دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

بررسی تجربی انتقال حرارت جریان نانو سیال TiO_2 در لوله با کارگذاری نوار پیچه

پایان نامه کارشناسی ارشد تبدیل انرژی

امیر هوشمند

استاد راهنما
دکتر احمد صداقت

۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحيم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... دو
فهرست اشکال ..... پنج
فهرست جداول ..... شش
فهرست علائم و نمادها ..... هفت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه ۲

۱-۱ پیشگفتار ۲
۱-۲ روش‌های افزایش انتقال حرارت ۳
۱-۳ کاربردهای نانوسیال و لوله با نوار پیچه ۴
۱-۴ تعریف مسئله ۶
۱-۵ اهداف پژوهش ۶
۱-۶ روش اجرای طرح ۷

فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته ۸

۲-۱ مقدمه ۸
۲-۲ نانوسیال ۸
۲-۳ روش‌های آماده‌سازی نانوسیال ۹
۲-۳-۱ آماده‌سازی دوگامی نانوسیال ۹
۲-۳-۲ آماده‌سازی تک‌گامی نانوسیال ۱۰
۲-۴ خواص ترموفیزیکی نانوسیالات ۱۱
۲-۴-۱ چگالی ۱۱
۲-۴-۲ گرمای ویژه ۱۱
۲-۴-۳ لزجت ۱۲
۲-۵ هدایت حرارتی نانوسیال ۱۳
۲-۵-۱ هدایت حرارتی مواد ۱۳
۲-۵-۲ هدایت حرارتی سیالات متداول با پراکنده‌سازی ذرات جامد ۱۳
۲-۵-۳ مدل‌های هدایت حرارتی نانوسیالات ۱۴
۲-۶ انتقال حرارت جابجایی [۵۱] ۱۸
۲-۶-۱ جابجایی اجباری ۱۸
۲-۶-۲ جابجایی آزاد ۱۹

۲-۷ انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال ۲۰
۲-۸ نوار پیچه ۲۳
۲-۹ انتقال حرارت نانوسیال با نوار پیچه ۲۵
فصل سوم: دستگاه آزمایش ۲۸
۳-۱ اجزاء دستگاه آزمایش ۲۸
۳-۲ دستورالعمل آزمایش ۳۵
فصل چهارم: نتایج و بحث پیرامون آنها ۳۷
۴-۱ مقدمه ۳۷
۴-۲ محاسبه خواص ترموفیزیکی نانوسیال ۳۷
۴-۲-۱ هدایت حرارتی نانوسیال ۳۷
۴-۲-۲ چگالی نانوسیال ۳۷
۴-۲-۳ لزجت نانوسیال ۳۷
۴-۲-۴ گرمای ویژه نانوسیال ۳۸
۴-۳ بررسی دقت و تأیید دستگاه آزمایش توسط سیال پایه ۳۸
۴-۴ نحوه انجام محاسبات ۴۰
۴-۴-۱ محاسبه افت فشار و ضریب اصطکاک ۴۱
۴-۴-۲ محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت ۴۱
۴-۵ افت فشار و ضریب اصطکاک ۴۲
۴-۵-۱ تغییرات افت فشار و ضریب اصطکاک با عدد رینولدز در لوله صاف ۴۲
۴-۵-۲ تغییرات افت فشار و ضریب اصطکاک جریان آب با عدد رینولدز در لوله با نوار پیچه ۴۳
۴-۵-۳ تغییرات ضریب اصطکاک با افزودن نانوذرات ۴۵
۴-۵-۴ تغییرات ضریب اصطکاک با کاربری نوار پیچه ۴۷
۴-۶ نتایج انتقال حرارت ۴۹
۴-۶-۱ تاثیر عدد رینولدز بر انتقال حرارت در لوله صاف ۴۹
۴-۶-۲ تاثیر عدد رینولدز بر انتقال حرارت جریان آب با نوار پیچه ۵۰
۴-۶-۳ تاثیر افزودن نانوذرات بر انتقال حرارت ۵۲
۴-۶-۴ تاثیر کاربری نوار پیچه بر انتقال حرارت ۵۴
۴-۷ ارزیابی عملکرد نوار پیچه و نانوسیال ۵۶
۴-۸ روابط تجربی برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک ۵۷
۴-۸-۱ رابطه تجربی برای محاسبه عدد ناسلت ۵۷
۴-۸-۲ رابطه تجربی برای محاسبه ضریب اصطکاک ۵۹
فصل پنجم: نتیجه‌گیری ۶۱
۵-۱ مقدمه ۶۱
۵-۲ نتایج انتقال حرارت ۶۱

۵-۳ نتایج افت فشار ۶۲
۵-۴ پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی ۶۳
پیوست: آنالیز خطا ۶۴
پ-۱ مقدمه ۶۴
پ-۲ محاسبه خطای ضریب انتقال حرارت کلی ۶۴
پ-۳ خطای محاسبه عدد ناسلت ۶۵
پ-۴ خطای محاسبه عدد رینولدز ۶۶
پ-۵ خطای محاسبه عدد پرانتل ۶۶
پ-۶ خطای محاسبه ضریب اصطکاک ۶۶
پ-۷ خطاهای دستگاه‌های اندازه‌گیری ۶۷
پ-۸ خطای آزمایش‌ها ۶۷
مراجع ۶۸

