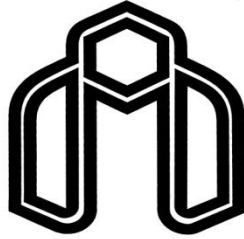


الله الرحمن الرحيم



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مکانیک

گروه حرارت و سیالات

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بررسی تجربی انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال در جریان جابجایی اجباری درون یک لوله افقی

دانشجو:

حامد سلطان زاده

استاد راهنما:

دکتر محمد حسن کیهانی

استاد مشاور:

دکتر فرشاد کوثری

دکتر محسن نظری

اردیبهشت ماه ۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : مکانیک

گروه : تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای حامد سلطان زاده

تحت عنوان: بررسی تجربی انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال در جریان جابجایی اجباری درون یک لوله افقی

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی : فرشاد کوثری		نام و نام خانوادگی : محمد حسن کیهانی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم که همواره مشوق و حامی من در دوران تحصیل بوده‌اند.

تقدیر و تشکر:

پس از حمد و ثنای پروردگار، نخستین آموزگار انسان، بر خود لازم می‌دانم تا از زحمات استاد راهنمای محترم جناب آقای دکتر کیهانی که مرا در به انجام رساندن این پایان نامه راهنمایی کردند، تقدیر و تشکر نمایم. همچنین از زحمات مشاوران گرامی، آقایان دکتر کوثری، دکتر نظری، دکتر هیهات و آقای مهندس شیخ حسنی سپاسگزاری می‌کنم.

در انتها از تمام عزیزانی که به هر طریقی در انجام این پروژه نقش آفرینی نموده‌اند، سپاسگزاری نموده و از خداوند منان آرزوی سلامت و توفیق روزافزون برایشان دارم.

دانشجو تأیید می‌نماید که مطالب مندرج در این پایان نامه نتیجه تحقیقات خودش می‌باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

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

خرداد ۱۳۹۰

چکیده:

نانوسیال بوسیله معلق‌سازی پایدار نانوذرات در سیال پایه تولید می‌شود. در این پروژه انتقال حرارت جابجایی و افت فشار نانوسیالات آلومینا/آب و تیتانیا/آب درون یک لوله افقی به صورت تجربی بررسی شده است. به همین منظور، یک حلقه جریان برای انجام آزمایشات ساخته شده که شرط مرزی در نظر گرفته شده برای بخش آزمایش سیستم، شار حرارتی ثابت در جداره است. نانوذرات Al_2O_3 با اندازه ۴۰ نانومتر و همچنین نانوذرات TiO_2 با اندازه ۱۵ نانومتر تهیه شده و با تعلیق پایدار در آب مقطر در غلظت‌های ۰٫۱٪، ۰٫۵٪، ۱٪، ۱٫۵٪ و ۲٪ نانوسیالات تولید شده‌اند. نتایج بررسی‌ها، بیانگر افزایش انتقال حرارت و عدد ناسلت با استفاده از نانوذرات در سیال پایه است و این بهبود در انتقال حرارت با افزایش غلظت حجمی افزایش می‌یابد. حداکثر افزایش عدد ناسلت برای نانوسیال آلومینا/آب در ۲٪ حجمی و در رینولدز ۱۳۵۰۰ در حدود ۲۲٪ مشاهده می‌شود. این در حالی است که بیشترین افزایش برای نانوسیال تیتانیا/آب در رینولدز ۱۱۸۰۰ تقریباً ۸٪ می‌باشد. ضمناً حلقه جریان به گونه‌ای طراحی شده که اختلاف فشار دو سر جریان نانوسیال نیز با یک دستگاه اندازه‌گیر دیفرانسیلی فشار اندازه‌گیری می‌شود. افت فشار اندازه‌گیری شده با استفاده از نانوسیالات تقریباً برابر با سیال پایه می‌باشد. همچنین این آزمایش برای آب به عنوان سیال پایه نیز انجام گردید و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شده است. علاوه بر این، داده‌های تجربی با نتایج حاصل از پیش‌بینی‌های انتقال حرارت و افت فشار تک‌فاز در جریان درهم مقایسه شده است. به طور کلی نتایج بررسی‌ها نشان از پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت جابجایی و افت فشار نانوسیالات با دقت مناسب بوسیله معادلات تک‌فازی موجود دارد. این نتیجه به شرطی امکان‌پذیر است که از خواص اندازه‌گیری شده هدایت حرارتی و ویسکوزیته که وابسته به دما و غلظت نانوذرات هستند، در محاسبه پارامترهایی چون عدد رینولدز، پرانتل و ناسلت استفاده شود.

کلمات کلیدی: نانوسیال - بررسی تجربی - انتقال حرارت جابجایی - افت فشار- نانوذرات

لیست مقالات مستخرج

۱. بررسی انتقال حرارت جابجایی اجباری و افت فشار نانوسیال در جریان مغشوش درون لوله افقی، نوزدهمین همایش سالانه مهندسی مکانیک ایران.
۲. مطالعه تجربی ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال آلومینا(Al_2O_3)/آب در لوله افقی، اولین کنفرانس علوم حرارتی ایران.
۳. بررسی تجربی انتقال حرارت نانوسیال آلومینا/آب داخل لوله افقی، ارسال به مجله علمی پژوهشی مکانیک و هوا فضا، دانشگاه امام حسین

4. Experimental Investigation of Convective Heat Transfer and Pressure Drop of Nanofluid (submitted)
5. Experimental Investigation of Pressure Drop of Nanofluid in Horizontal Tube, ASME Conference 2011 (abstract accepted, full peper is under reviewing)

فهرست مطالب

عنوان.....صفحه

۵

چکیده.....ز

لیست مقالات مستخرج.....ح

فهرست مطالب.....ط

فهرست اشکال.....ل

فهرست علائم و اختصارات.....س

فصل اول:

مقدمه.....

۱.....

۱-۱ اهداف و رئوس مطالب

پایان نامه.....۲

۲-۱ مروری بر مطالعات

گذشته.....۲

فصل دوم: نانوسیال و

کاربردها.....۷

۲-۱-۱ مفهوم

نانوسیالات.....

۸.....

۲-۲-۲ تهیه

نانوسیال.....

۹.....

۲-۲-۱-۱ روش تهیه یک مرحله‌ای.....۹

۱۱.....۲-۲-۲-روش تهیه دو مرحله‌ای.....

۳-۲-پایداری نانوذرات در

نانوسیالات.....۱۴.....

۱۴.....۲-۳-۱-تغییر pH سوسپانسیون.....

۱۵.....۲-۳-۲-استفاده از فعال کننده‌های سطح و پخش کننده‌ها.....

۱۵.....۲-۳-۳-استفاده از نوسانات ماورای صوت.....

۲-۴-خصوصیات نانوسیال بر مبنای درصد حجمی و

جرمی.....۱۶.....

۲-۵-کاربردهای

نانوسیالات.....

۱۷

۱۸.....۲-۵-۱-حمل و نقل.....

۱۹.....۲-۵-۲-خنک کاری قطعات الکترونیک.....

۲۰.....۲-۵-۳-صنایع دفاعی.....

۲۱.....۲-۵-۴-صنایع فضایی.....

۲۲.....۲-۵-۵-خنک کاری سیستم‌های هسته‌ای.....

۲۲.....۲-۵-۶-بیوپزشکی.....

۲۲.....۲-۵-۷-کاربردهای دیگر.....

فصل سوم: تحقیقات انجام شده در زمینه انتقال حرارت

نانوسیالات.....۳۳.....

۳۴.....۳-۱-۱-مطالعات تجربی هدایت حرارتی نانوسیال.....

۳۴.....۳-۱-۱-۱-اثر درصد حجمی ذره.....

۳۸.....۳-۱-۲-اثر نوع ذره.....

