



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

بررسی تجربی انتقال حرارت چگالشی جریان R-134a داخل لوله موجدار پیچشی با شیب‌های مختلف

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

داود خوئینی

اساتید راهنما

دکتر احمد صابونچی

دکتر محمدعلی اخوان بهابادی

لا اله الا الله محمد رسول الله



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

بررسی تجربی انتقال حرارت چگالشی جریان R-134a داخل لوله موجدار پیچشی با شیب‌های مختلف

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

داود خوئینی

اساتید راهنما

دکتر احمد صابونچی

دکتر محمدعلی اخوان بهابادی

تشکر و قدردانی:

با عنایت به گفته‌ی امیر مومنان، حضرت علی (علیه السلام) که فرمودند:

« من علمنی حرفاً، فقد سیرنی عبداً »

از زحمات و راهنمایی‌های اساتید گرانقدر، جناب آقای دکتر احمد صابونچی و جناب آقای دکتر محمدعلی اخوان بهابادی که بنده را در تمامی مراحل انجام این پایان‌نامه یاری فرمودند، صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایم. از جناب آقای دکتر محمدرضا سلیم‌پور که با نظرات خود اینجانب را در انجام این پایان‌نامه یاری نمودند قدردانی و تشکر می‌نمایم. همچنین از جناب آقای امیر نوروز، تکنسین آزمایشگاه ترمودینامیک دانشکده مکانیک دانشگاه تهران، که در ساخت دستگاه آزمایش همکاری نمودند، سپاسگزاری می‌نمایم.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع
این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی
اصفهان است.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
هشت	فهرست مطالب
۱	چکیده
	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱ افزایش انتقال حرارت در چگالش جابجایی اجباری داخل لوله
۳	۲-۱ انتقال حرارت افزایشی
۵	۳-۱ روش های افزایش انتقال حرارت
۵	۱-۳-۱ روش های غیر فعال
۱۰	۲-۳-۱ روش های فعال
۱۱	۴-۱ مزایای افزایش انتقال حرارت
۱۲	۵-۱ قابلیت بکارگیری سطوح افزایشی
۱۳	۶-۱ مبردها
۱۳	۱-۶-۱ مبردهای آزئوتروپیک
۱۳	۲-۶-۱ مبردهای زنوتروپیک
۱۳	۳-۶-۱ تغییر به مبردهای جدید
	فصل دوم: معرفی پروژه
۱۵	۱-۲ تعریف مساله
۱۶	۲-۲ اهداف این پژوهش
۱۷	۳-۲ روش اجرای طرح
	فصل سوم: مروری بر تحقیقات انجام شده
۱۸	۱-۳ چگالش بخار داخل لوله های صاف
۱۹	۱-۱-۳ چگالش بخار داخل لوله های صاف افقی
۲۳	۲-۱-۳ چگالش بخار داخل لوله های صاف با شیبهای مختلف
۲۷	۲-۲ افزایش انتقال حرارت در چگالش بخار خارج لوله (لوله های افقی با فین یکپارچه بیرونی)
۲۷	۱-۲-۳ چگالش پوشاننده
۲۹	۲-۲-۳ مدل های نظری برای تعیین ضرایب انتقال حرارت چگالشی
۳۱	۳-۲-۳ ضرایب انتقال حرارت به دست آمده از روش تجربی
۳۲	۳-۳ افزایش انتقال حرارت در چگالش بخار داخل لوله (بجز استفاده از لوله های موجدار پیچشی)
۳۳	۱-۳-۳ گزارش های تخصصی در مورد انتقال حرارت دو فاز
۳۳	۲-۳-۳ افزایش انتقال حرارت در چگالش بخار داخل لوله با استفاده از سیم پیچ
۳۴	۳-۳-۳ افزایش انتقال حرارت در چگالش بخار داخل لوله توسط نوار پیچشی
۳۶	۴-۳-۳ لوله های فیندار داخلی
۳۹	۵-۳-۳ وسایل افزایشی قابل جابجایی

۴۰	انتقال حرارت چگالشی داخل لوله میکروفیندار	۶-۳-۳
۴۳	افزایش انتقال حرارت با استفاده از لوله‌های موجدار پیچشی	۴-۳
۴۳	افزایش انتقال حرارت چگالشی روی سطح خارجی لوله‌های موجدار پیچشی	۱-۴-۳
۴۶	افزایش انتقال حرارت جریان تک فاز با استفاده از لوله‌های موجدار پیچشی	۲-۴-۳
۵۰	افزایش انتقال حرارت چگالشی و جوششی درون لوله‌های موجدار پیچشی	۳-۴-۳
۵۲	روابط تجربی محاسبه ضرایب انتقال حرارت لوله موجدار پیچشی	۴-۴-۳
۵۶	نتیجه گیری	۵-۴-۳

فصل چهارم: دستگاه آزمایش

۵۷	ملاحظات طراحی	۱-۴
۵۸	ساختار دستگاه آزمایش	۲-۴
۶۰	کندانسور اصلی	۱-۲-۴
۶۰	پیش کندانسور و کندانسور ثانویه	۲-۲-۴
۶۱	روتامتر	۳-۲-۴
۶۱	دستگاه اندازه گیری دما	۴-۲-۴
۶۱	فرآیند ساخت لوله موجدار پیچشی	۳-۴
۶۲	طراحی و ساخت فیکسچر جهت ایجاد شیارهای پیچشی بر روی لوله	۱-۳-۴
۶۳	روش ساخت و مشخصات هندسی لوله موجدار پیچشی	۲-۳-۴