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل۲-۱. طرحواره روش سیم داغ برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی ۱۴
شکل ۲-۲. طرحواره مقطع ساختار نانوسیال [۴۶] ۱۶
شکل ۲-۳. طرحواره جریان داخلی ورودی به یک لوله دایروی ۱۹
شکل ۲-۴. طرحواره نوار پیچه ۲۴
شکل ۲-۵. تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در کار سارما و همکاران [۷۰] ۲۷
شکل ۳-۱. طرحواره سیستم آزمایش ۲۸
شکل ۳-۲. تصویر مخزن ذخیره نانوسیال ۲۹
شکل ۳-۳. تصویر پمپ سیرکولاسیون ۲۹
شکل ۳-۴. تصویر مخزن تولید بخار و المنت‌های کف آن ۳۰
شکل ۳-۵. نوارهای پیچه با گام‌های مختلف ۳۱
شکل ۳-۶. تصویر اتصالات نری- مادگی مخصوص ترموکوپل نوع K ۳۱
شکل ۳-۷. نمایش‌گر دما ۳۲
شکل۳-۸. مانومتر U- شکل ۳۲
شکل ۳-۹. مبدل حرارتی ۳۳
شکل۳-۱۰. دبی سنج ۳۴
شکل ۳-۱۱. دستگاه همزن فراصوت ۳۵
شکل ۴-۱. ضریب اصطکاک جریان آب در لوله صاف ۳۹
شکل ۴-۲. عدد ناسلت جریان آب در لوله صاف ۴۰
شکل ۴-۳. تغییرات افت فشار با تغییر در عدد رینولدز برای جریان آب و نانوسیالات مختلف در لوله صاف ۴۲
شکل ۴-۴. تغییرات ضریب اصطکاک با عدد رینولدز برای جریان آب و نانوسیال در لوله صاف ۴۳
شکل ۴-۵. تغییرات افت فشار با تغییر در عدد رینولدز برای جریان آب در لوله صاف و با نوار پیچه ۴۴
شکل۴-۶. تغییرات ضریب اصطکاک با تغییر در عدد رینولدز برای جریان آب در لوله صاف و با نوار پیچه ۴۴
شکل ۴-۷. تغییرات ضریب اصطکاک با غلظت حجمی نانوذرات برای جریان در لوله با نوار با گام ۱۵ ..... ۴۵
شکل ۴-۸. تغییرات ضریب اصطکاک با غلظت حجمی نانوذرات برای جریان در لوله با نوار با گام ۵..... ۴۶
شکل ۴-۹. نسبت ضریب اصطکاک جریان نانوسیال به آب برای گام پیچش نوار ۱۰ ..... ۴۶
شکل ۴-۱۰. تغییرات ضریب اصطکاک با گام پیچش نوار در جریان نانوسیال با غلظت ٪۰/۱ حجمی ۴۸
شکل ۴-۱۱. تغییرات ضریب اصطکاک با گام پیچش نوار در جریان نانوسیال با غلظت ٪۰/۵ حجمی ۴۸
شکل ۴-۱۲. نسبت ضریب اصطکاک نوار پیچه به لوله صاف برای نانوسیال با غلظت ۰/۲ درصد حجمی ۴۹

شکل ۴-۱۳. تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی با عدد رینولدز برای جریان آب و نانوسیال در لوله صاف ۵۰
شکل ۴-۱۴. تغییرات عدد ناسلت با عدد رینولدز برای جریان آب و نانوسیال در لوله صاف ۵۰
شکل ۴-۱۵. تغییر ضریب انتقال حرارت با عدد رینولدز برای جریان آب با تغییر در گام پیچش نوار ۵۱
شکل ۴-۱۶. تغییرات عدد ناسلت با عدد رینولدز برای جریان آب با تغییر در گام پیچش نوار ۵۱
شکل ۴-۱۷. تغییرات عدد ناسلت با غلظت حجمی نانوذرات برای جریان در لوله با نوار با گام ۱۵ ..... ۵۲
شکل ۴-۱۸. تغییرات عدد ناسلت با غلظت حجمی نانوذرات برای جریان در لوله با نوار با گام ۵ ..... ۵۲
شکل ۴-۱۹. نسبت عدد ناسلت جریان نانوسیال به آب برای گام پیچش نوار ۱۰ ..... ۵۳
شکل ۴-۲۰. تغییرات عدد ناسلت با تغییر گام نوار پیچه برای جریان نانوسیال ۰/۱ درصد حجمی ۵۵
شکل ۴-۲۱. تغییرات عدد ناسلت با تغییر گام نوار پیچه برای جریان نانوسیال ۰/۵ درصد حجمی ۵۵
شکل ۴-۲۲. نسبت عدد ناسلت جریان در لوله صاف به نوار پیچه برای نانوسیال ۰/۲ درصد حجمی ۵۶
شکل ۴-۲۳. ارزیابی عملکرد نوار پیچه و نانوسیال ۵۷
شکل ۴-۲۴. مقایسه داده‌های تجربی و رابطه (۴-۱۷) برای محاسبه عدد ناسلت ۵۹
شکل ۴-۲۵. مقایسه داده‌های تجربی و رابطه (۴-۲۰) برای محاسبه ضریب اصطکاک ۶۰