۴۰.....۳-۱-۳-اثر اندازه ذره.....

۴۲.....۳-۱-۴-اثر شکل ذره.....

۴۴.....۳-۱-۵-اثر نوع سیال مبنای.....

۴۵.....۳-۱-۶-اثر دما.....

۴۹.....۳-۱-۷-اثر افزودنی‌ها.....

۵۱.....۳-۱-۸-اثر قدرت اسیدی (pH).....

۲-۳- مطالعات تحلیلی هدایت

حرارتی..... ۵۲

۳-۳- تحقیقات تجربی انتقال حرارت

جابجایی..... ۵۵

۱-۳-۳- افزایش انتقال حرارت در جریان آرام..... ۵۵

۲-۳-۳- افزایش انتقال حرارت در جریان درهم..... ۶۱

۴-۳- انتقال حرارت جوشش در

نانوسیالات..... ۶۳

فصل چهارم: طراحی و ساخت سیستم

آزمایشگاهی..... ۶۶

۱-۴- طراحی و

ساخت.....

۶۷

۲-۴-

کالیبراسیون.....

۶۹.....

۳-۴- نانوسیالات در آزمایشات

ما..... ۶۹

۴-۵- تست

آب.....

۷۱.....

۴-۵-۱- تست ضریب انتقال حرارت آب..... ۷۲

۴-۵-۲- تست افت فشار لزجی آب..... ۷۵

فصل پنجم: نتایج آزمایشات

نانوسیالات..... ۷۹

۱-۵- تست نانوسیال

آلومینا/آب..... ۸۰

۵-۱-۱- بدست آوردن خواص نانوسیال آلومینا/آب..... ۸۰

۵-۱-۲-آزمایشات انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آلومینا/آب.....۸۴

۵-۱-۳-آزمایشات افت فشار لزجی نانوسیال آلومینا/آب.....۸۸

۵-۲-تست نانوسیال

تیتانیا/آب.....۸۹

۵-۲-۱-بدست آوردن خواص نانوسیال تیتانیا/آب.....۸۹

۵-۲-۲-آزمایشات انتقال حرارت جابجایی نانوسیال تیتانیا/آب.....۹۲

۵-۲-۳-آزمایشات افت فشار لزجی نانوسیال تیتانیا/آب.....۹۶

فصل ششم: نتیجه -

گیری.....۹۸

۶-۱-نتیجه

گیری.....

۹۹.....

۶-۲-

پیشنهادات.....

۱۰۱.....

پیوست

الف.....

۱۰۲.....

منابع و

مراجع.....

۱۱۵.....

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: ضریب هدایت حرارتی تعدادی از مواد [۲۹]..... ۸
- شکل ۲-۲: روش تک مرحله‌ای تهیه نانوسیال [۲۹]..... ۱۰
- شکل ۳-۲: تصویر TEM نانوسیال حاوی نانوذرات مس که به طریق یک مرحله‌ای تهیه شده است [۱۳]..... ۱۱
- شکل ۴-۲: نانوسیال تهیه شده با استفاده از نانوذرات اکسید مس به طریق دو مرحله‌ای [۱۳]..... ۱۲
- شکل ۵-۲: تصویر TEM از توده‌ای شدن نانوذرات [۳۰]..... ۱۳
- شکل ۱-۳: افزایش هدایت حرارتی Al_2O_3 در آب [۳۸]..... ۳۵
- شکل ۲-۳: اثر غلظت ذره برای Al_2O_3 در آب [۳۸]..... ۳۶
- شکل ۳-۳: افزایش هدایت حرارتی CuO در آب [۳۸]..... ۳۶
- شکل ۴-۳: اثر غلظت ذره برای CuO در آب [۳۸]..... ۳۷
- شکل ۵-۳: اثر غلظت ذره برای CuO در اتیلن گلیکول [۳۸]..... ۳۸
- شکل ۶-۳: اثر نوع ذره برای ذرات در آب [۳۸]..... ۳۸
- شکل ۷-۳: اثر نوع ذره برای ذرات در اتیلن گلیکول [۳۸]..... ۳۹
- شکل ۸-۳: اثر نوع ذره برای ذرات در اتیلن گلیکول [۳۸]..... ۳۹

- شکل ۳-۹: اثر اندازه ذره برای Al_2O_3 در آب [۳۸]..... ۴۱
- شکل ۳-۱۰: اثر اندازه ذره برای Al_2O_3 در اتیلن گلیکول [۳۸]..... ۴۱
- شکل ۳-۱۱: اثر اندازه ذره برای CuO در آب [۳۸]..... ۴۲
- شکل ۳-۱۲: اثر شکل ذره برای SiC در آب [۳۸]..... ۴۳
- شکل ۳-۱۳: اثر شکل ذره برای SiC در اتیلن گلیکول [۳۸]..... ۴۳
- شکل ۳-۱۴: اثر شکل ذره برای TiO_2 در آب [۳۸]..... ۴۴
- شکل ۳-۱۵: اثر نوع سیال مینا برای Al_2O_3 در آب [۳۸]..... ۴۵
- شکل ۳-۱۶: اثر دما برای Al_2O_3 در آب [۳۸]..... ۴۶
- شکل ۳-۱۷: اثر دما برای Al_2O_3 در آب [۳۸]..... ۴۶
- شکل ۳-۱۸: اثر دما برای Al_2O_3 در آب [۳۸]..... ۴۷
- شکل ۳-۱۹: اثر دما برای CuO در آب [۳۸]..... ۴۷
- شکل ۳-۲۰: اثر دما برای CuO در آب [۳۸]..... ۴۸
- شکل ۳-۲۱: اثر دما برای نانولوله‌های کربنی چندجداره در آب [۳۸]..... ۴۹
- شکل ۳-۲۲: اثر دما برای نانولوله‌های کربنی چندجداره در آب [۳۸]..... ۴۹
- شکل ۳-۲۳: اثر افزودنی برای مس در اتیلن گلیکول [۳۸]..... ۵۰
- شکل ۳-۲۴: اثر افزودنی برای نانولوله‌های کربنی چندجداره در آب [۳۸]..... ۵۱
- شکل ۳-۲۵: اثر قدرت اسیدی برای Al_2O_3 در آب [۳۸]..... ۵۱
- شکل ۳-۲۶: اثر قدرت اسیدی برای CuO در آب [۳۸]..... ۵۲
- شکل ۳-۲۷: انتقال حرارت جریان آرام Al_2O_3 در آب [۳۸]..... ۵۶
- شکل ۳-۲۸: انتقال حرارت جریان آرام Al_2O_3 در آب [۳۸]..... ۵۷
- شکل ۳-۲۹: انتقال حرارت جریان آرام CuO در آب [۳۸]..... ۵۷
- شکل ۳-۳۰: انتقال حرارت جریان آرام نانولوله کربنی چندجداره در آب [۳۸]..... ۵۸
- شکل ۳-۳۱: انتقال حرارت جریان آرام نانولوله کربنی چندجداره در آب با NaDDBS [۳۸]..... ۵۹
- شکل ۳-۳۲: انتقال حرارت جریان آرام گرافیت در سیال [۳۸]..... ۶۰
- شکل ۳-۳۳: انتقال حرارت جریان آرام گرافیت در مخلوطی از روغن [۳۸]..... ۶۰
- شکل ۳-۳۴: انتقال حرارت جریان درهم Al_2O_3 در آب [۳۸]..... ۶۱
- شکل ۳-۳۵: انتقال حرارت جریان درهم TiO_2 در آب [۳۸]..... ۶۲
- شکل ۳-۳۶: انتقال حرارت جریان درهم مس در آب [۳۸]..... ۶۲
- شکل ۴-۱: شماتیک سیستم آزمایشگاهی..... ۶۷
- شکل ۴-۲: مقایسه عدد ناسلت تجربی و روابط پیش‌بینی برای آب خالص در جریان درهم..... ۷۴
- شکل ۴-۳: مقایسه عدد ناسلت تجربی و رابطه گنیلینسکی برای آب خالص در جریان درهم..... ۷۴

