

الحمد لله



دانشکده مهندسی مکانیک

گروه تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی تجربی و بهبود عملکرد لوله‌های حرارتی نوسانی در مبدل بازیافت

رضا خدای

استاد راهنما

دکتر علی عباس‌نژاد

شهریور ۹۳

ب



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره:
تاریخ:
ویرایش:

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای رضا خدای رسته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان بررسی تجربی و بهبود عملکرد لوله‌های حرارتی نوسانی در مبدل بازیافت که در تاریخ ۹۳/۰۶/۳۱ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☐ مردود	☐ دفاع مجدد	☒ قبول (با درجه : عالی امتیاز ۱۹۳۸)
--------------------------------	------------------------------------	---

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر علی عباس نژاد	استادیار	
۲- استاد مشاور			
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر علی جباری مقدم	استادیار	
۴- استاد ممتحن	دکتر محمد محسن شاه مردان	دانشیار	
۵- استاد ممتحن	دکتر پوریا اکبرزاده	استادیار	

امضاء

رئیس دانشکده:



تقديم به:

پدر بزرگوار و مادر مهربانم

تشکر و قدردانی:

در اینجا لازم می‌دانم از زحمات بی دریغ استاد ارجمندم جناب آقای دکتر علی عباس‌نژاد صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

در پایان هم از همراهی دوستان عزیزم آقای مهندس آشوری، خباز و سادات رسول و تمامی کسانی که ذکر نامشان در این مقال نمی‌گنجد صمیمانه قدردانی نمایم و از خداوند منان آرزوی سلامت و توفیق روزافزون برایشان خواستارم.

دانشجو تایید می نماید که مطالب مندرج در این پایان نامه نتیجه تحقیقات خودش می باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی مترتب از نتایج مطالعات، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد.

تعهد نامه

اینجانب رضا خدامی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته تبدیل انرژی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تجربی و بهبود عملکرد لوله های حرارتی نوسانی در مبدل باز یافت تحت راهنمایی دکتر علی عباس نژاد متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

چکیده

جمعیت استفاده کننده از انرژی در جهان نسبت به دهه‌های اخیر روز به روز در حال افزایش است. بدین ترتیب علاقه بشر برای دستیابی به منابع جدید انرژی از قبیل انرژی باد، بيو، آب، انرژی خورشیدی و غیره، قابل توجه است، اما همچنین کاهش مصرف انرژی نیز باید همزمان مورد توجه واقع شود. یکی از روش‌های نوین، تولید انرژی از انرژی‌های موجود بدون مصرف آن می‌باشد. همچنین آلودگی محیط زیست و تامین انرژی در آینده‌ای نه چندان دور به صورت یک بحران جدی بروز خواهد کرد و هزینه سوخت مصرفی در کشور ما ایران به این ارزانی نخواهد بود. لذا صرفه‌جویی و بازیافت انرژی یک راه حل مناسب برای این مشکل می‌تواند باشد. از طرفی صنایع به دنبال تجهیزاتی خواهند رفت که علاوه بر راندمان بالا از نظر اقتصادی نیز بسیار مقرون به صرفه باشند. استفاده از بازیاب‌های حرارتی با استفاده از لوله‌های حرارتی نوسانی یکی از این روش‌ها می‌باشد. در این پژوهش به بررسی تجربی کارایی لوله‌های حرارتی نوسانی بسته در مبدل‌های گرمایی، روش طراحی و ساخت یک نمونه مبدل بازیافت حرارت برای گرمایش هوا توسط لوله‌های حرارتی نوسانی پرداخته شده است. از یک ردیف لوله حرارتی نوسانی با نسبت پرشدگی ۴۰ درصد با سیال عامل اتانول و نانو سیال نقره استفاده شده است، در این حالت دبی جرمی دود ثابت در نظر گرفته شد و اثر تغییر دبی جرمی هوا و همچنین افزایش دمای دود ورودی بر روی عملکرد مبادله‌کن مورد بررسی قرار گرفت و تحلیل آن از نظرگاه انرژی و انرژی‌مورد بررسی قرار داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دبی جرمی هوا باعث افزایش اختلاف دمای ورودی و خروجی مجرای گرم و کاهش اختلاف دما در مجرای سرد می‌شود. از سوی دیگر افزایش دمای ورودی دود نیز باعث افزایش اختلاف دما در هر دو مجرا می‌شود. افزایش دبی جرمی و دمای ورودی دود باعث افزایش شار حرارتی انتقال یافته در هر دو مجرا خواهد شد و همچنین افزایش دبی جرمی باعث افزایش راندمان انرژی و کاهش راندمان انرژی سیستم خواهد شد اما افزایش دما الزاماً افزایش راندمان را در پی ندارد. همچنین

استفاده از نانوسیال منجر به بهبود افزایش عملکرد حرارتی سیستم می‌شود. حداکثر این افزایش برای نانوسیال در نسبت دبی ۲/۵ در دمای ورودی ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد و به مقدار ۱۱ درصد اتفاق افتاده است.

کلمات کلیدی: مبدل بازیافت، مبادله‌کن، لوله حرارتی، لوله حرارتی نوسانی

لیست مقالات مستخرج

رضا خدامی، علی عباس‌نژاد؛ بررسی تجربی استفاده از لوله‌های حرارتی نوسانی در
مبدل بازیاب، برای جذب حرارت دودکش و گرم کردن هوای مورد نیاز احتراق؛ سومین
کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی (پذیرش)

لیست علائم

T	دما ($^{\circ}\text{C}$)
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه (Kj/KgK)
q	شار حرارتی (W)
$\dot{m}$	دبی جرمی (Kg/s)
ε	کارایی
ΔH	تغییرات آنتالپی
ΔS	تغییرات آنتروپی
S	آنتروپی
η	بازده اگزرژی
Ex	اگزرژی
PE	انرژی پتانسیل
KE	انرژی جنبشی
μ	پتانسیل شیمیایی
P	فشار
V	حجم
W	کار

زیر نویس

واقعی	act
دود ورودی	h,i
دود خروجی	h,o
هوا ورودی	c,i
هوا خروجی	c,o
کمترین	min
بیشترین	max
جریانی	flow
غیر جریانی	non-flow
اگر رژی	e
خالص	net
جز	i
تعداد مول	N
پتانسیل	pot
جنبشی	kin
تولید	gen

محیطی 0

محیط ∞

فهرست مطالب

فصل ۱ : مقدمه	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ لوله حرارتی	۲
۳-۱ لوله‌های حرارتی نوسانی	۴
۱-۳-۱ کمیت‌های موثر بر عملکرد لوله حرارتی نوسانی	۵
۲-۳-۱ کاربردهای لوله حرارتی نوسانی	۷
فصل ۲ : مروری بر تحقیقات انجام شده	۱۱
۱-۲ مدل‌های فیزیکی و ریاضی موجود	۱۲
۲-۲ کارهای عملی انجام شده در ارتباط با موضوع به همراه نتایج	۱۶
فصل ۳ : دستگاه آزمایشگاهی	۲۷
۱-۳ مواد و تجهیزات	۲۸
۱-۱-۳ ساخت لوله حرارتی نوسانی	۲۸
۲-۳ نحوه پر کردن لوله‌های حرارتی نوسانی	۲۹
۳-۳ ساخت مبدا باز یافت حرارت	۳۰
۴-۳ نحوه انجام آزمایش	۳۲
۵-۳ بررسی عملکرد مبادله‌کن	۳۴
۶-۳ تحلیل انرژی	۳۵
۱-۶-۳ کارکرد تحلیل‌های انرژی و انرژی	۳۶

۳۸	 ۳-۶-۲ تعادل جرم، انرژی و آنتروپی
۳۹	 ۳-۶-۳ آگزرژی سیستم‌ها و جریان‌ها
۴۲	 ۳-۶-۴ روند تحلیل انرژی و آگزرژی
۴۲	 ۳-۶-۵ مفاهیم نتایج تحلیل‌های آگزرژی
۴۵	 فصل ۴: بررسی نتایج
۴۶	 ۴-۱ تحلیل دمایی
۵۰	 ۴-۲ تحلیل حرارتی
۵۲	 ۴-۳ تحلیل عملکرد مبدل
۵۵	 ۴-۴ تحلیل آگزرژی
۵۹	 فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۶۰	 ۵-۱ نتیجه‌گیری
۶۰	 ۵-۲ پیشنهادات
۶۳	 پیوست ۱ نانو سیالات
۶۴	 مفهوم نانو سیالات
۶۵	 مزایای بالقوه نانوسیال
۶۵	 بهبود انتقال حرارت و پایداری
۶۶	 کاهش توان لازم پمپاژ سیال
۶۶	 کاهش گرفتگی و انسداد مجاری
۶۷	 کاهش هزینه‌ها

کاربرد نانوسیالات.....	۶۷
تهیه نانو سیال.....	۶۹
روش تهیه یک مرحله‌ای.....	۶۹
روش تهیه دو مرحله‌ای.....	۷۰
پایداری نانو ذرات در نانوسیال.....	۷۰
تغییر PH سوسپانسیون.....	۷۱
استفاده از فعال کننده سطح و پایدارکننده‌ها.....	۷۱
ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات.....	۷۲
عوامل موثر بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات.....	۷۲
انتقال حرارت جابجایی در نانوسیالات.....	۷۴
جابجایی اجباری.....	۷۵
جابجایی طبیعی.....	۷۵
جوشش.....	۷۶
مراجع.....	۷۹

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ شماتیکی از یک لوله حرارتی ساده [۷] ۳
- شکل ۲-۱ لوله حرارتی نوسانی و انواع مختلف آن [۶] ۴
- شکل ۳-۱ تاثیر گرانش بر عملکرد لوله حرارتی نوسانی در موقعیتهای مختلف [۶] ۷
- شکل ۱-۲ دستگاه آزمایشگاهی و تصاویر بدست آمده توسط کاوارا و همکاران [۲۹] ۱۹
- شکل ۱-۳ لوله‌های حرارتی نوسانی بسته ساخته شده ۲۸
- شکل ۲-۳ دستگاه مبدل بازیافت ۳۲
- شکل ۳-۳ شماتیک سیستم مورد استفاده ۳۳
- ۱-۴ اختلاف دمای دو سر مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت در دمای ورودی دود ۱۱۰ درجه سانتی-
گراد ۴۸
- ۲-۴ اختلاف دمای دو سر مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت در دمای ورودی دود ۱۲۰ درجه سانتی-
گراد ۴۸
- ۳-۴ اختلاف دمای دو سر مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت در دمای ورودی دود ۱۲۵ درجه
سانتیگراد ۴۹
- ۴-۴ اختلاف دمای دو سر مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت در دمای ورودی دود ۱۳۰ درجه سانتی-
گراد ۴۹
- ۵-۴ شار حرارتی انتقال یافته مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت در دمای ورودی ۱۱۰ درجه سانتی-
گراد ۵۰
- ۶-۴ شار حرارتی انتقال یافته مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت در دمای ورودی ۱۲۰ درجه
سانتیگراد ۵۱
- ۷-۴ شار حرارتی انتقال یافته مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت در دمای ورودی ۱۲۵ درجه سانتی-

- گِراد.....۵۱
- ۸-۴ شار حرارتی انتقال یافته مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت در دمای ورودی ۱۳۰ درجه سانتی -
- گِراد.....۵۱
- شکل ۹-۴ راندمان مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت در دمای ورودی ۱۱۰ درجه سانتی گراد.....۵۳
- شکل ۱۰-۴ راندمان مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت در دمای ورودی ۱۲۰ درجه سانتی گراد.....۵۳
- شکل ۱۱-۴ راندمان مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت در دمای ورودی ۱۲۵ درجه سانتی گراد.....۵۳
- شکل ۱۲-۴ راندمان مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت در دمای ورودی ۱۳۰ درجه سانتی گراد.....۵۴
- ۱۳-۴ تغییرات انرژی از دست رفته بر حسب دبی سیال سرد.....۵۵
- ۱۴-۴ کارایی انرژی و کارایی انرژی بر حسب نسبت دبی های سیال سرد و گرم.....۵۶
- ۱۵-۴ کارایی انرژی و کارایی انرژی بر حسب R.....۵۶
- ۱۶-۴ بازده انرژی بر حسب دبی هوا.....۵۷

فهرست جداول

جدول ۱-۳ درصد مولی گاز حاصل از احتراق ۴۴

جدول ۱-۴ انتخاب سیال کاری برای لوله حرارتی..... ۴۸

جدول ۲-۴ بیشترین مقدار افزایش عملکرد برای هر نسبت دبی..... ۵۵

فصل ۱: مقدمه

۱-۱ مقدمه

لوله‌های حرارتی در بسیاری از موارد یکی از بهترین گزینه‌ها برای انتقال گرما و وسایل موثری برای بازیافت حرارت اتلافی محسوب می‌شوند. مزیت کاربرد لوله حرارتی بر دیگر روش‌های مرسوم این است که این وسیله می‌تواند مقادیر عظیمی از حرارت را توسط یک سطح مقطع کوچک و در یک مسافت قابل ملاحظه‌ای بدون هیچ‌گونه توان دریافتی، منتقل سازد. علاوه بر آن، ساخت و طراحی آسان، افت دمای کم در طول لوله حرارتی، کاربرد در بازه وسیعی از دما ($4-2000\text{K}$) و توانایی کنترل و انتقال نرخ‌های بالای حرارت در دماهای مختلف از دیگر مزیت‌های آن به شمار می‌روند [۱ و ۲].

نسل جدید لوله‌های حرارتی، لوله‌های حرارتی نوسانی نام دارد که در دهه ۱۹۹۰ توسط آکچی^۱ اختراع گردیدند [۳ و ۴]. لوله حرارتی نوسانی به علت استفاده از ترکیب انتقال حرارت محسوس و انتقال حرارت نهان نسبت به لوله‌های حرارتی معمولی کارآمدتر هستند. همچنین طراحی ساده و ارزان قیمت بودن از دیگر مزایای لوله حرارتی نوسانی نسبت به سایر وسایل انتقال حرارت می‌باشد.

۱-۲ لوله حرارتی

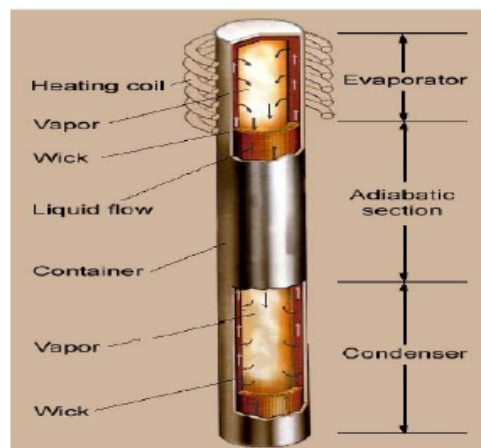
مبدل‌های حرارتی مرسوم که همواره در صنایع جهت انتقال حرارت به کار می‌روند، لوله‌های حرارتی ساده^۲ می‌باشند. این وسیله انتقال حرارت دو فاز شارهای حرارتی بالایی را در حداقل اختلاف دمای بین تبخیرکننده و چگالنده جابجا می‌کند و اولین بار توسط گاگلر^۳ در سال ۱۹۴۲ ساخته شد [۵]. یک لوله حرارتی وسیله نسبتاً ساده است که بدون هیچ قسمت متحرکی، قابلیت انتقال مقادیر زیادی حرارت را در فواصل مختلف دارد. جذاب‌ترین مشخصه لوله حرارتی ساده این است که در این سیستم نیاز به انرژی خارجی نیست و لوله حرارتی ساده فقط با اعمال گرما فعال می‌شود و در حین

¹ Akachi

² simple heat pipe

³ Gaugler

حال دارای ضریب رسانایی گرمایی موثر و نسبتاً بالایی است همانطور که در شکل ۱-۱ دیده می‌شود. عموماً^۱ لوله حرارتی از سه بخش اصلی تبخیرکننده^۲، قسمت آدیاباتیک^۳ و چگالنده^۳ تشکیل شده است. عملکرد لوله حرارتی ساده به این صورت است که حرارت در منطقه تبخیرکننده به لوله حرارتی ساده وارد شده و بدین وسیله سیال عامل داخل آن می‌جوشد و سیال عامل که در حالت مایع اشباع قرار دارد و در اثر دریافت گرمای نهان تبخیر به بخار اشباع تبدیل می‌شود. بخار اشباع حاصل در اثر اختلاف فشار به انتهای دیگر لوله حرارتی ساده یا ناحیه کندانسور منتقل می‌شود. این منطقه در ناحیه خنک‌تری قرار داشته و از این‌رو بخار اشباع، گرمای نهان تبخیر خود را از دست داده و چگالیده می‌شود. مایع اشباع حاصل، از طریق یک ساختار فتیله‌ای توسط نیروی موئینگی به قسمت تبخیر کننده بازگردانده می‌شود و سیکل مجدداً تکرار می‌شود تا گرما به طور پیوسته از ناحیه گرم به ناحیه سرد منتقل شود. از آنجایی که فرایندهای جوشش و چگالش همراه با ضرایب انتقال حرارت بالایی بوده و عملکرد لوله حرارتی ساده بر اساس جوشش و چگالش متوالی سیال عامل است، می‌توان انتظار داشت که لوله حرارتی ساده وسیله مناسبی در زمینه انتقال حرارت باشد.



شکل ۱-۱ شماتیکی از یک لوله حرارتی ساده [۷]

برای کاربردهایی با توان حرارتی بالا، طراحی ساختارهای خاص این فتیله، محدودیت‌هایی را

^۱ Evaporator

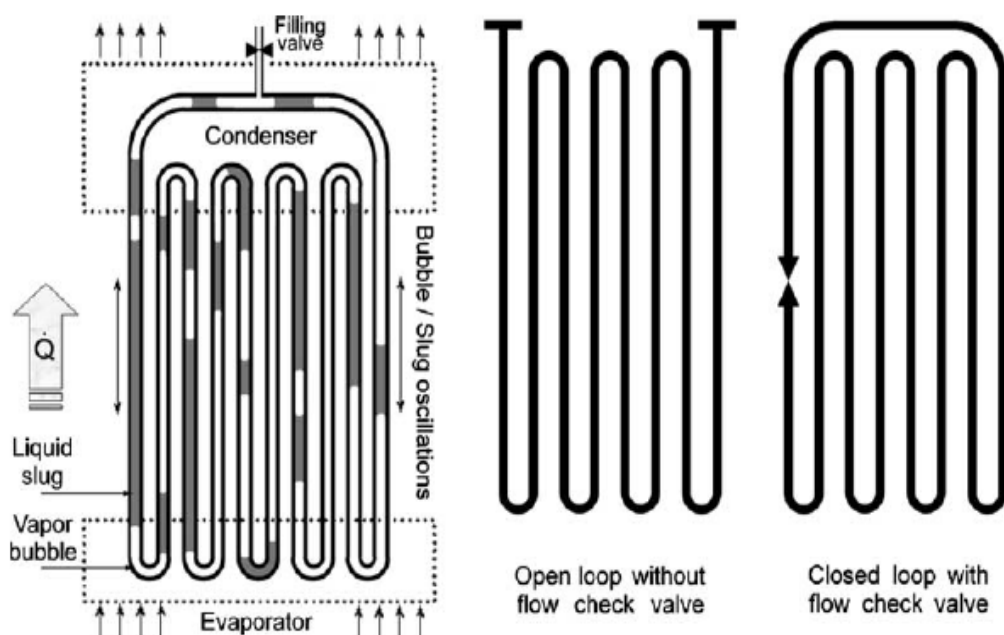
^۲ Adiabatic

^۳ Condenser

ایجاد می‌کرد. همچنین استفاده از ساختارهای فتیل‌ای سبب افزایش هزینه و پیچیدگی لوله حرارتی ساده می‌شد. به دلیل وابستگی بسیار شدید ساختار لوله حرارتی ساده نسبت به گرانش و عدم عملکرد مناسب در حالت افقی، نوع جدیدی از لوله‌های حرارتی با نام لوله‌های حرارتی نوسانی که هیچ‌گونه ساختار فیتیل‌ای مانند در آن وجود نداشت، معرفی گردیده‌اند.

۱-۳ لوله‌های حرارتی نوسانی

لوله‌های حرارتی نوسانی به دو نوع حلقه بسته و حلقه باز تقسیم می‌گردند. در نوع حلقه بسته دو انتهای لوله به هم متصل می‌گردند و در این شرایط امکان گردش سیال عامل در لوله حرارتی وجود دارد. در نوع حلقه باز دو انتهای لوله از هم مجزا هستند. نوع حلقه بسته به علت آنکه امکان گردش سیال در لوله حرارتی را فراهم می‌کند، انتقال حرارت بهتری نسبت به حلقه باز دارد. لوله حرارتی نوسانی و انواع مختلف آن در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲ لوله حرارتی نوسانی و انواع مختلف آن [۶]

مکانیزم عملکرد لوله حرارتی نوسانی بدین صورت است که وقتی لوله حرارتی از سیال عامل به

صورت جزئی پر می‌گردد، به علت تاثیر کشش سطحی در لوله با قطر کم، سیال عامل در لوله به حالت قطره - حباب^۱ توزیع می‌شود (مطابق شکل ۱-۲). در ابتدای اعمال شار حرارتی چون توان ورودی به اندازه‌ای نیست که بتواند سیال عامل را به حرکت درآورد. با افزایش بیشتر شار حرارتی، سیال عامل در لوله حرارتی به حرکت در آمده و انتقال حرارت به شدت بهبود می‌یابد [۷]. ویژگی منحصر به فرد لوله حرارتی نوسانی آن است که سیال عاملی که در قسمت تبخیرکننده تبخیر می‌گردد، با افزایش فشار خود و حرکت به سمت چگالنده سیالاتی که در چگالنده قرار دارند را به سمت تبخیرکننده در لوله مجاور حرکت می‌دهد. این امر همان‌طور که در ادامه توضیح داده می‌شود، عملکرد لوله حرارتی نوسانی را کمتر به گرانش وابسته می‌کند.

۱-۳-۱ کمیت‌های موثر بر عملکرد لوله حرارتی نوسانی

کمیت‌های مختلفی بر عملکرد لوله حرارتی نوسانی تاثیر می‌گذارند که از آن‌ها می‌توان به نوع سیال عامل، قطر داخلی، نسبت پرشدگی، توان ورودی، تعداد دور و زاویه شیب اشاره کرد. در ادامه هر یک از این کمیت‌ها توضیح داده می‌شوند:

قابلیت استفاده از سیالات مختلفی در لوله‌های حرارتی نوسانی وجود دارد که از آن‌ها می‌توان به آب، استون، اتانول، انواع مبردها (R113, R-134a و...)، میکروسیالات، نانوسیالات و... اشاره کرد.