فصل پنجم: دستورالعمل آزمایش و جمع آوری داده‌ها

۶۶	عملکرد	۱-۵
۶۶	کالیبراسیون وسایل اندازه گیری	۲-۵
۶۷	تعیین نشتی و شارژ سیستم	۳-۵
۶۸	دقت اندازه گیری	۴-۵
۶۹	دستورالعمل آزمایش	۵-۵
۷۰	جمع آوری داده‌ها	۶-۵
۷۱	تکرار پذیری آزمایش	۷-۵
۷۱	شیوه محاسبه	۸-۵
۷۲	محاسبه ضریب انتقال حرارت	۱-۸-۵
۷۳	محاسبه کیفیت بخار	۲-۸-۵

فصل ششم: تشریح نتایج

۷۵	مقدمه	۱-۶
۷۶	تغییرات درجه حرارت دیواره	۲-۶
۷۹	اثر کیفیت بخار	۳-۶
۸۲	اثر سرعت جرمی	۴-۶
۸۶	اثر تغییر شیب لوله	۵-۶

- ۶-۶ شیب مناسب جهت ماکزیمم شدن انتقال حرارت چگالشی ۹۰
- ۶-۷ رابطه‌ی تجربی جدید عدد ناسلت بر اساس نتایج آزمایشهای حاضر ۹۱
- ۶-۸ مقایسه داده‌های مطالعه حاضر با روابط لوله‌های موجدار پیچشی افقی ۹۲

فصل هفتم: نتیجه‌گیری

- ۷-۱ رفتار انتقال حرارت جریان چگالشی داخل لوله موجدار پیچشی با شیبهای مختلف ۹۳
- ۷-۲ پیشنهادها برای تحقیقات آتی ۹۵

پیوست‌ها

- الف - شرایط آزمایشی لوله موجدار پیچشی در شیبهای مختلف ۱۰۲
- ب - نمونه محاسبات ۱۰۹
- ج - تحلیل خطای نتایج آزمایشگاهی ۱۱۳

فهرست اشکال

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۱- (الف) عملکرد مقطع پوشش متخلخل برای جوشش (ب) ذرات متصل شده به سطح جهت افزایش چگالش لایه‌ای ۵
- شکل ۱-۲- (الف) زبری داخل لوله (ب) مقطع سطح زبر جهت جوشش هسته‌ای (ج) سیم پیچ ۶
- شکل ۱-۳- سطوح افزایشی گازها (الف) پره صفحه لوله‌ای (ب) پره‌های مورد استفاده در مبدل‌های حرارتی اتومبیل (ج) پره مورد استفاده در لوله‌های تخت شده (د) پره‌های موجدار مورد استفاده در بازیه‌های دوار ۷
- شکل ۱-۴- (الف) پره‌های یکپارچه در سطح خارجی لوله (ب) پره‌های ماریچ داخلی (ج) سطح مقطع لوله‌های چندگانه با پره داخلی (د) لوله دارای یک قطعه ستاره آلومینیومی ۷
- شکل ۱-۵- (الف) ابزار قابل جابجایی دوکی شکل (ب) قطعات دیسکی قابل جابجایی درون لوله (ج) سیم پیچ قابل جابجایی درون لوله. (د) اریفیس در ورودی میکروکانالها ۸
- شکل ۱-۶- سه نوع از وسایل ایجاد کننده جریان چرخشی (الف) نوار پیچشی (ب) پره‌های ماریچ (ج) میکسر استاتیکی ۸
- شکل ۱-۷- (الف) مبدل حرارتی با لوله‌های ماریچ. (ب) میکروکانالهای چرخشی ۹
- شکل ۱-۸- (الف) نحوه عملکرد کشش سطحی در تخلیه مایعات (ب) لوله شیاردار برای استفاده در چگالش در جهت عمودی. (ج) طرح یک محفظه بخار (استفاده از شبکه مس همراه نانو لوله‌های کربنی) ۱۰
- شکل ۱-۹- هندسه تویی رسوب‌زدا ۱۱
- شکل ۱-۱۰- روشهای مورد استفاده جهت ساخت لوله‌های با افزایش دوگانه (الف) پره‌های ماریچ در سطح داخلی و پره‌های یکپارچه در سطح خارج (ب) نوارهای پیچشی داخل لوله و پره‌های یکپارچه در سطح خارج (ج) پره‌های محوری در سطح داخلی و سطح پوشش داده (سطح متخلخل برای جوشش) در سطح خارج (د) نوارهای موجدار پیچیده و جوش داده شده ۱۲
- شکل ۱-۳- شکل شماتیک الگوهای مختلف جریان چگالشی در مطالعه ونگ و همکارانش ۲۵
- جدول ۱-۳: مقادیر پارامترهای C و n در معادله ۳-۳۰ ۲۶
- شکل ۳-۲ چگالش پوشاننده بر روی لوله افقی با فین یکپارچه بیرونی ۲۷
- شکل ۳-۳ تاثیر نوار متخلخل خشک کن بر چگالش پوشاننده ۲۹
- شکل ۳-۴ نمونه پروفیل فین با شعاع راس کوچک و افزایش شعاع در جانب برای چگالش بر سطح فین ۳۰
- شکل ۳-۵ تاثیر فاصله بین فینها بر ضریب افزایش انتقال حرارت در لوله‌های فین دار خارجی ۳۲
- شکل ۳-۶ مقایسه ناسلت موضعی در لوله موجدار پیچشی و لوله صاف در مطالعه باربا و همکاران ۴۷
- شکل ۴-۱-۱ دیگرام شماتیک سیستم آزمایشگاهی ۵۹
- شکل ۴-۲-۲ نمایی از دستگاه آزمایش و کندانسوری که آزمایشات بر روی آن انجام گردید. ۵۹
- شکل ۴-۳-۳ سطح مقطع کندانسور آزمایش - محل ترموکوپلهای متصل شده (جوش نقطه‌ای) به سطح لوله موجدار پیچشی ۶۰
- شکل ۴-۴-۴ نمای ایزومتریک دستگاه ساخته شده جهت ایجاد شیارهای پیچشی روی سطح لوله ۶۳
- شکل ۴-۵-۵ نمای ایزومتریک دمونتاز دستگاه ساخته شده جهت ایجاد شیارهای پیچشی روی سطح لوله ۶۴
- شکل ۴-۶-۶ سه نمای روبرو، بالا و برش خورده جانبی دستگاه ساخته شده به همراه اندازه‌گذارها ۶۴
- شکل ۴-۷-۷ تصویر و مشخصات هندسی لوله موجدار پیچشی ۶۵
- شکل ۴-۱-۵ کالیبراسیون ترموکوپلها ۶۷