- شکل ۴-۴: مقایسه عدد ناسلت تجربی و روابط پیش‌بینی برای آب خالص در جریان آرام..... ۷۵
- شکل ۴-۵: افت فشار برای آب خالص در جریان درهم..... ۷۶
- شکل ۴-۶: مقایسه افت فشار اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده برای آب مقطر در جریان درهم..... ۷۷
- شکل ۴-۷: افت فشار برای آب خالص در جریان آرام..... ۷۷
- شکل ۴-۸: مقایسه مقایسه افت فشار اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده برای آب مقطر در جریان آرام..... ۷۸
- شکل ۵-۱: ضریب هدایت حرارتی وابسته به دما برای نانوسیال آلومینا/آب..... ۸۲
- شکل ۵-۲: ضریب هدایت حرارتی وابسته به غلظت حجمی برای نانوسیال آلومینا/آب..... ۸۲
- شکل ۵-۳: ویسکوزیته سینماتیکی وابسته به دما برای نانوسیال آلومینا/آب..... ۸۳
- شکل ۵-۴: ویسکوزیته سینماتیکی وابسته به غلظت حجمی برای نانوسیال آلومینا/آب..... ۸۴
- شکل ۵-۵: تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز برای نانوسیال آلومینا/آب در جریان درهم..... ۸۵
- شکل ۵-۶: مقایسه عدد ناسلت تجربی با پیش‌بینی هابر حسب عدد رینولدز برای نانوسیال آلومینا/آب در جریان درهم..... ۸۶
- شکل ۵-۷: نسبت افزایش عدد ناسلت (Nu_{nt}/Nu_w) بر حسب عدد رینولدز برای نانوسیال آلومینا/آب..... ۸۷
- شکل ۵-۸: تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز برای نانوسیال آلومینا/آب در جریان آرام..... ۸۸
- شکل ۵-۹: مقایسه افت فشار اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده برای نانوسیال آلومینا/آب..... ۸۹
- شکل ۵-۱۰: ضریب هدایت حرارتی وابسته به دما برای نانوسیال تیتانیا/آب..... ۹۰
- شکل ۵-۱۱: ضریب هدایت حرارتی وابسته به غلظت حجمی برای نانوسیال تیتانیا/آب..... ۹۰
- شکل ۵-۱۲: ویسکوزیته سینماتیکی وابسته به دما برای نانوسیال تیتانیا/آب..... ۹۱
- شکل ۵-۱۳: تغییرات ویسکوزیته سینماتیکی نسبت به غلظت حجمی برای نانوسیال تیتانیا/آب..... ۹۲
- شکل ۵-۱۴: تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز برای نانوسیال تیتانیا/آب در جریان درهم..... ۹۳
- شکل ۵-۱۵: مقایسه عدد ناسلت تجربی با پیش‌بینی‌ها بر حسب عدد رینولدز برای نانوسیال تیتانیا/آب در جریان درهم..... ۹۴
- شکل ۵-۱۶: نسبت افزایش عدد ناسلت (Nu_{nt}/Nu_w) بر حسب عدد رینولدز برای نانوسیال تیتانیا/آب..... ۹۵
- شکل ۵-۱۷: تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز برای نانوسیال آلومینا/آب در جریان آرام..... ۹۶
- شکل ۵-۱۸: مقایسه افت فشار اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده برای نانوسیال تیتانیا/آب..... ۹۷

فهرست علائم

ظرفیت گرمایی ویژه	C
قطر لوله	D
شار حرارتی	q''
سرعت متوسط	V
فاصله محوری	x
ضریب انتقال حرارت جابجایی	h
ضریب هدایت حرارتی	k
طول لوله	L
عدد ناسلت	Nu
عدد پرانتل	Pr
عدد رینولدز	Re
ضریب اصطکاک	f
دما	T
ضریب شکل تجربی	n
قطر ذره	d
سرعت تصادفی نانوذرات	\bar{C}
جرم	m
حجم	v
توان حرارتی	Q
دبی جرمی جریان	\dot{m}
مساحت مقطع داخل لوله	A

علائم یونانی

چگالی	ρ
اختلاف فشار	ΔP
ویسکوزیته سینماتیکی	ν
غلظت حجمی ذره	ϕ
ضریب کرویت	ψ
نسبت ضخامت نانولایه به شعاع ذره	β

زیرنویس ها

سیال پایه	<i>bf</i>
داخلی	<i>in</i>
متوسط	<i>m</i>
نانوسیال	<i>nf</i>
خروجی	<i>out</i>
نانوذره	<i>p</i>
آب	<i>w</i>
سیال	<i>l</i>
مؤثر	<i>eff</i>
خوشه	<i>cl</i>
شعاع	<i>r</i>
ذرات جامد	<i>s</i>
بالک یا توده	<i>b</i>
جدار لوله	<i>w</i>

فصل اول

مقدمه

۱-۱ اهداف و رؤوس مطالب پایان نامه

در این پایان نامه، پتانسیل استفاده از محلول‌های نانوذرات^۱ (نانوسیالات^۲)، به عنوان سیالات بهبود دهنده انتقال حرارت بررسی می‌شود. از لحاظ تاریخی خصوصیات انتقال حرارت سیالات متداول همراه با مخلوطی از ذرات کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. به علت پیشرفت‌های اخیر در تولید نانوذرات محلول-هایی مثل نانوسیالات به عنوان سیال ناقل حرارت، زمینه‌ی تحقیقاتی بسیاری از محققان شده است. این امر به علت تولید محلول‌های با ذرات بی‌نهایت کوچک با قابلیت پایدار ماندن در مشخصه توزیعی (درصد حجمی یا وزنی) خاص است. هدف از این مطالعه بررسی رفتار انتقال حرارت جابجایی محلول‌هایی از نانوذرات تحت شرایط شار حرارتی یکنواخت در لوله‌ها به منظور بهره‌برداری از آنها برای افزایش و بهبود انتقال حرارت است. بیشتر سیستم‌های مدرن تولید انرژی در اندازه‌های بزرگ متکی به انتقال حرارت جابجایی سیال هستند؛ بنابراین هر افزایش در انتقال حرارت جابجایی مستقیماً در تولید انرژی تأثیر دارد. این مطالعه با مقدمه‌ای بر کارهای موجود در زمینه توزیع نانوذرات برای افزایش انتقال حرارت در فصل (۱) شروع می‌شود و با توصیفی از تولید و روش‌های تهیه نانوسیال و کاربردهای نانوسیالات که در فصل (۲) مطالعه می‌شود پی‌گرفته خواهد شد. تحقیقات تجربی و تئوری انتقال حرارت نانوسیالات در فصل (۳) مرور می‌شود. طراحی و ساخت سیستم آزمایشگاهی و اندازه‌گیری‌ها در فصل‌های (۴) و نتایج آزمایشات نانوسیالات در فصل (۵) مطالعه می‌شود. در نهایت در فصل (۶) نتیجه‌گیری و پیشنهادات ارائه می‌شود.