قطر داخلی در آرایش سیال در داخل لوله حرارتی تاثیر می‌گذارد. قطرهای خیلی بزرگ سبب جدا شدن^۲ قطرات سیال و حباب‌های بخار در داخل لوله می‌گردد و در قطرهای خیلی کوچک به قدری اتلافات اصطکاکی زیاد است که حرکت سیال عامل در لوله حرارتی مختل می‌گردد. بنابراین نیاز به محاسبه‌ی قطر بهینه‌ای وجود دارد که منجر به پخش شدن ذرات سیال به صورت مکانیزم قطره - حباب در لوله حرارتی نوسانی گردد [۷]. معمولاً لوله حرارتی نوسانی در بازه‌ی قطر بین ۵-۱۰/۱

^۱ slug-plug

^۲ Stratifying

میلی متر به طور مناسب کار می کند [۸].

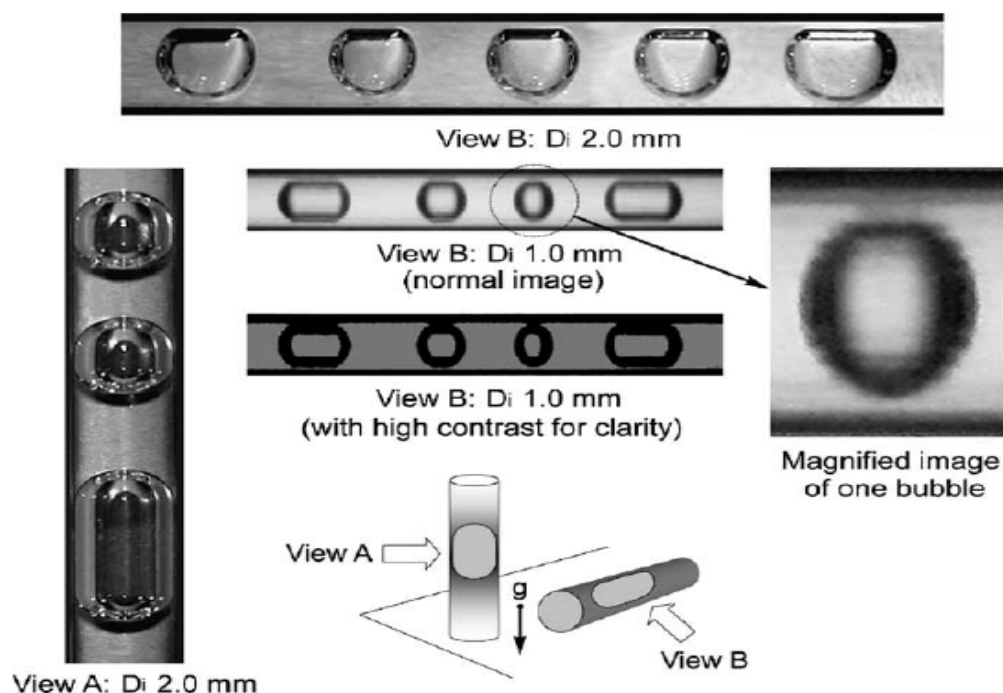
نسبت پرشدگی های کم منجر به خشک شدن^۱ سیال عامل در داخل لوله حرارتی و افت شدید انتقال حرارت می گردند. در نسبت پرشدگی های زیاد نیز پمپ کردن سیال عامل توسط حباب های بخار به خوبی صورت نمی گیرد. بنابراین یک مقدار بهینه ای برای نسبت پرشدگی لوله های حرارتی نوسانی وجود دارد که معمولاً بین ۴۰-۶۰ درصد می باشد [۹].

با افزایش توان ورودی به لوله حرارتی، آرایش جریان سیال از قطره - حباب به حالت جریان حلقوی^۲ تبدیل می گردد. هرچند عملکرد لوله حرارتی نوسانی در حالت جریان حلقوی بسیار بهتر بوده، ولی احتمال آن وجود دارد که با افزایش بیشتر توان ورودی به لوله حرارتی نوسانی خشک شدگی در تبخیرکننده ایجاد گردد که این امر بایستی مدنظر قرار گیرد [۱۰]. بنابراین با افزایش تعداد دور در لوله حرارتی نوسانی سهم شار حرارتی هریک از دورها کمتر گردیده و به تبع آن عملکرد لوله حرارتی بهبود می یابد؛ ولی با افزایش بیش از حد تعداد دورها در لوله حرارتی، احتمال آن وجود دارد که سهم شار حرارتی هر دور از شار حرارتی بحرانی (حداقل شار حرارتی لازم برای شروع نوسانات در لوله حرارتی) نیز کمتر گردد؛ بنابراین در این حالت عملکرد لوله حرارتی نوسانی به شدت افت می کند [۷].

در حالت افقی به علت عدم وجود نیروی گرانش برای حمل سیال چگالیده شده از چگالنده به تبخیرکننده یک کاهش مشهود در مقاومت حرارتی لوله حرارتی نوسانی رخ می دهد. همچنین گزارش هایی مبنی بر تغییر شکل حباب و قطره ها در حالت افقی در اثر نیروی گرانش وجود دارد که در ادامه بیشتر توضیح داده خواهد شد [۶ و ۹].

¹ Dry-out

² Annular flow



شکل ۳-۱ تاثیر گرانش بر عملکرد لوله حرارتی نوسانی در موقعیت‌های مختلف [۶]

۲-۳-۱ کاربردهای لوله حرارتی نوسانی

یکی از کاربردهای مهم لوله حرارتی استفاده آن‌ها به عنوان مبدل جهت بازیافت حرارت اتلافی دودکش‌ها می‌باشد. مبدل لوله حرارتی در بسیاری از موارد نظیر: دیگ بخار، کوره‌ها و خشک‌کن برای ذخیره انرژی استفاده می‌شود. استفاده از مبدل حرارتی، ضمن کاهش مصرف عمده انرژی باعث کاهش تولید CO_2 نیز خواهد شد. تحقیق بر روی مبدل‌های لوله حرارتی از اواسط دهه ۱۹۷۰ آغاز گشت و از آن زمان تاکنون یکی از کاربردهای مهم لوله حرارتی استفاده آن‌ها به عنوان مبدل جهت بازیافت حرارت اتلافی دودکش‌ها می‌باشد. تحقیق بر روی مبدل‌های لوله حرارتی از اواسط دهه ۱۹۷۰ آغاز گشت و از آن زمان تاکنون این مبدل‌ها کاربرد وسیعی در صنایع مختلف پیدا کرده‌اند [۱۱].

از لوله‌های حرارتی به منظور خنک‌سازی قطعات در تجهیزات الکترونیکی استفاده می‌گردد. به عنوان مثال از لوله‌های حرارتی به طور گسترده در کامپیوترهای مدرن برای دفع گرما در قطعاتی مثل

واحد پردازشگر مرکزی^۱ استفاده می‌گردد؛ همچنین از لوله‌های حرارتی به طور گسترده در کلکتورهای خورشیدی استفاده می‌گردد؛ در این کاربرد عموماً از آب به عنوان سیال عامل استفاده می‌شود. از لوله‌های حرارتی در خط‌های لوله انتقال نفت و گاز برای دفع حرارت استفاده می‌شود؛ در این سیستم‌ها حین انتقال سیال عامل بر اثر اصطکاک و اغتشاش جریان، گرمای زیادی تولید می‌شود و در صورت عدم دفع مناسب، منجر به ذوب اتصالات می‌شود. بنابراین استفاده از لوله‌های حرارتی برای دفع حرارت در این سیستم‌ها بسیار موثر می‌باشد، همچنین از لوله‌های حرارتی در سیستم‌های تهویه مطبوع استفاده می‌شود [۱۲].

دلایل برتری این مبدل‌ها نسبت به تجهیزات دیگر را می‌توان عوامل زیر معرفی کرد [۱]:

- ۱- مبدل‌های لوله حرارتی قسمت متحرک مکانیکی ندارند، لذا تعمیر و نگهداری آن‌ها به حداقل می‌رسد؛
- ۲- تماس بین جریان‌های اتلافی و گرم‌شونده وجود ندارد؛
- ۳- به لحاظ عملکرد مستقل لوله‌های حرارتی، امکان نصب لوله‌ها در فضاهای محدود و به شکل‌های مختلف وجود دارد؛
- ۴- ضریب بالای تبادل گرما و سطح زیاد انتقال گرما، بازده عملکرد مبدل را بسیار زیاد می‌کند؛
- ۵- لوله‌های حرارتی مستقل از یکدیگر عمل می‌کنند، بنابراین خرابی یک یا چند لوله عملکرد کلی سیستم را مختل نمی‌کند؛
- ۶- ابعاد مبدل نسبت به گرمایی که منتقل می‌کند خیلی کوچک است؛
- ۷- برتری مهم و اصلی این مبدل‌ها نسبت به مبدل‌های دیگر، نزدیکی عملکرد به حالت دما-

^۱ Central Processing Unit (CPU)

ثابت، افت فشار کم، درصد خطای در نظر گرفته شده در هنگام طراحی و هزینه نصب و راه‌اندازی کم می‌باشد.

اولین بهره‌برداری و استفاده از نقطه‌نظر مهندسی از لوله‌های نوسانی توسط آکاجی^۱ [۳] در سال ۱۹۹۰ انجام گرفت. او اولین نمونه‌ها از خانواده لوله‌های حرارتی نوین را در ۲۴ شکل مختلف ساخت.

این مجموعه لوله‌های حرارتی چرخه‌ای نامیده شدند. همه این ساختارهای پیشنهادی دارای یک مشخصه مشترک بودند و آن وجود یک شیر یک طرفه در مسیر لوله برای تحمیل یک جهت قراردادی بود. حداقل قطر داخلی لوله‌های به کار رفته در این مجموعه دو میلی‌متر بود. در آن زمان ادعا شد که لوله‌های حرارتی جدید بر کمبودها و مشکلاتی که لوله‌های معمولی دارند فائق می‌آیند. برای مثال دیده شد که سیال‌های عاملی که برای استفاده در لوله‌های حرارتی معمولی مناسب نیستند، در این لوله‌ها می‌توانند به کار گرفته شوند و دارای کارایی بالاتر یا لااقل مشابه باشند.

^۱Akachi

فصل ۲: مروری بر تحقیقات انجام

شده

۲-۱ مدل‌های فیزیکی و ریاضی موجود

هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی تجربی و بهبود عملکرد لوله‌های حرارتی نوسانی در مبدل بازیافت می‌باشد. با این وجود در ادبیات لوله حرارتی نوسانی پژوهش‌های ارزشمند تحلیلی و عددی نیز وجود دارند که در ادامه مرور می‌گردند.

در سال ۲۰۰۲ شفیع^۱ و همکارانش [۱۳]، مدل انتقال حرارتی برای لوله حرارتی نوسانی ارائه نمودند. آن‌ها تاثیر تبخیر و میعان لایه نازک^۲ را نیز در مدل خود در نظر گرفتند و نشان دادند که انتقال حرارت در لوله حرارتی نوسانی عمدتاً مرتبط با انتقال حرارت محسوس می‌باشد. کشش سطحی بالاتر منجر به افزایش انتقال حرارت کلی می‌شود. قطر، دمای دیواره و نسبت پرشدگی تاثیرات مهمی بر انتقال حرارت لوله حرارتی نوسانی دارد. با کاهش در دمای دیواره، انتقال کلی به شدت افت می‌کند. افزایش قطر لوله منجر به انتقال حرارت کلی بالاتر می‌شود. نتایج آن‌ها همچنین نشان می‌داد که لوله حرارتی نوسانی در نسبت پرشدگی‌های بالا به خوبی عمل نمی‌کند.

در سال ۲۰۰۳ کوی^۳ و همکارانش [۱۴]، با استفاده از شبکه عصبی یک لوله حرارتی نوسانی را مدل‌سازی نمودند. آن‌ها در شبکه خود از دو گره برای بار حرارتی و نسبت پرشدگی استفاده کردند. خروجی در شبکه آن‌ها مقاومت حرارتی بود. آن‌ها بین نتایج مدل خود و نتایج تجربی تطابق قابل قبولی مشاهده کردند و بیان داشتند که با استفاده از شبکه عصبی می‌توان به دقت عملکرد حرارتی لوله حرارتی نوسانی را مدل‌سازی نمود.

در سال ۲۰۰۴ دابسون^۴ [۱۵]، یک مدل تئوری برای لوله حرارتی نوسانی با در نظر گرفتن تاثیرات نیروی جاذبه، کشش سطحی، اصطکاک و فشار ارائه داد. او لوله حرارتی نوسانی را به صورت

¹ Shafii

² Thin film

³ Cui

⁴ Dobson

تجربی بررسی نمود. نتایج تئوری و تجربی او تطابق قابل قبولی داشتند. وی با محاسبه توان‌های لیاپونف^۱ نشان داد که مدل تئوری وی قادر است که رفتار بی‌نظم این دستگاه را نشان دهد. او همچنین نشان داد که در نظر گرفتن تبخیر مایع که در سطح تجمع کرده در مدل‌سازی بسیار مهم است.

در سال ۲۰۰۵ هالی^۲ و فقری^۳ [۱۶]، با استفاده از مدلی تحلیلی تاثیر تغییرات قطر کانال بر انتقال حرارت لوله حرارتی را مورد بررسی قرار دادند. مدل آن‌ها یک بعدی بود و در آن از فرض جریان قطره‌ای^۴ استفاده شده بود. آن‌ها در مدل خود معادله ممنتوم برای هر قطره مایع و معادله انرژی در دیواره، فتیله^۵ و سیال عامل را حل کردند. آن‌ها تاثیر قطر، جاذبه و نسبت پرشدگی را بررسی کردند و تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی مشاهده کردند. آن‌ها همچنین نشان دادند که وقتی قطر کانال در طول کانال تغییر می‌کند، انتقال حرارت می‌تواند افزایش یابد.

در سال ۲۰۰۶ شکوهمند^۶ و همکارانش [۱۷]، لوله حرارتی نوسانی را با شبکه عصبی دو لایه‌ای مدل کردند. آن‌ها تاثیرات نسبت پرشدگی، نوع سیال عامل و توان حرارتی را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که نتایج آن‌ها در تطابق خوبی با نتایج تجربی است و مدل آن‌ها می‌تواند برای پیش‌بینی روند پارامترهای موثر بر عملکرد لوله حرارتی نوسانی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در سال ۲۰۰۸ سو^۷ و ژنگ [۱۸]، برای درک بهتر انتقال حرارت و بررسی عوامل تاثیرگذار بر نرخ انتقال آن، مدلی ساده برای لوله حرارتی نوسانی حلقه بسته ارائه نمودند. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که مقاومت حرارتی لوله حرارتی نوسانی شامل مقاومت حرارتی سرمایش و مقاومت حرارتی سیکلی می‌باشد. سرعت جریان سرمایش، سطح سرمایش و نسبت مساحت سرمایش به مساحت گرمایش

¹ Lyapunov

² Holley

³ Faghri

⁴ Slug flow

⁵ Wick

⁶ Shokouhmand

⁷ Su

عوامل اصلی تاثیرگذار بر مقاومت سرمایش بوده و دمای منبع گرم و نسبت پرشدگی فاکتورهای اساسی تاثیرگذار بر مقاومت حرارتی سیکلی بودند. در بررسی ایشان، نرخ انتقال حرارت با افزایش سطح سرمایش، نسبت سطح سرمایش به سطح گرمایش، سرعت جریان سرد، دمای منبع گرم، نسبت پرشدگی و کاهش دمای سرمایش بیشتر می‌شد. آن‌ها نسبت پرشدگی را از ۱۰ تا ۸۰ درصد تغییر دادند. نرخ انتقال حرارت با افزایش نسبت پرشدگی به مقدار کم افزایش می‌یافت.

در همین سال ما^۱ و همکارانش [۱۹]، یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی حرکت نوسانی ارایه نمودند. آن‌ها با ترکیب حرکت نوسانی پیش‌بینی شده با مدل، یک مدل جامع برای پیش‌بینی تاثیرات انتقال حرارت جابجایی اجباری به علت حرکت نوسانی ارایه دادند. آن‌ها برای اعتبارسنجی مدل خود، بررسی تجربی بر روی لوله حرارتی نوسانی با ۸ دور نیز انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که وقتی توان ورودی یا اختلاف دمای بین قسمت تبخیرکننده و چگالنده از یک مقدار مشخص بیشتر می‌شد، حرکت نوسانی شروع شده و منجر به افزایش انتقال حرارت در لوله حرارتی نوسانی می‌گردید.

در همان سال ساکولچانگساتجاتای^۲ و همکارانش [۲۰]، مدلی ریاضی برای لوله حرارتی نوسانی در حالتی که تبخیرکننده در پایین چگالنده قرار داشته باشد و در زوایای شیب مختلف ارایه کردند. آن‌ها همچنین تمام معادلات حاکم بر فیلم مایع، قطره مایع و حباب بخار را با در نظر گرفتن کشش سطحی، اصطکاک ویسکوز سیال عامل و رابطه گاز ایده‌آل به صورت عددی حل نمودند. نتایج آن‌ها به وضوح دینامیک سیال عامل را در لوله حرارتی نوسانی نشان می‌داد. آن‌ها همچنین نتایج خود را با نتایج تجربی موجود مقایسه نمودند و به تطابق قابل قبولی با رنج خطای ۱۳ درصد رسیدند. آن‌ها نشان دادند که ماکزیمم نرخ انتقال حرارت در بالاترین دمای تبخیرکننده و زاویه شیب ۷۰-۸۰ درجه نسبت به افق رخ می‌دهد.

¹ Ma

² Sakulchangsattajai

در سال ۲۰۰۹، چن^۱ و همکارانش [۲۱]، مدل ریاضی برای یک لوله حرارتی نوسانی حلقه بسته ارائه نمودند. مدل آن‌ها ناپایداری حرارتی در قسمت‌های مختلف لوله حرارتی نوسانی و در شرایط عملکردی متفاوت را در برداشت. آن‌ها رفتار غیرخطی لوله حرارتی نوسانی را با روشی خطی تقریب زدند و نشان دادند توسعه تکنیک شناسایی غیرخطی، برای بهینه‌سازی و درک بهتر انتقال حرارت ناپایداری‌های حرارتی در طرح‌های مختلف لوله حرارتی نوسانی مناسب می‌باشد.

در سال ۲۰۱۰، اکسیان^۲ و همکارانش [۲۲]، برای یک لوله حرارتی نوسانی حلقه بسته یک مدل تئوری ارائه نمودند. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که انبساط و تراکم بخارها یک جریان نوسانی پایدار در داخل لوله حرارتی ایجاد می‌کند که با انتقال حرارت در قسمت سرد متاثر می‌گردد و حرکت نوسانی متاثر از زاویه شیب، نسبت پرشدگی و توان گرمایش می‌باشد.

در همان سال یوان^۳ و همکارانش [۲۳]، مدلی برای جریان سیال و انتقال حرارت در قطرات مایع و حباب‌های بخار در لوله حرارتی نوسانی ارائه کردند. آن‌ها با استفاده از روش لاگرانژ معادله انرژی جدیدی برای قطره مایع ارائه نمودند و عبارت تنش برشی را که متناظر با حالت جریان سیال می‌باشد، در معادله حرکت قطره مایع در نظر گرفتند. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که نیروی هارمونیک که بر قطره مایع در لوله‌های حرارتی نوسانی عمل می‌کند، اختلاف فشار بین حباب‌های بخار می‌باشد. همچنین دامنه و فرکانس زاویه‌ای نوسان سیال وابسته به جابجایی اولیه قطرات مایع نیست. اگر جریان سیال به صورت قطره-حباب باشد، سهم تبادل حرارت محسوس تقریباً ۸۰ درصد انتقال حرارت کل خواهد بود.

در سال ۲۰۱۱ چنگ^۴ و همکارانش [۲۴]، یک مدل ریاضی برای حرکت نوسانی در یک لوله حرارتی نوسانی ارائه نمودند. مدل آن‌ها تاثیر پارامترهای مختلفی همچون نسبت پرشدگی، دمای

¹ Chen

² Xian

³ Yuan

⁴ Cheng

کاری، نیروی گرانش و اختلاف دما بین تبخیرکننده و چگالنده را بیان می‌نمود. نتایج مدل آن‌ها نشان می‌داد که متوسط سرعت قطرات مایع با اختلاف دما بین تبخیرکننده و چگالنده متناسب است و با افزایش تعداد دور اختلاف دما برای سیستم برای شروع حرکات نوسانی کاهش می‌یابد. در حضور میدان گرانش در حالتی که تبخیرکننده در پایین قرار داشته باشد، سیستم راحت‌تر حرکات نوسانی انجام می‌دهد و اختلاف دما کاهش می‌یابد.

۲-۲ کارهای عملی انجام شده در ارتباط با موضوع به همراه

نتایج

آکاچی و پلاسک^۱ [۲۵] در تحقیقی از لوله حرارتی برای خنک‌سازی قطعات الکترونیکی استفاده کردند و ترکیبات مختلفی را در ساخت لوله حرارتی مورد استفاده قرار دادند، از جمله: لوله‌های استیل با سیال عامل نیتروژن مایع، لوله‌های مسی با سیال‌های عامل آب، R-۱۳۳ و R-۱۴۲ و لوله آلومینیومی با سیال عامل متانول. آن‌ها در تحقیقات خود مقاومت حرارتی سیستم‌های مختلف را مورد مقایسه قرار دادند.

یک نوع پیش‌گرم‌کن هوای لوله حرارتی نوسانی انتها بسته توسط ریتیدچ^۲ و همکاران [۲۶] ساخته شده که از سه ناحیه اوپراتور، آدیاباتیک و کندانسور تشکیل شده است. لوله حرارتی از جنس مس با قطر داخلی ۲ میلی‌متر و از سیال آب و R-۱۲۳ به عنوان سیال کاری استفاده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش دما و تغییر سیال کاری از آب به R-۱۲۳ عملکرد پیش‌گرم‌کن بهتر شده و پیش‌گرم‌کن هوای لوله حرارتی انتها بسته منجر به صرفه جویی انرژی می‌شود.

یاوو^۳ [۲۷] براساس مطالعات قبلی خود استفاده از لوله‌های حرارتی را در سیستم‌های تهویه

¹ polasek

² Rittidech

³ Yau

مطبوع بررسی کرده است و مشخص شده است که می‌تواند اثر مفیدی در کنترل رطوبت و ذخیره انرژی داشته باشد.

مینا^۱ و همکارانش [۲۸] با طراحی، ساخت و تست پیش‌گرم‌کن لوله حرارتی نوسانی انتها بسته با شیر یک‌طرفه، نقش آن در کاهش رطوبت نسبی در سیستم‌های خشک‌کن برای بازیافت حرارت تلف شده از سیکل خشک‌کن را بررسی کردند.

لوله حرارتی نوسانی آن‌ها از R-۱۳۴a با نسبت پرشدگی ۵۰ درصد بوده است. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش سرعت هوای داغ میزان انتقال حرارت و راندمان کاهش و با افزایش دمای هوای داغ راندمان افزایش می‌یابد. همچنین این سیستم می‌تواند میزان رطوبت هوا را از محدوده ۱۰۰-۸۰ درصد به ۷۲-۵۴ درصد برساند. در تحقیقی که توسط نانتافان^۲ و همکارانش [۲۹] انجام شده است، پس از ساخت یک نمونه مبدل حرارتی لوله سیم‌دار که سیم‌ها از لوله حرارتی نوسانی بودند، آزمایش‌ها در حالتی که سیال داخل لوله آب گرم و مبدل در معرض هوا قرار گرفته است، انجام شده است. سیال کاری لوله حرارتی از متانول، استون و R-۱۲۳ انتخاب شدند. نتایج نشان داده است که لوله حرارتی نوسانی به عنوان فین سوزنی می‌تواند تا ۱۰٪ میزان انتقال حرارت را نسبت به حالتی که فاقد سیال کاری باشد افزایش دهد.