- شکل ۵-۲ نمای شماتیک کمپرسور، پمپ خلأ، کپسول گاز R-134a ۶۸
- شکل ۵-۳ تکرار پذیری آزمایش در شرایط مشابه ۷۱
- شکل ۵-۴ موقعیت نقاط مختلف تعریف شده در معادلات ۵-۸ تا ۵-۱۱ در دستگاه آزمایش ۷۴
- شکل ۶-۱ تغییرات درجه حرارت دو نیمه‌ی بالا و پایین دیواره لوله داخلی کندانسور آزمایش شده ۷۶
- شکل ۶-۲ تغییرات درجه حرارت دو نیمه‌ی بالا و پایین دیواره لوله داخلی کندانسور آزمایش شده ۷۷
- شکل ۶-۳ تغییرات درجه حرارت دو نیمه‌ی بالا و پایین دیواره لوله داخلی کندانسور آزمایش شده ۷۷
- شکل ۶-۴ تغییرات درجه حرارت دو نیمه‌ی بالا و پایین دیواره لوله داخلی کندانسور آزمایش شده ۷۸
- شکل ۶-۵ تغییرات درجه حرارت دو نیمه‌ی بالا و پایین دیواره لوله داخلی کندانسور آزمایش شده ۷۸
- شکل ۶-۶ مقایسه ضرایب انتقال حرارت در لوله موجدار پیچشی با شیبهای مختلف و سرعت جرمی $kg/m^2 s$ ۰.۱۲/۸۷ ۷۹
- شکل ۶-۷ مقایسه ضرایب انتقال حرارت در لوله موجدار پیچشی با شیبهای مختلف و سرعت جرمی $kg/m^2 s$ ۰.۱۴۲/۴۲۴ ۸۰
- شکل ۶-۸ مقایسه ضرایب انتقال حرارت در لوله موجدار پیچشی با شیبهای مختلف و سرعت جرمی $kg/m^2 s$ ۰.۱۹۷/۸۳۵ ۸۰
- شکل ۶-۹ مقایسه ضرایب انتقال حرارت در لوله موجدار پیچشی با شیبهای مختلف و سرعت جرمی $kg/m^2 s$ ۰.۲۵۳/۲۴۶ ۸۱
- شکل ۶-۱۰ تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار برای لوله موجدار با شیب 90° - و سرعتهای جرمی مختلف ۸۳
- شکل ۶-۱۱ تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار برای لوله موجدار با شیب 60° - و سرعتهای جرمی مختلف ۸۳
- شکل ۶-۱۲ تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار برای لوله موجدار با شیب 30° - و سرعتهای جرمی مختلف ۸۴
- شکل ۶-۱۳ تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار برای لوله موجدار با شیب 0° و سرعتهای جرمی مختلف ۸۴
- شکل ۶-۱۴ تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار برای لوله موجدار با شیب 30° + و سرعتهای جرمی مختلف ۸۵
- شکل ۶-۱۵ تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار برای لوله موجدار با شیب 60° + و سرعتهای جرمی مختلف ۸۵
- شکل ۶-۱۶ تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار برای لوله موجدار با شیب 90° + و سرعتهای جرمی مختلف ۸۶
- شکل ۶-۱۷ تغییرات ضریب انتقال حرارت با شیب کندانسور آزمایش در کیفیت بخار $x = 0.5$ و سرعتهای جرمی مختلف .. ۹۰
- شکل ۶-۱۸ مقایسه ضرایب انتقال حرارت آزمایشگاهی با مقادیر قابل پیش‌بینی توسط رابطه جدید (۶-۲) ۹۱
- شکل ۶-۱۹ مقایسه مقادیر آزمایشگاهی ضرایب انتقال حرارت لوله موجدار پیچشی افقی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط لاهالرچا و وانگویز [۳ و ۴] ۹۲

فهرست علائم

q	شار حرارتی شعاعی	A	سطح
r_a	شعاع راس فین، شکل ۳-۴	A_R	سطح لوله
S	مساحت	B	پارامتر تعریف شده در معادله (ج-۲۱)
T	درجه حرارت آب خنک کن	C	پارامتر تعریف شده در معادله (ج-۲۲)
t	زمان	C_P	ظرفیت گرمای ویژه
t	درجه حرارت دیواره لوله	D	قطر لوله
t	درجه حرارت مبرد	E	نسبت افزایش
t_{wi}	درجه حرارت متوسط دیواره داخلی	e	ضخامت سیم پیچ، فین
t_{wo}	درجه حرارت متوسط دیواره خارجی	e	ارتفاع زبری
t_{ws}	درجه حرارت موضعی دیواره خارجی	F_1, F_2, \dots	پارامتر تصحیح
U	ضریب انتقال حرارت کلی	F_t	فاکتور رابطه سرعت مماسی
U	سرعت	F_{tt}	فاکتور رابطه اثر پره
U_R	خطای اندازه گیری	f	ضریب اصطکاک
U_{V_i}	خطای متغیر	G	سرعت جرمی
u_V	سرعت متوسط بخار در ورودی مبرد	g	شتاب جاذبه
V_f	حجم فضای آزاد جریان	h	ضریب انتقال حرارت جابجایی
V_i	متغیر مستقل	h	انتالپی
W_t	ضخامت دیواره	h_{fg}	انتالپی نهان تبخیر
X_{tt}	پارامتر مارتینلی	K	ضریب هدایت حرارتی
نمادهای یونانی			
α	زاویه کندانسور نسبت به افق	L	طول مبدل حرارتی (لوله کندانسور)
β	زاویه ماریپیچ شیارهای لوله موجدار پیچشی	L	طول کل ناحیه تحت چگالش
δ	ضخامت لایه چگالش	m	جرم
δ_{tt}	پهنای نوار پیچیده شده	\dot{m}	دبی جرمی
η	راندمان سطح	Nu_b	عدد ناسلت چگالش آزاد
μ	ویسکوزیته دینامیک	Nu_f	عدد ناسلت چگالش اجباری
ν	حجم مخصوص	n	تعداد فین
ξ	پارامتر بکار رفته در معادله (۳-۴۱)	n	ثابت بکار رفته در معادله (۳-۳۰)
ρ	چگالی	P	فشار استاتیک
σ	کشش سطح	ΔP	افت فشار
τ	تنش برشی	P	گام فین، سیم پیچ
		P	گام موجهای پیچشی لوله موجدار
		Q	میزان انتقال حرارت

