دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

بررسی تجربی انتقال حرارت و افت فشار جریان نانوسیال در لوله افقی با سیم-پیچ در شرایط دمای دیواره ثابت

پایان نامه کارشناسی ارشد تبدیل انرژی

علی اکبر شمشیری

اساتید راهنما
دکتر احمد صداقت
دکتر محمد علی اخوان بهابادی

۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

بررسی تجربی انتقال حرارت و افت فشار جریان نانوسیال در لوله افقی با سیم-پیچ در شرایط دمای دیواره ثابت

پایان نامه کارشناسی ارشد تبدیل انرژی

علی اکبر شمشیری

اساتید راهنما
دکتر احمد صداقت
دکتر محمد علی اخوان بهابادی

۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته تبدیل انرژی آقای علی اکبر شمشیری

تحت عنوان

بررسی تجربی انتقال حرارت و افت فشار جریان نانوسیال در لوله افقی با سیم‌پیچ در شرایط دمای دیواره ثابت

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای اول پایان نامه	دکتر احمد صداقت
۲- استاد راهنمای دوم پایان نامه	دکتر محمد علی اخوان بهابادی
۳- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر ابراهیم شیرانی
۴- استاد داور	دکتر علی اکبر عالم رجبی
۵- استاد داور	دکتر محمد رضا سلیم‌پور
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر محمد رضا سلیم‌پور

سپاس

سپاس و ستایش پروردگاری که خود خویشتن را به ما شناسانده و نعمت بزرگ شکر و سپاس‌گذاری‌اش را به ما الهام کرده است.

این پایان‌نامه نه فقط حاصل تلاش اینجانب بلکه راهنمایی‌ها و مساعدت جمعی از اساتید و نیز سایر دوستانم می‌باشد. بر همین اساس لازم می‌دانم از تمامی ایشان نهایت تقدیر و تشکر را اعلام دارم. در ابتدا از خانواده خود بواسطه حمایت‌های همه‌جانبه و محبت‌های بی‌دریغشان تشکر می‌نمایم. از اساتید عزیزم جناب آقای دکتر احمد صداقت و جناب آقای دکتر محمد علی اخوان بهابادی به سبب راهنمایی‌ها و راهگشایی‌های ارزنده و ثمربخش ایشان کمال تشکر و قدردانی را دارم و از جناب آقای دکتر ابراهیم شیرانی که در انجام این پایان‌نامه از توصیه‌های ایشان سود برده‌ام، کمال تشکر را دارم.

از دوست عزیزم آقای مهندس داریوش آشتیانی و نیز جناب آقای نوروز که در تکمیل این پروژه مرا یاری نموده‌اند، تشکر و قدردانی کرده و از خداوند متعال سربلندی و موفقیت ایشان را در تمام مراحل زندگی خواستارم. همچنین مراتب قدردانی خود را از دوستان عزیزم آقایان مهندس میثم اکبری و سعید شاملو که همیشه در کنار اینجانب بوده‌اند، اعلام می‌دارم. از سرکار خانم شقایق سادات کاظمی بواسطه کمک‌های فکری و معنوی که برای اتمام این پایان‌نامه به من داده‌اند تشکر ویژه دارم. در پایان نیز همراهی‌ها و همکاری‌های دوستان عزیزم آقایان مهندس محمد سعیدی‌نیا، وحید گودرزی، محسن علاییان و مجید کرمی را ارج می‌نهم و صمیمانه از ایشان تشکر می‌کنم.

علی اکبر شمشیری

زمستان ۱۳۹۰

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

تقدیم به مادر نازنینم، پدر
و خانواده‌ام.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه ۲

۱-۱ پیش‌گفتار ۲
۱-۲ روش‌های افزایش انتقال حرارت ۳
۱-۳ کاربردهای نانوسیال و لوله با سیم‌پیچ ۴
۱-۴ تعریف مسئله ۶
۱-۵ اهداف مطالعه ۶
۱-۶ روش اجرای طرح ۶

فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته ۸

۲-۱ مقدمه ۸
۲-۲ نانوسیال ۸
۲-۳ هدایت حرارتی نانوسیال ۹
۲-۳-۱ هدایت حرارتی مواد ۹
۲-۳-۲ مدل‌های متداول هدایت حرارتی مؤثر با پراکنده شدن ذرات ۹
۲-۳-۳ هدایت حرارتی نانوسیالات ۱۰
۲-۳-۴ مدل‌های هدایت حرارتی نانوسیال ۱۲
۲-۴ روش‌هایی برای آماده‌سازی نانوسیال ۱۴
۲-۴-۱ آماده‌سازی دوگامی نانوسیالات ۱۴
۲-۴-۲ آماده‌سازی تک‌گامی نانوسیالات ۱۵
۲-۵ خواص ترموفیزیکی نانوسیالات ۱۵
۲-۵-۱ چگالی ۱۶
۲-۵-۲ گرمای ویژه ۱۶
۲-۵-۳ لزجت ۱۶
۲-۶ انتقال حرارت جابجایی نانوسیال ۱۷
۲-۶-۱ انتقال حرارت جابجایی نانوسیال ۱۷
۲-۶-۲ انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال ۲۱
۲-۷ ساختار و دلایل افزایش انتقال حرارت در نانوسیال ۲۲
۲-۸ سیم‌پیچ ۲۴

فصل سوم: انتخاب سیال پایه و نانوذرات ۳۰
۳-۱ انتخاب سیال پایه ۳۰
۳-۲ ویژگیهای روغن HT-B ۳۱
۳-۳ انتخاب نوع نانوذرات ۳۳
۳-۴ اندازه‌گیری خواص نانوسیال ۳۵
۳-۴-۱ اندازه‌گیری چگالی نانوسیال ۳۵
۳-۴-۲ رفتار رئولوژیکی نانوسیال و اندازه‌گیری لزجت ۳۶
۳-۴-۳ اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی ۴۰
۳-۴-۴ اندازه‌گیری گرمای ویژه ۴۲
جمع بندی ۴۳
فصل چهارم: دستگاه آزمایش ۴۴
۴-۱ مقدمه ۴۴
۴-۲ پمپ ۴۵
۴-۳ شیر برگشتی ۴۵
۴-۴ بخش آزمایش ۴۶
۴-۵ خنک کن ۴۷
۴-۶ دبی سنجی ۴۷
۴-۷ مخزن ۴۸
۴-۸ دستگاه افت فشارسنج (فشارسنج دیفرانسیلی) ۴۸
۴-۹ دستگاه اندازه‌گیری دما (ترمومتر) ۵۰
۴-۱۰ دستگاه اولتراسونیک ۵۰
۴-۱۱ کارپردازش آزمایش و جمع‌آوری داده‌ها ۵۱
فصل پنجم: نتایج و بحث ۵۳
۵-۱ مقدمه ۵۳
۵-۲ نحوه انجام محاسبات ۵۳
۵-۲-۱ محاسبه‌ی ضریب اصطکاک ۵۳
۵-۲-۲ محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی ۵۵
۵-۲-۳ محاسبه عدد ناسلت ۵۶
۵-۲-۴ حل تئوری مسئله در حالت خاص ۵۶
۵-۳ بررسی دقت و تایید دستگاه آزمایش توسط سیال پایه ۵۹
۵-۴ نتایج انتقال حرارت لوله صاف ۶۱
۵-۴-۱ تأثیر تغییرات عدد رینولدز بر ضریب انتقال حرارت ۶۱
۵-۴-۲ تأثیر نانوذرات بر ضریب انتقال حرارت ۶۲
۵-۴-۳ جمع‌بندی نتایج انتقال حرارت لوله صاف ۶۵
۵-۵ نتایج انتقال حرارت لوله با سیم‌پیچ ۶۶