فهرست جداول

جدول ۲-۱. مقایسه هدایت حرارتی جامدات و سیالات در دمای ۳۰۰K [۳۷] ۱۳
جدول ۳-۱. ابعاد هندسی نوارهای پیچه کارگذاری شده طی آزمایشها ۳۱
جدول ۳-۲. مشخصات نانوذرات مورد استفاده ۳۴
جدول ۴-۱. مقادیر متوسط خواص برای آب و نانوسیال با غلظت‌های مختلف ۳۸
جدول پ- ۱. خطاهای هر یک از کمیت‌های اندازه‌گیری شده ۶۷
جدول پ- ۲. حداکثر خطای محاسبه شده در آزمایش‌ها مختلف ۶۷

فهرست علائم و نمادها

نمادهای لاتین

A	مساحت سطح انتقال حرارت (m^2)
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kgK)
D	قطر داخلی بخش آزمایش (m)
f	ضریب اصطکاک دارسی
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی (W/m^2K)
H	گام پیچش نوار پیچه (m)
k	ضریب هدایت حرارتی (W/mK)
L	طول بخش آزمایش (m)
$\dot{m}$	دبی جرمی جریان (kg/s)
Nu	عدد ناسلت جریان
Pe	عدد پکلت
Pr	عدد پرانتل
q_{conv}	انتقال حرارت جابجایی (W)
Q	دبی حجمی جریان (m^3/s)
Re	عدد رینولدز
T	دما (K)
u_m	سرعت متوسط جریان (m/s)
v	سرعت متوسط جریان (m/s)

نمادهای یونانی

ρ	چگالی (kg/m^3)
ϕ	غلظت حجمی نانوسیال $(\%)$
μ	لزجت دینامیکی $(Pa.s)$
ΔT	اختلاف دما (K)
ν	لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1})
ΔP	اختلاف فشار (Pa)
Δh	اختلاف ارتفاع مایع مانومتر (m)

زیرنویس‌ها

سیال پایه	*f*
مقدار متوسط	*m*
نانوسیال	*nf*
نانوذره	*np*
ذره	*p*
آب	*w*

چکیده

این پژوهش به بررسی تجربی انتقال حرارت و افت فشار جریان نانوسیال اکسید تیتانیوم می‌پردازد. در دو دهه اخیر مطالعات بر روی رفتار رئولوژیکی و انتقال حرارتی نانوسیالات به شدت رشد کرده و نتایج حاصل، پیشرفت‌های چشمگیری در این زمینه را حکایت می-کند. به منظور افزایش هرچه بیشتر انتقال حرارت، در کنار استفاده از سیال مناسب، می‌توان از تجهیزات درون‌لوله‌ای نظیر سیم‌پیچ، نوار پیچه و نوار حلزونی نیز بهره جست. طی کار حاضر آزمایش‌ها برای آب و نانوسیال با غلظت‌های مختلف درون لوله صاف و با کارگذاری نوار پیچه انجام گرفت. شرط مرزی دمای ثابت دیواره بر مسئله حاکم بود. بخش آزمایش به طول ۰/۹۳۵ m، از یک لوله مسی به قطر داخلی ۸mm که نوارها درون آن قرار می‌گرفتند تشکیل شده بود. گام پیچش نوارهای مورد استفاده در محدوده $0 < H/D < 15$ بوده و غلظت حجمی نانوسیالات مورد استفاده در این پژوهش $0 < \phi < 0.5\%$ بود. محدوده عدد رینولدز جریان طی این پژوهش ۳۰۰۰ تا ۲۲۰۰۰ است، که دربرگیرنده رژیم‌های جریان گذار و مغشوش است، اما به نوعی با وجود نوار پیچه می‌توان اظهار کرد که اغتشاشات حاصل در جریان، رژیم مغشوش را بر شکل جریان دیکته می‌کند. نتایج حاکی از بهبود انتقال حرارت با بکارگیری نانوسیالات بوده، به گونه‌ای که با تغلیظ نانوسیال این روند همچنان ادامه می‌یافت. همچنین بکارگیری همزمان نانوسیال و نوار پیچه تاثیر بسیار چشمگیری بر افزایش انتقال حرارت گذاشته، به طوری که بیشترین انتقال حرارت برای نانوسیال ٪۰/۵ حجمی و نوار پیچه با گام ۵ ثبت شد. از طرفی باید متذکر شد که هر دو روش غیرفعال مورد استفاده در این تحقیق بر افزایش میزان افت فشار نیز دامن می‌زنند. بدین ترتیب با بررسی پارامتر ضریب عملکرد میزان چربش انتقال حرارت به افت فشار نیز بررسی شد. بررسی مزبور نشان‌دهنده مزیت بالای استفاده همزمان از نوار پیچه و نانوسیال بود. در پایان به منظور تکمیل هرچه بیشتر بانک اطلاعات حاصل از پژوهش‌ها در این زمینه و سهل‌الوصول نمودن کاربرد نتایج پژوهش حاضر، به ارائه روابطی برای محاسبه عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در محدوده آزمایش‌ها پرداختیم.

