۵ شکل گیری جریان ثانویه در لوله های با موج مارپیچی در مقاطع مختلف ۱۵۴
شکل۴-۸۶ خطوط جریان سه بعدی در لوله های با موج مارپیچی ۱۵۴
شکل۴-۸۷ کانتور تغییرات غلظت نانو ذرات در مقاطع مختلف لوله ۱۵۵
شکل۴-۸۸ تغییرات عدد ناسلت برای غلظتهای مختلف و لوله صاف ۱۵۵
شکل۴-۸۹ تغییرات عدد ناسلت برای غلظتهای مختلف و گام مارپیچ ۱۶ در فرورفتگی۱ میلی متر ۱۵۶

شکل۴-۹۰ تغییرات عدد ناسلت برای غلظتهای مختلف و گام مارپیچ ۱۶ در فرورفتگی ۰/۶۷ میلی متر.....۱۵۶
شکل۴-۹۱ تغییرات عدد ناسلت برای غلظتهای مختلف و گام مارپیچ ۲۵ در فرورفتگی ۱ میلی متر ۱۵۷
شکل۴-۹۲ تغییرات عدد ناسلت نسبی برای غلظتهای مختلف نانو ذرات برای گام و فرورفتگی موج مارپیچی مختلف ۱۵۸

فهرست جداول

جدول ۱-۱ ضریب هدایت حرارتی برخی از مواد ۲۷
جدول ۱-۲ مقدار افزایش ضریب هدایتی نانو سیال‌ها ۳۸
جدول ۳-۱ مشخصات هندسی لوله های ساخته شده ۶۹
جدول ۴-۱ مشخصات لوله های در نظر گرفته شده برای حل عددی ۱۵۱

فهرست علائم

A	(m^2)	مساحت
d	(m)	قطر لوله
e	(m)	عمق (ارتفاع زبری)
f	-	ضریب بی بعد اصطکاک
h	(W/m^2K)	ضریب جابجایی حرارتی
j	-	ضریب جی
K	(W/mK)	ضریب هدایت حرارتی
l	(m)	طول لوله
m	(kg)	جرم
$\dot{m}$	(kg/s)	دبی جرمی
Nu	-	عدد ناسلت
Ns		تعداد شیار
P	(pa)	فشار
p	(m)	گام
Pr	-	عدد پرانتل
Q	(W)	مقدار حرارت
Re	-	عدد رینولدز
$R3$		راندمان انتقال حرارت برای پمپاژ یکسان
v	(m/s)	سرعت
		حروف یونانی
ρ	$Kg/m3$	چگالی
μ	Kg/ms	ویسکوزیته دینامیکی
υ	m^2/s	ویسکوزیته سینماتیکی
φ	-	درصد حجمی
α		زاویه مارپیچ
		زیرنویس
s,f		مربوط به لوله صاف و سیال پایه
a, nf		مربوط به لوله با موج مارپیچی و نانوسیال
P		مربوط نانوذره
p		مربوط به لوله صاف
i		داخلی
o		خارجی

فصل اول

مقدمه ای بر مبدل‌های حرارتی

۱- فصل اول - مقدمه ای بر مبدل‌های حرارتی، اصول انتقـال حـرارت و افت فشار

۱-۱ مقدمه

مبدل‌های حرارتی تجهیزاتی صنعتی می‌باشند که به کمک آن‌ها می‌توان در اثر تماس غیر مستقیم دو سیال، سیال دیگر را گرم یا سرد کرد. این تعریف به طور ضمنی بیان می‌کند که در یک مبدل حرارتی حداقل دو سیال وجود دارد که حرارت بین آن دو جابجا می‌شود. مبدل‌های حرارتی صنعتی موجود برای مصارف متعددی بکار می‌روند. تمام یخچال‌هایی که بر اساس سیکل تبرید تراکم بخاری عمل می‌کنند دارای دو مبدل حرارتی هستند که یکی برای جذب حرارت از یخچال و فریزر و دیگری برای دفع حرارت به هوای محیط مورد استفاده قرار می‌گیرد. رادیاتور وسائل نقلیه که در آن آب در گردش داخل موتور به وسیله هوا خنک می‌شود و فن‌کوئلی که برای گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها به کار می‌رود هر یک نوعی مبدل حرارتی هستند. مبدل‌های حرارتی در اندازه های مختلف بسیار کوچک و بسیار بزرگ ساخته می‌شوند. کاربرد مبدل حرارتی بسیار وسیع و در صنایع مختلفی از قبیل نیروگاههای تولید برق، پالایشگاه‌ها، صنایع ذوب فلز و شیشه سازی، صنایع غذایی و داروسازی، کاغذ سازی، صنایع پتروشیمی، سرد خانه‌ها و سیستم‌های گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها، صنایع میعان گازها (مانند هوا) و صنایع الکترونیک مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای بررسی مبدل‌ها در ادامه به دسته بندی آن‌ها از دیدگاه اصول انتقال حرارت و افت فشار که دو پارامتر مهم در مبدلها می‌باشند، پرداخته می‌شود[۱].