۲-۱ مروری بر مطالعات گذشته

¹ Nanoparticles

² Nanofluids

در چند دهه اخیر به منظور صرفه جویی در مصرف انرژی و مواد اولیه و با در نظر گرفتن مسایل اقتصادی و زیست محیطی تلاش‌های زیادی برای ساخت دستگاه‌های تبادل حرارت پربازده صورت پذیرفته است. هدف اصلی، کاهش اندازه مبدل‌های حرارتی مورد نیاز برای یک بار حرارتی معین و افزایش ظرفیت مبدل‌های حرارتی موجود می‌باشد. تقاضای جهانی برای دستگاه‌های تبادل حرارتی کارآمد، قابل اطمینان و اقتصادی مخصوصاً در صنایع فرآیندی، تولید الکتروسیسته سیستم‌های سرمایش و تهویه مطبوع، مبدل‌های حرارتی وسایل نقلیه و... به سرعت رو به افزایش است. اگر اصول مربوط به روش‌های افزایش انتقال حرارت و طراحی دستگاه‌های انتقال حرارت با سطح زیاد به خوبی شناخته شوند، امکان افزایش صرفه جویی در مصرف انرژی و کاهش آلودگی محیط زیست میسر خواهد بود. روش‌های متعددی برای افزایش انتقال حرارت وجود دارند که به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند.

- روش‌های فعال که نیازمند نیرو یا توان خارجی می‌باشند.

- روش‌های غیر فعال که نیازی به اعمال نیرو یا توان خارجی ندارند.

روش‌های فعال شامل همزدن مکانیکی، تراشیدن سطح، سطوح چرخنده، نوسان سطح، نوسان سیال، استفاده از میدان الکتریکی، تزریق و مکش خواهند شد. همچنین روش‌های غیر فعال عبارتند از سطوح گسترده، مبدل‌های حرارتی فشرده، مجاری با مقطع غیر مدور، افزایش انتقال حرارت گردابه‌ای، تغییر خاصیت رئولوژیکی سیال، میکروکانال‌ها، پوشش‌دهی و پرداخت سطح، استفاده از وسایل جابه‌جا شونده داخل مجرای سیال، استفاده از وسایل چرخاننده جریان، ایجاد انقطاع و شکستگی در جریان، لوله‌های مارپیچی و در نهایت مواد افزودنی به سیال.

بنابراین ایده‌ی استفاده از تعلیق ذرات به عنوان روشی برای افزایش هدایت حرارتی کشف جدیدی نیست. ماکسول [۱] موضوع افزایش هدایت الکتریکی سیالات با پخش ذرات را به صورت تئوری در حدود ۱۲۰ سال قبل تحقیق کرده بود. از آن زمان به بعد مطالعات بسیاری راجع به تعلیق ذرات در اندازه‌های میلی و

میکرو در سیالات مختلف انجام شد. چنین کاری توسط آحوجا [۲] [۳] نشان داد که با تعلیق ذرات پلی‌استرن در اندازه‌ی ۵۰-۱۰۰ میکرون در گلیسرین، هدایت حرارتی آن کمتر از گلیسرین می‌شود. پیش‌بینی‌های هدایت حرارتی محلولهای ناهمگن بوسیله‌ی مدل‌هایی چون همیلتون-کراسر [۴] و ماکسول [۵] آغاز شد. کارهای مشابه دیگری انجام شد و اثرات تغییر اندازه ذره و چگالی را به مانند دیگر عوامل که ممکن بود در افزایش تأثیر داشته باشند بررسی نمود.

کاربرد چنین محلول‌هایی در سیستم‌های واقعی به علت ناتوانی ذاتی در حفظ ذرات معلق درون سیال و ته‌نشین شدن و انسداد باعث بروز مشکلات شد. بنابراین این سیالات به طور جدی هرگز برای کاربردهای صنعتی لحاظ نشدند.

با توسعه نانوتکنولوژی روش‌هایی برای تولید نانوذرات در شکل‌ها، اندازه‌ها و ترکیبات مختلف بوجود آمده است. به علت افزایش نسبت سطح به حجم چنین ذراتی، خواص فیزیکی این مواد به طور قابل توجه متفاوت از موادی است که ذرات با اندازه‌های بزرگتر دارند. اولین تحقیق تجربی و تئوری بهبود هدایت حرارتی در محلول‌های نانوذرات بوسیله‌ی ماسودا و همکاران [۶] در سال ۱۹۹۳ در ژاپن انجام شد. این کار نشان داد که هدایت حرارتی محلول‌های آلومینا (Al_2O_3)، سیلیکا (SiO_2) و تیتانیا (TiO_2) درون سیال مبنای آب در ۰.۵٪ حجمی (در مورد آلومینا) تا ۳۲٪ افزایش می‌یابد. پس از آن، بحث تعلیق نانوذرات برای افزایش هدایت حرارتی در دنیای غرب مطرح شد که دکتر چوی [۷] در آزمایشگاه ملی آرگون (ANL) آمریکا روی آن تحقیق کرد. گروه ANL مطالعات بسیاری راجع به مکانیزم افزایش انتقال حرارت سیال و پتانسیل افزایش با استفاده از تعلیق نانوذرات انجام دادند که بعدها چوی آن را نانوسیال نامید.

نخستین کار این گروه نشان داد که افزایش هدایت حرارتی در چنین سیستم‌های دوفازی به علت تغییر خواص است که پتانسیل افزایش ضریب انتقال حرارت را نیز دارند [۸]. افزایش ۲۰٪ در ضریب انتقال حرارت در جریان آرام در اولین تحقیق مشاهده شد و این را به افزایش هدایت حرارتی نسبت دادند.

مفهوم کلیدی دیگر این بود که نانوسیالات به علت حرکت براونی نانوذرات درون سیال استعداد کمتری در ایجاد مشکلاتی نظیر مشکلاتی که ذرات بزرگ ایجاد می‌کردند داشتند.

از آن زمان به بعد تحقیقات مختلفی راجع به اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوذرات در سیالات مختلف به صورت تجربی انجام شدند و تلاشهایی نیز برای شرح تئوریک این پدیده صورت گرفت. چوی و ایستمن به موازات محققان دیگر چند تحقیق ارائه دادند و تلاش کردند توصیفی از هدایت حرارتی نانوسیالات ارائه کنند [۹] [۱۰] [۱۱] [۱۲] [۱۳].

گروههای دیگری از هند [۱۴] و چین [۱۵] [۱۶] [۱۷] اخیراً این زمینه از تحقیق را هدایت کرده‌اند. کارهای فوق‌الذکر روی تعلیق ذرات فلزی و اکسیدهای فلز انجام شدند. اخیراً تولید نانولوله‌های کربنی نیز موجب افزایش تحقیقات روی این نوع از نانوسیالات شده است [۱۸].

همه‌ی مطالعات گفته شده‌ی بالا یک یا چند نقص منطقی دارند. اغلب نانوسیالات یا به خوبی پایدار نبودند و یا پایداری ضعیفی داشتند. در برخی از موارد مقادیری که گزارش شده بود، حتی توسط همان گروهی که کار اصلی را انجام دادند دیگر تکرار نشد. بیشتر گروهها افزایش هدایت حرارتی محلول را بسیار بیشتر از مدل پیش‌بینی شده توسط ماکسول تفسیر کردند؛ در حالی که مدل ماکسول تنها برای ذرات کروی پخش شده درون سیال ارائه شد نه برای یک محلول پایدار با هر شکلی از ذرات.

در انواع دیگری از مطالعات، تحقیقات روی رفتار انتقالی و جابجایی نانوسیالات صورت گرفته است [۱۹]. همچنین زینالی و اعتماد [۲۰] [۲۱] از ایران مطالعاتی در این بخش انجام داده‌اند. کارهای موثری دیگری نیز در زمینه انتقال حرارت جابجایی توسط برخی از پژوهشگران انجام شده است [۲۲] [۲۳] [۲۴] [۲۵] [۲۶]. بعضی دیگر از محققان مطالعاتی را روی جوشش استخری و خواص دوفازی انجام داده‌اند [۲۷] [۲۸] و دریافتند که نانوسیالات پتانسیل افزایش شار حرارتی بحرانی‌ای بیشتر از سیال مبنا در جوشش

استخری دارند. این افزایش می‌تواند تا ۲۰۰٪ باشد. تحقیقات در زمینه جوشش می‌تواند در راکتورهای هسته‌ای بکار رود.