کلید واژه: انتقال حرارت، نانوسیال، افت فشار، نوار پیچه، دما ثابت

فصل اول

مقدمه

۱-۱ پیش‌گفتار

انرژی به عنوان بزرگ‌ترین مشکل رودرروی بشر در ۵۰ سال آینده ارزیابی شده است. علاوه بر این کاهش انتشار فرآورده‌های کربنی و جلوگیری از گرم شدن زمین به عنوان یک مشکل جدی مد نظر است. 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 کابردهای گوناگونی نظیر میکروالکترونیک، حمل و نقل، خودرو، اشعه‌های ایکس و لیزر، استفاده عملی از انرژی خورشیدی برای تولید توان و ... در حال افزایش‌اند. با رشد و توسعه فناوری درصنایع الکترونیک، کامپیوترهایی با سرعت‌های بالاتر، اندازه‌های کوچکتر و قابلیت‌های بیشتر تولید شده 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 پیش رو در افزایش قدرت موتورها و یا خودروهای هیبرید، ناگزیر از بکارگیری رادیاتورهای بزرگ‌تر و در نتیجه سطح پیشانی[۱] بیشتر است که باعث افزایش نیروی پسا 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 پره و میکروکانال و یا افزایش یافتن نرخ جریان می‌باشد، که با زیاد شدن توان مصرفی پمپ همراه می‌باشد، اما روش‌های دیگری نیاز است که پاسخگوی کامل درخواست صنایع در خنک‌کاری باشد.

به هرحال، راه حل‌های طراحی کنونی تقریباً به انتهای راه 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

---

[۱] Frontal area

هدایت حرارتی پایین‌تری برخوردارند. از این‌رو همواره سعی شده است که 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 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[۱] اعلام شد [۱]. بعدها اضافه کردن ذراتی به اندازه میکرو/ میلی‌متر با هدایت حرارتی بالا به آنها توسط آهوجا[۲] [۲] مورد بررسی قرار گرفت. سیالات انتقال حرارتی که شامل ذراتی با این اندازه بودند، معایبی نظیر خوردگی قطعات در اثر سایش، گرفتگی مسیرهای جریان، ته‌نشینی ذرات و افزایش افت فشار را موجب می‌شدند. بدین ترتیب، این ذرات انتخاب مناسبی برای افزایش انتقال حرارت نبوده و جستجو برای یافتن سیال انتقال حرارت جدید ادامه یافت. برای رهایی از این مشکلات، فناوری نانو با فراهم کردن فرصت تولید موادی در محدوده اندازه نانو که در سیالات انتقال حرارت معمول معلق شوند، ارائه شده تا امکان تولید گروه جدیدی از سیالات مهندسی شده با هدایت حرارتی بالا را فراهم کند و در ضمن مشکلاتی که ذراتی با اندازه بزرگ‌تر ایجاد می‌کردند را برطرف نماید. این دسته جدید از سیالات انتقال حرارت که در آن نانوذرات معلقند را نانوسیال یا سوسپانسیون ذرات نانو می‌گویند. نانوسیالات حتی با غلظت-های بسیار کم نیز سبب افزایش قابل ملاحظه در خواص حرارتی می‌شوند. 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 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. قاعدتاً این وضعیت منجر به ظهور سیستم‌های انتقال حرارت کوچک‌تر با بهایی کمتر شده و بهبود کارایی را نیز درپی خواهد داشت. در این راستا، برگلز و همکارانش[۳] [۳]، روش‌های مختلف را برای افزایش انتقال حرارت ارائه نمودند. این روش‌ها شامل دو دسته روش‌های فعال[۴] و روش‌های غیرفعال[۵] هستند. در روش‌های غیرفعال از سطوح با هندسه‌های خاص یا سیال‌های افزودنی برای افزایش انتقال حرارت استفاده می‌شود. از میان این روش‌ها به قرار دادن وسایل افزایشی جابجا شده[۶] در داخل مجرای جریان و افزودنی‌ها برای مایعات[۷] می‌توان اشاره کرد که در ادامه به آنها خواهیم پرداخت. به هر حال در این قبیل روش‌ها،

---

۱ Maxwell

۲ Ahuja

۳ Bergles et al.

۴ Active

۵ Passive

۶ Displaced insert devices

۷ Additives for liquids

محدودیت اصلی هدایت حرارتی کم سیال است. در روش‌های فعال به یک نیروی خارجی نظیر میدان الکتریکی یا آکوستیک و ارتعاش سطحی و یا اختلاط مکانیکی نیاز داریم. استفاده از انرژی خارجی در حجم‌های کوچک گران و نامتداول است.