یانگ و همکاران^۳ [۳۰] یک مبدل لوله حرارتی ترموسیفونی را برای بازیافت حرارت از گازهای خروجی از آگروز ماشین ساخته و مورد بررسی قرار دادند. این مبدل شامل ۵۰ لوله فولادی در ۹ ردیف بوده و طول بخش‌های تبخیرکننده و چگالنده برابر ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد. آن‌ها نشان دادند که با افزایش دمای گاز گرم ورودی از ۱۰۰ به ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد گرمای بازیافت شده حدوداً سه برابر شده است.

¹Meena

²Nantaphan

³Yang

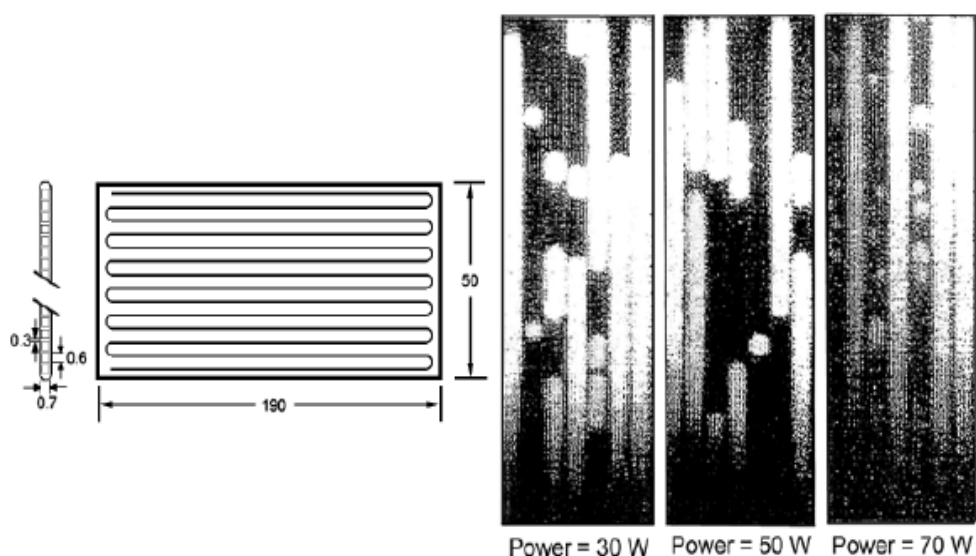
آزاد و جولا^۱ [۳۱] مبدل حرارتی ترموسیفونی هوا- هوا با ۶ ردیف لوله را برای دمای ۷۰ درجه سانتی گراد مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش نسبت ظرفیت گرمایی جریان گرم به جریان سرد از ۱ به ۲ همواره کارایی افزایش و همچنین با افزایش در طول تبخیرکننده و چگالنده (۱-۲۵) و افزایش در ضخامت پره از ۰/۰۰۰۳ تا ۰/۰۰۰۴ کارایی نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر آن با کاهش گام طولی (۰/۱m - ۰/۳۱۲۵) و افزایش در تعداد پرها در هر متر (۳۱۵-۵۵۱) بازهم کارایی افزایش می‌یابد.

نوعی و شکری [۳۲]، یک مبدل گرمایی ترموسیفونی گاز - گاز را در یک مدل نیمه صنعتی مورد بررسی قرار دادند که مبدل مورد مطالعه دارای ۶ ردیف لوله مسی ۱۵ تایی با ساختار مربعی و به ابعاد کل، ارتفاع ۱۳۰ سانتی‌متر، طول ۴۳ سانتی‌متر، عرض ۲۷ سانتی‌متر، که با پره‌های آلومینیومی ساخته شده و دارای سیال عامل آب با درصد پرشدگی ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد می‌باشد. در همه‌ی آزمایشات جریان هوا در بخش چگالنده و تبخیرکننده به صورت جریان مخالف بوده است. جریان هوای سرد با دبی ۰/۷۶۵ kg/s بر روی بخش چگالنده جریان دارد. جریان هوای داغ در یک سیکل بسته توسط یک دمنده با دور متغیر به بخش تبخیرکننده در بازه دبی جرمی ۰/۱۶ تا ۰/۶ کیلوگرم بر ثانیه و در بازه دمایی بین ۹۰ تا ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد وارد می‌گردد. کارایی مبدل ساخته شده در تمام شرایط آزمایش بالاتر از ۳۸ درصد بود. درصد پرشدگی تأثیری در کارایی مبدل نداشته است.

نوعی و مجیدیان [۱۱]، به منظور بازیافت حرارت در اتاق‌های عمل مبدل لوله گرمایی ترموسیفونی را ساختند که در بازه دمایی ۵۵-۱۵ سانتی‌گراد کار می‌کرد و از متانول به عنوان سیال عامل استفاده کرده بودند. این مبدل دارای ۸ عدد لوله مسی در ۳ ردیف به قطر ۱۵ میلی‌متر و طول تبخیرکننده و چگالنده برابر ۳۰۰ میلی‌متر، و بدون پره بوده است. کارایی مبدل با نسبت دبی جریان گرم به سرد برابر با ۰/۱۶ بوده است.

¹ Azad and Geoola

در سال ۱۹۹۶ کاوارا^۱ و همکارانش [۳۳]، با استفاده از رادیگرافی پروتونی از درون لوله‌های حرارتی نوسانی عکس‌برداری و حرکت‌های ناگهانی و نوسانی سیال را ثبت کردند. لوله حرارتی نوسانی آزمایش شده با ایجاد شیارهای مستطیلی شکل به ابعاد $0.6 \times 0.7 \text{ mm}^2$ بر روی یک صفحه به ابعاد $190 \times 50 \times 1/3 \text{ mm}^3$ ساخته شده بود. نتایج آزمایشگاهی آن‌ها در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. آن‌ها بیان داشتند که جریان غالب دوفازی در لوله حرارتی نوسانی به صورت الگوی قطره - حباب می‌باشد.



شکل ۱-۲ دستگاه آزمایشگاهی و تصاویر بدست آمده توسط کاوارا و همکاران [۲۹]

در سال ۲۰۰۳، چاروئنساوان^۲ و همکارانش [۶]، نتایجی را برای لوله حرارتی نوسانی حلقه بسته مسی با ۳ سیال عامل (آب، اتانول و R-123) و دو قطر داخلی ۱ و ۲ میلی‌متر منتشر کردند. در تمام آزمایش‌ها نسبت پرشدگی ثابت و برابر ۵۰ درصد در نظر گرفته شده بود. آن‌ها به جای کنترل حرارت اعمالی به تبخیرکننده، دمای تبخیرکننده و چگالنده را تنظیم می‌کردند. اثر قطر داخلی، زاویه شیب، تعداد دور و سیال عامل مورد بررسی قرار گرفت. در بررسی تعداد دور بر عملکرد لوله حرارتی مشخص

¹ Kawara

² Charoensawan

شد که اگر تعداد دور از مقدار بحرانی (N_{crit}) بیشتر باشد، آنگاه لوله حرارتی نوسانی به طور مناسبی می‌تواند در حالت افقی نیز کار کند [۶].

در سال ۲۰۰۴، تسای^۱ و همکارانش [۳۴]، از نانوذرات طلا در لوله حرارتی استفاده کردند. در یک نسبت پرشدگی یکسان، کاهش شدیدی در مقاومت حرارتی با نانوسیال در مقایسه با آب خالص ایجاد گردید. همچنین نتایج آن‌ها نشان می‌داد که مقاومت حرارتی با تغییر اندازه نانو ذرات طلا تغییر می‌کند.

در سال ۲۰۰۶ ما^۲ و همکارانش [۳۵، ۳۶]، تاثیر استفاده از نانوذرات الماس^۳ را در عملکرد لوله حرارتی نوسانی مورد بررسی قرار دادند و کاهش چشم‌گیری را در مقاومت حرارتی در مقایسه با آب خالص مشاهده نمودند. به عنوان مثال در توان ورودی ۸۰ W، نانوسیال الماس اختلاف دمای بین تبخیرکننده و چگالنده را از ۴۰.۹ به ۲۴.۳ سانتی‌گراد کاهش داد. همچنین آن‌ها به مقاومت حرارتی ۰/۰۳ k/W در توان ورودی ۳۳۶ W رسیدند. با استفاده از نانوسیال الماس در مقاومت حرارتی کاهش چشم‌گیری در مقایسه با آب مقطر ایجاد گردید.

در سال ۲۰۰۸، لین^۴ و همکارانش [۳۷]، تاثیرات استفاده از نانوسیال نقره را بر عملکرد لوله حرارتی نوسانی مورد بررسی قرار دادند. پارامترهای مورد بررسی توسط آن‌ها علاوه بر نوع سیال عامل، نسبت پرشدگی، توان ورودی و غلظت نانوسیال بود. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که بهترین نسبت پرشدگی لوله حرارتی نوسانی ۶۰ درصد است. در اکثر نقاط مورد آزمایش انتقال حرارت نانوسیال نقره در غلظت ۱۰۰ ppm به علت افزایش رسانایی حرارتی از آب بهتر و مقاومت حرارتی این نانوسیال در غلظت حجمی ۴۵۰ ppm، به علت افزایش لزجت سیال عامل از آب مقطر بیشتر است.

¹ Tsai

² Ma

³ Diamond nano-fluid

⁴ Lin

در سال ۲۰۰۹، جمشیدی^۱ و همکاران [۹ و ۱۰]، از نانوسیال‌های نقره و تیتانیوم اکسید به عنوان سیال عامل در لوله حرارتی نوسانی استفاده کردند. آن‌ها تاثیر تغییر نسبت پرشدگی، زاویه شیب و غلظت نانوسیال را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که استفاده از نانوسیال انتقال حرارت را ۳۰٪ نسبت به آب خالص بهبود می‌دهد. همچنین برای نانوسیال آب نقره بهترین عملکرد در نسبت پرشدگی ۵۰ درصد رخ می‌دهد، در حالیکه برای نانوسیال تیتانیوم اکسید و آب خالص بهترین نسبت پرشدگی در ۴۰ درصد اتفاق می‌افتد. با تغییر زاویه شیب از حالت عمودی تا زوایای نزدیک به افق عملکرد لوله حرارتی نوسانی تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد اما در زوایای بسیار نزدیک به افق انتقال حرارت لوله حرارتی نوسانی به شدت افت می‌کند و با کاهش غلظت نانوذرات در سیال مبنا عملکرد سیستم کاهش پیدا می‌کند. لوله حرارتی نوسانی آن‌ها با سیال عامل در بهترین شرایط انتقال حرارت را ۱۱/۵ برابر نسبت به لوله حرارتی خالی بهبود می‌داد. با استفاده از نانوسیال‌های نقره و تیتانیوم اکسید انتقال حرارت لوله حرارتی نوسانی به شدت بهبود یافت.

در سال ۲۰۰۹، وانگ^۲ و همکارانش [۳۸]، آزمایش‌هایی برای بررسی تاثیر سیال میکروکپسول FS-39E و نانوسیال Al_2O_3 بر عملکرد لوله حرارتی نوسانی انجام دادند. آن‌ها فهمیدند که انتقال حرارت لوله حرارتی نوسانی می‌تواند با استفاده از این سیال‌ها افزایش یابد. بر اساس نتایج آن‌ها بهترین غلظت برای سیال میکروکپسول FS-39E ۱ درصد و برای نانوسیال آلومینیوم اکسید ۰/۱ درصد مورد استفاده قرار گرفت. همچنین در حالت عمودی سیال میکروکپسول FS-39E و در حالت افقی Al_2O_3 بهترین سیال‌ها از نظر انتقال حرارت بودند.

در سال ۲۰۱۰، کو^۳ و همکارانش [۳۹]، تاثیر استفاده از نانوسیال آلومینا را بر عملکرد لوله حرارتی نوسانی به طور تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از ذرات آلومینای کروی و دارای قطر ۵۶

¹ Jamshidi

² Wang

³ Qu

نانومتر استفاده کردند. پارامترهای مورد بررسی توسط ایشان، نسبت پرشدگی، نسبت جرمی ذرات آلومینا در آب و تاثیر توان ورودی بود. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که در بهترین حالت در توان ورودی ۵۸/۸ وات، در نسبت پرشدگی ۷۰ درصد و نسبت جرمی ۰/۹ درصد، مقاومت حرارتی ۳۲/۵ درصد نسبت به آب خالص بهبود می‌یابد. آن‌ها با بررسی نمونه‌های مختلف دیواره‌های داخلی لوله حرارتی، مهم‌ترین دلیل برای افزایش انتقال حرارت لوله حرارتی نوسانی را تجمع نانوذرات در تبخیرکننده بیان نمودند..

در سال ۲۰۱۱، محمدی و همکارانش [۴۰]، تاثیر استفاده از نانوسیال مغناطیسی (فروفلوید) بر عملکرد لوله حرارتی نوسانی حلقه بسته را بررسی نمودند. آن‌ها عملکرد لوله حرارتی نوسانی را در نسبت پرشدگی‌ها، توان‌های ورودی و زوایای شیب مختلف بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که در اکثر شرایط استفاده از نانوسیال مغناطیسی سبب بهبود انتقال حرارت لوله حرارتی نوسانی می‌گردد و اعمال میدان مغناطیسی سبب کاهش چشم‌گیر در مقاومت لوله حرارتی نوسانی می‌شود. آن‌ها همچنین نشان دادند که اعمال میدان مغناطیسی می‌تواند نقش نیروی جاذبه را در حالت افقی ایفا کند. با افزایش توان ورودی مقاومت حرارتی لوله حرارتی نوسانی افت می‌کند که دلیل این امر تغییر آرایش جریان سیال از قطره حباب به حلقوی است. جریان حلقوی کارایی بالاتری دارد ولی احتمال آن وجود دارد که سیال عامل در این حالت در لوله حرارتی دچار خشک‌شدگی گردد. همچنین با اعمال میدان مغناطیسی عملکرد لوله حرارتی نوسانی در حالت افق به شدت بهبود یافت.

در سال ۲۰۱۱، جی^۱ و همکارانش [۴۱]، تاثیر اندازه‌ی ذرات آلومینا را بر مقاومت حرارتی لوله حرارتی نوسانی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها چهار نوع نانوذره با قطرهای متوسط ۵۰ نانومتر، ۸۰ نانومتر، ۲/۲ میکرومتر و ۲۰ میکرومتر را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش ایشان حاکی از آن است که مقاومت حرارتی لوله نوسانی به طور قابل توجهی به اندازه‌ی ذرات آلومینای به کار گرفته

^۱ Ji

بستگی دارد و در میان چهار اندازه‌ی مختلف مورد آزمایش، بهترین عملکرد لوله حرارتی نوسانی برای ترکیب آب با نانوذرات آلومینا با قطر ۸۰ نانومتر بدست آمد. همچنین نتایج آزمایش ایشان حاکی از آن است که زمان شروع کار لوله حرارتی نوسانی با افزایش قطر نانوذرات آلومینا همواره و حتی در حالت استفاده از ذرات با قطر ۲۰ میکرومتر نیز بهبود می‌یابد. آن‌ها تاثیر تغییرات اندازه‌ی ذرات بر روی میزان انتقال حرارت را بررسی کردند، مشاهده شد که با کاهش اندازه‌ی ذرات از ۲۰ میکرومتر تا ۸۰ نانومتر، قابلیت انتقال حرارت افزایش، و مقاومت حرارتی کاهش می‌یابد ولی در صورتیکه اندازه‌ی ذرات از ۵۰ نانومتر کمتر شوند، مقاومت حرارتی توانایی کاهش بیشتر را نخواهد داشت، بنابراین از بین نانوذرات با اندازه‌های مختلف، می‌توان نانوذرات با اندازه‌ی ۸۰ نانومتر را به عنوان بهترین حالت برای کمترین مقاومت حرارتی انتخاب نمود. همچنین جی و همکارانش وابستگی مقاومت حرارتی به نسبت پرشدگی‌های مختلف را بررسی کردند. مشاهده کردند، با افزایش نسبت پرشدگی، مقاومت حرارتی نیز افزایش می‌یابد. به طوریکه بهترین حالت انتقال حرارت در نسبت پرشدگی ۵۰ درصد رخ می‌دهد. آن‌ها همچنین وابستگی دمای شروع کار لوله حرارتی^۱ به قطر ذرات را نیز بررسی کردند. مشاهده کردند، این دما برای بزرگترین قطر ذرات تست شده (قطر ۲۰ میکرومتر) ۴۸/۵ درجه سانتی‌گراد و برای کوچکترین قطر ذرات آزمایش شده (قطر ۵۰ نانومتر)، ۴۰/۶ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد.

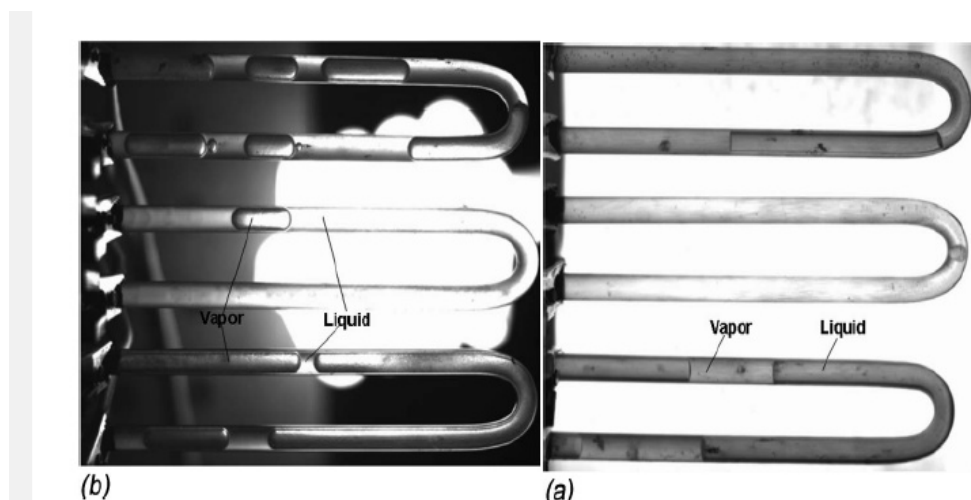
در سال ۲۰۱۱، لی^۲ و همکارانش [۴۲]، به مشاهده‌ی رژیم جریان دوفاز حاصل از ترکیب سیال آب مقطر و نانوسیال با غلظت ۰/۲۶۸ درصد در لوله حرارتی نوسانی با قطر داخلی ۳/۵۳ میلی‌متر و قطر خارجی ۵/۳۸ میلی‌متر پرداختند. آن‌ها رژیم جریان دوفاز داخلی بر دیواره‌ی لوله را توسط یک دوربین CCD ثبت کردند. نتایج آزمایش آن‌ها حاکی از آن بود که انتقال حرارت لوله حرارتی به طور قابل ملاحظه‌ای به رژیم جریان دوفاز وابسته است. به طوریکه در حالت استفاده از آب مقطر در لوله

^۱ Start-up temperature

^۲ Li

حرارتی نوسانی فقط جریان ستونی قابل مشاهده بود و پس از استفاده از نانوسیال جریان قطره‌ای^۱ و جریان حلقوی^۲ به طور پیوسته شکل می‌گیرند و این باعث می‌شود که مقاومت حرارتی لوله حرارتی نوسانی در حالت استفاده از ترکیب آب مقطر و نانوسیال نسبت به حالت استفاده از آب مقطر، کاهش چشم‌گیری داشته باشد.

نتایج تصویربرداری آن‌ها از لوله حرارتی در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، با استفاده از نانوسیال، زاویه‌ی تماس سیال با لوله حرارتی نوسانی نسبت به حالت آب مقطر کاهش می‌یابد و باعث می‌گردد که انتهای فاز بخار انحنای دایروی بیشتری داشته باشد.



شکل ۲-۲ توزیع اولیه جریان دوفاز موجود در تبخیرکننده در (a) آب مقطر (b) نانوسیال با غلظت ۰/۲۶۸٪ [۴۲] در سال ۲۰۱۱، کو و همکارانش [۴۳]، به صورت تجربی به مقایسه‌ی مقاومت حرارتی لوله حرارتی نوسانی با استفاده از نانوسیال‌های اکسید سیلیکون و آلومینا پرداختند. نانوسیال اکسید سیلیکون با نسبت وزنی ۰ تا ۰/۶ درصد و نانوسیال آلومینا با نسبت وزنی ۰ تا ۱/۲ درصد تهیه و با نسبت پرتشدگی ۵۰ درصد مورد آزمایش و مقایسه قرار گرفتند. نتایج آن‌ها حاکی از وابستگی شدید مقاومت حرارتی به نوع نانوسیال به کار رفته شده بود، به طوریکه استفاده از نانوسیال آلومینا نسبت به حالت خاص، منجر به کاهش حدود ۵/۶ درجه در دمای تبخیرکننده (۸/۷ درصد) و کاهش ۲۵/۷

¹ Slug flow

² Annular flow

درصدی مقاومت حرارتی می‌گشت. در حالیکه استفاده از نانوسیال اکسید سیلیکون باعث افزایش دمای تبخیرکننده به میزان $3/5$ درجه سانتی‌گراد ($5/5$ درصد) و افزایش مقاومت حرارتی به میزان $23/7$ درصد می‌شد. آن‌ها بیان داشتند که استفاده از نانوسیالات مختلف با تغییر شرایط صفحه‌ی تبخیرکننده و چگالنده باعث تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت حرارتی می‌شود. مشاهده شد با افزایش درصد وزنی نانوذرات اکسید سیلیکون، دمای تبخیرکننده و مقاومت حرارتی آن همواره افزایش می‌یابد. آن‌ها نشان دادند که استفاده از نانوسیال آلومینا منجر به کاهش مقاومت حرارتی لوله حرارتی نوسانی می‌گردد و با افزایش توان ورودی مقاومت حرارتی لوله حرارتی نوسانی، کاهش می‌یابد.

در سال ۲۰۱۱، ریهل^۱ و همکارانش [۴۴]، به صورت تجربی عملکرد لوله حرارتی نوسانی را با نانوسیال اکسید مس بررسی نمودند و افزایش چشم‌گیری در انتقال حرارت لوله حرارتی نوسانی با نانوسیال مشاهده نمودند. آن‌ها بیان داشتند که استفاده از نانوذرات اکسید مس به طور چشم‌گیری رسانایی حرارتی نانوسیال را افزایش می‌دهد و این امر موجب بهبود انتقال حرارت لوله حرارتی نوسانی با نانوسیال می‌گردد. آن‌ها مشاهده کردند که استفاده از نانوسیال، نوسانات دمای قسمت‌های مختلف لوله حرارتی نوسانی در توان ۵۰ وات بیشتر می‌گردد. همچنین با استفاده از نانوسیال مس دمای تبخیرکننده در توان ورودی ۵۰ وات در دمای ۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به حالت پایدار می‌رسد، در حالی که با استفاده از آب مقطر در توان ورودی ۵۰ وات، این دما ۱۱۸ درجه سانتی‌گراد خواهد بود.