نتیجه‌ی نهایی از مرور کارهای گذشته این است که پایدارسازی کامل نانوسیالات و خواص ترموفیزیکی آنها باید به منظور تعیین رفتار و انتقال حرارت جابجایی آنها انجام شود. این کار نیازمند این است که مقدار و اندازه ذره، ترکیب شیمیایی، هدایت حرارتی و ویسکوزیته هر محلول به منظور فهم کامل رفتار و مدل آن تعیین شود. انتظار از نانوسیالات این است که راه مؤثری را برای افزایش قابلیت‌های انتقال حرارت تجهیزات موجود نشان دهد و افق جدیدی را که بی‌شباهت با انقلاب مواد نیست برای ساختارهای مکانیکی بگشاید و سیالات هم می‌توانند از دستیابی به این خواص مطلوب بهره ببرند. در همین راستا، در این پایان‌نامه یک سیستم آزمایشگاهی و روش بررسی مربوطه برای تحقیق روی عملکرد انتقال حرارت جابجایی محلولهای شامل نانوذرات اجرا می‌شود و پدیده‌هایی که همراه با آن اتفاق می‌افتد بررسی می‌شود.

به بیانی جزئی‌تر در این مطالعه بررسی تجربی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیالات آب-آلومینا و آب-تیتانیا در جریان آرام و درهم داخل لوله مسی با شار حرارتی ثابت دیواره در دستور کار می‌باشد. در این تحقیق غلظت‌های مختلف نانوسیال آب-آلومینا و آب-تیتانیا تهیه شده و تأثیر افزایش غلظت و سرعت جریان روی انتقال حرارت جابجایی اجباری بررسی شده است و با پیش‌بینی‌های تئوریک در مورد انتقال حرارت سیالات خالص مقایسه گردیده است.

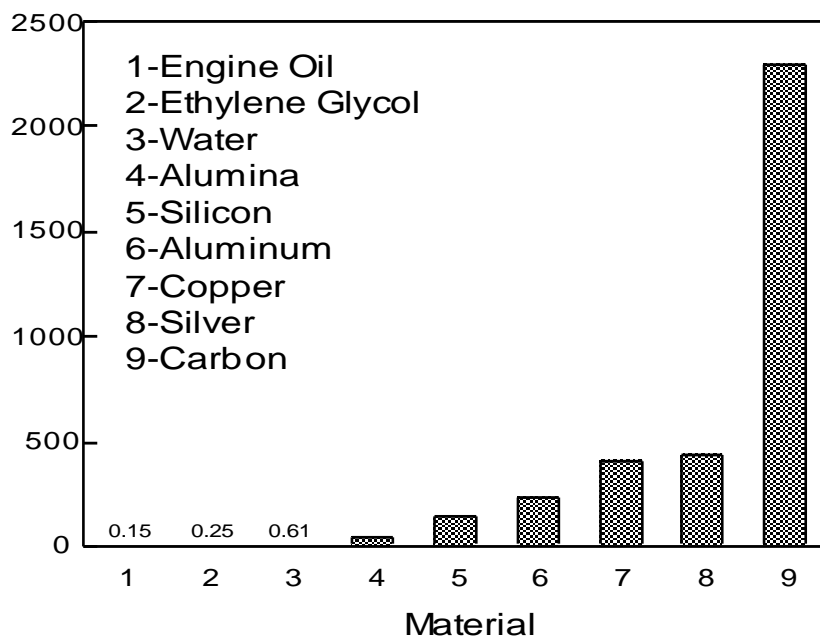
فصل دوم

نانوسیال و کاربردها

در این فصل به بیان مفهوم نانوسیال و خصوصیات آن پرداخته شده و کاربردهای نانوسیال ذکر می‌گردد.

۱-۲- مفهوم نانوسیالات

سیالات متداول در انتقال حرارت و حامل انرژی در صنایع را معمولاً سیالاتی نظیر آب، روغن‌ها و اتیلن-گلیکول تشکیل می‌دهند و نیز می‌دانیم 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. از طرفی هدایت حرارتی مواد فلزی نیز بسیار بیشتر از هدایت حرارتی مواد غیرفلزی است (شکل ۱-۲). به همین دلیل انتظار می‌رود که سیالات حامل ذرات جامد معلق فلزی یا اکسیدفلزی دارای هدایت حرارتی بیشتری نسبت به سیالات خالص باشند.



شکل ۱-۲: ضریب هدایت حرارتی تعدادی از مواد [۲۹]

افزودن نانوذرات به یک سیال نظیر آب فقط هدایت حرارتی آن را تحت تأثیر قرار نداده، بلکه سایر خواص فیزیکی نظیر ظرفیت حرارتی، چگالی و ویسکوزیته‌ی سیال نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. مجموعه تغییرات

ایجاد شده در خواص ترموفیزیکی سیال سبب می‌شود تا علاوه بر افزایش هدایت حرارتی، در انتقال حرارت جابجایی نیز شاهد افزایش چشمگیر ضریب انتقال حرارت باشیم.

بنابراین شیوه تهیه و فرآوری نانوسیال یا به عبارت دیگر نحوه معلق‌سازی ذرات جامد در سیال پایه و افزودن نانوذره به سیال پایه یکی از حوزه‌های تحقیقاتی مهم در زمینه نانوسیالات می‌باشد.

۲-۲- تهیه نانوسیال

طرز تهیه نانوسیال اولین اقدام کلیدی در کاربردی کردن این مفهوم برای تغییر راندمان انتقال حرارت می‌باشد. تهیه نانوسیال را که از طریق افزودن نانوذرات به سیال پایه صورت می‌گیرد، نباید مانند یک اختلاط ساده جامد-مایع در نظر گرفت. زیرا تهیه نانوسیال مستلزم ایجاد شرایط خاص و ویژه‌ای است. برخی از این شرایط عبارتند از یکنواخت بودن سوسپانسیون، پایداربودن^۱ سوسپانسیون، توده‌ای‌شدن^۲ کم ذرات، ته‌نشین^۳ نشدن و عدم تغییر ماهیت شیمیایی سیال. برای رسیدن به چنین خواص ویژه‌ای از راهکارهای مختلف استفاده می‌شود. به عنوان مثال می‌توان از تغییر pH محلول سوسپانسیون، استفاده از مواد فعال سطحی، استفاده از مواد پراکنده‌ساز و ضد انعقاد و یا از ارتعاشات برای رسیدن به ویژگی‌های مذکور استفاده کرد.

تمام این روش‌ها منجر به تغییر خواص سطحی و عدم تشکیل خوشه‌های ذرات معلق به منظور ایجاد یک سوسپانسیون پایدار می‌شوند. با در نظر گرفتن ملاحظات ذکر شده، شیوه‌های تهیه نانوسیال کلاً به دو روش تقسیم می‌گردد.