مبدل‌های حرارتی با استفاده از سطوح انتقال حرارت ساده ساخته می‌شوند. استفاده از یک سطح افزایش دهنده انتقال حرارت می‌تواند مقادیر بالاتری برای مقدار hA به ازای واحد سطح پایه نسبت به سطح صاف تولید کند. همانطور که می‌دانیم هر کدام از روش‌های افزایش انتقال حرارت، علاوه بر ازدیاد ضریب انتقال حرارت، افت فشار را نیز افزایش می‌دهند. از اینرو روش‌های مذکور علاوه بر تأمین انتقال حرارت مورد نیاز، محدودیت‌های دبی جریان و افت فشار را نیز باید تا حد قابل قبولی مرتفع سازند. بنابراین سطحی که بتواند افزایش انتقال حرارت مورد نیاز را با کمترین افت فشار تامین کند ارجح‌تر است.

تجهیزات درون لوله‌ای نیز می‌توانند با یک یا ترکیبی از چند مورد زیر، باعث افزایش انتقال حرارت و متعاقباً افزایش نامطلوب 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 نشان‌دهنده‌ی 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 نوار پیچه

اینکه افزوده شدن ذرات جامد به مایعات، انتقال حرارت آنها را افزایش می‌دهد امری کاملاً شناخته شده است و مطالعات نظری آن به دهه اول ۱۸۰۰ و ماکسول مربوط می‌شود. در حدود ۱۰۰ سال پیش استفاده از مخلوط‌های جامد-مایع در اندازه میکرومتر و میلی‌متر با هدف افزایش رسانش گرمایی سیال شروع شد، اما درشتی این ذرات مشکلاتی همچون سایش لوله‌ها 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 سیال جدید نسبت به سیال خالص اولیه 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 دسته‌ای جدید از سیالات را که قادر به افزایش نرخ انتقال حرارت از طریق پخش ذرات در اندازه‌های نانومتری در سیالات عامل انتقال حرارت می‌باشند را تولید نمود. از آنجا که ذرات جامد معلق شده در سیال پایه از ضریب هدایت گرمایی بالاتری نسبت به سیال پایه برخوردارند، انتظار می‌رود که با افزودن آنها به سیال پایه امکان

بهبود بازدهی فرایند انتقال حرارت فراهم گردد. افزایش هدایت حرارتی مؤثر و نیز تغییر چگالی، گرمای ویژه و لزجت، دلیل مهمی برای بهبود رفتار انتقال حرارت نانوسیال می‌باشد.

نانوسیالات، سوسپانسیون‌های رقیقی متشکل از ذرات خیلی کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر در حداقل یک بعد هستند و هدایت حرارتی بسیار بالاتر از سیال پایه دارند. چویی[۱] [۴] در سال ۱۹۹۵ میلادی اولین کسی بود که از تعلیق نانوذرات درون سیال پایه، نانوسیال را پدید آورد. مزیت 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 می‌شود 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 می‌توان 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، می‌توان به آسانی اندازه این سیستم‌ها را کوچک کرده و بهره‌وری انرژی و سوخت را افزایش داد. کم‌تر شدن هزینه‌های عملیاتی و پاک‌سازی محیط زیست از دیگر نکات مثبت قابل توجه نانوسیالات می‌باشد. اگر نرخ 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 می‌تواند کاهش یابد.

مطالعات زیادی به منظور شناخت خواص نانوسیالات 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 [۱۱-۵]. 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[۲] مانند سیم پیچ یا نوار پیچه 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.

نوار پیچه در کاربردهایی نظیر تجهیزات خنک‌کننده، پیش‌گرم‌کن‌ها و به طور کلی در انواع مبدل‌های حرارتی به

---

[۱] Choi

[۲] Insert

کار می‌رود. این تجهیزات ساده مزایای مختلفی نسبت به دیگر روش‌های افزایش انتقال حرارت دارند:

۱- قیمت پایین
۲- نصب و درآوردن آسان
۳- کاهش توان پمپ هنگامی که به منظور دستیابی به انتقال حرارت برابر با سیال پایه مقایسه می‌شود
۴- محافظت از استحکام مکانیکی لوله اصلی
۵- امکان نصب در لوله‌های مبدل‌های گرمایی موجود

۱-۴ تعریف مسئله

هدف کار تجربی که قصد انجام آن را داریم، بررسی میزان انتقال حرارات و افت فشار جریان نانوسیال در لوله افقی با نوار پیچه در شرایط دمای ثابت دیواره می‌باشد. با توجه به مطالب عنوان شده، و با عنایت به تحقیقات نسبتاً محدود انجام شده روی نانوسیالات، ضرورت انجام تحقیقات در این زمینه احساس می‌شود. با نگاه به بررسی‌های انجام شده، به نظر می‌رسد که تاکنون مطالعات بسیار اندکی برای سنجش تأثیر بکارگیری همزمان نانوسیال و هندسه-های افزایشی ویژه انتقال حرارت صورت گرفته است. 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 آب- اکسید تیتانیوم، استفاده گسترده از آب در صنعت و همچنین هدایت حرارتی ذاتی و پایداری نسبی بالای نانوذرات اکسید تیتانیوم در مقایسه با دیگر مواد می‌باشد. لذا به دلیل اینکه تاکنون تأثیر همزمان استفاده از این نانوسیال و نوار پیچه مورد بررسی واقع نشده است، مطالعه‌ای در این زمینه انجام خواهیم داد.