۵-۵-۱ نتایج ضریب انتقال حرارت لوله با سیم‌پیچ برای سیال پایه ۶۶
۵-۵-۲ تأثیر نانوذرات بر نتایج ضریب انتقال حرارت لوله با سیم‌پیچ ۷۱
۵-۵-۳ جمع‌بندی نتایج انتقال حرارت لوله با سیم‌پیچ ۷۷
۵-۶ نتایج افت فشار و ضریب اصطکاک لوله صاف ۷۸
۵-۶-۱ تأثیر عدد رینولدز بر نتایج افت فشار ۷۸
۵-۶-۲ تأثیر افزودن نانوذرات بر نتایج افت فشار ۷۹
۵-۶-۳ جمع‌بندی نتایج افت فشار و ضریب اصطکاک لوله صاف ۸۱
۵-۷ نتایج افت فشار و ضریب اصطکاک لوله با سیم‌پیچ ۸۲
۵-۷-۱ نتایج افت فشار لوله با سیم‌پیچ برای سیال پایه ۸۲
۵-۷-۲ تأثیر نانوذرات بر نتایج افت فشار لوله با سیم‌پیچ ۸۵
۵-۷-۳ جمع‌بندی نتایج افت فشار و ضریب اصطکاک لوله با سیم‌پیچ ۹۰
۵-۸ ارزیابی عملکرد استفاده از نانوسیال و لوله با سیم‌پیچ از بعد افزایش توأم انتقال حرارت و افت فشار ۹۱
۵-۸-۱ ارزیابی عملکرد نانوسیال در لوله صاف ۹۲
۵-۸-۲ ارزیابی عملکرد سیال پایه در لوله با سیم‌پیچ ۹۳
۵-۸-۳ ارزیابی عملکرد نانوسیال‌ها در لوله با سیم‌پیچ ۹۵
۵-۸-۴ جمع‌بندی نتایج ارزیابی عملکرد نانوسیال‌ها و لوله با سیم‌پیچ ۹۶
فصل ششم: نتیجه‌گیری ۹۸
۶-۱ پیش‌گفتار ۹۸
۶-۲ خصوصیات ترموفیزیکی سیالات مورد آزمایش ۹۹
۶-۳ نتایج انتقال حرارت ۹۹
۶-۳-۱ نتایج انتقال حرارت لوله صاف ۹۹
۶-۳-۲ نتایج انتقال حرارت لوله با سیم‌پیچ ۱۰۰
۶-۴ نتایج افت فشار ۱۰۱
۶-۴-۱ نتایج افت فشار لوله صاف ۱۰۱
۶-۴-۲ نتایج افت فشار لوله با سیم‌پیچ ۱۰۱
۶-۵ نتایج ارزیابی عملکرد نانوسیال و لوله با سیم‌پیچ ۱۰۲
۶-۶ پیشنهاد برای تحقیقات آینده ۱۰۳
پیوست: آنالیز خطا ۱۰۴
پ-۱ مقدمه ۱۰۴
پ-۲ محاسبه خطای ضریب انتقال حرارت کلی ۱۰۴
پ-۳ خطای محاسبه عدد ناسلت ۱۰۵
پ-۴ خطای محاسبه عدد رینولدز ۱۰۶
پ-۵ خطای محاسبه عدد پرانتل ۱۰۶
پ-۶ خطای محاسبه عدد پکلت ۱۰۶
پ-۷ خطای محاسبه ضریب اصطکاک ۱۰۶

پ-۸ خطاهای دستگاه‌های اندازه‌گیری ۱۰۷
پ-۸ خطای آزمایشات ۱۰۷
مراجع ۱۱۲

فهرست علائم و نمادها

نمادهای لاتین

مساحت	A
ظرفیت گرمایی ویژه (J/kgK)	c_p
قطر لوله (m)	D
قطر سیم	e
ضریب اصطکاک	f
مقدار ویژه	G_n
ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین (W/m^2K)	h
توان پمپاژ	HP
ضریب هدایت حرارتی (W/mK)	k
طول لوله (m)	l
دبی جرمی (kg/s)	$\dot{m}$
ضریب شکل	n
عدد ناسلت (hD/k)	Nu
افت فشار (Pa)	Δp
گام سیم‌پیچ	p
محیط سطح مقطع لوله (m)	P
عدد پکلت $(\rho VDc_p/k)$	Pe
عدد پرانتل $(\mu c_p/k)$	Pr
شار حرارتی (W/m^2)	q''
دبی حجمی (m^3/s)	Q
فاصله شعاعی از مرکز لوله (m)	r
شعاع لوله (m)	r_0
ضریب عملکرد	R
عدد رینولدز $(\rho VD/\mu)$	Re
زمان (s)	t
دما $(^\circ C)$	T
سرعت (m/s)	u
خطای اندازه‌گیری و یا محاسبه	U
سرعت میانگین سیال (m/s)	V

طول بی‌بعد	x^+

نمادهای یونانی

زاویه پیچش سیم‌پیچ	α
نسبت هدایت ذرات	α
نسبت ضخامت نانولایه	β
مقدار ویژه	λ
ویسکوزیته دینامیکی (kg/ms)	μ
ویسکوزیته سینماتیکی (m^2/s)	v
عدد پی	π
چگالی (kg/m^3)	ρ
نسبت حجمی نانوذرات	ϕ
نسبت جرمی نانوذرات	φ

زیرنویس‌ها

سیال پایه	f
داخلی	i
ورودی	in
متوسط	m
نانوسیال	nf
خروجی	out
لوله صاف	p
سطح لوله	s
سیم‌پیچ	w