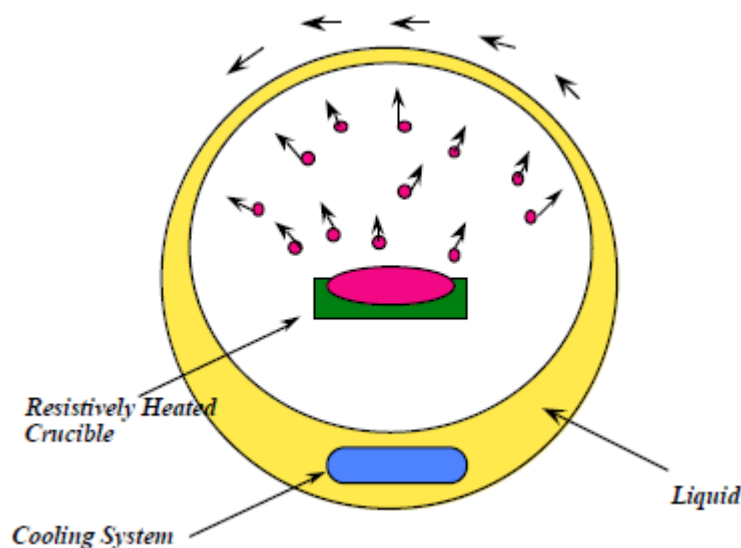
۲-۲-۱- روش تهیه یک مرحله‌ای

¹ Stability

² Agglomeration

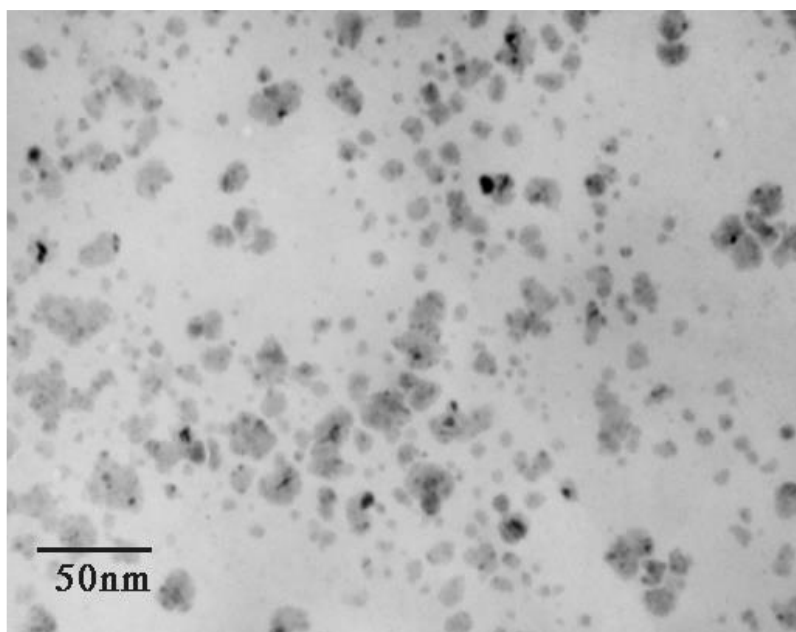
³ Settling

در روش یک مرحله‌ای، ذرات مورد نظر به طور مستقیم در درون سیال تهیه و پراکنده می‌شود. به عنوان مثال برای تهیه نانوذرات فلزی درون یک سیال، ماده فلزی تحت شرایط خلاء تبخیر می‌شود و بخار فلز، مستقیماً به درون سیال پایه هدایت می‌شود تا به شکل نانوذرات کندانس گردد. این روش تهیه نانوسیال به روش پایین به بالا نیز معروف است. این روش که در شکل (۲-۲) فرآیند آن نشان داده شده است، روش مناسبی برای تولید نانوسیالات فلزی می‌باشد.



شکل ۲-۲: روش تک مرحله‌ای تهیه نانوسیال [۲۹]

در این روش تهیه نانوسیال، سطح نانوذرات در معرض شرایط نامطلوبی قرار نگرفته و پوشش‌های ناخواسته‌ای روی آنها تشکیل نمی‌گردد. به همین دلیل نانوذرات تهیه شده از این طریق بسیار تمیز می‌باشد. این مسئله مزیت روش یک مرحله‌ای تهیه نانوسیال است. تهیه نانوسیال با این روش اغلب همراه با مقداری متراکم شدن و تجمع ذرات در درون سیال می‌باشد. اما، مزیت اصلی روش یک مرحله‌ای کنترل بسیار مناسب روی اندازه و توزیع ذرات است. شکل (۳-۲) نشان‌دهنده نانوسیال حاوی نانوذرات مس می‌باشد که به طریق یک مرحله‌ای تهیه گردیده است.



شکل ۲-۳: تصویر TEM نانوسیال حاوی نانوذرات مس که به طریق یک مرحله‌ای تهیه شده است [۱۳].

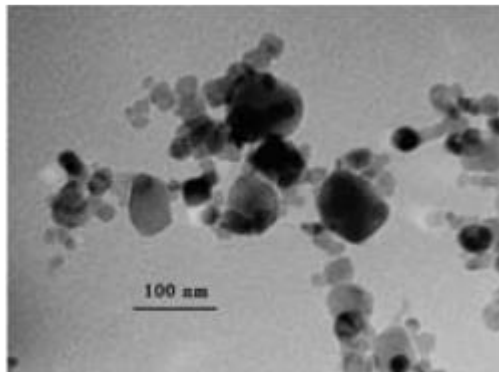
روش یک مرحله‌ای تهیه نانوسیال به دلایل فنی اغلب کمتر مورد استفاده محققین قرار گرفته است. در عوض در اغلب کارهای تحقیقاتی محققین در گزارش‌های خود به استفاده از روش دو مرحله‌ای جهت تهیه نانوسیال اشاره کرده‌اند. علت این مسئله نیز آسان‌تر بودن تولید نانوسیال با نانوپودرهای آماده و خریداری شده است.

۲-۲-۲- روش تهیه دو مرحله‌ای

متداول‌ترین روش تهیه نانو سیالات، روش دو مرحله‌ای است. در روش دو مرحله‌ای برای تهیه نانوسیال، می‌توان از انواع پودرها با اندازه‌های مختلف به راحتی استفاده کرد، مسئله‌ای که در روش یک مرحله‌ای با مشکلات بیشتری همراه است. در این روش ابتدا نانو ذرات معمولاً به وسیله روش رسوب بخار شیمیایی در فضای گاز بی اثر به صورت پودر خشک تهیه می‌شود، در مرحله بعد نانو ذره یا نانو لوله در داخل سیال پراکنده می‌شود. به عبارت دیگر، ابتدا نانوذره مورد نظر یا نانولوله مورد نظر تهیه گردیده و سپس به سیال

¹ Transmission Electron Microscope

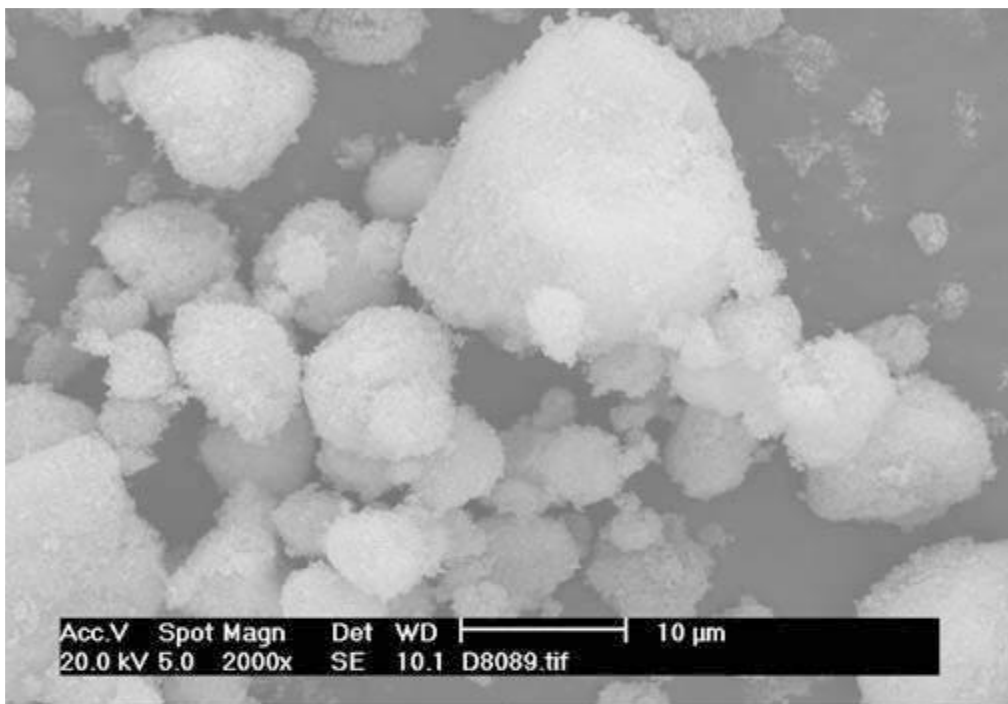
پایه افزوده می‌گردد. برای پایداری نانوسیال در این حالت، از روش‌هایی مانند لرزاننده آلتراسونیک^۱ و یا سورفکتانت‌ها استفاده می‌شود تا توده نانو ذره‌ای به حداقل برسد و باعث بهبود رفتار پراکندگی شود. به نظر می‌رسد که این روش با توجه به این که می‌توان نانوذرات و نانولوله‌ها را بیشتر و اغلب آسان‌تر از روش تک مرحله‌ای تهیه کرد، اقتصادی بوده و برای کاربردهای صنعتی بهتر باشد. شکل (۲-۴) نشان‌دهنده نانوسیال تهیه شده با استفاده از نانوذرات اکسید مس به طریق دومرحله‌ای می‌باشد.