در این پژوهش هدف ساخت دستگاه مبدل بازیافت حرارت، از گازهای خروجی می‌باشد. مبدل ساخته شده از یک ردیف لوله حرارتی نوسانی بسته با ۱۸ دور ساخته شده است و تاثیر سیال عامل، تاثیر تغییرات دبی هوا، افزایش دمای دود ورودی بر عملکرد حرارتی مبدل به صورت تجربی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

¹ Riehl

فصل ۳: دستگاه آزمایشگاهی

همان‌طور که در مقدمه بیان شد هدف از انجام این پروژه بررسی تجربی و بهبود عملکرد لوله‌های حرارتی نوسانی بسته در یک مبدل بازیافت هوا- هوا می‌باشد. به منظور انجام این کار دستگاه آزمایشگاهی مورد نظر ساخته شد، که در ادامه نحوه ساخت دستگاه، نحوه انجام آزمایش و تجهیزات مورد استفاده برای اندازه‌گیری توضیح داده خواهد شد.

۳-۱ مواد و تجهیزات

۳-۱-۱ ساخت لوله حرارتی نوسانی

لوله‌های حرارتی نوسانی ساخته شده در این پژوهش، شامل دو ردیف لوله حرارتی نوسانی بسته با قطر داخلی ۲ میلی‌متر و قطر خارجی ۴ میلی‌متر می‌باشد، که هر ردیف آن شامل ۱۸ دور لوله حرارتی نوسانی می‌باشد، بطوریکه ارتفاع کل لوله حرارتی نوسانی ۵۶ سانتی‌متر در نظر گرفته شد، ۲۷ سانتی‌متر تبخیرکننده، ۲۷ سانتی‌متر چگالنده و ۲ سانتی‌متر قسمت آدیاباتیک که بسیار ناچیز می‌باشد و تقریباً قابل چشم‌پوشی می‌باشد. جهت دستیابی به حداکثر انتقال حرارت، جنس لوله‌ها مسی انتخاب می‌گردد. سپس برای ایجاد لوله‌های حرارتی نوسانی، لوله‌های مسی را توسط لوله خم‌کن به صورت U شکل تغییر شکل داده که در این حالت تعداد ۱۸ دور در فاصله ۱۰۰ سانتیمتری ایجاد می‌گردد.



شکل ۳-۱ لوله‌های حرارتی نوسانی بسته ساخته شده

۳-۲ نحوه پر کردن لوله‌های حرارتی نوسانی

به نسبت حجم سیال عامل داخل لوله حرارتی نوسانی بسته به حجم کل آن، نسبت پرشدگی گفته می‌شود که یکی از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار در نرخ انتقال حرارت لوله حرارتی نوسانی حلقه بسته می‌باشد.

ابتدا هوای لوله حرارتی نوسانی تخلیه گردید، از پمپ خلا آمریکایی مدل C55JXHRL-4205 ، اتصالات، شیلنگ‌ها و شیرها مخصوص استفاده شده است. حضور گازهای غیرچگال و افزایش فشار در لوله حرارتی نوسانی باعث بدتر شدن مقاومت حرارتی می‌گردد. بنابراین از یک سیستم خلا شامل پمپ خلا با ظرفیت خلاسازی مناسب و اتصالات، شیلنگ‌ها و شیرهای مخصوص به منظور تخلیه لوله حرارتی از هوا و پر کردن آن از سیال عامل، استفاده گردید. جهت اندازه‌گیری فشار خلا از دستگاه فشارسنج خلا پیرانی ساخت شرکت یارنیکان صالح استفاده شده است.

برای اطمینان از تخلیه کامل لوله حرارتی نوسانی حلقه بسته از هوا، با استفاده از پمپ خلا برای مدت تقریبی ۳۰ دقیقه جهت دستیابی فشار مجموعه تا زیر ۱۵pa هوای درون لوله حرارتی نوسانی بسته تخلیه می‌گردد. این مدت زمان نسبتاً طولانی به دلیل نازک بودن لوله‌ها و پیچ و خم‌دار بودن آن‌ها در نظر گرفته شد، سپس برای پر کردن سیستم با یک نسبت پرشدگی مشخص، شیر اتصالی که لوله حرارتی را به سیستم خلا وصل می‌کرد، بسته شد تا لوله حرارتی در شرایط خلا باقی بماند. سپس لوله مدرج به وسیله سرنگ چند میلی‌لیتر بیشتر از حجم سیال مورد نظر برای رسیدن به درصد حجمی دلخواه پر شده (به دلیل حجم شیر)، پر گردید. انتهای دیگر لوله مدرج به یک شیر ساچمه‌ای متصل شده و شیر در حالت بسته قرار می‌گرفت. زمان پر کردن، وجود هوا و گازهای غیرچگال در لوله حرارتی نوسانی حلقه بسته بر عملکرد آن تاثیر منفی می‌گذارند. از این رو با ضربه زدن به تعداد زیاد بر روی شیر اتصال و تا زمان اطمینان نسبی از عدم وجود هوا و گازهای غیرچگال،

به اصطلاح هواگیری شیر انجام گردید. با کمی باز کردن شیر متصل به لوله حرارتی، به دلیل خلا بودن لوله، سیال به داخل آن کشیده می‌شد. زمان پایین رفتن سطح سیال با گذاشتن شیر در انتهای دیگر لوله مدرج و ایجاد خلا نسبی، سرعت مکش کم می‌گشت و مقدار ورودی سیال به لوله کاملاً قابل تنظیم بود. مقدار سیال ورودی توسط اندازه‌گیری اختلاف دو مقدار ابتدایی و انتهایی لوله مدرج، در هر نسبت پرشدگی مشخص گردید و بعد از این که مقدار مورد نظر وارد لوله حرارتی شد، شیر متصل به لوله حرارتی بسته می‌گشت، در این لحظه لوله حرارتی به طور نسبی از سیال عامل پر شده بود. در این آزمایش از اتانول با خلوص ۹۶ درصد و همچنین نانو سیال نقره/آب با اندازه 1 ± 18 نانومتر به عنوان سیال عامل انتقال حرارت در لوله‌های حرارتی نوسانی استفاده شده است.

۳-۳ ساخت مبدل بازیافت حرارت

با استفاده از عملیات ورقکاری و کانالسازی، بدنه مبدل بازیافت، کانال دود و کانال هوا از ورق گالوانیزه به ضخامت ۰/۷ میلی‌متر ساخته شد که مشخصات آن به صورت ذیل می‌باشد:

طول کلی مبدل ۱۶۰ سانتی‌متر، عرض آن ۶۰ سانتی‌متر می‌باشد، قسمتی که لوله‌های حرارتی نوسانی در آن قرار گرفته است به صورت یک مکعب مستطیل به طول ۱۰۰ سانتی‌متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر، ارتفاع ۷ سانتی‌متر می‌باشد، و ۴ عدد کلاهک مخروطی شکل، اندازه هر کدام از آن‌ها ۳۰ سانتی‌متر که در واقع ورودی‌ها و خروجی‌های دود و هوا می‌باشند. قسمت مکعب مستطیل توسط یک فصل مشترک به دو قسمت (کانال) به طول ۱۰۰ سانتی‌متر و عرض ۳۰ سانتی‌متر تقسیم شده است، یکی کانال دود و دیگری کانال هوا می‌باشد. که لوله‌های حرارتی نوسانی از سوراخ‌هایی که بر روی این فصل مشترک ایجاد گردید عبور داده شدند، بطوری که نصف لوله‌های حرارتی نوسانی در کانال دود و نصف دیگر آن در کانال هوا قرار گرفت، محل عبور لوله‌های حرارتی نوسانی از سوراخ‌های ایجاد شده بر روی فصل مشترک توسط چسب آب‌بندی که در مقابل حرارت مقاوم هستند و از طرفی با افزایش حرارت چسبندگی آن‌ها بیشتر می‌شود جهت جلوگیری از نفوذ دود به کانال هوا کاملاً

درزبندی شد. ناحیه تبخیرکننده لوله‌های حرارتی نوسانی در کانال دود و ناحیه چگالنده در کانال هوا قرار داده شدند. توسط چسب آب‌بندی سطح فصل مشترک کانال دود و هوا جهت جلوگیری از انتقال حرارت و تمرکز کامل بر روی عملکرد لوله‌های حرارتی نوسانی کاملاً پوشانده و عایق بندی شد. سطح مقطع ورودی‌ها و خروجی‌های دود و هوا به صورت دایره ای و به قطر ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. در این آزمایش برای ایجاد جریان اجباری و کنترل سرعت و دبی جریان دود و هوا، دو فن در خروجی‌های کانال دود و هوا قرار داده شد، جریان در مبدل به صورت مکشی و مخالف می‌باشد. مشخصات فن‌های استفاده شده به شرح ذیل می‌باشد:

Type: VMA-10S2S, Voltage: 220V, Frequency: 50Hz, Phase: Single, Current:

0/08 A, Power: 16W, r.p.m: 2400, Cosφ: 0/9 , Air volume: $90 \frac{m^3}{h}$, Net weight:

0/45 kg

دیمر وسیله ای است که در مدار به صورت سری قرار می‌گیرد و می‌تواند ولتاژ را کنترل کند. از این وسیله جهت کم و زیاد کردن نور لامپ‌ها استفاده می‌شود. در این آزمایش جهت کم و زیاد کردن دور فن‌ها از دیمر استفاده شده است.

از گازهای گرم خروجی بخاری گازسوز مهیا گاز مدل ۱۰۰۰۰ با حداقل قدرت حرارتی ۱۵۰۰ کیلوکالری در ساعت و حداکثر قدرت حرارتی ۸۵۰۰ کیلوکالری در ساعت در قسمت گرم مبدل بازیافت (قسمت تبخیرکننده لوله‌های حرارتی نوسانی) استفاده شده است.



شکل ۳-۲ دستگاه مبدل بازیافت

۴-۳ نحوه انجام آزمایش

به طور کلی مسائل مربوط به طراحی و محاسبات گرمایی در مبدل‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول مسائلی هستند که در آن‌ها، نوع مبدل گرمایی و اندازه آن معلوم بوده و موضوع اصلی تعیین نوع انتقال حرارت و دماهای خروجی سیال براساس دبی‌ها و دماهای ورودی می‌باشد. این نوع مسائل به مسائل عملکردی^۱ مبدل‌های گرمایی معروف هستند.

در مسائل نوع دوم، دبی‌ها و دماهای ورودی و خروجی در سیال سرد و گرم داده شده‌اند. مساله طراحی در نوع دوم عبارت است از انتخاب یک نوع مبدل مناسب، تعیین اندازه آن و محاسبه سطح مورد نیاز برای دستیابی به دماهای خروجی مورد نظر. پس از محاسبات گرمایی مرحله طراحی مکانیکی قرار دارد [۴۵]. در این آزمایش از دسته اول استفاده شده است.

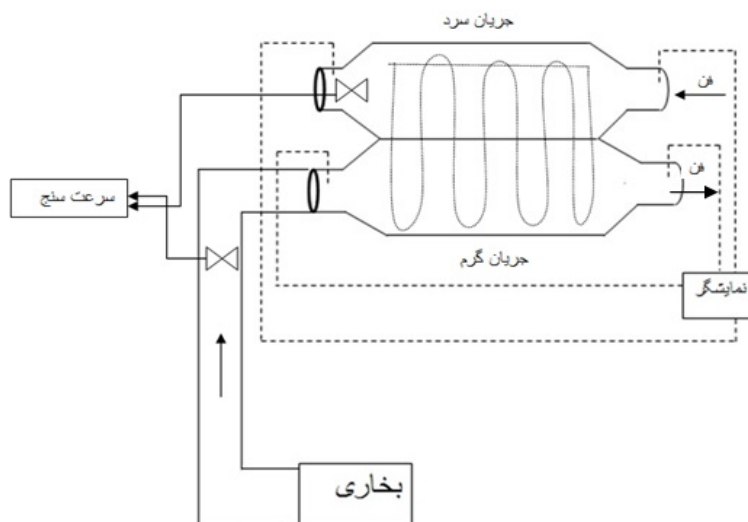
پس از ساخت مبدل، بر روی پایه مناسبی قرار داده شد. مبدل بازیافت زمانی که در حالت قائم قرار دارد، تبخیرکننده^۲ و کندانسور^۳ لوله‌های حرارتی نوسانی به ترتیب در قسمت پایین و بالای آن قرار می‌گیرد. جهت شبیه‌سازی و نزدیک بودن آزمایش‌ها به حالت واقعی، از گازهای خروجی بخاری گازسوز استفاده شده است. بخاری گازسوز از طریق لوله‌های رابط و اتصال‌های مورد نیاز به ورودی

¹ Performance

² Evaporator

³ Condenser

کانال دود دستگاه مبدل وصل شده است. جهت ثبت دما در ورودی‌ها و خروجی‌های دود و هوا از ۴ عدد سنسور پی‌تی ۱۰۰ (PT ۱۰۰)، یک دستگاه ترمومتر اتونیکس^۱ و یک عدد کلید سلکتور ۴ حالت استفاده شده است. با چرخاندن کلید سلکتور و تغییر حالت از ۱ به ۴ دمای نقاط مختلفی که حسگرها نصب شده است بر روی نمایشگر دما نمایش داده می‌شود. شکل ۳-۳ شماتیکی از دستگاه و نحوه نصب تجهیزات به آن را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳ شماتیک سیستم مورد استفاده

حسگرها در ورودی‌ها و خروجی‌های دستگاه مبدل به صورت ثابت و بدون حرکت، در مرکز و به صورت عمود بر مسیر جریان قرار داده شده است. در خروجی کانال هوا، یک فن قرار دارد که هوای محیط را به سمت داخل کانال و بر روی کندانسور لوله‌های حرارتی نوسانی به جریان در می‌آورد. و همچنین در خروجی کانال دود یک فن قرار دارد که گازهای گرم خروجی از بخاری را بر روی تبخیرکننده لوله‌های حرارتی نوسانی به جریان در می‌آورد. جهت اندازه‌گیری سرعت فن از بادسنج^۲ استفاده شده است. پس از گذشت زمان حدود سی تا چهل دقیقه از روشن شدن بخاری و رسیدن به شرایط پایدار عملیات اندازه‌گیری شروع شد. برای برقراری شرایط پایدار بعد از هر بار تغییر دمای دود

¹ Autonics

² Anemometer

ورودی و تغییر دبی جرمی هوا، مدت زمان حدود ۱۵ دقیقه در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها در دو حالت مورد بررسی قرار گرفت، یک‌بار با یک ردیف لوله حرارتی نوسانی با سیال عامل اتانول و نسبت پرشدگی ۴۰ درصد و در حالتی که دستگاه در زاویه ۹۰ درجه نسبت به افق قرار گرفته است، مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش دیگر نیز از نانو سیال نقره/آب با نسبت پرشدگی و همچنین زاویه دستگاه مشابه با حالت اتانول استفاده شد. در هر دو حالت اثر افزایش دمای دود ورودی، تغییر دبی جرمی هوای ورودی مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمایش‌ها جریان در مبدل به صورت مخالف، فن به صورت مکند و بدنه دستگاه با پشم شیشه عایق‌بندی شده است. جهت بررسی و اطمینان از عدم انتقال حرارت از فصل مشترک دو کانال دود و هوا که لوله‌های حرارتی نوسانی از آن‌ها عبور داده شده است، یک مرحله آزمایش به صورت ورقه‌ی خالی (فصل مشترک بدون لوله حرارت نوسانی) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که زمانی که سرعت به کمتر از ۰/۷ متر بر ثانیه می‌رسد دمای هوای خروجی ۲ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. ولی زمانی که سرعت بالاتر از ۰/۷ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شد هیچ‌گونه تغییری در دمای هوا خروجی مشاهده نمی‌شد، لذا جهت اطمینان بیستر و تمرکز بیشتر بر روی عملکرد لوله‌های حرارتی نوسانی سرعت دود را ثابت و ۱ متر بر ثانیه و سرعت هوا به صورت متغیر و بالاتر از یک متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. جهت جلوگیری از تاثیر دمای خود بخاری بر روی حسگرهای ورودی دود و خروجی هوا، بخاری در فاصله تقریباً دو متری از مبدل قرار داده شد. برای رسیدن به دقت مناسب و کاهش خطاهای اندازه‌گیری، دستگاه را در محلی دور از شرایط محیطی نامناسب مانند وزش باد و تابش نور خورشید قرار داده شد.

۳-۵ بررسی عملکرد مبادله‌کن

برای تعریف کارایی مبدل ϵ ، ابتدا ماکزیمم نرخ انتقال حرارت ممکن (q_{max}) بیان می‌داریم که عبارت است از میزان حرارت انتقال یافته، به صورت تئوری، در یک مبادله‌کن جریان مخالف با سطح بینهایت، که با رابطه زیر بیان می‌شود [۴۶]:

$$q_{max} = C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (۱-۳)$$

به طوری که C_{min} ، کمترین مقدار ظرفیت گرمایی کل در بین جریان‌های گرم و سرد می‌باشد. کارایی به صورت نرخ انتقال حرارت واقعی به ماکزیمم نرخ انتقال حرارت ممکن تعریف می‌شود [۴۶]:

$$\varepsilon = \frac{q_{act}}{q_{max}} \quad (۲-۳)$$

$$\varepsilon = \frac{C_h(T_{h,in} - T_{h,out})}{C_{min}(T_{h,in} - T_{c,in})} \quad (۳-۳)$$

$$\varepsilon = \frac{C_c(T_{c,out} - T_{c,in})}{C_{min}(T_{h,in} - T_{c,in})} \quad (۴-۳)$$

$$C_{min} = (\dot{m}C_p)_{min}, C_h = (\dot{m}C_p)_h, C_c = (\dot{m}C_p)_c \quad (۵-۳)$$

میزان حرارت جذب شده در قسمت تبخیر کننده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$Q = \dot{m}_h C_{p,h}(T_{h,in} - T_{h,out}) \quad (۶-۳)$$

و همچنین میزان حرارت دفع شده در قسمت چگالنده برابر است با:

$$Q = \dot{m}_c C_{p,c}(T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (۷-۳)$$

۳-۶ تحلیل انرژی

تحلیل انرژی یک تکنیک تحلیل ترمودینامیک است که بر مبنای قانون دوم ترمودینامیک استوار است، که روشی روشن و شفاف دیگری برای ارزیابی و مقایسه سیستم‌ها به شکلی معنادار و منطقی ارائه می‌کند. به طور خاص، تحلیل انرژی میزان کارایی را در سیستم ارزیابی می‌کند که معیارهایی برای دستیابی به کارکرد ایده‌آل سیستم به دست می‌دهد و به طور روشن‌تری تحلیل‌های

انرژی، دلایل و نقاط اتلاف ترمودینامیکی را معین می‌کند. در نتیجه، تحلیل انرژی می‌تواند در بهبود و بهینه‌سازی طراحی به کار گرفته شود[47].

در سال‌های اخیر افزایش استفاده و شناخت بیشتر فواید روش انرژی در صنعت، دولت و آموزش مشاهده شده است و انرژی به مسئله‌ای در حال رشد و جهانی درآمده است.

می‌دانیم که این از قوانین بنیادی طبیعت است که انرژی نه به وجود می‌آید و نه از بین می‌رود (قانون اول ترمودینامیک). انرژی در شکل‌های گوناگون در دسترس است و می‌تواند از شکلی به شکل دیگر تبدیل شود. به هر حال، همیشه یک محدودیت سخت وجود دارد. انرژی‌های مختلف کیفیت‌های متفاوت دارند و این نشان می‌دهد که تا چه حد در تئوری قابلیت تبدیل به کار مکانیکی را دارند. این محدودیت، که یک قانون طبیعت است، تنزل کیفیت انرژی را در هر تبدیل ایجاب می‌کند (قانون دوم ترمودینامیک).

کیفیت انرژی با مفهوم آنتروپی توصیف می‌شود. آنتروپی بالا، معادل است با کیفیت پایین انرژی. بر اساس آنچه قانون دوم می‌گوید تبدیل تنها با افزایش آنتروپی ممکن است. با معرفی انرژی، می‌توانیم انرژی و آنتروپی را در یک زمان مورد بحث قرار دهیم و به اصطلاح با یک تیر دو نشان را بزنیم.

۳-۶-۱ کارکرد تحلیل‌های انرژی و انرژی

ترمودینامیک امکان توصیف رفتار، عملکرد و کارایی را برای تغییرات انرژی از یک فرم به فرم دیگر در یک سیستم به دست می‌دهد. تحلیل‌های رایج ترمودینامیک بر قانون اول ترمودینامیک استوار است، که قانون بقاء انرژی را بیان می‌کند. تحلیل انرژی یک سیستم تبدیل انرژی در حقیقت محاسبه‌کننده انرژی‌های ورودی و خروجی است. انرژی خروجی به تولید و اتلاف قابل تقسیم است. کارایی‌ها معمولاً به عنوان نسبتی از کمیت‌های انرژی برآورد می‌شود و معمولاً برای ارزیابی و مقایسه

سیستم‌های مختلف به کار می‌رود. نیروگاه‌ها، گرم‌کننده‌ها و سردکننده‌ها و انباره‌های حرارتی، برای مثال، بر اساس میزان کارایی با هم مقایسه می‌شوند.

با این حال، کارایی انرژی معمولاً همراه‌کننده است زیرا که معیاری برای تقریب کارکرد سیستم برای رسیدن به حالت ایده‌آل نمی‌دهد. علاوه بر آن، تلفات ترمودینامیکی که در یک سیستم اتفاق می‌افتد، به معنای عواملی که عملکرد سیستم را از حالت ایده‌آل دور می‌کند، معمولاً با تحلیل انرژی نمی‌توانند به طور دقیق شناسایی و ارزیابی شوند. نتایج تحلیل انرژی می‌تواند عدم کارایی‌های عمده را در بخش‌های نادرست سیستم نشان دهد.

تحلیل انرژی امکان برطرف کردن بسیاری از نواقص و کمبودهای روش تحلیل انرژی را فراهم می‌کند. تحلیل انرژی بر پایه قانون دوم ترمودینامیک است و در شناسایی دلایل و نقاط اتلاف و مشخص کردن میزان ناکارایی بسیار مفید است. انرژی همراه با کمیت انرژی، فواید و کیفیت آن را ارزیابی کمی می‌کند. آنالیز انرژی می‌گوید که با وجود آنکه انرژی از بین نمی‌رود و به وجود نمی‌آید، اما می‌تواند در کیفیت تغییر سطح دهد و سرانجام به سطحی می‌رسد که در تعادل کامل با محیط اطراف است و بنابراین استفاده دیگری برای کار بیشتر نخواهد داشت.