چکیده

این پژوهش، به بررسی تجربی افزایش انتقال حرارت و افت فشار در اثر افزودن نانولوله‌های کربنی به روغن انتقال حرارت می‌پردازد. با وجود مطالعات فراوانی که در دو دهه اخیر بر روی نانوسیال‌ها انجام گرفته، تحقیقات روی کاربردهای انتقال حرارت نانوسیال هنوز در مراحل ابتدایی قرار دارد و ضروری است مکانیزم افزایش انتقال حرارت کاملاً شناخته شود و تحقیقات موجود تکمیل گردد. یکی دیگر از روش‌هایی که معمولاً برای افزایش انتقال حرارت به کار می‌رود، استفاده از تجهیزات داخل لوله‌ای از جمله سیم‌پیچ می‌باشد، که نصب آسان و قیمت پایین از مزایای اصلی این روش افزایش انتقال حرارت می‌باشد. آزمایش‌ها برای جریان روغن انتقال حرارت و نانوسیالات مختلف درون لوله صاف و لوله‌های با سیم‌پیچ در شرایط دمای دیواره ثابت، در رژیم جریان آرام و اعداد رینولدز پایین جریان مغشوش انجام گرفت. بخش آزمایش از یک لوله صاف مسی که فنرها در آن قرار می‌گرفتند، به طول ۱/۵ متر و قطر داخلی ۱۴/۵ میلی‌متر و قطر خارجی ۱۵/۶ میلی‌متر تشکیل شده بود، البته طول لوله برای سنجش ضریب انتقال حرارت ۱/۲ متر و برای پارامتر افت افشار ۱/۵ متر بود. سیال جاری درون لوله توسط بخار موجود در مخزن که اطراف لوله را احاطه کرده بود و بیش از نیاز توسط المنت‌های حرارتی تولید می‌شد، گرم می‌شد. سیال‌های مورد آزمایش روغن انتقال حرارت به همراه سه نانوسیال روغن انتقال حرارت- نانو لوله‌های کربنی با غلظتهای جرمی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ درصد بودند که درون لوله صاف و لوله‌های با سیم‌پیچ جریان یافتند. سیم‌پیچ‌های مورد آزمایش در این تحقیق در گستره هندسی گام پیچ $۲/۷۹ > p/d > ۱/۱۲$ و قطر سیم $۰/۰۹۷ > e/d > ۰/۰۶۹$ قرار داشتند. خصوصیات ترموفیزیکی سیالات آزمایش شامل چگالی، ضریب هدایت حرارتی، لزجت و گرمای ویژه به صورت آزمایشگاهی و با دستگاه‌های دقیق اندازه‌گیری شدند و بر اساس این داده‌ها روابطی برای محاسبه خصوصیات نانوسیال ارائه گردید تا در محاسبات مربوط به انتقال حرارت و افت فشار مورد استفاده قرار گیرند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن نانولوله‌ها باعث افزایش چگالی، ضریب هدایت حرارتی و لزجت روغن انتقال حررات گردیده است ولی گرمای ویژه روغن انتقال حرارت با افزودن نانولوله‌ها کمتر شده است. در بخش سیال پایه عبوری از لوله با سیم‌پیچ روابطی برای پیش‌بینی عدد ناسلت بر پایه عدد رینولدز و عدد پرانتل و هندسه سیم‌پیچ ارائه شد. افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت در ناحیه‌ای که الگوی جریان به دلیل استفاده از سیم‌پیچ تغییر کرده بود، مشاهده شد، البته افزایش در ضریب انتقال حرارت همراه با افزایش در ضریب اصطکاک و افت فشار مشاهده شد. نتایج آزمایش نانوسیالات، خصوصیات بهتر انتقال حرارت نسبت به سیال پایه را نشان داد. در لوله صاف در یک عدد رینولدز یکسان با افزایش غلظت نانوسیالات میزان انتقال حرارت افزایش یافت، در عین حال مقدار افت فشار نیز افزایش قابل ملاحظه‌ای را، مخصوصاً برای نانوسیال با غلظت ۰/۴ درصد، نشان داد. همچنین نتایج این بخش بیان‌گر این بود که با افزایش عدد رینولدز میزان افزایش انتقال حرارت بیشتر می‌شد. در بخش نانوسیال عبوری از لوله با سیم‌پیچ بار دیگر افزایش انتقال حرارت در مقایسه با زمانی که سیال آزمایش، سیال پایه بود، مشاهده شد. این افزایش در ناحیه کاملاً آرام از افزایش ایجاد شده توسط همان نانوسیال در لوله صاف بیشتر بود ولی در نواحی گذرا و مغشوش نتیجه بالعکس بود. در پایان به دلیل افزایش هم‌زمان انتقال حرارت و افت فشار به ارزیابی عملکرد روش‌های افزایش انتقال حرارت به‌کار رفته پرداخته شد.