in	ورودی	v	ویسکوزیته سینماتیک
m	متوسط	Φ_m	زاویه چرخش، شکل ۳-۴
n	نامی	x	کیفیت بخار
o	خارجی	Δx	تغییر در کیفیت بخار
o	خروجی		<u>زیر نویس ها</u>
out	خروجی	AC	کندانسور ثانویه
p	لوله صاف	av	متوسط
pc	پیش کندانسور	B	تحتانی
r	ریشه فین	c	بحرانی
R	مبرد	c	خنک
S	اشباع	e	معادل
su	سوپر هیت	eq	معادل
TS	کندانسور اصلی	f	پره
w	آب خنک کن	f	مایع
W	دیواره	f	ناحیه پوشیده شده
	<u>اعداد بی بعد</u>	fr	اصطکاکی
$Fr = \frac{G^2}{gD\rho^2}$	عدد فرود	g	گاز
$Re = \frac{GD}{\mu}$	عدد رینولدز	H	هیدرولیکی
$We = \frac{G^2 D}{\rho \sigma}$	عدد وبر	h	لوله افقی
$Nu = \frac{hD}{k}$	عدد ناسلت	i	ورودی
$Pr = \frac{\mu C_P}{k}$	عدد پراندتل	i	داخلی
		i	سطح میان فازی

چکیده

در این تحقیق، مطالعه آزمایشگاهی بر روی ضرایب انتقال حرارت چگالشی جریان R-134a داخل لوله موجدار پیچشی با شیبهای مختلف لوله نسبت به افق، α ، جهت بررسی یکی از روشهای افزایش انتقال حرارت چگالشی صورت گرفته است (α زاویه بین بردار سرعت مبرد و سطح افقی در جهت مثلثاتی است). دستگاه مورد استفاده در این بررسی، یک سیکل تبرید تراکم بخار مجهز به کلیه وسایل اندازه‌گیری مورد نیاز می‌باشد. این سیستم شامل یک کندانسور دو لوله‌ای از نوع جریان مخالف می‌باشد که کندانسور اصلی نامیده می‌شود. در لوله خارجی این کندانسور، آب خنک‌کن جریان می‌یابد در حالیکه که در لوله داخلی (لوله موجدار پیچشی)، مبرد R-134a چگالیده می‌شود. در این پژوهش، داده‌های تجربی طی فرآیند چگالش مبرد R-134a در هفت شیب متفاوت کندانسور آزمایش در محدوده زاویه ای $+90^\circ$ تا -90° و برای چهار سرعت جرمی متفاوت مبرد، جمع‌آوری گردید. تحلیل داده‌ها نشان داد که تغییر شیب لوله تأثیر زیادی بر انتقال حرارت چگالشی دارد. در سرعت جرمی پایین مبرد و کیفیت پایین بخار، بالاترین ضریب انتقال حرارت چگالشی که مربوط به شیب $\alpha = +30^\circ$ می‌باشد حدوداً $1/41$ برابر پایین‌ترین ضریب انتقال حرارت چگالشی که در شیب $\alpha = -90^\circ$ اتفاق می‌افتد، می‌باشد. همچنین مشخص شد که در تمامی سرعتهای جرمی، بالاترین ضریب انتقال حرارت میانگین در شیب $\alpha = +30^\circ$ اتفاق می‌افتد. با توجه به نتایج، یک رابطه تجربی جدید جهت پیش بینی ضریب انتقال حرارت چگالشی در لوله موجدار پیچشی در کیفیتهای بخار مختلف، سرعتهای جرمی مختلف و شیبهای مختلف لوله، ارائه گردید.

کلمات کلیدی: ۱- افزایش انتقال حرارت ۲- جریان چگالشی ۳- لوله موجدار پیچشی ۴- شیب لوله.

فصل اول

مقدمه

۱-۱ - افزایش انتقال حرارت در چگالش جابجایی اجباری داخل لوله

مسائل مربوط به بهینه‌سازی مبدل‌های حرارتی همواره محققان بسیاری را به خود مشغول داشته است. در سالهای اخیر توجه زیادی به مبدلهایی با سطوح فشرده معطوف شده است، در نتیجه مبدلهایی با وزن کمتر، کوچکتر و ارزاتر طراحی شده است. کندانسورها یکی از پر کاربردترین مبدل‌های حرارتی هستند. در حقیقت فرآیند چگالش درون لوله‌ای در تجهیزات گوناگونی از قبیل نیروگاههای بخار، کارخانه‌های صنایع شیمیایی، سیستم‌های تبرید و تهویه مطبوع، رخ می‌دهد. به دلیل محدودیتهای منابع انرژی و ضرورت بقای انرژی، بهینه‌سازی مبدل‌های حرارتی به خصوص کندانسورها، خیلی مهم هستند و طراحی مبدل حرارتی اهمیت زیادی در صرفه‌جویی انرژی دارد. بنابراین روشهای مختلفی جهت افزایش انتقال حرارت در کندانسورها پیشنهاد شده است [۱، ۲]. این روشها در ادامه به طور مفصل بحث و بررسی شده‌اند و در اینجا در مورد مزایای استفاده از لوله‌های موجدار پیچشی که در مطالعه حاضر از آن استفاده شده است، بحث می‌شود.