در سیستم‌های ذخیره انرژی، برای مثال، آنالیز انرژی به فرد اجازه می‌دهد تا بیشینه مقدار پتانسیل انرژی ورودی را مشخص کند. این میزان حداکثری تنها زمانی حفظ و بازیافت می‌شود که انرژی فرایندی بازگشت‌پذیر را از سر بگذرانند. اتلاف پتانسیل برای بازیافت انرژی در جهان واقعی همیشه رخ می‌دهد، زیرا فرایندهای واقعی همیشه بازگشت‌ناپذیرند.

میزان جریان انرژی یک سیال، بیشترین میزان کاری است که در فرایند بازگشت به حالت محیط با تبادل حرارت و ماده با محیط اطراف به دست می‌آید. در اصل، تحلیل انرژی محدودیت‌های تئوریک تحمیل‌شونده به یک سیستم را با اشاره به اینکه هیچ سیستم واقعی نمی‌تواند انرژی را

ذخیره کند و این که تنها بخشی از انرژی ورودی می تواند بازیافت شود، بیان می کند. همچنین، تحلیل انرژی محدودیت های عملی را با ارائه میزان اتلاف به شکل اندازه مستقیم اتلاف انرژی به صورت کمی و عددی معلوم می کند.

۳-۶-۲ تعادل جرم، انرژی و آنتروپی

۳-۶-۲-۱ تعادل مفهومی

یک تعادل عمومی برای یک میزان کمی در یک سیستم می تواند به شکل زیر نوشته شود [۴۷]:

$$\text{ورودی} + \text{تولید} - \text{خروجی} - \text{مصرف} = \text{ذخیره}$$

ورودی و خروجی به ترتیب به مقادیر وارد شده به سیستم و خارج شده از سیستم بازمی گردد. تولید و مصرف به ترتیب به مقادیر تولید شده و مصرف شده توسط سیستم مربوط است. میزان ذخیره نیز کمیت مانده را (مثبت و یا منفی) برای سیستم نشان می دهد.

نسخه هایی از رابطه تعادل عمومی بالا می تواند برای جرم، انرژی، آنتروپی و انرژی نوشته شود. ماده و انرژی، به عنوان موضوع قوانین بقا، نمی توانند تولید و یا مصرف شوند. در نتیجه، رابطه تعادل عمومی برای هر کدام از این کمیت ها به شکل زیر نوشته می شود:

$$\text{جرم ورودی} - \text{جرم خروجی} = \text{انباشتگی جرم}$$

$$\text{انرژی ورودی} - \text{انرژی خروجی} = \text{انباشتگی انرژی}$$

پیش از ارائه رابطه تعادل برای انرژی، خوب است که بدانیم این کمیت ها برای آنتروپی به این صورت خواهد بود:

$$\text{آنتروپی ورودی} + \text{آنتروپی تولید شده} - \text{آنتروپی خروجی} = \text{انباشتگی آنتروپی}$$

آنتروپی در طی روند یک فرایند بر اساس تغییرناپذیری تولید می شود، اما نمی تواند مصرف شود. این روابط تعادل توضیح می دهند که در طی یک فرایند در یک سیستم بین دو لحظه از زمان چه اتفاقی می افتد. برای یک چرخه کامل فرایند که وضعیت آغازین و پایانی سیستم یکسان است، میزان انباشتگی برای تمام روابط تعادل صفر است.

۳-۶-۳ اگزرژی سیستم ها و جریان ها

۳-۶-۳-۱ اگزرژی یک سیستم بسته

اگزرژی یک سیستم بسته ی جرم ، یا اگزرژی غیر جریانی^۱، به این صورت می تواند بیان شود:

$$Ex_{non-flow} = Ex_{ph} + Ex_o + Ex_{kin} + Ex_{pot} \quad (۸-۳)$$

$$Ex_{pot} = PE \quad (۹-۳)$$

$$Ex_{kin} = KE \quad (۱۰-۳)$$

$$Ex_o = \sum_i (\mu_{io} - \mu_{i00}) N_i \quad (۱۱-۳)$$

$$Ex_{non-flow} = (U - U_o) + P_o(V - V_o) - T_o(S - S_o) \quad (۱۲-۳)$$

که در آن سیستم دارای دمای T ، فشار P ، پتانسیل شیمیایی μ_i ، آنتروپی s ، انرژی E ، حجم V و تعداد مول N_i برای جز i است. سیستم در یک محیط فرضی در یک وضعیت پایدار با خواص شدتی T_o, P_o, μ_{i00}, S_o است. کمیت μ_{io} مقدار μ را در وضعیت محیطی مشخص می کند مفاهیم سمت راست معادله (۲-۴۵) به ترتیب نشان دهنده ی بخش های فیزیکی، شیمیایی، جنبشی و پتانسیل اگزرژی بی جریان سیستم هستند.

اگزرژی Ex خاصیتی از سیستم و محیط فرضی است که می توان آن را ترکیب خواص شدتی و خواص مقداری سیستمی با خواص شدتی محیط دانست.

^۱Non-flow exergy

اگرزری فیزیکی غیر جریانی، بیشینه کار قابل دستیابی است که از سیستمی طی رسیدن به وضعیت محیطی به دست می‌آید (یعنی تعادل حرارتی و مکانیکی با محیط). اگرزری شیمیایی غیر جریانی بیشینه کار قابل دستیابی است که از یک سیستم طی رسیدن به میرایی به دست می‌آید.

۳-۶-۳-۲ اگرزری جریان‌ها

اگرزری گردش جریان ماده Ex_{flow} برابر است با مجموع اگرزری بی جریان و اگرزری وابسته به گردش کار جریان (با ارجاع به P_o) یعنی:

$$Ex_{flow} = Ex_{non-flow}(P - P_o)V \quad (۱۳-۳)$$

به صورت دیگر، می‌توان Ex_{flow} را با معادله ۲-۴۵ برای بخش های فیزیکی، شیمیایی، جنبشی و پتانسیل آن تعریف کرد [۲۱]:

$$Ex_{flow} = Ex_{ph} + Ex_o + Ex_{kin} + Ex_{pot} \quad (۱۴-۳)$$

که در اینجا:

$$Ex_{pot} = PE \quad (۱۵-۳)$$

$$Ex_{kin} = KE \quad (۱۶-۳)$$

$$Ex_o = \sum_i (\mu_{io} - \mu_{ioo}) N_i \quad (۱۷-۳)$$

$$Ex_{non-flow} = (H - H_o) - T_o(S - S_o) \quad (۱۸-۳)$$

یک جرم کنترل را در نظر بگیرید، در ابتدا در وضعیت مرده، که در حجم ثابتی در تعامل با سیستم دیگری گرم یا سرد شده است. حرارت انتقال یافته‌ی جرم کنترل Q است. جریان انرژی وابسته به انتقال گرما Q با Ex_Q نشان داده می‌شود و می‌تواند به این صورت تعریف شود [47]:

$$Ex_Q = \int_i^f (1 - T_o/T) \delta Q \quad (۱۹-۳)$$

که در اینجا δQ انتقال حرارت زیاد شونده، و انتگرال از حالت اولیه i تا حالت نهایی f است. این انرژی حرارتی کمینه کار مورد نیاز سیستم مرکب از جرم کنترل و محیط برای درآوردن جرم کنترل از وضعیت مرده به وضعیت نهایی است.

عموماً کمیت داخل پرانتز این معادله "ضریب دمای انرژیژتیک" نامیده می شود و τ را مشخص می کند:

$$\tau = 1 - T_o/T \quad (۲۰-۳)$$

$$Ex_Q = \left(1 - T_o/T\right) Q = \tau Q \quad (۲۱-۳)$$

انتقال انرژیژتی وابسته به کار انجام شده توسط سیستم بر اساس تغییر حجم همان کار قابل استفاده شبکه بر اساس میزان تغییر حجم است، و با W_{net} نشان داده می شود.

$$(W_{net})_{1,2} = W_{1,2} - P_o(V_2 - V_1) \quad (۲۲-۳)$$

که در آن $W_{1,2}$ کار انجام شده توسط سیستم بر اساس تغییر حجم $(V_2 - V_1)$ است. عبارت $P_o(V_2 - V_1)$ کار جابجایی لازم برای تغییر حجم در برابر فشار ثابت P_o اعمال شده توسط محیط است. همانند آنچه در کار شفت وجود دارد، انرژیژتی وابسته به الکتریسیته برابر با انرژی است.

برای یک فرایند که در یک سیستم اتفاق می افتد، تفاوت بین انرژی کل که در داخل و خارج سیستم جریان دارد، منهای مقدار انباشتگی انرژیژتی، میزان مصرف انرژی خواهد بود.

$$I = T_o S_{gen} \quad (۲۳-۳)$$

معادله (۶۰-۲) نشان می دهد که مصرف انرژیژتی با میزان تولید آنتروپی متناسب است.

۳-۶-۴ روند تحلیل انرژی و انرژی

یک روند ساده برای انجام تحلیل های انرژی و انرژی این مراحل را شامل می شود:

فرایند فرضی را به قسمت های کوچکتر به تعداد دلخواه، بر اساس میزان عمق جزییات و سطح اطلاعاتی که می خواهید از تحلیل بگیرید تقسیم کنید، قاعده توازن جرم و انرژی را بر روی فرایند اعمال کنید و تمام کمیت های مبنا (مانند کار و گرما) و ویژگی های اولیه (مانند دما و فشار) را معین کنید، براساس طبیعت فرایند، میزان پیچیدگی و دقت تحلیل و پرسش هایی که به دنبال پاسخشان هستید، یک مدل محیطی مرجع انتخاب کنید، به نسبت مدل محیطی مرجع، مقدار انرژی و انرژی را تخمین بزنید، توازن انرژی را اعمال کنید به طوری که میزان مصرف انرژی را مشخص کند.

نتایج را تفسیر (داده پردازی) و نتیجه گیری و پیشنهادات مناسب را ارائه کنید، مانند تغییرات طراحی، اصلاحات واحد و غیره.

۳-۶-۵ مفاهیم نتایج تحلیل های انرژی

برای بررسی انرژی دستگاه ابتدا با فرض های زیر معادله انرژی آن را خلاصه می کنیم:

۱. از تغییرات انرژی پتانسیل و جنبشی صرفه نظر می کنیم.

۲. فشار در ورودی و خروجی یکسان است.

۳. گاز ایده آل

۴. چگالی دو سیال یکسان در نظر گرفته شده است.

پس از این فرض ها معادله انرژی به صورت زیر بدست می آید:

$$Ex = \dot{m} \times \Psi = \dot{m}((h_o - h_i) - T_o(S_o - S_i)) \quad (24-3)$$

که مقادیر ΔH و ΔS با توجه به فرض‌های بالا از رابطه‌های زیر بدست می‌آید [۴۸ و ۴۹]:

$$\Delta H = C_p \Delta T \quad (25-3)$$

$$\Delta S = C_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \quad (26-3)$$

C_p برای هوا از جدول‌های ترمودینامیکی در دماهای معلوم خوانده می‌شود، این مقدار برای دود ورودی به صورت زیر محاسبه شده است [۴۸ و ۴۹]:

فرضیات:

۱. دود ورودی به صورت گازهای ناشی از احتراق کامل متان فرض شده است.

۲. احتراق با ده درصد هوای اضافی در نظر گرفته شده است.

با این فرض‌ها با نوشتن معادله احتراق متان، نسبت مولی هر یک از محصولات به صورت زیر بدست آمده است.

جدول ۳-۱ درصد مولی گاز حاصل از احتراق

N_2	72/1%
H_2O	17/43%
C_2O	8/71%
O_2	1/74%

سپس با استفاده از رابطه‌ی زیر C_p را بدست می‌آوریم [۴۸]:

$$C_p = x_{N_2} C_{p_{N_2}} + x_{H_2O} C_{p_{H_2O}} + x_{C_2O} C_{p_{C_2O}} + x_{O_2} C_{p_{O_2}} \quad (27-3)$$

همچنین بازده اگزرژیتهیک هم از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید [۴۸ و ۴۹]:

$$\text{بازده} = \frac{(ex_{\text{هوا}} * \dot{m}_{\text{هوا}})}{(ex_{\text{دود}} * \dot{m}_{\text{دود}})} \quad (28-3)$$

کارایی انتقال اگزرژی

کارایی انتقال اگزرژی^۱ این مفهوم بر اساس، ضریب کارایی در مبدل‌ها تعریف می‌شود [۵۰]:

$$\varepsilon_e = \frac{\text{نرخ اگزرژی واقعی}}{\text{نرخ اگزرژی حداکثر}} \quad (29-3)$$

این مفهوم برای مبدل‌های جریان ناهمسو که افت فشار ندارند به صورت زیر تعریف

می‌شود [۵۰]:

$$\varepsilon_e = \frac{T_{co} - T_{ci} - T_{\infty} \ln \left(\frac{T_{co}}{T_{ci}} \right)}{T_{hi} - T_{ci} - T_{co} \ln \left(\frac{T_{hi}}{T_{ci}} \right)} \quad (30-3)$$

¹ Exergy transfer effectiveness

فصل ۴: بررسی نتایج

در این فصل به بررسی نتایج بدست آمده با توجه به اطلاعات حاصل از اندازه‌گیری انجام شده در آزمایشات شامل دما، سرعت ورودی برای هوا و دود و شرایط سیال عامل لوله‌های حرارتی می‌پردازیم. توضیحات مربوط به روند آزمایش و شرایط کاری بصورت کامل در فصل قبل مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۱ تحلیل دمایی

از جمله ابتدایی‌ترین پارامترهای مورد توجه در بررسی عملکرد لوله‌های حرارتی نوسانی بحث اختلاف دمای ایجاد شده در مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت است. تجزیه و تحلیل این بخش می‌تواند راه‌گشای مباحث بعدی در این زمینه باشد. در این آزمایش دمای مبدل بازیافت در ۴ نقطه، شامل: ورودی و خروجی مجرای گرم (دود) و ورودی و خروجی مجرای سرد (هوا) اندازه‌گیری شده است. دمای دود ورودی از ۱۱۰ تا ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد متغیر بوده که به تبع آن تغییرات در نقاط دیگر اندازه‌گیری شده است. توجه به این نکته ضروری است که استفاده از سیال عامل در لوله‌های حرارتی دارای محدودیت‌هایی است. یک، اول توجه در شناسایی یک مایع (سیال) کاری مناسب، حدود عملکرد دمایی مناسب است و انتخاب سیال کاری برای لوله‌های حرارتی در جدول ۴-۱ آمده است. در دمای تقریبی چند گروه سیال کاری ممکن است وجود داشته باشد و تنوعی از ویژگی‌ها باید به منظور تعیین قابل قبول‌ترین این سیال‌ها برای کاربرد در نظر گرفته شود. نیازهای (ویژگی‌های) نخست یک سیال کاری به شرح زیر هستند [۵۱]:

۱- سازگاری با فتیل و دیواره لوله حرارتی

۲- دوام خوب حرارتی

۳- ترشوندگی فتیل و دیواره

۴- گرمای نهان بالا

۵- هدایت حرارتی بالا

۶- ویسکوزیته پایین مایع و بخار

۷- کشش سطحی بالا

۸- انجماد قابل قبول

جدول ۴-۱ انتخاب سیال کاری برای لوله حرارتی [۵۱]

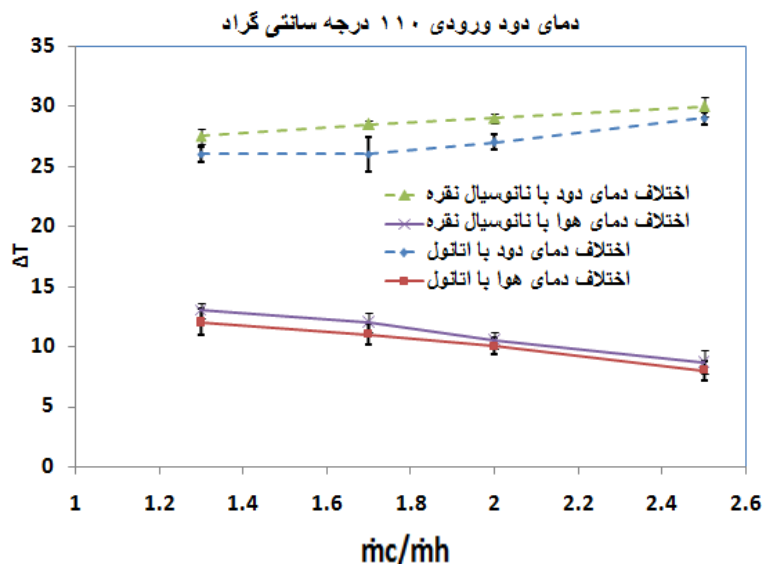
Medium	Melting point (°C)	Boiling point at atmos. press. (°C)	Useful range (°C)
Helium	-271	-261	-271 to -269
Nitrogen	-210	-196	-203 to -160
Ammonia	-78	-33	-60 to 100
Pentane	-130	28	-20 to 120
Acetone	-95	57	0 to 120
Methanol	-98	64	10 to 130
Flutec PP2 ¹	-50	76	10 to 160
Ethanol	-112	78	0 to 130
Heptane	-90	98	0 to 150
Water	0	100	30 to 200
Toluene	-95	110	50 to 200
Flutec PP9 ¹	-70	160	0 to 225
Thermex ²	12	257	150 to 350
Mercury	-39	361	250 to 650
Caesium	29	670	450 to 900
Potassium	62	774	500 to 1000
Sodium	98	892	600 to 1200
Lithium	179	1340	1000 to 1800
Silver	960	2212	1800 to 2300

توجه به این نکته ضروری است که دبی دود ورودی ثابت در نظر گرفته شده و سرعت هوای

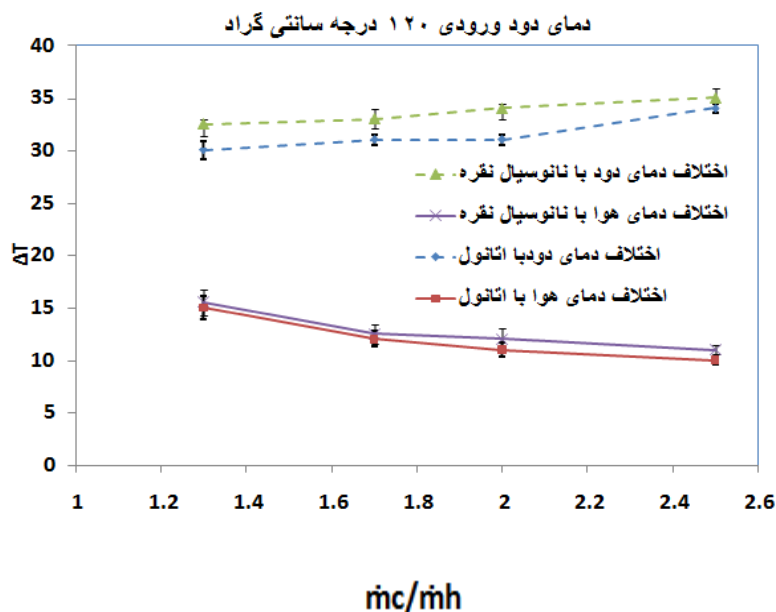
عبوری توسط فن در کانال هوا کنترل می‌شود. بازه سرعت های ورودی برای هوا شامل ۱/۳، ۱/۷، ۲ و

۲/۵ متر بر ثانیه می‌باشد. سرعت دود نیز ۱ متر بر ثانیه در کلیه آزمایش‌ها اندازه‌گیری شده است.

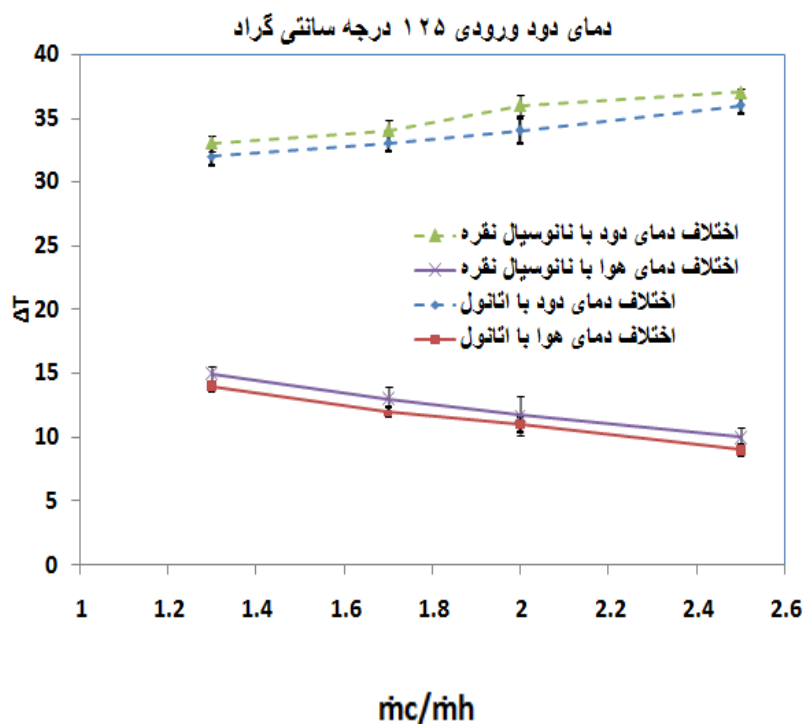
نمودارهای ۱-۴ تا ۴-۴ بیان گر اختلاف دمای بوجود آمده در دوسر مجرای گرم و مجرای سرد برای دمای ورودی دود متفاوت در برابر نسبت دبی متفاوت هوا و دود، بر اثر انتقال حرارت انجام شده در لوله های حرارتی برای دو سیال عامل اتانول و نانوسیال نقره/آب است.



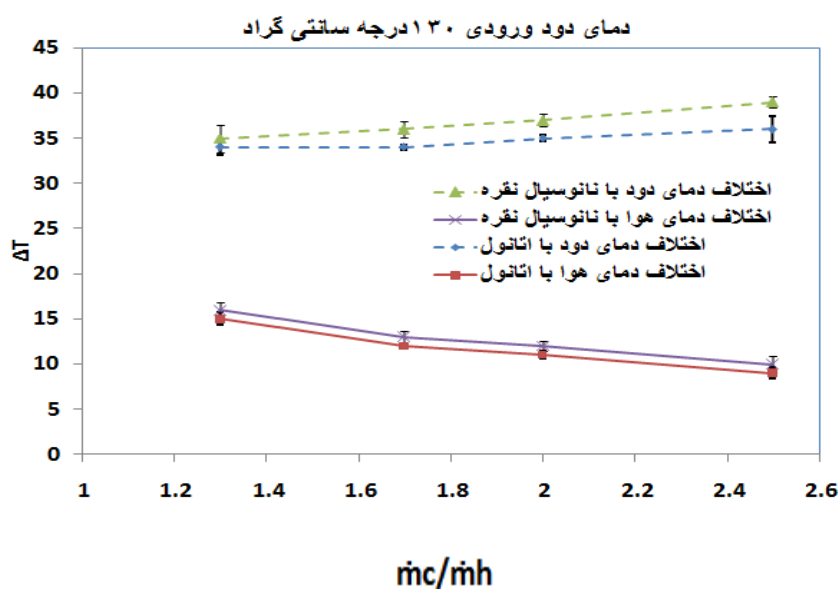
۱-۴ اختلاف دمای دو سر مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت در دمای ورودی دود ۱۱۰ درجه سانتی گراد



۲-۴ اختلاف دمای دو سر مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت در دمای ورودی دود ۱۲۰ درجه سانتی گراد



۳-۴ اختلاف دمای دو سر مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت در دمای ورودی دود ۱۲۵ درجه سانتی گراد



۴-۴ اختلاف دمای دو سر مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت در دمای ورودی دود ۱۳۰ درجه سانتی گراد

همان طور که از نتایج استنباط می شود افزایش نسبت دبی ($\dot{m}_c/\dot{m}_h$) باعث افزایش اختلاف دمای مجرای گرم (دود) و کاهش اختلاف دمای مجرای سرد (هوا) می شود. واضح است که افزایش دمای ورودی دود نیز منجر به افزایش میزان اختلاف دما در دو سر هر دو مجرا شده است. استفاده از

نانوسیال نیز تاثیر بسزایی در افزایش اختلاف دما برای هر دو مجرای دود و هوا دارد.