۱-۲ دسته بندی مبدل‌های حرارتی

مبدل‌های حرارتی اصولاً براساس موارد ذیل دسته بندی می‌باشند:

الف) پدیده انتقال:

تبادل انرژی بین دو سیال به صورت تماس مستقیم یا غیرمستقیم صورت می‌گیرد: در نوع مستقیم، حرارت بین دو سیال که با هم تماس مستقیم دارند مبادله می‌شود. معمولاً یکی از این دو سیال گاز و دیگری مایع است که با فشار بخار خیلی پایین و پس از تبادل حرارت به سادگی قابل تفکیک هستند. در نوع غیرمستقیم، حرارت ابتدا به یک سطح جامد نفوذ ناپذیر منتقل می‌شود و سپس از آن به سیال سرد انتقال می‌یابد.

ب) ساختمان مبدل:

در بسیاری مواقع مبدل‌های حرارتی بر مبنای ساختمان تقسیم بندی می‌شوند. مبدل‌های حرارتی از نظر ساختمان به چهار دسته تقسیم بندی می‌شوند که عبارت اند از :

۱) مبدل‌های حرارتی لوله ای[1]

در این مبدل‌ها اساس انتقال حرارت از نوع غیر مستقیم بوده و مکانیزم انتقال حرارت جابه‌جایی می‌باشد. این مبدل‌ها به دو دسته عمده تقسیم بندی می‌شوند: دو لوله ای[2] ، پوسته و لوله[3]

ساده‌ترین نوع مبدل‌های حرارتی دو لوله ای هستند که یک سیال از درون لوله داخلی می‌گذرد و سیال دیگر در فضای بین دو لوله جریان دارد.

در آرایش جریان همسو، سیالات گرم و سرد از سر یکسان وارد می‌شوند و در جهت یکسان جریان می‌یابند و از انتهای یکسان خارج می‌شوند. در آرایش جریان نا همسو، سیالات از دو سر متقابل وارد می‌شوند و در جهت‌های مخالف جریان می‌یابند و از دو انتها متقابل دیگر خارج می‌شوند. سیالات ممکن است دارای جریان عرضی (عمود بر هم) نیز باشند این نوع جریان عموماً در مبدل‌های گرمایی لوله ای پره دار بکار می‌رود. نوع متداول دیگر مبدل گرمایی پوسته- لوله ای است بر حسب تعداد

---

[1] *Pipe Heat Exchanger*
[2] *Two Pipes*
[3] *Tube and Shell*

پاس‌های پوسته و لوله، این مبدل‌ها انواع مختلفی دارند و ساده‌ترین آن‌ها که دارای یک پاس پوسته و یک پاس لوله است. معمولاً دیوارک هایی نصب می‌شوند تا با ایجاد تلاطم و ایجاد مؤلفه سرعت عرضی در جریان، ضریب جابجایی سیال در سمت پوسته افزایش یابد .

در مبدل‌های پوسته و لوله با صفحه لوله های ثابت ، پوسته به صفحه لوله ، جوش شده است و هیچ گونه دسترسی به خارج از دسته لوله، برای تمیزکاری وجود ندارد. این انتخاب کم هزینه و دارای انبساط گرمایی محدود است.