۱-۵ اهداف پژوهش

اهداف این مطالعه عبارتند از:

۱- تهیه نانوسیال آب- اکسید تیتانیوم طبق روش‌های موجود با غلظت‌های مختلف.
۲- محاسبه خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال در غلظت‌های مختلف.
۳- ساخت دستگاه آزمایش برای جریان آب و نانوسیال.
۴- بدست آوردن داده‌های آزمایشگاهی مربوط به انتقال حرارت جابجایی اجباری جریان سیال پایه و نانوسیال در لوله دایروی افقی با و بدون نوار پیچه 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 به واسطه استفاده از نانوسیال به جای سیال پایه در لوله دایروی افقی با و بدون نوار پیچه.
۷- اثر پارامترهای مختلف نظیر غلظت ذرات نانوسیال، دبی جرمی، اندازه گام نوارپیچه و دمای سیال بر

روی افت فشار.

۸- ارزیابی عملکرد استفاده از نانوسیال در لوله‌های صاف و همچنین لوله‌های با نوار پیچه از نقطه نظر انتقال حرارت و افت فشار با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی انتقال حرارت مطالعه حاضر و داده‌های افت فشار موجود و بررسی نهایی میزان چربش این دو بر یکدیگر.

۹- ارائه روابطی برای محاسبه ضریب انتقال حرارت و افت فشار جریان نانوسیال در لوله با نوار پیچه و بدون آن و با کاربری آب و نانوسیال.

۱-۶ روش اجرای طرح

روش اجرای طرح بصورت تجربی خواهد بود. بدین‌ترتیب که پس از تهیه نانوسیال، خواص ترموفیزیکی آن با استفاده از روابط مناسب موجود ارزیابی می‌شود. سپس دستگاه آزمایش طراحی و ساخته شده، وسایل اندازه‌گیری روی آن نصب می‌گردد. ابتدا تجهیزات اندازه‌گیری کالیبره می‌شوند و پس از آن برای بررسی صحت و دقت دستگاه، نتایج برای سیال پایه خالص ثبت می‌گردد و سپس آزمایش‌ها برای جریان نانوسیال انجام می‌شود. با توجه به تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل دبی، غلظت‌های مختلف نانوسیال و گام‌های پیچش مختلف نانوسیال، کمیت‌های مورد نظر محاسبه شده و تحلیل می‌شوند. پس از تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده باید قادر به ارائه روابطی برای داده‌های حاصل باشیم. در نهایت ارزیابی عملکرد سیستم از بعد انتقال حرارت و افت فشار، انجام خواهد گرفت.

فصل دوم

مروری بر تحقیقات گذشته

۲-۱ مقدمه

افزایش انتقال حرارت و نیز سیالات انتقال‌دهنده حرارت موضوع بسیاری از تحقیقات در دهه‌های اخیر بوده است. سیالات انتقال حرارت شرایط را برای تبادل انرژی در یک سیستم مهیا می‌کنند و اثرات آنها بستگی به ویژگی‌های فیزیکی از قبیل هدایت، لزجت، چگالی و ظرفیت گرمایی دارد. هدایت حرارتی پایین، اغلب مهمترین محدودیت سیالات انتقال حرارت می‌باشد.

اخیراً، علاقه‌ای به استفاده از نانوذرات به عنوان مواد افزودنی برای اصلاح و بهبود کارکرد سیالات انتقال حرارت بوجود آمده است. نانوسیالات با برتری‌هایی که در زمینه انتقال حرارت جابجایی سیالات دارند، بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرند. اخیراً تحقیقات تئوری و تجربی مهمی بر روی انتقال حرارت جابجایی انجام شده است و مقالاتی در مورد افزایش انتقال حرارت سوسپانسیون‌های نانوذرات جامد فلزی یا غیرفلزی در مقایسه با انتقال حرارت سیال پایه موجود می‌باشد. پراکندگی یا مخلوط شدن نانوذرات با هدایت حرارتی بالا علاوه بر بهبود هدایت حرارتی سیالات انتقال حرارت، ضریب انتقال حرارت را نیز افزایش داده است[۱۷-۱۲].

همچنین با توجه به تکنیک‌های متفاوت برای افزایش انتقال حرارت، وسایل درون لوله‌ای از جمله نوار پیچه دارای نقش برجسته‌ای می‌باشند و از این رو تحقیقاتی نیز در این زمینه انجام گرفته است. در این فصل به برخی از این مطالعات اشاره می‌گردد.