لوله‌های موجدار پیچشی نوعی از لوله‌ها هستند که دارای موجهای پیچشی روی سطح خود هستند که با ایجاد جریان چرخشی و محدود کردن رشد لایه مرزی حرارتی، سبب افزایش انتقال حرارت و افزایش جزیی ضریب اصطکاک می‌شوند [۳، ۴]. لوله‌های موجدار پیچشی به دلایل: الف) سهولت ساخت ب) محدودیت رسوبگذاری ج) افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت در مقابل افزایش جزیی افت فشار، نسبت به سایر سطوح زبر از قبیل: لوله‌های

فیندار، لوله‌ها با سطوح زبر برجسته، سیم پیچ داخل لوله و لوله با شیارهای متقاطع، دارای برتری هستند [۵]، این امر سبب شده این نوع لوله‌ها به طور وسیعی در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرند و تحقیقاتی درباره عملکرد آنها به انجام رسیده است. مکانیزم اصلی انتقال حرارت چگالشی لوله‌های موجدار پیچشی مانند سایر وسایل افزایش دهنده انتقال حرارت درون لوله‌ای، شامل چهار مکانیزم زیر که از فاکتورهای مهم افزایش انتقال حرارت در لوله‌های موجدار پیچشی است، می‌باشد [۳]:

۱. جلوگیری از رشد لایه مرزی و افزایش اغتشاشات در جریان

۲. افزایش سطح موثر انتقال حرارت

۳. ایجاد جریان چرخشی

۴. محدودیت و یا حذف رسوب گذاری

۱-۲- انتقال حرارت افزایشی

امروزه موضوع کاربرد انتقال حرارت افزایشی^۱ در مبدل‌های حرارتی به طور جدی دنبال می‌شود. صنایع تبرید، اتومبیل سازی و ... معمولاً از سطوح افزایشی در مبدل‌های حرارتی خویش بهره می‌برند. اگر چه می‌توان از سطوح افزایشی در تمام مبدل‌های حرارتی استفاده کرد ولی باید دید این استفاده به صرفه است یا خیر.

سطح افزایشی انتقال حرارت، دارای هندسه‌ای خاص است که مقدار hA بالاتری بر واحد سطح مبنا نسبت به سطح صاف ایجاد می‌کند. نسبت افزایش (E) عبارت است از نسبت hA سطح افزایشی به سطح صاف، یعنی:

$$E = \frac{hA}{(hA)_p} \quad (1-1)$$

با در نظر گرفتن یک مبدل حرارتی جریان مخالف، میزان انتقال حرارت از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = UA \cdot \Delta T_m \quad (2-1)$$

جهت نشان دادن فواید افزایش سطح، رابطه فوق را در طول کل لوله (L) ضرب و تقسیم می‌کنیم:

$$Q = \frac{UA}{L} L \cdot \Delta T_m \quad (3-1)$$

عبارت $\frac{L}{UA}$ مقاومت حرارتی کل بر واحد طول لوله بوده و توسط رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{L}{UA} = \frac{L}{\eta_1 h_1 A_1} + \frac{L t_w}{k_w A_w} + \frac{L}{\eta_2 h_2 A_2} \quad (4-1)$$

^۱ Enhanced heat transfer

^۲ Enhancement ratio

که زیر نویسه‌های ۱ و ۲ مربوط به سیالهای ۱ و ۲ می‌باشد. η راندمان سطح بوده و برای سطوح گسترده^۱ به کار می‌رود. جهت سادگی، در رابطه (۴-۱) از مقاومت حرارتی رسوب صرف‌نظر شده که می‌تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد. با افزایش $\frac{UA}{L}$ عملکرد مبدل حرارتی بهبود می‌یابد. برای ازدیاد هر کدام از $\frac{UA}{L}$ ها، می‌توان از سطوح افزایشی استفاده نمود. این عمل، مقاومت حرارتی بر واحد طول لوله ($\frac{L}{UA}$) را کاهش می‌دهد. کاهش $\frac{L}{UA}$ به منظور یکی از اهداف زیر انجام می‌شود:

۱. کاهش اندازه: اگر میزان تبادل حرارت، Q ، ثابت نگه داشته شود، طول ناحیه تبادل حرارتی را می‌توان کاهش داد. با این عمل اندازه مبدل کوچکتر می‌شود.

۲. افزایش UA : این عمل به دو صورت تأثیر گذار است:

الف) کاهش ΔT_m : اگر Q و طول کل لوله L ثابت بماند، ΔT_m کاهش می‌یابد. این عمل، راندمان ترمودینامیکی بالاتری را در پی دارد و هزینه‌های کاربری را کاهش می‌دهد.

ب) افزایش تبادل حرارت: با ثابت نگه داشتن L ، $\frac{UA}{L}$ زیاد شده باعث افزایش نرخ انتقال حرارت برای درجه حرارت‌های ثابت می‌گردد.

۳. توان مصرفی پمپ کمتر برای انتقال حرارت ثابت: اگر چه شاید به نظر عجیب باشد که سطوح افزایشی باعث کاهش توان مصرفی پمپ شوند، اما از نظر تئوری این امکان‌پذیر است. اما این مسئله مستلزم آن است که مبدل حرارتی افزایشی، نسبت به نوع مشابه با سطوح صاف با سرعت کمتری کار کند که این امر سبب افزایش سطح پیشانی مبدل می‌شود که مطلوب نیست.