کلید واژه: نانوسیال، انتقال حرارت، افت فشار،خواص ترموفیزیکی، سیم‌پیچ، دما ثابت

فصل اول

مقدمه

۱-۱ پیش‌گفتار

خنک‌کاری یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی است که بسیاری از صنایع با آن روبرو هستند و هدایت حرارتی پایین مهمترین محدودیت در توسعه کارایی انتقال حرارت سیالات مورد استفاده در کاربری‌های صنعتی و تجاری می‌باشد. بارهای حرارتی در کاربردهای گوناگونی نظیر میکرو الکترونیک، حمل و نقل، خودرو، اشعه‌های ایکس و لیزر، استفاده عملی از انرژی خورشیدی برای تولید قدرت و ... در حال افزایش‌اند. با رشد و توسعه فناوری در صنایع الکترونیک، کامپیوترهایی با سرعت‌های بالاتر، اندازه‌های کوچکتر و قابلیت‌های بیشتر بوجود آورده است که منجر به تولید شارهای حرارتی بالا در ابعاد کوچک شده است.

در صنعت حمل و نقل، خنک‌کاری یک موضوع حیاتی است زیرا که روند پیش‌رو در افزایش قدرت موتورها و یا خودروهای هیبرید، ناگزیر در استفاده از رادیاتورهای بزرگ‌تر و در نتیجه سطح پیشانی[1] بیشتر است که باعث افزایش نیروی درگ و مصرف سوخت بالاتر می‌گردد. یک دیدگاه جایگزین برای طراحی و توسعه مبدل‌های گرمایی جدید، استفاده از سیالات انتقال حرارت کارآمدتر می‌باشد.

روش‌های متعارف برای افزایش نرخ شار حرارتی شامل سطوح گسترش یافته از قبیل فین و میکروکانال و یا افزایش یافتن نرخ جریان می‌باشد که با زیاد شدن توان پمپ مصرفی همراه می‌باشد، اما روش‌های دیگری نیاز است که پاسخگوی کامل درخواست صنایع در خنک‌کاری باشد.

بهرحال، راه حل‌های طراحی کنونی تقریباً به انتهای خود رسیده‌اند. هدایت حرارتی پایین اغلب مهم‌ترین محدودیت در سیالات انتقال حرارت می‌باشد. سیالات انتقال حرارت معمولی به طور ذاتی در مقایسه با جامدات از هدایت حرارتی پایین‌تری برخوردارند. از این‌رو سعی شد با استفاده از ذرات جامد هدایت سیالات را بالا ببرند.

فناوری‌ها و سیالات پیشرفته جدید با پتانسیل بهبود جریان و ویژگی‌های حرارتی، اهمیت خاصی دارند. با توجه به

---

[1] Frontal area

اینکه ذرات استفاده شده از هدایت بالایی برخوردارند، ویژگی‌های حرارتی سیال را بهبود می‌بخشند. ایده افزایش انتقال حرارت در سیالات با استفاده از مخلوط کردن ذرات رسانا اولین بار توسط ماکسول اعلام شد [۱]. بعدها اضافه کردن ذراتی به اندازه میکرو/میلیمتر با هدایت حرارتی بالا به آنها توسط آهوجا [۲] مورد بررسی قرار گرفت. سیالات انتقال حرارتی که شامل ذراتی با این سایز بودند، معایبی نظیر خوردگی قطعات در اثر سایش، گرفتگی مسیرهای جریان، ته‌نشینی ذرات و افزایش افت فشار را شامل می‌شدند. از این رو، این ذرات انتخاب مناسبی برای افزایش انتقال حرارت پذیرفته نشدند و جستجو برای یافتن سیال انتقال حرارت جدید ادامه یافت. برای رهایی از این مشکلات، فناوری نانو با فراهم کردن فرصت تولید و عمل‌آوری مواد در محدوده اندازه نانو که در سیالات انتقال حرارت معمول معلق شوند، آمده است تا یک گروه جدیدی از سیالات مهندسی شده با هدایت حرارتی بالا تولید کند و در ضمن مشکلاتی که ذراتی با اندازه بزرگ‌تر ایجاد می‌کردند را برطرف کند. این دسته جدید از سیالات انتقال حرارت که در آن نانوذرات معلق هستند را نانوسیال می‌گویند. نانوسیالات حتی با غلظت‌های بسیار کم نیز سبب افزایش قابل ملاحظه در خواص حرارتی می‌شود. بنابراین بررسی هرچه بیشتر خواص این نوع جدید از سیال‌های انتقال‌دهنده حرارت برای شناخت مزایا (افزایش ضرایب هدایت حرارتی و انتقال حرارت جابجایی) و معایب آن (افزایش میزان افت فشار و سایش) از اهمیت بسزایی برخوردار است.