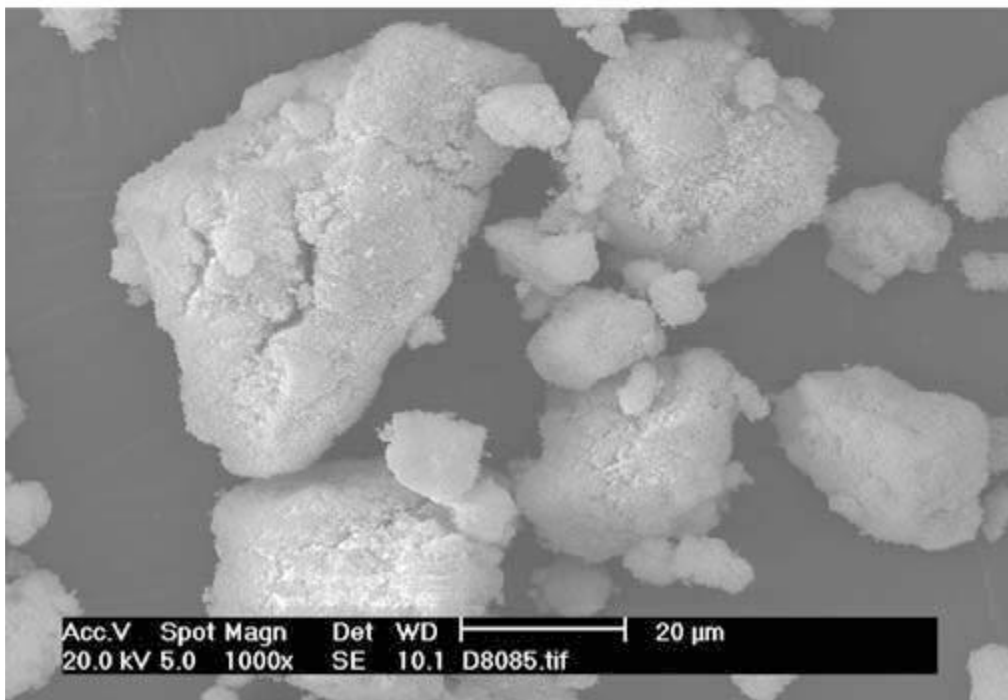
شکل ۲-۴: نانوسیال تهیه شده با استفاده از نانوذرات اکسید مس به طریق دو مرحله‌ای [۱۳].

در روش دو مرحله‌ای نیز باید مسئله کلوخه و توده‌ای شدن و نیز چسبندگی نانوذرات را در نظر گرفت. شکستن وضعیت توده‌ای ذرات و برگرداندن آنها به وضعیت اولیه از اقدامات اساسی است که در تهیه نانوسیال باید صورت بگیرد. چرا که اندازه و توزیع ذرات در داخل سیال مهمترین نقش را در تعیین رفتار حرارتی و هیدرولیکی بر عهده دارد. شکل (۲-۵) نشان‌دهنده ایجاد وضعیت کلوخه‌ای در نانوذرات اکسید مس و اکسید آلومینیوم می‌باشد. روش دو مرحله‌ای شیوه‌ای مناسب برای تهیه نانوسیالات اکسیدی می‌باشد. روش دو مرحله‌ای برای بعضی مواد مانند اکسید فلزات در آب دیونیزه شده نیز بسیار مناسب است و برای نانو سیالات شامل ذرات فلزی سنگین کمتر موفق بوده است. این روش دارای مزایای بالقوه‌ای است. زیرا شرکت‌های زیادی توانایی تهیه نانو پودرها را در مقیاس صنعتی دارند.

¹ Ultrasonic Vibrator



(a) Al₂O₃



(b) CuO

شکل ۲-۵: تصویر TEM از توده‌های شدن نانوذرات [۳۰].

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

نانوذراتی که به روش یک مرحله‌ای و یا به روش دو مرحله‌ای تهیه می‌گردند، باید تا حد امکان 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 نانوذرات در سیال مورد توجه قرار بگیرد.

۲-۳- پایداری نانوذرات در نانوسیالات

در اندازه و مقیاس نانو، اتم‌های سطحی نانوذرات به شدت افزایش پیدا کرده و اهمیت می‌یابند. به عبارت دیگر خصوصیات شیمیایی و فیزیکی سطح، اهمیت بسیار بیشتری نسبت به ساختار ماده پیدا می‌کنند. وقتی که مواد نانو تحت تأثیر دمای محیط قرار می‌گیرند، اتم‌های سطح ذرات نانو نسبت به اتم‌های داخلی از پایداری کمتری برخوردار می‌شوند و این ناپایداری سطحی ذره علت اصلی توده‌ای شدن ذرات می‌باشد. به نوعی می‌توان گفت که ذرات معلق در یک محلول به خاطر وجود نیروهای واندروالس بین ذرات، تمایل به توده‌ای شدن و بزرگ شدن دارند.

برای پایدار کردن نانوذرات و جلوگیری از کلوخه و توده‌ای شدن ذرات که سبب سنگینی و تسریع ته‌نشینی می‌گردد، از روشهای مختلف از جمله پایدارکننده‌ها، تغییر pH و ایجاد نوسان ماورای صوت می‌توان استفاده کرد.

۲-۳-۱- تغییر pH سوسپانسیون

وقتی نانوذرات در آب پخش می‌شوند، رفتار کلی برهم‌کنش آب- ذره به خواص سطح ذره بستگی دارد. در مورد هر ذره یک pH معین تحت عنوان pH نقطه ایزوالکتریک وجود دارد. در این مقدار pH نیروهای دافعه بین ذرات صفر بوده و در نتیجه ذرات به هم می‌پیوندند. بنابراین وقتی pH مساوی یا نزدیک pH نقطه ایزوالکتریک باشد، سوسپانسیون ناپدار می‌باشد. با افزایش اختلاف pH نسبت به این نقطه نیروهای آب‌پوشی بین ذرات افزایش می‌یابد. در نتیجه تحریک نانوذرات در سوسپانسیون افزایش یافته و موجب پایداری بیشتر نانوسیال می‌گردد.