اصل مهمی که باید به آن توجه داشت این است که، یک سطح افزایشی می‌تواند جهت هر یک از مقاصد فوق به کار رود، اینکه کدام بهبود حاصل می‌شود بستگی به نظر طراح دارد. ممکن است طراحی بخواهد مبدل حرارتی را کوچکتر کند، در حالی که طراح دیگری راندمان ترمودینامیکی بالاتری را خواهان باشد.

اگر چه کاهش اندازه می‌تواند ارزشمند باشد، اما کاهش هزینه ممکن است بهتر باشد. در بسیاری از موارد طراح می‌خواهد کاهش اندازه با کاهش هزینه باشد. عامل دیگری که در مورد کاهش اندازه باید در نظر گرفت این است که حجم سیال داخل مبدل حرارتی کاهش می‌یابد که این امر برای سازندگان حائز اهمیت است. زیرا در صنایع تبرید، حجم کمتر سیال به معنی حجم کمتر مبرد گران قیمت است.

اهداف دوم و سوم در هزینه‌های جاری اهمیت دارند. به عنوان مثال هدف دوم برای کندانسورها و اواپراتورهای سیکل تبرید، باعث کاهش هزینه‌های توان مصرفی کمپرسور می‌گردد. هدف سوم برای بهبود ظرفیت

^۱ Extended surfaces

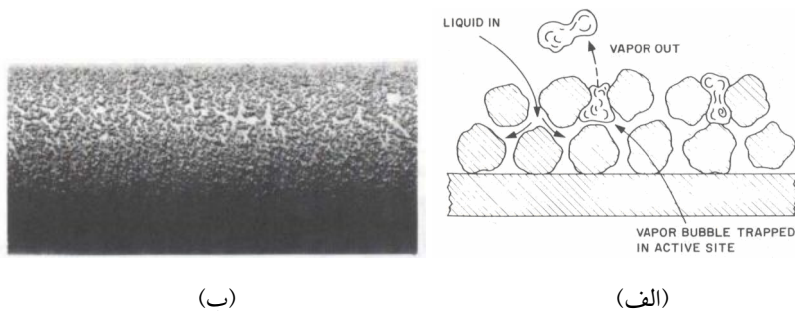
یک مبدل حرارتی موجود مهم است، این کار باعث افزایش عملکرد سیستم می‌شود. افت فشار (یا کاهش توان مصرف پمپ) همواره مد نظر طراح مبدل حرارتی است. از این رو، یک سطح افزایشی واقعی باید افزایش انتقال حرارت مورد نیاز را تأمین کرده، محدودیتهای دبی جریان و افت فشار را برآورده سازد.

۳-۱- روشهای افزایش انتقال حرارت

با گذشت ۱۵۰ سال از اولین پژوهش در رابطه با انتقال حرارت افزایشی توسط ژول^۱، همواره تحقیقات در این زمینه در حال انجام بوده است [۶]. روشهای متعددی برای افزایش انتقال حرارت تا کنون ارائه شده است. ۱۳ روش افزایش انتقال حرارت توسط برگلز^۲ [۷] ارائه شد، همچنین ایشان طی مقاله‌ای به مرور تحقیقات اخیر انتقال حرارت افزایشی پرداختند [۶]. این روشها به روشهای فعال^۳ و روشهای غیر فعال^۴ و ترکیب این روشها تقسیم می‌شود، در روشهای غیر فعال از سطوح با هندسه‌های خاص یا سیالهایی افزودنی برای افزایش انتقال حرارت استفاده می‌شود. در روش فعال، نیاز به میدان نیروی خارجی نظیر میدانهای الکتریکی یا آکوستیک و ارتعاش سطحی است.

۱-۳-۱- روشهای غیر فعال

سطوح پوشش داده شده: این سطوح دارای پوششهای فلزی یا غیر فلزی هستند مانند تفلون که چگالش قطره‌ای را افزایش می‌دهند یا پوششهای متخلخل بسیار ریز، که برای ایجاد افزایش جوشش هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۱-۱- الف مقطع یک پوشش فلزی متخلخل را برای جوشش هسته‌ای نشان می‌دهد. اندازه ذرات در این پوشش از مرتبه ۰/۰۰۵ mm می‌باشد و شکل ۱-۲- ب ذرات بزرگتر (تقریباً ۰/۵ mm) روی سطح را نشان می‌دهد که جهت افزایش جابجایی تکفاز یا چگالش به کار می‌رود.



شکل ۱-۱- الف) عملکرد مقطع پوشش متخلخل برای جوشش (ب) ذرات متصل شده به سطح جهت افزایش چگالش لایه‌ای [۸].