۱-۲ روش‌های افزایش انتقال حرارت

در چند سال اخیر، تلاش‌های بسیاری برای توسعه روش‌های افزایش انتقال حرارت برای بهبود کارکرد کلی مبدل‌های گرما انجام شده است. توجه به این تکنیک‌ها بستگی به قیمت انرژی دارد و با افزایش قیمت آن در حال حاضر انتظار می‌رود که شاخه افزایش انتقال حرارت وارد فاز رشد جدیدی شده باشد. بیشتر فرایندهای صنعتی شامل انتقال حرارت بوسیله جریان یافتن سیال چه در حالت آرام یا چه به صورت مغشوش می‌باشند که می‌توانند به صورت جریان سیال یا جوشش استخری باشند. فرایندها محدوده وسیعی از دماها و فشارها را پوشش می‌دهند. چونکه ضریب انتقال حرارت در این نوع جریانات معمولاً پائین می‌باشد احتیاج به روشی برای افزایش آن داریم. در زمینه روش‌های افزایش انتقال حرارت مطالعات زیادی انجام شده است. در بسیاری از این کاربردها می‌خواهیم از کاهش مقاومت حرارتی سیال انتقال حرارت بهره ببریم. این موقعیت منجر به سیستم‌های انتقال حرارت کوچک‌تر با بهایی کمتر و بهبود کارایی می‌شوند. در این راستا، برگلز و همکارانش[۱] [۳]، روش‌های مختلف را برای افزایش انتقال حرارت ارائه نمودند. این روش‌ها شامل دو دسته روش‌های فعال[۲] و روش‌های غیرفعال[۳] تقسیم می‌شوند. در روش‌های غیرفعال از سطوح با هندسه‌های خاص یا سیال‌های افزودنی برای افزایش انتقال حرارت استفاده می‌شود. از روش‌های غیر فعال به قرار دادن وسایل افزایشی جابجا شونده[۴] در داخل مجرای جریان و افزودنی‌ها برای مایعات[۵] می‌توان اشاره کرد که

---

[2] Bergles et el.
[3] Active
[3] Passive
[5] Displaced insert devices
[5] Additives for liquids

در ادامه به آنها خواهیم پرداخت. در روش‌های فعال به یک نیروی خارجی نظیر میدان الکتریکی یا آکوستیک و ارتعاش سطحی نیاز داریم.

مبدل‌های حرارتی با استفاده از سطوح انتقال حرارت ساده ساخته می‌شوند. استفاده از یک سطح افزایش دهنده انتقال حرارت می‌تواند مقادیر بالاتری برای hA به ازای واحد سطح پایه نسبت به سطح صاف تولید کند. از سطوح افزایشی می‌توان به منظور افزایش یک یا هر دو عبارت hA/L نسبت به حالت صاف استفاده کرد. همانطور که می‌دانیم هر کدام از روش‌های افزایش انتقال حرارت، علاوه بر ازدیاد ضریب انتقال حرارت، افت فشار را نیز افزایش می‌دهند. از این رو روش‌های مذکور علاوه بر تأمین انتقال حرارت مورد نیاز، محدودیت‌های دبی جریان و افت فشار را نیز باید برآورده سازند. سطحی که بتواند افزایش انتقال حرارت مورد نیاز را باکمترین افت فشار تامین کند ارجح‌تر است که در بخش‌های بعدی به آن اشاره می‌شود.

تجهیزات درون لوله‌ای نیز می‌توانند با ترکیبی از یک یا چند مورد زیر، باعث افزایش انتقال حرارت و به همراه آن افزایش ضریب اصطکاک جریان شوند:

۱- جلوگیری از توسعه زیر لایه مرزی جریان، افزایش میزان اغتشاش آن
۲- افزایش سطح مؤثر انتقال حرارت
۳- تولید جریان‌های گرادبه‌ای یا ثانویه

افزودنی‌ها برای مایعات نیز از روشهای غیر فعال به حساب می‌آیند. این افزودنی‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند: الف) ذرات جامد یا حباب‌های گاز در جریان‌های تکفاز ب) افزودنی‌های نشان دهنده‌ی مایع جهت سیستم‌های جوشش. امروزه کاربرد نانوذرات جامد بعنوان افزودنی در مایعات، به منظور افزایش میزان انتقال حرارت، مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است.