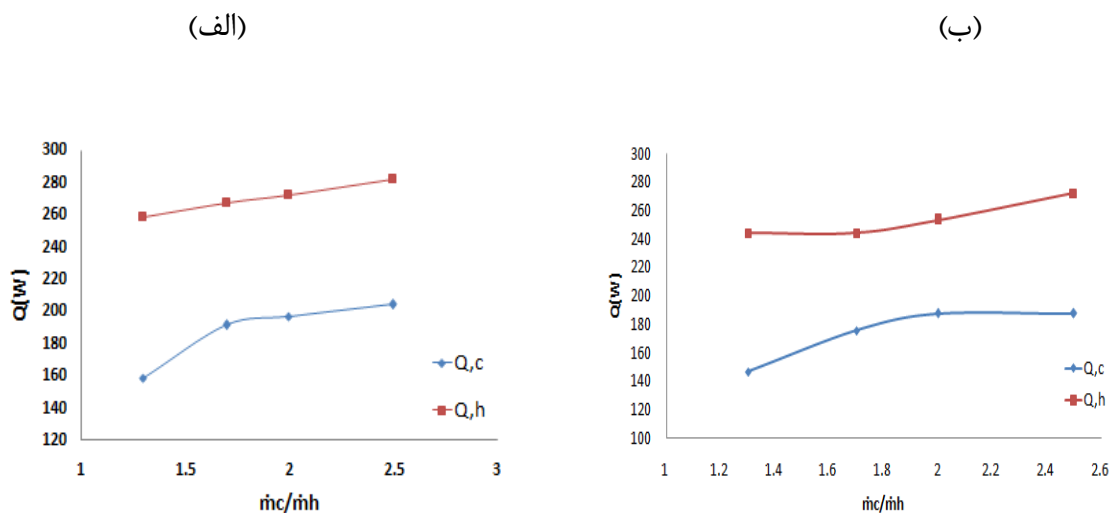
در تمامی نمودارهای بالا نتایج در بازه خطای آماری که با روش بازه اطمینان^۱ محاسبه شده است به نمایش در آمده که خطای قابل قبول آزمایشات را نشان می دهد.

۴-۲ تحلیل حرارتی

پس از بررسی نتایج بدست آمده در قسمت قبل، می توان شار حرارتی مبادله شده را برای هر دو قسمت مبدل حرارتی نوشت. شار حرارتی را می توان از رابطه ۴-۱ استخراج نمود.

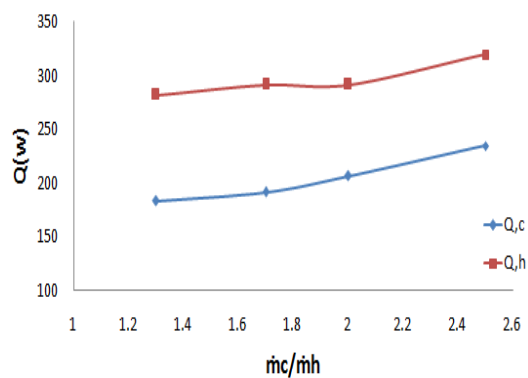
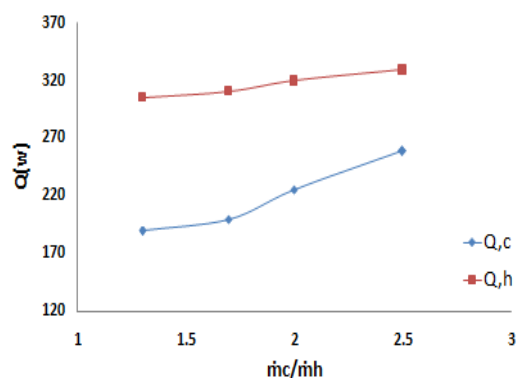
$$q = \dot{m}c_p\Delta T \quad (۴-۱)$$

نتایج حاصل از شار حرارتی مبادله شده در دو قسمت مبدل بازیافت را می توان در نمودارهای ۵ تا ۹ بصورت مجزا برای هر دو سیال عامل اتانول (ب) و نانوسیال نقره (الف) مشاهده نمود.

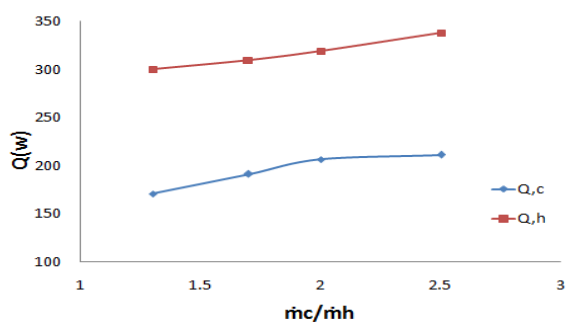
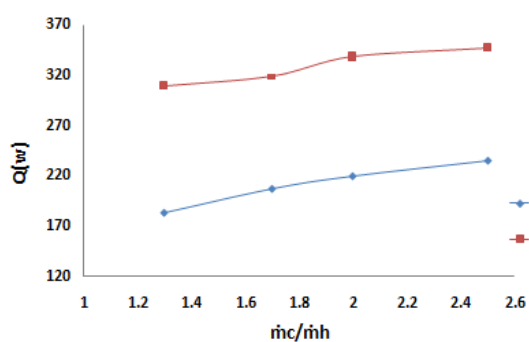


۴-۵ شار حرارتی انتقال یافته مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت در دمای ورودی ۱۱۰ درجه سانتی گراد

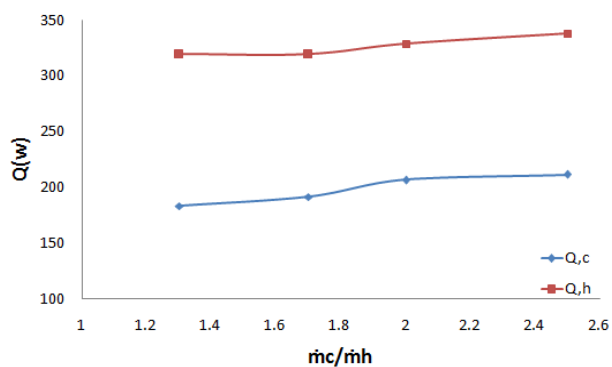
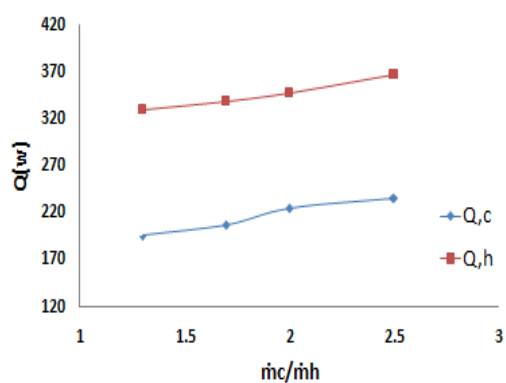
¹ confidence interval



۶-۴ شار حرارتی انتقال یافته مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت در دمای ورودی ۱۲۰ درجه سانتی گراد



۷-۴ شار حرارتی انتقال یافته مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت در دمای ورودی ۱۲۵ درجه سانتی گراد



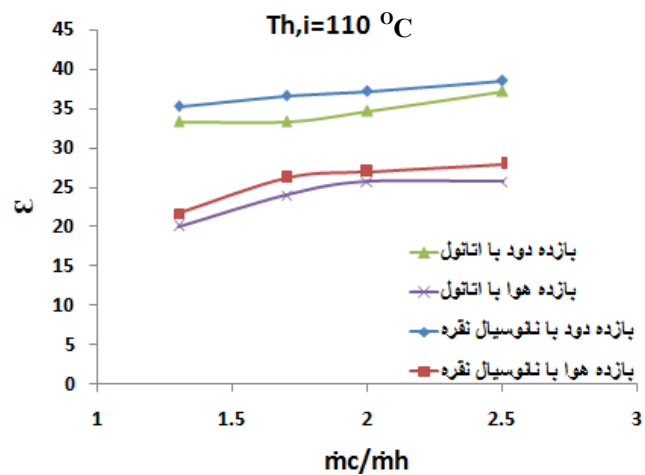
۸-۴ شار حرارتی انتقال یافته مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت در دمای ورودی ۱۳۰ درجه سانتی گراد

نمودارهای بالا به وضوح نمایانگر افزایش شار حرارتی انتقال یافته در مبدل بازیافت بر اثر افزایش سرعت است. این افزایش در هر دو مجرای دود و هوا قابل مشاهده است. نمودارهای اختلاف دما برای مجرای هوا نمایانگر کاهش اختلاف دما در اثر افزایش دبی هوا بوده، اما توجه به این نکته ضروری است که این کاهش دما در حجم بیشتری انجام شده است و در نتیجه شار حرارتی انتقال یافته رو به افزایش خواهد بود. افزایش دمای ورودی نیز بصورت واضح باعث افزایش شار حرارتی انتقال یافته می‌شود.

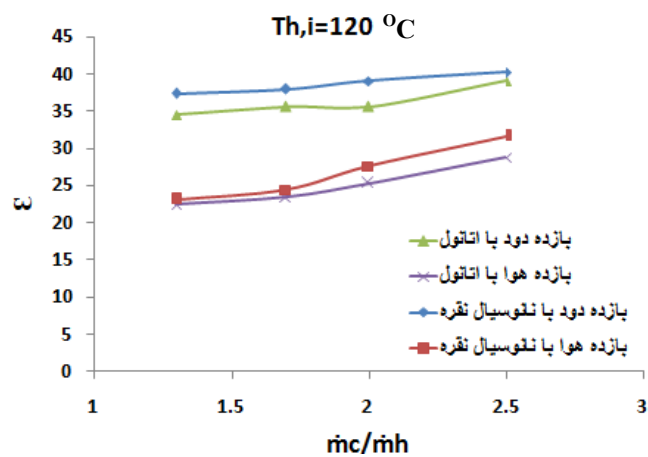
۴-۳ تحلیل عملکرد مبدل

تحلیل راندمان مهمترین قسمت بررسی یک مبدل حرارتی است. راندمان مبدل حرارتی بازیافت را می‌توان بصورت کلی با معادله ۲-۳، ۳-۳، ۴-۳ تعریف کرد. در نتیجه معادله برای مجرای گرم و سرد به بصورت معادلات ۳-۳، ۴-۳ نوشته می‌شود.

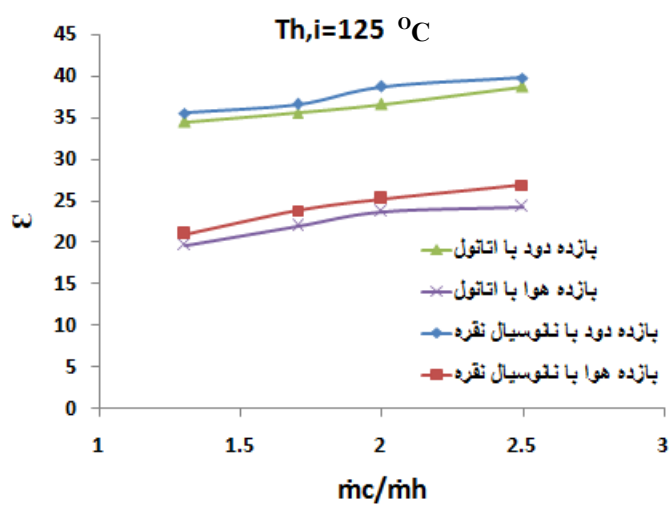
نتایج حاصل از محاسبات عملکرد مبدل بازیافت با تغییر پارامترهای سیستم از جمله سرعت ورودی هوا و دمای ورودی دود برای هر دو سیال عامل اتانول و نانوسیال نقره در نمودارهای ۹ تا ۱۲ آورده شده است. افزایش سرعت ورودی منجر به بازدهی بهتر سیستم در همه حالات می‌شود.



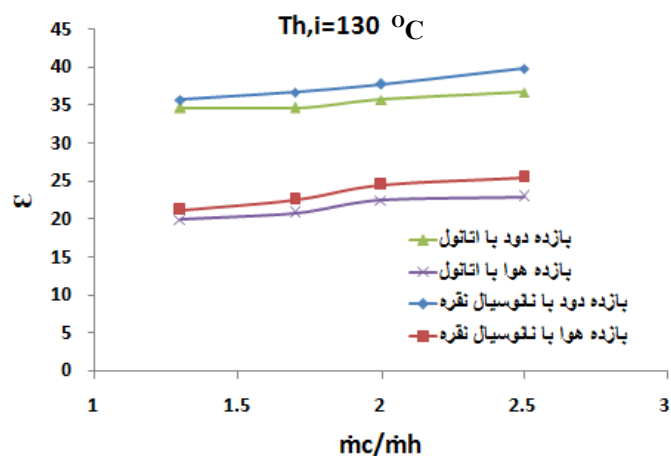
شکل ۹-۴ راندمان مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت در دمای ورودی ۱۱۰ درجه سانتی گراد



شکل ۱۰-۴ راندمان مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت در دمای ورودی ۱۲۰ درجه سانتی گراد



شکل ۱۱-۴ راندمان مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت در دمای ورودی ۱۲۵ درجه سانتی گراد



شکل ۴-۱۲ راندمان مجرای سرد و گرم مبدل بازیافت در دمای ورودی ۱۳۰ درجه سانتی گراد

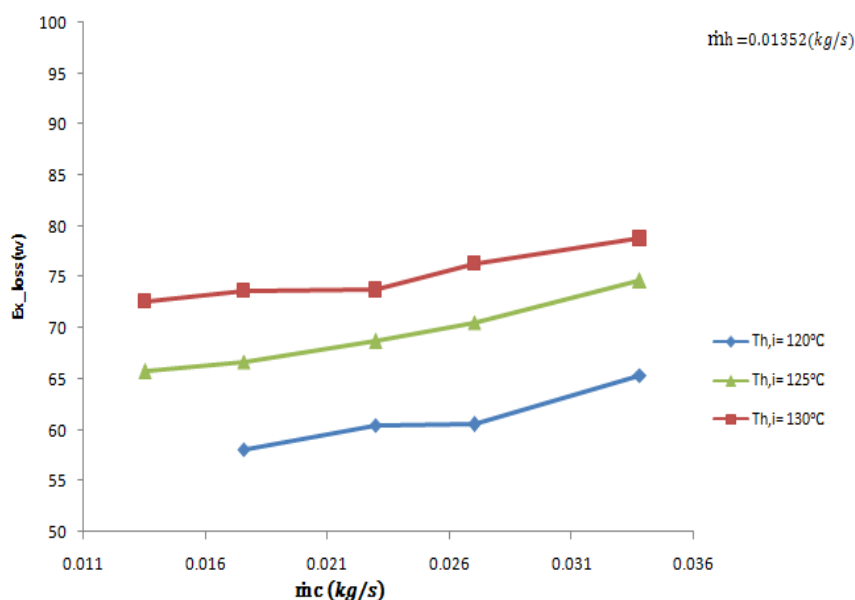
همانطور که مشاهده شد استفاده از نانوسیال می تواند تاثیر مناسبی بر افزایش راندمان مبدل داشته باشد. که این افزایش می تواند به علت اضافه شدن ضریب هدایت نانوذرات و حرکت آنها در سیال پایه باشد.

جدول ۴-۲ بیشترین مقدار افزایش عملکرد برای هر نسبت دبی

نسب دبی	۲/۵	۲	۱/۷	۱/۳
دمای دود ورودی بر حسب سانتی- گراد	۱۳۰	۱۲۰	۱۱۰	۱۱۰
حداکثر درصد افزایش	۱۱٪	۹/۵٪	۹٪	۸٪

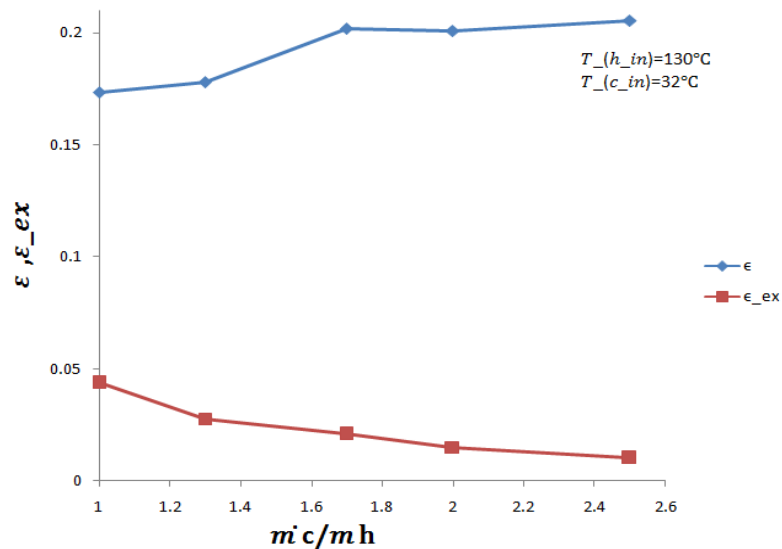
۴-۴ تحلیل اگزرژی

نمودار ۴-۱۳، تغییرات اگزرژی از دست رفته بر حسب دبی سیال سرد (در این جا هوا) در دبی ثابت سیال گرم (دود) است، همان طور که دیده می شود با افزایش دبی هوا، مقدار اتلاف اگزرژی دستگاه افزایش می یابد، علت این امر افزایش برگشت ناپذیری ها و توربولانس بر اثر افزایش دبی است که خود را در اتلاف اگزرژی نشان می دهد. همچنین با افزایش دمای سیال گرم ورودی مقدار اتلاف اگزرژی افزایش می یابد، علت این امر میزان اگزرژی اولیه بیشتر دستگاه است.

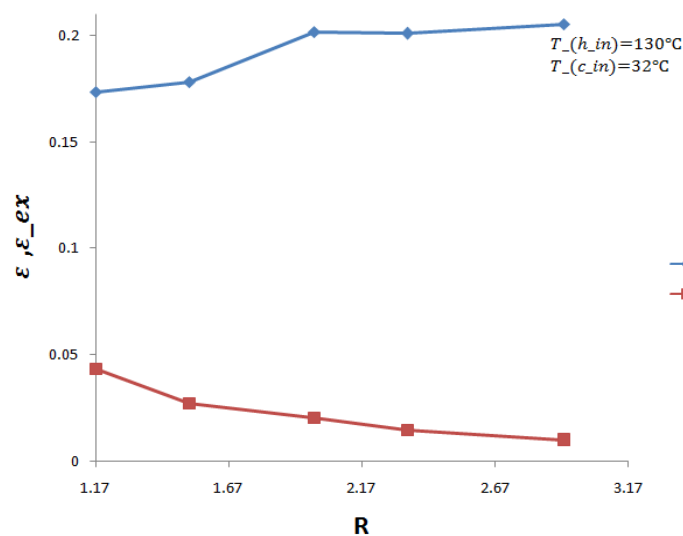


۴-۱۳ تغییرات اگزرژی از دست رفته بر حسب دبی سیال سرد

نمودار بالا، تغییرات اگزرژی از دست رفته بر حسب دبی سیال سرد (در این جا هوا) در دبی ثابت سیال گرم (دود) است، همانطور که دیده می شود با افزایش دبی هوا، مقدار اتلاف اگزرژی دستگاه افزایش می یابد، علت این امر افزایش برگشت ناپذیری ها و توربولانس بر اثر افزایش دبی است که خود را در اتلاف اگزرژی نشان می دهد. همچنین با افزایش دمای سیال گرم ورودی مقدار اتلاف اگزرژی افزایش می یابد، علت این امر میزان اگزرژی اولیه بیشتر دستگاه است.



۴-۱۴ کارایی انرژی و کارایی انرژی بر حسب نسبت دبی های سیال سرد و گرم



۴-۱۵ کارایی انرژی و کارایی انرژی بر حسب R

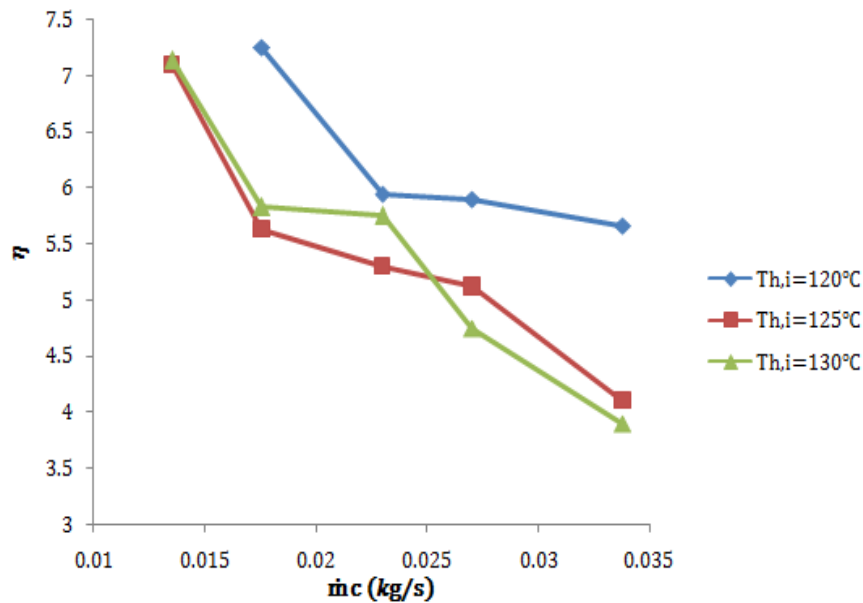
نمودارهای بالا، تغییرات ضریب کارایی انرژی و کارایی انرژی بر حسب نسبت دبی های

سیال سرد و گرم و $R = \frac{(\dot{m}c_p)_{max}}{(\dot{m}c_p)_{min}}$ آن ها است، همان طور که دیده می شود با افزایش این نسبت،

کارایی انرژی مبدل در کانال هوا افزایش، و کارایی انرژی کاهش می یابد، در واقع با افزایش سرعت

هوا، از یک طرف انتقال حرارت زیاد می شود و از طرف دیگر اتلاف انرژی ناشی از توربولانس و

افزایش برگشت‌ناپذیری ها هم افزایش می‌یابد، در این دستگاه و سرعت‌های اندازه‌گیری شده، اثر افزایش اتلاف اگزرژی بیشتر است و در نتیجه ضریب کارایی اگزرژتیک کاهش می‌یابد، علت کم‌تر بودن و متفاوت بودن شیب ضریب کارایی اگزرژتیک نسبت به انرژی نیز، لحاظ کردن برگشت‌ناپذیری‌ها در اولی است.