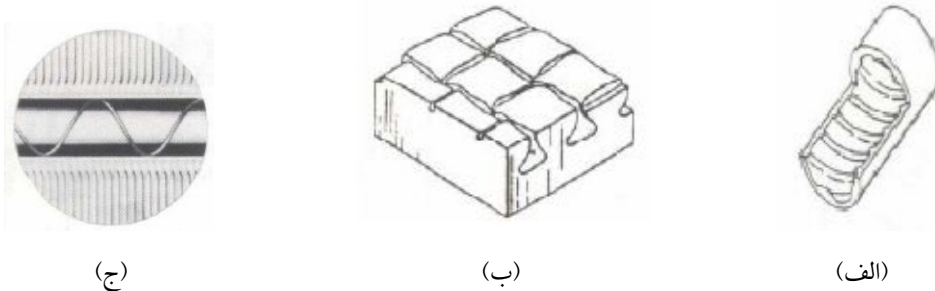
^۱ Joule

^۲ Bergles

^۳ Active

^۴ Passive

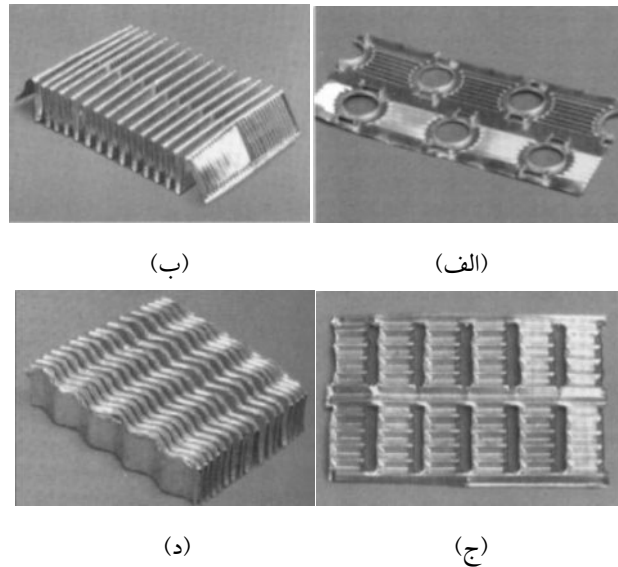
سطوح زبر: این سطوح یا به صورت یکپارچه به سطح متصل اند یا در مجاورت سطح نصب می شوند. زبریهای یکپارچه را می توان با ماشینکاری یا سمباده زنی ایجاد کرد. برای جریان تک فاز این روش به جای افزایش سطح انتقال حرارت، معمولاً برای افزایش اختلاط لایه مرزی نزدیک سطح به کار می رود. شکل ۱-۲-الف نمونه ی زبری یکپارچه را نشان می دهد. تشکیل برخی سطوح زبر از طریق ماشینکاری اقتصادی نیست، شکل ۱-۲-ب سطح زبر افزایشی را جهت جوشش هسته ای نشان می دهد. ساختار این سطح به گونه ای است که با ایجاد محل های تشکیل هسته مصنوعی می تواند عملکرد بهتری نسبت به سطح صاف داشته باشد. شکل ۱-۲-ج یک سیم پیچ را که به طور تناوبی لایه مرزی را به هم می زند در داخل یک لوله نشان می دهد. سیم پیچ مثالی از یک زبری غیر یکپارچه است. همچنین سطح با دندان های کروی سبب افزایش انتقال حرارت خواهد شد. اثر دندان های کروی روی سطح بر افزایش انتقال حرارت، بیشتر از افزایش افت فشار می باشد.



شکل ۱-۲-الف) زبری داخل لوله (ب) مقطع سطح زبر جهت جوشش هسته ای (ج) سیم پیچ داخل لوله [۸].

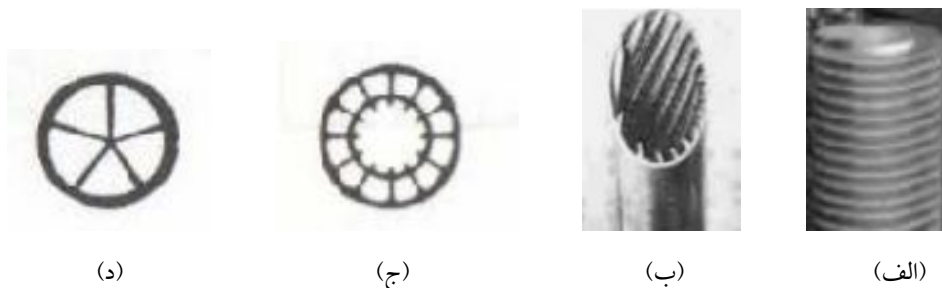
سطوح گسترده برای مایعات: این سطوح در مبدلهای حرارتی بسیاری استفاده می شوند. همان طور که در رابطه (۱-۴) نشان داده شد، مقاومت حرارتی با افزایش ضریب انتقال حرارت (h)، یا سطح (A)، یا هر دو کاهش می یابد. با استفاده از پره ساده فقط می توانیم سطح را افزایش دهیم در حالی که با ساخت سطوح گسترده ای با اشکال خاص می توان h را نیز افزایش داد. تلاشهای رایج جهت افزایش انتقال حرارت گازها به سمت سطوح گسترده ای معطوف شده است که می توانند ضریب انتقال حرارت بالاتری را نسبت به پره های ساده تولید کنند. شکل ۱-۳ انواع سطوح گسترده افزایشی مورد استفاده جهت گازها را نشان می دهد. سطوح نشان داده شده در شکل های (۱-۳-الف تا ۱-۳-د) باعث تشکیل و به هم خوردن مکرر لایه مرزی حرارتی می شود. در سطوح گسترده برای مایعات از پره هایی با ارتفاع کمتر نسبت به سطوح گسترده گازها استفاده می شود. زیرا ضریب انتقال حرارت مایعات عموماً بیشتر از گازها است. استفاده از پره های بلند برای مایعات سبب کاهش راندمان پره شده و بهره وری ماده را کاهش می دهد. مثالهایی از سطوح گسترده برای مایعات در شکل ۱-۴-الف نشان داده شده است. شکل ۱-۴-الف یک لوله با پره خارجی و شکل ۱-۴-ب یک لوله با پره مارپیچ داخلی را نشان می دهد. لوله های با پره داخلی نشان داده شده در شکل ۱-۴-ج از چندین لوله هم مرکز با پره داخلی ساخته شده اند. همچنین لوله نشان داده شده در شکل ۱-۴-د دارای یک قطعه

آلومینیوم اکستروود شده ۵ جزئی است. لوله محیطی آن بر روی سطح قطعه فشرده شده تا تماس حرارتی خوبی برقرار باشد. شکل‌های نشان داده شده در شکل‌های ۴-۱ می‌تواند برای تبخیر و چگالش جابجایی اجباری استفاده شوند.