۱-۳ کاربردهای نانوسیال و لوله با سیم‌پیچ

اینکه افزوده شدن ذرات جامد به مایعات، انتقال حرارت آنها را افزایش می‌دهد امری کاملاً شناخته شده است و مطالعات نظری آن به بیش از یک قرن پیش و ماکسول مربوط می‌شود، در حدود ۱۰۰ سال پیش استفاده از مخلوط های جامد مایع در اندازه میکرومتر و میلیمتر با هدف افزایش رسانش گرمایی سیّال شروع شد اما درشتی این ذرّات مشکلاتی همچون سایش لوله ها و بدنه ، پروانه پمپ‌ها، ناپایداری و ته نشینی سریع و در نتیجه مسدود کردن کانال‌ها را در پی داشت، در برابر این مشکلات میزان افزایش راندمان سیّال جدید نسبت به سیّال خالص اوّلیه قابل ملاحظه نبود.

با استفاده از دستاوردهای اخیر در زمینه تولید ذرات جامد با ابعاد نانومتری، می‌توان بر مشکلات ناشی از این ایده غلبه نمود و کلاس جدیدی از سیالات را که قادر به افزایش نرخ انتقال حرارت از طریق پخش ذرات در اندازه های نانومتری در سیالات عامل انتقال حرارت می باشند را تولید نمود. از آنجا که ذرات جامد معلق شده در سیال پایه از ضریب هدایت گرمایی بالاتری نسبت به سیال پایه برخوردارند، انتظار می رود که با افزودن آنها به

سیال پایه امکان بهبود بازدهی فرایند انتقال حرارت فراهم گردد. هنگامی که هدایت حرارتی مؤثر افزایش می‌یابد و نیز چگالی، گرمای ویژه، و لزجت تغییر می‌کند، دلیل مهمی برای بهبود رفتار انتقال حرارت نانوسیال می‌باشد.

حسن این نانوذرات آن است که مشکل ذرات بزرگتر را نداشته و یا آن را تا حد قابل توجهی کاهش می‌دهند. اندازه فوق‌العاده کوچک این ذرات موجب می شود تا به راحتی و بدون کلوخه شدن و یا ساییدن پمپ، جریان پیدا کنند. به علاوه احتمال رسوب آنها نیز کمتر است و به راحتی و با روش های مناسب می توان مقدار آنها را کاهش داد یا از مایع خارج نمود.

کل بهره نانوسیال به عنوان سیال انتقال حرارات از طریق ضریب انتقال حرارت تعیین می‌گردد. اگر نانوسیال بتواند ضریب انتقال سیستم‌های انرژی حرارتی را افزایش دهد، آنها می‌توانند به آسانی سایز این سیستم‌ها را کوچک کنند و بهره‌وری انرژی و سوخت را افزایش دهند، کمتر شدن هزینه‌های عملیاتی و پاک‌سازی محیط زیست از دیگر نکات مثبت قابل اشاره نانوسیال می‌باشد. اگر سرعت انتقال حرارت توسط سیالات بیش از پیش افزایش یابد، طراحی رادیاتورها آسان و مؤثرتر شده و می‌توان آنها را کوچکتر ساخت. همچنین اندازه پمپ‌های خنک‌کننده می تواندکاهش یابد.

مطالعات زیادی به‌منظور شناخت خواص نانوسیال‌ها انجام شده است. نتایج بیانگر نسبت سطح به حجم زیاد، سوسپانسیون پایدار و عدم کلوخه شدن در مسیرهای عبور است که این سیالات را برای مقاصد انتقال حرارت مناسب می‌سازد [۱۰-۴]. برای مثال در سیستم‌های سرمایش روغن موتور هر چقدر اندازه و در نتیجه جرم ذره کوچکتر باشد، انرژی سینیتیکی ذره کمتر شده و در هنگام برخورد با دیواره تأثیر سایشی آن ناچیز می‌گردد.

با وجود این باید قبول کرد که تحقیقات روی کاربردهای انتقال حرارت نانوسیال هنوز در مراحل ابتدایی قرار دارد و ضروری است مکانیزم افزایش انتقال حرارت کاملاً شناخته شود و تحقیقات موجود تکمیل گردد.