مبدل‌های پوسته و لوله با دسته لوله U شکل دارای کم هزینه‌ترین ساختار است، زیرا فقط به یک صفحه لوله نیاز است. سطح داخلی لوله‌ها به دلیل خم U شکل تند، نمی‌توانند با وسایل مکانیکی تمیز شود. در این مبدل‌ها تعداد زوجی از گذرهای لوله به کار می‌رود ولی محدودیتی از نظر انبساط گرمایی وجود ندارد. هزینه این مبدل‌ها زیاد است. آرایش‌های مختلف جریان در سمت پوسته و سمت لوله، بسته به وظیفه گرمایی (ظرفیت گرمایی)، افت فشار، تشکیل رسوب، شیوه های ساخت و هزینه بری، کنترل خوردگی و مسائل تمیز کاری، استفاده می‌شوند. بفل ها[4] در مبدل‌های پوسته و لوله برای افزایش ضریب انتقال گرما در سمت پوسته و برای نگه داشتن لوله‌ها استفاده می‌گردند.مزایای مبدل‌های پوسته و لوله را می‌شود به شرح زیر نام برد:

۱-در حجم کم ایجاد سطح بزرگی برای انتقال حرارت می‌کنند.

۲- طراحی مکانیکی خوبی دارند.

۳- روش ساخت تثبیت شده خوبی دارند.

۴- قابلیت استفاده برای دامنه وسیعی از مواد را دارند.

۵- به راحتی تمیز می‌شوند.

[4] *Baffle*

۲) مبدل‌های حرارتی صفحه ای[5]

مبدل حرارتی صفحه ای اساساً با توجه به سادگی و با توجه به نیازهای صنایع غذائی در دهه ۱۹۳۰ ابداع شدند. طراحی بهینه آن در دهه ۱۹۶۰ با تکامل موثرتر هندسه صفحات، مونتاژ اجزا و مواد بهینه تر برای ساخت واشرهای مورد استفاده در این نوع مبدل‌ها کارآمدتر از گذشته مورد بازبینی قرار گرفت. موارد استفاده از آنها به تمامی صنایع راه پیدا کرد و توانسته است از رقیب خود (مبدل‌های لوله ای) پیشی بگیرد. به دلیل تنوع بسیار زیاد محدوده های طراحی این نوع مبدل‌ها که در نوع صفحات و آرایش آن‌ها قابل بررسی است، عملاً شرکت‌های سازنده آن‌ها اطلاعات محرمانه طراحی را اعلام نمی‌کنند.

مبدل‌های صفحه ای واشردار تشکیل شده است از تعدادی صفحات نازک با سطح چین دار و یا موج دار که جریان سیال گرم و یا سرد را از هم جدا می‌کنند. صفحات دارای قطعاتی در گوشه‌ها هستند و به نحوی چیدمان شده‌اند که دو سیال عامل به صورت یک در میان، بین صفحات جریان دارند. طراحی و واشربندی بهینه این امکان را ایجاد می‌کند که مجموعه از صفحات در کنار یکدیگر تشکیل یک مبدل صفحه ای مناسب را بدهند. مبدل‌های حرارتی صفحه ای معمولاً در جریان سیالی با فشار پایین‌تر از ۲۵بار و دمای کمتر از ۲۵۰ درجه محدود می‌شوند. از آنجا که کانالهای جریان کاملاً کوچک هستند، جریان قوی گردابه ای و توربولانس موجب بزرگ بودن ضرایب انتقال حرارت و افت فشارها می‌گردد. بعلاوه بزرگ بودن تنش برشی موضعی باعث کاهش تشکیل رسوب می‌شود. واشرها از نشتی سیال به بیرون مبدل جلوگیری می‌کنند و سیال‌ها را در صفحات به شکل مورد نظر هدایت می‌نمایند. شکل جریان عموماً به نحوی انتخاب می‌شوند که جریان سیال‌ها خلاف جهت یکدیگر باشند.

مبدل‌های صفحه ای حلزونی با پیچاندن دو صفحه بلند موازی به شکل یک حلزونی و جوش دادن لبه های صفحات مجاور به صورتی که یک کانال را تشکیل دهند، شکل داده می‌شود. در هر یک از دو مسیر

---

[5] *Plate Heat Exchanger*