شکل ۳-۱- سطوح افزایشی گازها (الف) پره صفحه لوله‌ای (ب) پره‌های مورد استفاده در مبدل‌های حرارتی اتومبیل

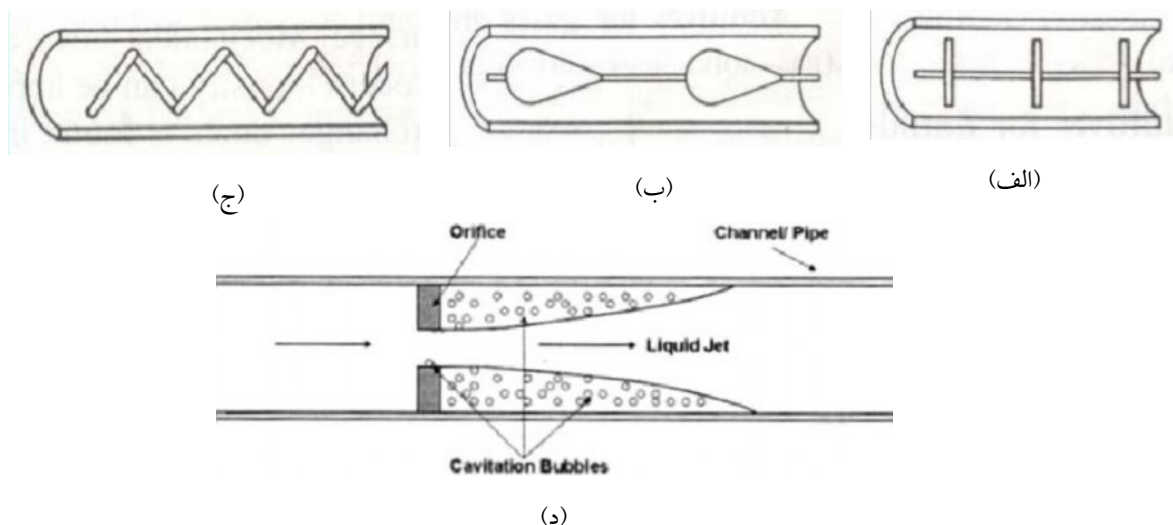
(ج) پره مورد استفاده در لوله‌های تخت شده (د) پره‌های موجدار مورد استفاده در بازیاب‌های دوار [۸].



شکل ۴-۱- (الف) پره‌های یکپارچه در سطح خارجی لوله (ب) پره‌های مارپیچ داخلی.

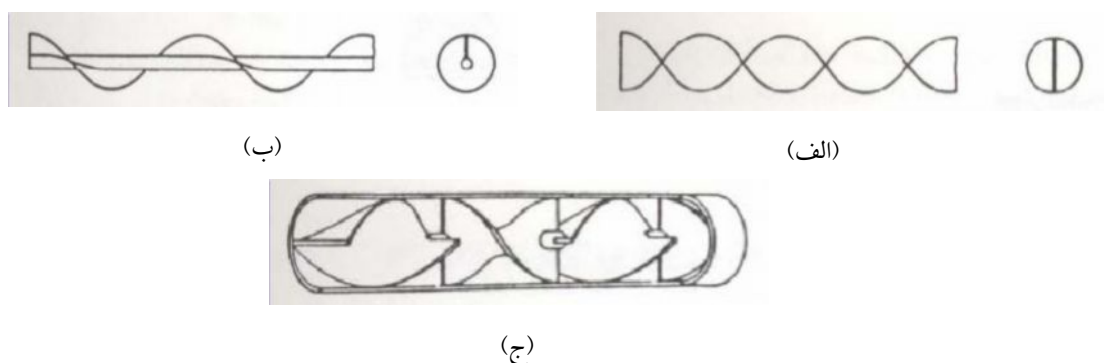
(ج) سطح مقطع لوله‌های چند گانه با پره داخلی (د) لوله دارای یک قطعه ستاره آلومینیومی [۸].

وسایل قابل جابجایی: این وسایل، وسایلی هستند که در داخل مجرای جریان قرار می‌گیرند. و به طور غیر مستقیم انتقال انرژی را در سطح گرم شده افزایش می‌دهند. از این وسایل هم در جریان تکفاز هم در جریان دو فاز استفاده می‌شود. وسایل نشان داده شده در شکل‌های ۵-۱-الف و ب علاوه بر ناحیه دیواره، جریان اصلی را نیز به هم می‌زند. سیم پیچ نشان داده شده در شکل ۵-۱-ج در لبه لایه مرزی واقع شده و از آن برای افزایش اختلاط در لایه مرزی استفاده می‌شود بدون اینکه جریان اصلی را تحت اثر قرار دهد. استفاده از اریفیس (شکل ۵-۱-د) در ورودی میکروکانالها (سبب افزایش اغتشاشات در طول قابل ملاحظه) مثالی دیگر از وسایل جابجا شونده جهت افزایش انتقال حرارت در میکروکانالها است.



شکل ۵-۱- ابزار قابل جابجایی (الف) قطعات دیسکی درون لوله (ب) وسایل دوکی شکل (ج) سیم پیچ درون لوله [۸] (د) اریفیس در ورودی میکروکانالها [۶].

وسایل ایجاد جریان چرخشی^۱: وسایلی هستند که باعث ایجاد جریان چرخشی در جریان می‌شوند. برخی از این وسایل عبارتند از نوار پیچشی^۲ (شکل ۶-۱-الف) و گردابه‌سازهای ورودی و هسته محوری با پره‌های مارپیچ (شکل ۶-۱-ب) و (شکل ۶-۱-ج) معکوس کننده جریان^۳ یا میکسر استاتیکی^۴ را برای جریان آرام نشان می‌دهد. این وسیله جریان را به طور متناوب در جهات ساعتگرد و عکس آن به چرخش در می‌آورد.



شکل ۶-۱- سه نوع از وسایل ایجاد کننده جریان چرخشی (الف) نوار پیچشی (ب) پره‌های مارپیچ (ج) میکسر استاتیکی [۸].

^۱ Swirl flow devises

^۲ Twisted tape

^۳ Flow inverter

^۴ Static mixer