۲-۲ نانوسیال

با پیشرفت علم، تولید نانوذرات از مواد گوناگون میسر شده است. یکی از خصایص مواد در ابعاد نانو، نسبت سطح به حجم بالای آنهاست که توانایی‌های خاصی به آنها بخشیده است. نانوسیالات به عنوان دسته مهیج جدیدی از فناوری نانو پدیدار شده‌اند که بر پایه سیالات انتقال حرارت می‌باشند و در چند سال گذشته به طور فوق‌العاده‌ای رشد کرده‌اند. دانشمندان و مهندسان سعی بر این دارند تا قوانین حاکم بر خواص ترموفیزیکی این سیالات را کشف کنند، لذا سازوکارهای جدید پیشنهاد کرده و مدل‌های غیر معمولی را برای توضیح این رفتارها ارائه می‌دهند.

نانوسیال عبارتی است که توسط چوی [۴] به نوع جدیدی از سیال انتقال حرارت که شامل مقدار کمی از نانوذرات فلزی یا غیرفلزی بود، اتلاق شد. این ذرات به صورت همگن و پایدار در فاز پیوسته‌ای پراکنده شده بودند.

تحقیق و توسعه ابتدایی فناوری نانوسیال، پتانسیل بالای نانوسیالات را برای کاربرد در انتقال حرارت نشان داد و منجر به این شد که هم صنعت و هم دانشگاه‌های سراسر جهان تلاش‌هایی را در خصوص پژوهش در این راستا انجام دهند.

اندازه میانگین ذرات بکار رفته در نانوسیالات ممکن است از ۱ تا ۱۰۰ نانومتر متغیر باشد. فهم کامل رفتارهای انبوهشی و رئولوژیکی نانوسیالات برای محققین نانوسیال بسیار مهم است. از این رو در این قسمت به بررسی تحقیقات گذشته در خصوص خواص ترموفیزیکی نانوسیالات می‌پردازیم. کار جامعی در این زمینه اخیراً توسط دونگدوگسوک[۱] و وونگوایزز[۲] [۱۸] ارائه شده است. تعدادی از نانومواد و سیالات پایه به شرح ذیل اند:

انواع نانومواد: نانوذرات مورد استفاده در نانوسیالات از مواد مختلفی ساخته می‌شوند، مانند: اکسیدهای سرامیکی (CuO و Al_2O_3)، اکسیدهای نیتریدی (SiN و AlN)، سرامیک‌های کاربیدی (TiC و SiC)، فلزات (Au، Ag و Cu)، نیمه رساناها (SiC و TiO_2)، ترکیبات کربنی (نانولوله‌های کربنی، الماس و گرافیت) و مواد کامپوزیتی مثل نانوذرات آلیاژی $Al_{70}Cu_{30}$.

انواع سیالات پایه: انواع مختلفی از مایعات نیز بعنوان سیال میزبان بکار گرفته می‌شوند، مانند: آب، اتیلن گلیکول، روغن موتور، سیالات زیستی[۳] و محلول های پلیمری.

۲-۳ روش‌های آماده‌سازی نانوسیال

تهیه نانوسیالات اولین قدم در تحقیقات نانوسیالات می‌باشد. این سیالات ترکیب ساده‌ی مایع- جامد نیستند. پیشگام در شاخه نانوسیالات، چوی، در یکی از مقالات خود [۱۶] به این نکته اشاره کرده است که نانوذرات با اندازه یکسان که به صورت یکنواخت پراکنده شوند بهترین نانوسیال را ایجاد خواهند کرد. برای نیل به این هدف، محققین روش‌های مختلفی را جهت آماده‌سازی نانوسیالات توسعه داده‌اند. برای تهیه نانوسیال باید از پراکندگی صحیح نانوذرات در سیال و مکانیزم صحیح افزودن ذرات به سیستم بمنظور رسیدن به سوسپانسیون پایدار بدون ته‌نشینی آگاه بود. از این‌رو فرآیندی که به وسیله آن ذرات در داخل مایع پراکنده می‌شوند نقش مهمی در تعیین خصوصیات نانوسیال دارد. اصولاً دو روش برای تهیه نانوسیالات وجود دارد: یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای.

۲-۳-۱ آماده‌سازی دوگامی نانوسیال

در بیشتر کارهای تجربی که بر نانوسیالات غیرفلزی کار شده است، از روش دوگامی برای تولید نانوسیال استفاده