یکی از روش‌هایی که معمولاً برای افزایش انتقال حرارت به کار می‌رود، استفاده از تجهیزات داخل لوله‌ای مانند سیم پیچ یا نوار پیچیده شده می‌باشد.

در کاربردهایی نظیر صنایع پتروشیمی که دستورالعمل‌های خاصی مورد نیاز است، تجهیزات جاسازی به این دلیل که خصوصیات مکانیکی لوله از قبیل زبری را تغییر نمی‌دهند، به کار می‌رود. زمانی که احتیاج به افزایش انتقال حرارت موجود در مبدل‌های گرمایی می‌باشد، می‌توان از آنها استفاده کرد و دیگر احتیاجی به تعویض لوله داخلی مبدل نمی‌باشد.

سیم‌پیچ‌های موجود در کاربردهایی نظیر تجهیزات خنک‌کننده روغن، پیش‌گرم‌کن‌ها به کار می‌روند. آنها مزایای مختلفی نسبت به دیگر روش‌های افزایش انتقال حرارت دارند:

۱- قیمت پایین
۲- نصب و درآوردن آسان
۳- محافظت از استحکام مکانیکی لوله اصلی
۴- امکان نصب در لوله‌های مبدل‌های گرمایی موجود

۱-۴ تعریف مسئله

هدف کار تجربی که ما می‌خواهیم انجام دهیم، بررسی میزان انتقال حرارت و افت فشار جریان نانو سیال در لوله افقی با سیم پیچ در شرایط دمای دیواره ثابت می‌باشد. با توجه به مطالب عنوان شده، و با توجه به تحقیقات انجام شده روی نانوسیالات، ضرورت انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه احساس می‌شود. با توجه به بررسی‌های انجام شده، به نظر می‌رسد که تاکنون مطالعات بسیار کمی برای سنجش تأثیر بکارگیری همزمان نانوسیال و هندسه‌های افزایشی ویژه انتقال حرارت صورت گرفته‌است، ضمن اینکه نانوسیالات تهیه شده با سیالات پایه و یا نانوذرات متفاوت خواص غیریکسانی دارند و نمی‌توان رابطه‌ای یکسان برای آنها در نظر گرفت.

دلیل اصلی برای فراهم ساختن نانوسیال روغن – نانوتیوب کربن، استفاده گسترده از روغن در صنعت و هدایت حرارتی ذاتی بالا و چگالی پایین نانوتیوب‌های کربن در مقایسه با فلزات می‌باشد.

لذا به دلیل اینکه تاکنون تأثیر همزمان استفاده از این نانوسیال و سیم‌پیچ مورد بررسی واقع نشده است، مطالعه‌ای در این زمینه انجام خواهیم داد.

۱-۵ اهداف پژوهش

اهداف این پژوهش عبارتند از:

۱- ساخت نانوسیال روغن – نانوتیوب کربن طبق روش‌های موجود با غلظت‌های مختلف.
۲- اندازه‌گیری خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال در غلظت‌های مختلف.
۳- ساخت دستگاه آزمایش برای جریان روغن پایه و نانوسیال.
۴- بدست آوردن داده‌های آزمایشگاهی مربوط به انتقال حرارت جابجایی اجباری جریان روغن پایه و نانوسیال در لوله دایروی افقی با و بدون سیم‌پیچ در شرایط عملکردی مختلف (دبی‌ها، غلظت‌ها و ...).
۵- استفاده از داده‌های فوق جهت محاسبه ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت.
۶- تحلیل نتایج و بررسی افزایش انتقال حرارت بواسطه استفاده از نانوسیال به جای سیال پایه در لوله دایروی افقی با و بدون سیم‌پیچ.
۷- اثر پارامترهای مختلف مثل غلظت ذرات نانوسیال ، دبی جرمی، ضخامت سیم سیم‌پیچ، اندازه گام سیم‌پیچ و دمای سیال بر روی افت فشار.
۸- ارزیابی عملکرد استفاده از نانوسیال در لوله‌های صاف و همچنین لوله‌های با سیم‌پیچ از نقطه نظر انتقال حرارت و افت فشار با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی انتقال حرارت مطالعه حاضر و داده‌های افت فشار موجود.

۱-۶ روش اجرای طرح

پس از ساخت نانوسیال، خواص ترموفیزیکی آن با استفاده از دستگاه‌های موجود اندازه‌گیری می‌شود. سپس دستگاه آزمایش طراحی و ساخته شده، وسایل اندازه‌گیری روی آن نصب می‌گردد. ابتدا برای بررسی صحت و دقت