۴-۱۶ بازده اگزرژی بر حسب دبی هوا

نمودار بالا، بازده اگزرژی بر حسب دبی سیال سرد ورودی است، همان‌طورکه می‌بینیم این نمودار هم غالب بودن اثر افزایش اتلاف اگزرژی را تایید می‌کند، پرش‌های نمودار ناشی از تغییرات اثر مثبت افزایش انتقال حرارت و اثر منفی افزایش اتلاف اگزرژی است.

فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ نتیجه‌گیری

در این تحقیق بررسی عملکرد مبدل بازیافت حرارت توسط لوله‌های حرارتی نوسانی مورد بررسی قرار گرفته است. لوله‌های حرارتی از جنس مس و با قطر داخلی ۲ میلی‌متر بوده که بین دو محفظه که سیال گرم و سرد در آن جریان دارد قرار داده شده است. این لوله‌ها وظیفه انتقال حرارت مجرای گرم به مجرای سرد را بر عهده دارند. نتایج بدست آمده آزمایشات را می‌توان به این شکل دسته‌بندی نمود:

- افزایش دبی جرمی هوا باعث افزایش اختلاف دمای ورودی و خروجی مجرای گرم و کاهش اختلاف دما در مجرای سرد می‌شود.
- از سوی دیگر افزایش دمای ورودی دود نیز باعث افزایش اختلاف دما در هر دو مجرا می‌شود.
- افزایش دبی جرمی و دمای ورودی دود باعث افزایش شار حرارتی انتقال یافته در هر دو مجرا خواهد شد.
- افزایش دبی جرمی باعث افزایش راندمان انرژی سیستم خواهد شد اما افزایش دما الزاما افزایش راندمان را در پی ندارد.
- افزایش دمای ورودی ممکن است باعث کاهش راندمان سیستم شده که دلیل می‌تواند خشک شدگی لوله‌های حرارتی نوسانی باشد.
- افزایش دبی هوای سرد باعث افزایش اتلاف انرژی دستگاه خواهد شد.
- افزایش دبی هوای سرد باعث کاهش ضریب کارایی انرژی مبدل خواهد شد.
- افزایش دبی هوای سرد باعث کاهش راندمان انرژی مبدل خواهد شد.

۵-۲ پیشنهادات

- استفاده از سیال عامل‌های دیگر مانند نانو ذرات طلا و...
- بررسی تلفات حرارتی جابجایی و تشعشعی در دمای بالا
- تاثیر اثر زائده‌ها^۱ بر راندمان مبدل

^۱ baffle

- بررسی تغییر آرایش لوله ها
- بررسی اثر دمای هوای ورودی بر عملکرد سیستم

پیوست ۱ نانو سیالات

مفهوم نانوسیالات

در مسئله بازده انتقال حرارت در تجهیزاتی نظیر مبدل‌های حرارتی، هدایت حرارتی سیال حامل انرژی و ضریب جابجایی انتقال حرارت نقش اساسی را بر عهده دارند. سیالات متداول در انتقال حرارت و حامل انرژی در صنایع را معمولاً سیالاتی نظیر آب، روغن‌ها و اتیلن گلیکول تشکیل می‌دهند. با افزایش رقابت جهانی در زمینه صنایع مختلف و نقش هزینه تولید انرژی، این صنایع به شدت به سمت توسعه سیالات پیشرفته و جدید با شاخص‌های حرارتی بالا پیش می‌روند. به خوبی مشخص است که فلزات در شکل جامد خود دارای هدایت حرارتی بسیار بالایی نسبت به سیالات هستند. به عنوان مثال هدایت حرارتی مس در دمای محیط حدود ۷۰۰ برابر آب و ۳۰۰۰ برابر روغن موتور است [۵۲]. از طرفی هدایت حرارتی مواد فلزی نیز بسیار بیشتر از هدایت حرارتی مواد غیرفلزی است. به همین دلیل انتظار می‌رود که سیالات حاوی ذرات جامد معلق فلزی یا اکسید فلزی دارای هدایت حرارتی بیشتری نسبت به سیالات خالص باشند [۵۳]. فن‌آوری جدید نانو تکنولوژی این امکان را فراهم آورده تا بتوان ذراتی با اندازه بسیار کوچک نانومتری تولید و فرآوری کرد. این پیشرفت سبب شد تا در سال ۱۹۹۳ فکر استفاده از نانوذرات فلزی در داخل سیالات حامل انرژی نظیر آب و اتیلن گلیکول ایجاد و موضوع نانوسیال بعنوان موضوع جدید انتقال حرارت مطرح گردد. چون از بخش تکنولوژی انرژی آزمایشگاه ملی آرگون آمریکا در سال ۱۹۹۵ اولین بار موضوع نانوسیال را بعنوان محیط جدید انتقال حرارت مطرح نمود [۵۴]. نانوسیالات طبقه جدیدی از سیالات انتقال حرارت می‌باشند که از طریق معلق‌سازی نانو ذرات در درون سیالات معمولی و متداول انتقال حرارت که به عنوان سیال پایه شناخته می‌شوند، به دست می‌آیند؛ پراکندگی نانو ذرات درون سیال می‌تواند کاملاً یا تقریباً همگن باشد. [۵۴].

امروزه با توسعه تحقیقات، نانوسیال را نه فقط از طریق افزودن نانو ذرات فلزی بلکه از طریق افزودن نانو ذرات اکسیدهای فلزی و نانو لوله‌های کربنی می‌توان تهیه کرد. افزودن نانو ذرات اعم از

فلزی، اکسیدهای فلزی یا نانو لوله‌های کربنی به یک سیال نظیر آب فقط هدایت حرارتی آن را تحت تاثیر قرار نداده بلکه سایر خواص فیزیکی نظیر ظرفیت حرارتی سیال نیز تحت تاثیر قرار می‌گیرد. مجموعه تغییرات ایجاد شده در خواص ترموفیزیکی سیال سبب می‌شود تا علاوه بر افزایش هدایت حرارتی در انتقال حرارت جابجایی نیز باعث افزایش چشمگیر ضریب انتقال حرارت گردد. امروزه تحقیقات در زمینه نانوسیالات ابعاد بسیار گسترده‌ای پیدا کرده، بطوریکه از یک سو محققین در رابطه با افزایش هدایت حرارتی سیالات و افزایش انتقال حرارت به دنبال ساخت و تهیه نانوسیالات با انواع نانو ذرات و نانو لوله‌ها با توزیع اندازه‌های مختلف بوده و از سوی دیگر به بررسی مسئله پایداری و عدم ته نشینی نانو ذرات در طی فرایند انتقال حرارت و عدم کلوخه شدن یا مهاجرت آن‌ها می‌پردازند. ایجاد تغییرات در خواص رئولوژی سیال پایه با افزودن نانو ذرات بخشی از تلاش‌های محققین را به بررسی این موضوع معطوف داشته است.

مزایای بالقوه نانوسیال

فرایند انتقال حرارت و استفاده از مبدل‌های حرارتی در اغلب صنایع کوچک و بزرگ وجود دارد. افزایش حرارت و کارایی مبدل‌های حرارتی به معنی صرفه‌جویی میلیون‌ها دلار در هزینه‌های صنایع می‌باشد. با رفتاری شگفت‌انگیز که نانوسیال از خود در زمینه انتقال حرارت نشان داده، امید به چنین صرفه‌جویی در صنایع بزرگ بیشتر گردیده است. برخی از مزایا و قابلیت‌های بالقوه نانوسیالات به قرار زیر می‌باشد [۵۴].

بهبود انتقال حرارت و پایداری

کاهش اندازه ذرات یک جامد که توام با افزایش تعداد آن‌ها در واحد جرم می‌باشد منجر به افزایش سطح مخصوص می‌گردد، بطوریکه سطح مخصوص ذراتی با اندازه نانومتری در حدود ۱۰۰۰ برابر سطح مخصوص ذراتی با ابعاد میکرومتر می‌باشد. با کاهش ذرات به حدود نانومتر درصد بیشتری

از اتم‌های آن در نزدیکی سطح قرار می‌گیرند. سطح ذرات در انتقال حرارت موثر بوده و استفاده از نانوسیال به افزایش سطح انتقال حرارت منجر می‌گردد. مقایسه سطح ایجاد شده برای انتقال حرارت در نانو ذرات با سطح پودرهای متداول میکرومتری بیانگر توانایی و قابلیت زیاد نانو ذرات در افزایش انتقال حرارت و ایجاد سوسپانسیون پایدار می‌باشد. لازم به ذکر است که یکی از مشکلات افزودن ذرات میکرو به سیال پایه، ته‌نشینی سریع سریع آن‌ها می‌باشد که با کاهش اندازه به مقیاس نانو تا حدود زیادی مرتفع می‌گردد.

کاهش توان لازم پمپاژ سیال

در سیالات حامل انرژی افزایش میزان انتقال حرارت جابجایی مستلزم افزایش سرعت سیال برای بالا رفتن عدد رینولدز و به تبع آن عدد ناسلت و در نتیجه ضریب انتقال حرارت جابجایی است. این افزایش سرعت در درون تجهیزات به نوبه خود مستلزم افزایش توان مصرفی پمپ می‌باشد اما اگر نانوسیال برای انتقال حرارت بکار گرفته شود در یک سرعت مشخص افزایش انتقال حرارت نتیجه افزایش هدایت حرارتی سیال خواهد گردید. به عنوان مثال افزایش انتقال حرارت به میزان دو برابر با استفاده از سیال پایه نیازمند افزایش توان پمپ حدود ده برابر می‌باشد، در حالیکه اگر نانو ذرات به سیال پایه افزوده شده و ضریب هدایت حرارتی نانوسیال حاصل حدود سه برابر سیال پایه گردد، بدون نیاز به افزایش پمپ می‌توان به همان دو برابر افزایش در انتقال حرارت دست پیدا کرد. بنابراین کاهش هزینه انرژی و کاهش توان مصرفی پمپ‌ها از دیگر مزایای نانوسیالات است.

کاهش گرفتگی و انسداد مجاری

ایده افزایش انتقال حرارت با استفاده از افزودن ذرات پایه قدمتی نزدیک به صد سال دارد و ذراتی که در تحقیقات قدیمی به سیالات افزوده می‌شد دارای اندازه‌های میکرومتری بودند. این ذرات پایداری لازم در سوسپانسیون را نداشته و به سرعت ته‌نشین می‌شدند، همین امر سبب شد که

مجاری عبور سیال خصوصا در میکرو کانال‌ها به سرعت مسدود گردد، در حالی که ذرات با اندازه نانو تشکیل سوسپانسیون‌های بسیار پایدارتری داده و پایین بودن سرعت ته نشینی و اندازه نانویی ذرات آن‌ها سبب می‌گردد تا به عنوان سیالی مناسب در میکروکانال‌ها استفاده گردند.

کاهش هزینه‌ها

با توجه به عدم نیاز به توان مصرفی پمپ‌های انتقال سیال و همچنین کاهش اندازه‌ها و وزن تجهیزات انتقال حرارت با بکارگیری نانوسیال، صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی واحدهای صنعتی ایجاد می‌گردد.

کاربرد نانوسیالات

نانوسیالات در حوزه وسیعی از کاربردهای صنعتی و پزشکی می‌تواند قابل استفاده باشد [۵۴].

مبدل‌های حرارتی

مبدل‌های حرارتی کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف مانند نفت، گاز و نیروگاه‌ها دارند و افزایش بازده حرارتی این تجهیزات میلیارد‌ها دلار صرفه‌جویی اقتصادی را در پی دارد. در مبدل‌های حرارتی که با سیالات مرسوم کار می‌کنند با افزایش سرعت سیال ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد که نتیجه آن افزایش قابل ملاحظه در توان مصرفی پمپ است. نانوسیالات با بهبود چشم‌گیر خواص انتقال حرارتی سیال بدون نیاز به افزایش سرعت سیال افزایش انتقال حرارت، بازده مبدل و صرفه‌جویی در توان مصرفی پمپ را باعث می‌شوند. در نتیجه استفاده از نانوسیالات کاهش اندازه، وزن مبدل و صرفه‌جویی انرژی و هزینه را به همراه خواهد داشت.

حمل و نقل

صنایع حمل و نقل نیازمند افزایش کارایی سیالات خنک کننده و تکنولوژی سرمایش هستند. در حال حاضر سیالات خنک کننده موتور، روغن های موتور، سیالات انتقال قدرت و سایر سیالاتی که در دمای بالا کار می کنند خواص انتقال حرارت پایینی دارند. نانوسیالات با بهبود خواص انتقال حرارتی باعث کوچک تر و سبک تر شدن موتورها، پمپ ها، رادیاتورها و سایر اجزا و کاهش مصرف سوخت می شوند که این باعث کاهش هزینه ها و کاهش آلودگی محیط زیست می گردد.

سیستم های گرمایشی و تهویه مطبوع

نانوسیالات با افزایش انتقال حرارت بازده انرژی در سیستم های تهویه مطبوع و سردخانه را افزایش می دهند که این اثر باعث کاهش حجم این سیستم و افزایش فضای مفید ساختمان می گردد.

پزشکی

نانو ذرات مغناطیسی توانایی حمل دارو در بدن، تخریب سلول های سرطانی و ممانعت از تخریب بافت های سالم حین عمل جراحی را دارند. برخی از نانوسیالات نیز دارای خواص ضد باکتری هستند.

دیگر کاربردها

از دیگر موارد کاربرد نانوسیالات می توان به استفاده در تجهیزات سنگین نظامی جهت سرمایش مناسب این تجهیزات و نیز افزایش بازده ایمنی و اقتصادی سیستم های هسته ای اشاره کرد. همچنین نانوسیالات با افزایش انتقال حرارت در کلکتورهای خورشیدی بازده این سیستم ها را نیز افزایش می دهند.

تهیه نانو سیال

طرز تهیه نانوسیال اولین قدم کلیدی در کتربردی کردن این مفهوم برای تغییر راندمان انتقال حرارت می‌باشد. تهیه نانوسیال را که از طریق افزودن نانو ذرات به سیال پایه صورت می‌گیرد نباید مانند یک اختلاط ساده جامد مایع در نظر گرفت؛ زیرا تهیه نانوسیال مستلزم ایجاد شرایط خاص و ویژگی‌های است؛ برخی از این شرایط خاص عبارتند از یکنواخت بودن، پایدار بودن سوسپانسیون، توده‌ای شدن کم ذرات و عدم تغییر ماهیت شیمیایی سیال. برای رسیدن به چنین خواص ویژه‌ای از راه کارهای مختلف استفاده می‌شود؛ به عنوان مثال می‌توان از تغییر PH محلول سوسپانسیون، استفاده از مواد فعال سطحی، استفاده از مواد پراکنده‌ساز و ضد انعقاد ذرات و یا از ارتعاشات برای رسیدن به ویژگی‌های مذکور استفاده کرد. تمام این روش‌ها منجر به تغییر خواص سطحی ذرات معلق و ایجاد یک سوسپانسیون پایدار می‌شوند [۵۲].

روش تهیه یک مرحله‌ای

در روش تک مرحله‌ای ذرات مورد نظر به طور مستقیم در درون یک سیال بخار فلز مستقیماً به درون سیال پایه هدایت می‌شود تا به شکل نانو ذرات کندانس گردد این روش تهیه نانوسیال به روش پایین به بالا نیز معروف است. در این روش تهیه نانوسیال سطح نانو ذرات در معرض شرایط نامطلوبی قرار نگرفته و پوشش‌ها ناخواسته‌ای روی آن‌ها تشکیل نمی‌گردد. به همین دلیل نانو ذرات تهیه شده از این طریق تمیز می‌باشد و این مسئله مزیت روش یک مرحله‌ای نانوسیال است. تهیه نانوسیال با این روش اغلب همراه با مقداری متراکم شدن و تجمع ذرات در درون سیال می‌باشد [۵۵].

روش یک مرحله‌ای تهیه نانوسیال به دلایل فنی اغلب کمتر مورد استفاده محققین قرار گرفته است. در عوض در اغلب کارهای تحقیقاتی محققین در گزارش‌های خود به استفاده از روش دو مرحله‌ای جهت تهیه نانوسیال اشاره کرده‌اند. علت این مسئله نیز آسان‌تر بودن فرمولاسیون با

نانوپودرهای آماده و خریداری شده است.

روش تهیه دو مرحله‌ای

در روش دو مرحله‌ای برای تهیه نانوسیال می‌توان از انواع پودرها با اندازه‌های مختلف به راحتی استفاده کرد که این مسئله از ضعف‌های روش یک مرحله‌ای محسوب می‌شود. در روش دو مرحله‌ای ابتدا نانوذره مورد نظر یا نانولوله مورد نظر تهیه گردیده و سپس به سیال پایه افزوده می‌گردد. به نظر می‌رسد که این روش با توجه به اینکه می‌توان نانوذرات و نانولوله‌ها را بیشتر و اغلب آسان‌تر از روش تک مرحله‌ای تهیه کرد اقتصادی بوده و برای کاربردهای صنعتی بهتر می‌باشد. در روش دو مرحله‌ای نیز باید مسئله کلوخی و توده‌ای شدن و نیز چسبندگی نانو ذرات را در نظر گرفت. شکستن وضعیت توده‌ای و برگرداندن آن‌ها به وضعیت اولیه از اقدامات اساسی که در تهیه نانو سیال باید صورت بگیرد.

تجهیزات مختلفی را برای پراکنده‌سازی نانو ذرات در درون سیال می‌توان بکار برد. از جمله این تجهیزات حمام ماورای صوت، همزن با توان برشی بالا و هموژنایزر می‌باشند. زمان فرآوری نانوسیال و شدت همزن تاثیر مهمی بر پراکندگی نانو ذرات در درون سیال پایه دارند. پیوندهای ضعیف ایجاد شده در بین ذرات توده‌ای شده با اعمال نیرو شکسته می‌شود؛ با این حال نانو ذرات به شدت متمایل به توده‌ای شدن مجدد هستند؛ یکی از دلایل این مسئله نیروی واندروالس می‌باشد.

نانو ذراتی که به روش یک مرحله‌ای و یا به روش دو مرحله‌ای تهیه می‌گردند باید تا حد ممکن پایدار بوده و ذرات پراکنده شده در سیال تجمع پیدا نکرده و کلوخه و ته‌نشین نشوند. برای رسیدن به چنین وضعیت پایداری باید مسئله پایداری تعلیق نانو ذرات در سیال مورد توجه قرار بگیرد.

پایداری نانو ذرات در نانوسیال

در اندازه و مقیاس نانو اتم‌های سطحی به شدت افزایش پیدا می‌کنند. به عبارت دیگر خصوصیات شیمیایی و فیزیکی سطح اهمیت بسیار بیشتری نسبت به ساختار ماده پیدا می‌کنند؛

وقتی مواد نانو تحت تاثیر دمای محیط قرار می گیرند اتم های سطح ذرات نانو نسبت به اتم های داخلی از پایداری کمتری برخوردار می شوند و این ناپایداری سطحی ذره علت اصلی توده ای شدن ذرات می باشد.

ذرات معلق در یک محلول به خاطر وجود نیروهای واندروالس بین ذرات تمایل به توده ای شدن و بزرگ شدن دارند. برای پایدار کردن نانو ذرات و جلوگیری از کلوخه و توده ای شدن ذرات که سبب سنگینی و تسریع ته نشینی می گردد از روش های مختلف از جمله پایدارکننده ها، تغییر PH یا ایجاد نوسان ماورای صوت می توان استفاده کرد [۵۲].

تغییر PH سوسپانسیون

وقتی نانو ذرات در آب پخش می شوند رفتار کلی بر هم کنش آب و ذره به خواص سطح ذره بستگی دارد در مورد هر ذره یک PH معین تحت عنوان PH نقطه ایزوالکتریک وجود دارد که در این مقدار PH نیروهای دافعه بین ذرات صفر بوده و در نتیجه ذرات به هم می پیوندند. بنابراین وقتی PH مساوی یا نزدیک PH نقطه ایزوالکتریک باشد سوسپانسیون ناپایدار می باشد. با افزایش اختلاف PH نسبت به این نقطه نیروهای آب پوشی بین ذرات افزایش می یابد. در نتیجه تحرک نانو ذرات در سوسپانسیون افزایش یافته و موجب پایداری بیشتر نانوسیال می گردد [۵۲].

استفاده از فعال کننده سطح و پایدارکننده ها

یکی از روش های پایدارسازی سوسپانسون های حاوی نانو ذرات، استفاده از پایدارکننده های شیمیایی است؛ هرچند بعضی از محققین استفاده از این روش را مناسب نمی دانند. علت این مسئله این است که افزودن پخش کننده می تواند ضریب هدایت حرارتی سیال پایه را تحت تاثیر گذاشته و در نتیجه بهبود واقعی هدایت حرارتی با استفاده از نانو ذرات تحت الشعاع قرار گیرد. جز پایدارکننده سوسپانسیون که به نانوسیال افزوده می شود باید دارای ویژگی هایی باشد. از جمله این ویژگی ها می -

توان به سازگاری شیمیایی و عدم واکنش‌های شیمیایی با سیال پایه و نیز عدم تغییر PH، ایجاد خورندگی و... اشاره کرد.

انتخاب پایدارکننده مناسب اغلب بستگی به خواص ذرات و سیال مورد نظر دارد. به عنوان مثال پراکنده‌سازها و پایدارکننده‌های آبی برای سوسپانسیون‌های ذرات در آب مناسب می‌باشند.

نوسانات ماورای صوت می‌تواند موجب شکسته شدن کلوخه‌های ذرات شده و در نتیجه پایداری سوسپانسیون‌ها را افزایش دهد. در اکثر تحقیقات انجام گرفته بر روی خواص نانوسیالات برای پراکنده کردن بهتر نانو ذرات و پایداری بیشتر سوسپانسیون از نوسانات ماورای صوت استفاده شده است. در مورد سوسپانسیون‌های نانولوله‌های کربنی، نوسانات مافوق صوت ممکن است موجب شکسته شدن نانولوله‌های کربنی شود.

وقتی نانو ذرات به سیال پایه افزوده شدند به دلیل تشکیل کلوخه‌هایی از ذرات در عرض چند دقیقه ته‌نشین می‌شوند. به همین دلیل برای پخش کردن ذرات از نوسانات ماورای صوت استفاده می‌گردد، هرچند گزارش‌هایی مبنی بر چسبیدن ذرات در اثر طولانی شدن زمان نوسانات ماورای صوت وجود دارد.

ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات

در فرایندهای انتقال حرارت هدایتی و جابجایی یکی از مشخصه‌های موثر سیال ضریب هدایت حرارتی آن است به طوریکه یکی از دلایل مهم افزایش انتقال حرارت نسبت به سیال پایه را به افزایش شدید ضریب هدایت حرارتی ذرات نانوسیال ربط می‌دهند [۵۲].