---

۱ Duangthongsuk

۲ Wongwises

۳ Bio Fluids

شده است. نانوپودر خشک با استفاده از روش‌های مختلفی از قبیل چگالش گاز بی‌اثر یا تجزیه بخار شیمیایی (تک-گامی) ساخته می‌شوند، که روش اولی توسط گرانکویست[۱] و بورمان[۲] توسعه داده شد [۱۹]. روش‌های شیمیایی نیز برای تولید نانوذرات شامل رسوب شیمیایی، رسوب‌سازی با بخار شیمیایی، میکرو-امولوسیون[۳]، گرماکافت افشانی[۴] و گرما افشانی[۵] می‌باشد. این نانوذرات با روش های ساده‌ای نظیر همزن فراصوت یا آسیاب توپی[۶] (دوگامی)، با یا بدون پراکنده‌سازها یا عوامل فعال‌ساز سطحی در سیال پراکنده می‌شوند.گاهی اوقات، قبل از فرایند پراکنده‌سازی لازم است عملیات سطحی بر نانوذرات انجام گیرد. برای مثال ایستمن و همکاران[۷] [۲۰]، لی و همکاران [۲۱] و ونگ و همکاران[۸] [۲۲] از روش همزن فراصوت برای تهیه نانوسیال Al_2O_3 استفاده کردند. همچنین مورشد و همکاران [۲۳] سوسپانسیون TiO_2 در آب را با این روش تهیه کردند. در مقایسه دو روش، تکنیک دو مرحله‌ای برای نانوذرات اکسیدی بهتر عمل می کند، به طوری که برای ذرات فلزی کمتر موفق است.

روش‌های شیمیایی و فیزیکی برای پراکنده‌سازی ذرات در سیال پایه به طور گسترده مورد تحقیق قرار گرفته‌اند. بجز استفاده از دستگاه همزن فراصوت تکنیک‌های دیگری مانند کنترل PH یا استفاده از عوامل فعال سطحی[۹] یا پراکنده‌سازها[۱۰] نیز استفاده می‌شوند.

هدف از تمامی این روش‌ها تغییر خواص سطحی ذرات معلق و جلوگیری از تشکیل توده‌های ذرات می‌باشد. انتخاب فعال‌ساز و پراکنده‌ساز مناسب بستگی به خواص محلول و ذرات دارد.تیول‌ها، اسید اولئیک و سدیم دودسیل بنزن سولفونات نمونه‌هایی از تغییر دهنده‌های PH، فعال‌سازها و پراکنده‌سازهای متداول هستند [۱۲،۲۴].

۲-۳-۲ آماده‌سازی تک‌گامی نانوسیال

فرایند پراکنده‌سازی دوگامی برای ساخت نانوسیال فلزی مشکل است. روش تبخیر یک مرحله‌ای مستقیم توسط اکو و همکاران [۲۵] انجام شده و تکنیک وروس[۱۱] نامیده می‌شود. این روش ایده اصلی برای تهیه نانوذرات بود، اما متعاقباً جداکردن ذرات ازسیالات برای تهیه نانوذرات خشک دشوار است. روش وروس اصلاح شده توسط واگنر و

---

۱ Granqvist

۲ Buhrman

۳ Micro-emulsions

۴ Spray pyrolysis

۵ Thermal spraying

۶ Ball milling

۷ Eastman et al.

۸ Lee et al. and Wang et al.

۹ Surfactant

۱۰ Dispersant

۱۱ VEROS

همکاران [۲۶] پیشنهاد شد. ایستمن و همکاران [۲۰] تکنیک وروس اصلاح شده را توسعه دادند و یک روش تبخیری را برای تهیه نانوسیالات پایدار بکار بردند. یک فرایند تک‌گامی جدید برای ساخت نانوسیال مس در اتیلن گلیکول توسط ایستمن و همکاران [۲۷] بکار رفت. در این روش با چگالش بخارات مس، نانوذرات تشکیل می‌شوند. بخار مس با تماس با فشار بخار پایین سیال، تراکم نانوذرات را کمینه می‌کند.

از دیگر روش های تک‌گامی می‌توان به کار پتل[۱] [۲۸] اشاره کرد که با کاهش سیترات نانوذرات طلا و نقره بدست آورد، ذرات بدست آمده با این روش اندازه‌های بسیار باریکی داشتند.

۲-۴ خواص ترموفیزیکی نانوسیالات

هدایت حرارتی نانوسیالات توجه اصلی در نانوسیال را به خود اختصاص داده است. هرچند برای سیالات ساکن این مهمترین موضوع است ولی با در نظر گرفتن سیالات انتقال حرارت، ضریب انتقال حرارت نانوسیال در جریان مهمترین موضوع می‌باشد. دیگر خواص مهم غیر از هدایت حرارتی که بر ضریب انتقال حرارت اثر می‌گذارد، عبارتند از : چگالی، گرمای ویژه و لزجت نانوسیال.

۲-۴-۱ چگالی

چگالی نانوسیالات را معمولاً با نسبت چگالی نانوسیال به سیال پایه بر طبق رابطه پاک[۲] و چو[۳] [۲۹] محاسبه می‌کنند.

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p \qquad (۱-۲)$$

۲-۴-۲ گرمای ویژه

برای محاسبه گرمای ویژه نانوسیالات نیز معمولاً از دو رابطه مشهور استفاده می‌شود؛ که یکی معادله ژوان[۴] و روتزل[۵] [۳۰] است؛ در این معادله نسبت گرمای ویژه نانوسیال به سیال پایه به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{C_{p,nf}}{C_p} = \frac{1+k_c\phi}{1+k_p\phi} \qquad (۲-۲)$$

که $k_c = \left(\frac{\rho_s c_{p,s}}{\rho c_p} - 1\right)$.

---

[۱] Patel et al.

[۲] Pak

[۳] Cho

[۴] Xuan

[۵] Roetzel