عوامل موثر بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات

میزان افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال نسبت به سیال پایه به پارامترهای مختلفی از

جمله غلظت، اندازه نانوذرات و PH دارد.

غلظت نانوذرات

با افزایش غلظت نانوذرات عموماً ضریب هدایت حرارتی سیال افزایش می‌یابد. نسبت ضرایب هدایت حرارتی با جز حجمی نانو ذرات بصورت خطی افزایش می‌یابد اما این افزایش برای سیستم‌های مختلف با شیب‌های متفاوت صورت می‌گیرد. دلیل این مسئله این است که ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات هم به ضریب هدایت حرارتی سیال پایه و هم به ضریب هدایت حرارتی نانوذرات بستگی دارد.

PH

مقدار PH نانوسیال از دیگر عوامل موثر بر افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال نسبت به سیال پایه است. در تحقیقی انجام شده بر روی نانوسیال حاوی نانوذرات Al_2O_3 ، این نتیجه حاصل گردیده است که علیرغم افزایش ضریب هدایت حرارتی با افزایش جز حجمی نانوذرات شیب این افزایش برای PHهای مختلف متفاوت است [۵۶].

دما

دما یکی از عوامل موثر بر مقدار افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال است. یافته‌های تجربی حکایت از آن دارد که با افزایش دما اثر نانوذرات بر افزایش ضریب هدایت حرارتی نیز به شدت افزایش می‌یابد [۵۵، ۵۶].

در نانوسیالات تصور بر این است که مکانیزم اصلی افزایش ضریب هدایت حرارتی حرکت اتفاقی نانوذرات می‌باشد. فرض محتمل این است که این حرکت شبه براونی تابع دمای سیال است. بنابراین مقدار افزایش ضریب هدایت حرارتی با دما برای ذرات کوچکتر در دماهای بالاتر به مراتب بیشتر از افزایش ضریب هدایت حرارتی برای ذرات درشت‌تر است؛ در در دمای پایین حرکت شبه براونی از

اهمیت کمتری برخوردار بوده و لذا اختلاف افزایش ضریب هدایت حرارتی توسط ذرات کوچک‌تر و درشت‌تر کاهش پیدا می‌کند.

همان‌گونه که ذکر شد در نانوسیالات تصور بر این است که مکانیزم اصلی افزایش ضریب هدایت حرارتی حرکت انتقالی نانوذرات باشد. این تحرک برای ذرات ریزتر بیشتر از ذرات درشت‌تر پیش‌بینی شده و بنابراین میزان افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال توسط ذرات ریزتر بیشتر از ذرات درشت‌تر خواهد بود [۵۷].

همانند فعالیت‌های صورت گرفته برای بیان ریاضی خواص فیزیکی از جمله ضریب هدایت حرارتی مواد خالص یا مخلوط مواد اعم از مایعات، جامدات و گازها تلاش‌هایی نیز برای ارائه مدل‌های ریاضی در مورد خواص ترموفیزیکی نانوسیالات انجام شده است.

برای محاسبه و تخمین ضریب هدایت حرارتی سوسپانسیون‌های مایع جامد مدل‌های متداول زیادی وجود دارد که البته این مدل‌ها اغلب برای سوسپانسیون‌های حاوی ذرات میکرومتری یا درشت‌تر ارائه گردیده‌اند. با تغییر اندازه ذرات داخل سوسپانسیون از میکرومتر به نانومتر، به نظر می‌رسد که این مدل‌ها جوابگوی محاسبات نبوده و نتایج حاصل از آن‌ها توأم با خطای قابل ملاحظه‌ای باشد.

انتقال حرارت جابجایی در نانوسیالات

سیالاتی نظیر آب، روغن‌های معدنی و اتیلن گلیکول نقش زیادی در انتقال حرارت در فرایندهای صنعتی مانند فرایندهای تولید نیرو، فرایندهای شیمیایی، فرایندهای سرمایش و گرمایش و میکروالکترونیک بر عهده دارند. خواص ضعیف انتقال حرارت سیالات متداول نظیر سیالات مذکور اولین مانع جدی فشرده‌سازی و کارآمد مبدل‌های حرارتی است.

هدایت حرارتی برخی از جامدات نظیر فلزات چند صد برابر مایعات متداول حامل انرژی است.

بر این اساس ایده بهبود و افزایش هدایت حرارتی مایعات با افزودن ذرات جامد بسیار ریز شکل گرفته است. برخی از ذرات جامد مانند ذرات فلزی، غیرفلزی و پلیمری را می‌توان با مایعات مخلوط کرده و از آن‌ها سیال دوغابی شکل تهیه کرد؛ هرچند اگر سوسپانسیون‌های حاصل محتوی ذرات با ابعاد میلی‌متر یا میکرومتر باشند مشکلاتی نظیر گرفتگی مجاری حرکت سیال، ته‌نشین سریع و افت فشار بیش از حد ظاهر خواهد شد و در صورتی که ذرات دارای اندازه نانومتری باشد مشکلات فوق بسیار کم‌رنگ خواهند گردید.

در بررسی انتقال حرارت جابجایی هر دو فرایند جابجایی آزاد و جابجایی اجباری نانوسیالات مورد توجه محققین قرار گرفته است. افزودن مقداری نانوذره به یک سیال پایه علاوه بر اثری که روی ضریب هدایت حرارتی سیال پایه دارد، فرایندهای جابجایی آزاد و اجباری را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. این تاثیر می‌تواند به دلیل تغییر ضریب هدایت حرارتی، تغییر ظرفیت حرارتی، تغییر ویسکوزیته و نیز پدیده‌هایی نظیر حرکت براونی ذرات ایجاد شود [۵۲].

جابجایی اجباری

مقدار انتقال حرارت جابجایی اجباری نتیجه حرکت توده سیال می‌باشد؛ حرکت سیال می‌تواند بر اثر اعمال یک نیروی خارجی نظیر نیروی منتقل شده به سیال توسط پمپ ایجاد شود؛ به وسیله جابجایی اجباری یک سیال روی یک سطح با دمایی متفاوت با دمای سیال می‌تواند انتقال حرارت صورت گیرد [۵۳].

جابجایی طبیعی

مسئله انتقال حرارت جابجایی طبیعی را علاوه بر شیوه‌های آزمایشگاهی می‌توان از طریق تئوری و با استفاده از معادلات حاکم بر چنین فرآیندی نیز تجزیه و تحلیل کرد. برای چنین اموری دو دیدگاه وجود دارد. از یک نگاه می‌توان سوسپانسیون جامد-مایع را دوفازی در نظر گرفت؛ دیدگاهی

که در تجزیه و تحلیل سوسپانسیون‌های حاوی ذرات جامد با ابعاد میلی‌متر یا میکرومتر به کار می‌رود و از دیدگاه دیگری سوسپانسیون را می‌توان به عنوان یک سیال تک فازی در نظر گرفت. دیدگاه اول به فهم بهتر انتقال حرارت توسط فازهای جامد-مایع کمک می‌نماید. در دیدگاه دوم ذرات جامد و مایع در تعادل حرارتی و دارای سرعت‌های موضعی برابر فرض می‌شوند [۵۳].

جوشش

در جوشش اثرات گرمای نهان تبخیر حائز اهمیت می‌باشد. چون جوشش همراه با حرکت سیال است به عنوان نوعی از انتقال حرارت جابجایی طبقه‌بندی شده ولی دارای ویژگی‌های خاص خود می‌باشد؛ در جوشش و میعان می‌توان در ازای اختلاف دمای کم به نرخ انتقال حرارت زیاد دست یافت؛ گرمای نهان تبخیر، کشش سطحی و اختلاف دانسیته دو فاز پارامترهای موثر در فرآیند جوشش هستند که به دلیل اثرات نیروی شناوری و گرمای نهان تبخیر ضرایب انتقال حرارت جوشش به مراتب بزرگتر از مقادیر مربوط به جابجایی بدون تغییر فاز می‌باشند. بسیاری از مسایل مهندسی شامل پدیده جوشش می‌باشند. تبخیر در فصل مشترک جامد مایع را جوشش می‌نامند؛ این فرآیند در صورتی اتفاق می‌افتد که دمای سطح از دمای اشباع در فشار مایع بیشتر شود؛ در فرآیند جوشش حرارت از جامد به مایع منتقل می‌شود. در این فرآیند حباب‌های بخار روی سطح تشکیل شده رشد پیدا کرده و از آن جدا می‌شوند. رشد و دینامیک حباب‌های بخار به شکل پیچیده‌ای تابع دما، نوع سطح و خواص سیال می‌باشند. دینامیک تشکیل حباب حرکت سیال در نزدیکی سطح را به شدت تحت تاثیر قرار داده و ضریب انتقال حرارت را افزایش می‌دهد.

جوشش ممکن است در شرایط مختلفی روی دهد به عنوان مثال در جوشش استخری سیال ساکن بوده و حرکت آن در مجاورت سطح در نتیجه جابجایی آزاد و اغتشاش ناشی از رشد و جدایی حباب‌ها صورت می‌گیرد. برعکس در جوشش جابجایی اجباری جریان سیال توسط یک وسیله خارجی و همین‌طور در اثر جابجایی آزاد و اختلاط ناشی از حباب‌ها ایجاد می‌گردد؛ جوشش را می‌توان

براساس مادون اشباع یا اشباع بودن هم دسته‌بندی نمود؛ در جوشش مادون اشباع دمای مایع کمتر از دمای اشباع آن می‌باشد و حباب‌های تشکیل شده در سطح ممکن است در مایع میعان پیدا کنند؛ در جوشش اشباع دمای مایع کمی از دمای اشباع بیشتر است؛ در این حالت حباب‌های تشکیل شده در روی سطح بر اثر نیروهای شناوری به بالا رانده شده و از سطح آزاد مایع خارج می‌شوند. [۵۳].

- [1] Faghri, A. , "Heat pipe science and technology", Taylor & Francis, USA, 1995.
- [2] Chi, S.W., " Heat Pipe Theory and Practice", cGraw-Hill, USA, 1993.
- [3] H.Akachi, Structure of a heat pipe, US Patent(1990) Patent Number 4921041.
- [4] H Akachi, L-type heat sink. US Patent (1996) Patent Number 5490558.
- [5] R. S. Gaugler US Patent (1942) Patent Number 2350348.
- [6] P Charoensawan, S. Khandekar, M. Groll, and P. Terdtoon,
"Closed loop pulsating heat pipes –part A: Parametric experimental investigations," Applied Thermal Engineering, vol. 23 ,pp. 2009-2020, 2003.
- [7] S Khandekar, "Thermo-hydrodynamics of closed loop pulsating heat pipes, " PH.D., University of Stuttgart, Germany, 2004.
- [8] M. B. Shafii, A. Faghri, and Y. Zhang, "Thermal modeling of unlooped and looped Pulsating heat pipes", Journal of Heat Transfer, vol. 123, pp. 1159-1 172,2001 .
- [9] H. Jarnshidi, S. Arabnejad, M. B. Shafii, and Y. Saboohi, "Thermal characteristics Of closed loop pulsating heat pipe with nanofluids,"Journal of Enhanced Heat Transfer, vol. 18, pp. 221-237,2011.
- [10] H. Jarnshidi, S. Arabnejad, M. B. Shafii, and Y. Saboohi, and R. Rasoulia
"Experimental investigation of closed loop pulsating heat pipe with nanofluids," ASME 2009 Heat Transfer Summer Conference (HT2009), San Francisco, California, USA, 1, July, pp.675-683.
- [11] Noie, S. H., and Majideian G.R., " waste heat recovery using heat pipe heat exchanger (HPHE) for surgery rooms in hospitals", Applied Thermal Engineering, Elsevier Science, 2000, vol. 20, pp. 1271-1282.
- [12] Available:

http://wikipedia.org/wiki/Heat_pipe

- [13] M. B. Shafii, A. Faghri, and Y. Zhang, "Analysis of heat transfer in unlooped and looped pulsating heat pipes," *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, vol. 12, pp. 585-609, 2002.
- [14] X. Cui, J. Weng, and M. Groll, "Heat transfer performance model of pulsating heat pipe based on neural network, *Huagong Xuebao/Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, vol. 54, pp. 1319-1322, 2003.
- [15] R. T. Dobson, "Theoretical and experimental modelling of an open Oscillatory heat pipe including gravity, " *international Journal of Thermal Sciences*, vol. 43, pp. 113-119, 2004.
- [16] B. Holley and A. Faghri, "Analysis of pulsating heat pipe with capillary Wick and varying channel diameter, " *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48, pp. 2635-2651, 2005.
- [17] H. Shokouhmand, N. Gharib, and H. Bahrami, "Modeling of closed loop pulsating heat pipes by Neural Networks," 2006.
- [18] L. Su and H. Zhang, "Analysis of steady state model for loop pulsating heat pipe, " *Huagong Xuebao/Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, vol. 59, pp. 2718-2725, 2008.
- [19] H. B. Ma, B. Borgmeyer, P. Cheng, and Y. Zhang, "Heat transport Capability in an oscillating heat pipe, " *Journal of Heat Transfer*, vol. 130, 2008.
- [20] P. C. P. Sakulchangsattajai, T. Waowaew, P. Terdtoon, M. Murakami, "Mathematical modeling of closed-End pulsating heat pipes operating with a bottom heat mode," *Journal of Heat Transfer Engineering*, vol. 29, pp. 239-254, 2008.
- [21] P. H. Chen, Y. W. Lee, and T. L. Chang, "Predicting thermal instability in a closed loop pulsating heat pipe system," *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp. 1566-1576, 2009.
- [22] H. Z. Xian, X. M. Liu, D. Y. Liu, Y. P. Yang, and X. Z. Du, "The oscillating

- phase change heat transfer characteristics of oscillating heat pipe," kung Cheng Je Wu Li Hsueh Pao/Journal of Engineering Thermophysics, vol. 31, pp. 685-688, 2010.
- [23] D. Yuan, W. Qu, and T. Ma, "Flow and heat transfer of liquid plug and Neighboring vapor slugs in a pulsating heat pipe, "international Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 53, pp. 1260-1268, 2010.
- [24] P. Cheng and H. Ma, "A mathematical model of an oscillating heat pipe, "heat Transfer Engineering, vol. 32, pp. 1037-1046, 2011.
- [25] Akachi, H., and Polášek, F., " Thermal Control of IGBT Modules in Traction Drives by Pulsating Heat Pipes", Preprints 10th Int. Heat Pipe Conf, 1997, Vol. 3, pp. 8-12.
- [26] Rittidech, S., Dangeton, W., and Soponronnarit, S., "Closed-ended oscillating heat-pipe (CEOHP) air-preheater for energy thrift in a dryer", Applied Energy, 2005, vol. 81, pp. 198–208.
- [27] Yau, Y.H., "The use of a double heat pipe heat exchanger system for reducing energy consumption of treating ventilation air in an operating theatre-A full year energy consumption model simulation", Energy and Buildings, 2008, Vol. 40, pp. 917– 925.
- [28] Meena, P., Rittidech, S., Poomsa-ad, N., "Application of closed-loop oscillating heat-pipe with check valves (CLOHP/CV) air-preheater for reduced relative-humidity in drying systems", Applied Energy, 2007, Vol. 84 pp. 553–564.
- [29] Nuntaphan, A., Vithayasai, S., Vorayos, N., orayos, N., and Kiatsiriroat, T., "Use of oscillating heat pipe technique as extended surface in wire-on-tube heat exchanger for heat transfer enhancement", International Communications in Heat and Mass Transfer, 2010, Vol. 37, pp. 287–292.
- [30] Yang, F., Yuan, X., and Lin G., "waste heat recovery using heat pipe heat exchanger for heating automobile using exhaust gas", Applied Thermal Engineering, Elsevier Science, 2003, vol. 23, pp. 367-372.

- [31] Azad, E., and Geoola, F., "A design procedure for gravity-assisted heat pipe heat exchanger, Heat Recovery Systems", Elsevier Science, 1984, pp.101-111.

[۳۲] شکری، روح ا...، نوعی باغبان، سید حسین، "بررسی عملکرد یک مبادله کن لوله گرمایی

ترموسیفونی گاز-گاز در یک پایلوت آزمایشگاهی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی،

دانشکده مهندسی، سال ۸۴

- [33] O.T.Z. Kawara, A. Serizawa, M. Kohno, "Visualization of Flow in Heat Pipe by proton Radiography, "in proceeding of 24th Visualization and information Symposium, Osaka, Japan, 1996, pp. 23 -27 .

- [34] C. Y. Tsai, H. T. Chien, P. P. Ding, B. Chan, T. Y. Luh, and P. H. Chen, "Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance, " Materials Letters, vol. 58, pp.1461-1465, 2004.

- [35] H. B. Ma, C. Wilson, Q. Yu, K. Park, U. S. Choi, and M. Tirumala, "An experimental investigation of heat transport capability in a nanofluid oscillating heat pipe," Journal of Heat Transfer, vol. 128, pp. 1213 - 1216, 2006.

- [36] H. B. Ma, C. Wilson, B. Borgmeyer, K. Park, Q. Yu, S. U. S. Choi, and M. Tirumala, "Effect of nanofluid on the heat transport capability in an oscillating heat pipe, " Applied Physics Letters, vol. 88, 2006.

- [37] Y. H. Lin, S. W. Kang, and H. L. Chen, "Effect of silver nano-fluid on pulsating heat pipe thermal performance, "Applied Thermal Engineering, vol. 28, pp. 1312-1317, 2008.

- [38] S. Wang, Z. Lin, W. Zhang, J. Chen, and Y. Tang, "Heat transport characteristics of an oscillating heat pipe with Al₂O₃ nano-fluid," 2010, pp.331-335.

- [39] J. Qu, H. y. Wu, and P. Cheng. "Thermal performance of an oscillating heat pipe with Al₂O₃-water nanofluids, "International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 37, pp. 111-115, 2010.

- [40] M. M. Maziar Mohammadi, A.R. Ghahremani, and M.B. Shafii, "Experimental study of the effects of ferrofluid on thermal performance of a pulsating heat pipe," presented at the Proceeding of ICNMM 2011-9th International ASME Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, University of Alberta in Edmonton, Canada.
- [41] Y. Ji, H. Ma, F. Su, and G. Wang, "Particle size effect on heat transfer performance in an oscillating heat pipe," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 35, pp. 724-727, 2011.
- [42] Q. M. Li, J. Zou, Z. Yang, Y. Y. Duan, and B. X. Wang, "Visualization of two-phase flows in nanofluid oscillating heat pipes," *Journal of Heat Transfer*, vol. 133, 2011.
- [43] J. Qu and H. Wu, "Thermal performance comparison of oscillating heat pipes with SiO₂/water and Al₂O₃/water nanofluids," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 50, pp. 1954-1962, 2011.
- [44] R. R. Riehl and N. D. Santos, "Water-copper nanofluid application in an open loop pulsating heat pipe," *Applied Thermal Engineering*, vol. 42, pp. 6-10, 2012.
- [45] نوعی باغبان، س. ح. خشنودی، م.، "انتقال حرارت اصول و کاربرد"، جلد ۱ و ۲، مشهد، ۱۳۷۲
- [46] Incropera, F.P., and DeWitt, D.P., "Fundamentals of heat Transfer", John Wiley and sons Inc., Toronto, 1996.
- [47] I. D. M. A. Rosen, EXERGY : Energy, Environment and Sustainable Development, Oxford: Elsevier, 2012 .
- [48] Bejan A. Tsatsaronis G, Moran M. Thermal Design and Optimization. Wiley & Sons, Dec 12, 1995- 560 pages
- [49] Dincer I, Rosen M . A. EXERGY: Energy, Environment and Sustainable Development. Elsevier. Amsterdam . 2007

[50] Exergy transfer effectiveness on heat exchanger for finite pressure drop
Original Research Article
Energy, Volume 32, Issue 11, November 2007, Pages 2110-2120
Shuang-Ying Wu, Xiao-Feng Yuan, You-Rong Li, Lan Xiao

[51] D.A. Reay, P.A. Kew, (2006), "Heat Pipes", Vol.5, Elsevier

[۵۲] دکتر سید غلامرضا اعتماد، مهندس محمد نصیری و مهندس محمد حجت، نانوسیال

محیط جدید انتقال حرارت، انتشارات ارکان دانش، زمستان ۱۳۸۶

[53] F.P.Incropera, D.P. Dewitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer Fifth ed., John wiley and Sons Inc, 2002.

[54] S. U. S. Choi, "Enhancing thermal conductivity of fluids withnanoparticles," 1995, pp. 99-105.

[55] V. Trisaksri and S. Wongwises, "Critical review of heat transfer Characteristics of nonofluids," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.11, pp. 512-523,2007.

[56] H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, F. Ai, and Q. Wu, "Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles," Journal of Applied Physics, vol. 91. pp. 4568-4572,2002.

[57] S. K. Das, N. Putra, P. Thiesen, and W. Roetzel, "Temperature dependence Of themal conductivity enhancement for nanofluids,"Journal of Heat Transfer. vol. 125, pp. 567-574, 2003.

Abstract:

Using the energy is increasing by growing population around the world in recently decades. Also, human interest in accessing new energy such as wind, bio, water, solar energy and etc. is reasonable but reduction the energy consumption must consider simultaneous. One of the new methods related to produce energy from existence that doesn't use them. Also, environment pollution and supply the energy in future arise as a serious critical and because of that consumptive fuel cost in Iran won't be cheap. Although saving and recovering are good solutions for resolving this problem. On the other hand, industries try to find equipment that addition to high productivity have special advantages from economic points of view. It should be note that thermal recovers by pulsating heat pipe is one of the important methods. In this investigation to study Experimental close pulsating heat pipe efficiency in heat exchanger ,Design method and construction of a prototype heat recovery exchanger for heating air by pulsating heat pipes is investigated. In this experiment used one row of the pulsating heat pipe with filling ratios 40% of ethanol and Silver nanofluids working fluid. In this situation (condition), smoke mass flow considered constant also, affection of air mass flow changes and increasing the heat of the entry smoke upon exchanger function is considered. And analyze it from the point of view of energy and exergy has been studied.. The results show that increasing the air mass flow rate increases the temperature difference between the inlet and outlet ducts to reduce the temperature difference between warm and cold air ducts. On the other hand, increasing the temperature of the inlet duct smoke also increases the temperature difference in both of ducts. Increasing the mass flow rate and inlet temperature of Smoke will increases the heat flux on both of ducts. And also increase the efficiency of the system will increase the mass flow rate but rise of the temperature does not necessarily result in increased efficiency. also use of nanofluids, resulting in improved thermal performance of the system. The maximum increases for nanofluid in 2.5 rates of mass flow and at 130 °C inlet temperature and at the rate 11% will be occurred.

Key words: Heat exchanger-heat pipe-pulsating heat pipe



Shahrood University

Department of Mechanical Engineering

**Experimental study and performance improvement
of pulsating heat pipe for heat recovery**

Written by

Reza Khoddami

Supervisor

Ali abbasnejad

September 2014