۲-۳-۲ - استفاده از فعال‌کننده‌های سطح و پخش‌کننده‌ها

یکی از روش‌های پایدارسازی سوسپانسیون‌های حاوی نانوذرات استفاده از پایدارکننده‌های شیمیایی است. هر چند برخی از محققین استفاده از این روش را مناسب نمی‌دانند. علت این مسئله این است که افزودن پخش‌کننده می‌تواند ضریب هدایت حرارتی سیال پایه را تحت تأثیر گذاشته در نتیجه بهبود واقعی هدایت حرارتی با استفاده از نانوذرات تحت‌الشعاع قرار گیرد. جزء پایدارکننده سوسپانسیون که به نانوسیال افزوده می‌شود، باید دارای ویژگی‌هایی باشد. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به سازگاری شیمیایی با سیال پایه، سازگاری شیمیایی با نانوذرات و عدم ایجاد واکنش‌های شیمیایی با سیال پایه و نانوذرات و عدم تغییر pH و عدم ایجاد محیط خورنده اشاره کرد.

متداول‌ترین پایدارکننده‌هایی که تاکنون در مقالات به آنها اشاره شده است، مواد فعال سطحی مختلف می‌باشند. از جمله این پایدارکننده‌ها می‌توان به تی‌أل‌ها، اولئیک اسید و نمک‌های لورات اشاره کرد. انتخاب پایدارکننده مناسب نیز اغلب بستگی به خواص ذرات و سیال مورد نظر دارد.

۲-۳-۳ - استفاده از نوسانات ماورای صوت

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 نانوذرات و پایداری بیشتر سوسپانسیون از نوسانات ماورای صوت استفاده شده است. هر چند استفاده از نوسانات ماورای صوت یکی از روشهای متداول پراکنده‌سازی نانوذرات در سیال پایه است، لیکن زمان هم‌زدن و نوسانات نیز باید مورد توجه قرار بگیرد. در مواردی مشاهده شده است که افزایش زمان نوسان از یک حد معین به بعد به تسریع کلوخه شدن ثانویه ذرات سرعت می‌بخشد. در نتیجه متغیرهای زیادی هستند که برای کار با آزمایشات نانوسیالات باید به شمار آیند. توسعه‌های تئوری و مفهومی محلولها منجر به درک بهتری از خواص و رفتار نانوسیالات می‌شود. افزودن مواد سطحی، کنترل pH و استفاده از نوسانات مافوق صوت روشهای استاندارد برای شکستن توده‌های بزرگ ذرات و همگن نمودن سیال است.

۲-۴- خصوصیات نانوسیال بر مبنای درصد حجمی و جرمی

گام بعدی در مطالعه‌ی نانوسیالات شناخت خصوصیات و ویژگی‌های آنها است. برای اینکه این تحقیق بخواهد توجه خود را به انجام درست آزمایشات معطوف بدارد باید مراحل سنتز نانوسیال را به درستی انجام دهد. از طرفی فهم رفتار نانوسیالات از نقطه نظر مبانی به منظور تشخیص درست پدیده‌های آن نیز بسیار مهم است.

در بیشتر تحقیقات انجام شده راجع به هدایت حرارتی نانوسیال و انتقال حرارت، غلظت ذرات درون سیال بر مبنای درصد حجمی داده می‌شود. درصد حجمی به منظور استفاده از مدل‌های موجود برای هدایت حرارتی محیط‌های مخلوط مانند مدل‌های ماکسول [۴] و همیلتون-کراسر [۵] به کار می‌رود. هر چند که از دیدگاه آزمایشگاهی تعیین درصد حجمی دقیق کاری بسیار مشکل است. زیرا وجود تعداد زیاد مولکول‌های سطح در ذرات، چگالی ماده در حالت تغییر است و محاسبه‌ی درصد حجمی مناسب نیست.

ضمناً زمانی که ذرات درون محلول قرار گرفتند، تشکیل اکسید یا دیگر گروه‌های سطحی حجم اشغال شده توسط ذرات را تغییر می‌دهد.

برخی محققان در حال استفاده از غلظت جرمی و چگالی ماده‌ی مربوطه به منظور تعیین غلظت حجمی برای شبیه‌سازی هستند. این کار در ادامه‌ی همان کارهای قبلی است که توجه به درصد حجمی می‌تواند همراه‌کننده باشد و اگر تغییر غیر عادی در خواص دیده شود قابلیت توجیه با این روش را خواهد داشت. از طرفی اگر محققى بخواهد صحت نتایج آزمایشگاهی خود را که از طریق غلظت جرمی انجام گرفته باشد بررسی کند، هیچ‌گونه تفسیری نمی‌تواند بیابد. زیرا تحلیل‌های معتبر تنها بر مبنای غلظت حجمی انجام شده‌اند.

پدیده جالب دیگر تغییر درصد حجمی نانوسیال با تغییر دماست. حجم و چگالی ذرات جامد وابستگی بسیار کمی به دما دارد. به همین دلیل باید این حقیقت را در نظر گرفت که درصد حجمی یک نانوسیال می‌تواند با گرم شدن سیستم کاهش یابد. این اثر دمایی باید برای محققى که می‌خواهد از مدل‌های حجمی متوسط برای پیش‌بینی هدایت حرارتی استفاده کند به حساب آورده شود.

۲-۵- کاربردهای نانوسیالات

از نانوسیالات می‌توان برای بهبود عملکرد انتقال حرارت و انرژی در گستره وسیعی از سیستم‌های حرارتی استفاده نمود که مهم‌ترین کاربرد آن خنک‌کاری تجهیزات می‌باشد. بیشتر کارها در زمینه نانوسیالات در آزمایشگاه‌ها و دانشگاه‌ها و در مرحله تحقیقات انجام شده است. اخیراً تعداد شرکت‌هایی که پتانسیل فناوری نانوسیالات را می‌بینند و توسعه‌ی فعال را در کاربردهای صنعتی مد نظر دارند در حال افزایش است. در صنعت حمل و نقل، جنرال موتور^۱ و فورد^۲ در میان دیگران، پروژه‌های تحقیقاتی نانوسیال را به

^۱ GM

^۲ Ford

طور مداوم پیش برده‌اند. در این بخش برخی از نمونه‌های واقعی و کاربردهای بالقوه در زمینه‌های حمل و نقل، میکروالکترونیک، صنایع دفاعی، صنایع هسته‌ای، فضایی و بیوپزشکی مطرح می‌شود.

۲-۵-۱- حمل و نقل

مخلوط اتیلن گلیکول و آب که تقریباً به طور فراگیر به عنوان مبرد در اتومبیل‌ها استفاده می‌شود در مقایسه با آب خالص، سیالی با انتقال حرارت نسبتاً ضعیف محسوب می‌شود. روغن موتورهای حتی پایین‌تر از میزان معمول انتقال حرارت عمل می‌کنند. افزودن نانوذرات به مبردهای استاندارد، پتانسیل بهبود نرخ خنک‌کاری موتورهای سنگین و اتومبیل‌ها را دارد. چنین بهبودی می‌تواند برای خروج گرما با کاهش اندازه سیستم‌های حرارتی همراه شود. در حقیقت سیستم‌های خنک‌کاری کوچک‌تر به تولید رادیاتورهای کوچک‌تر و سبک‌تر می‌انجامد که مزیتی بزرگ در عملکرد ماشین و کامیون دارد و منجر به کاهش مصرف سوخت می‌شود. بنابراین می‌توان به منظور جایگزینی نرخ بهبود خنک‌کاری برای موتورهای اتومبیل و کامیون در خروج گرما، از موتورهای قوی‌تر با همان اندازه سیستم خنک‌کاری استفاده نمود.

مبرد نانوسیالی پیشرو در موتورهای اتیلن گلیکول با نانوذرات است. اتیلن گلیکول خالص سیالی با انتقال حرارت ضعیف در مقایسه با مخلوط اتیلن گلیکول و آب با نسبت برابر است، اما افزودن نانوذرات شرایط را بهبود خواهد بخشید. اگر نرخ انتقال حرارت نتیجه شده بتواند نزدیک به نرخ مخلوط ۵۰/۵۰ شود، فواید مهمی خواهد داشت. شاید یکی از مهمترین آنها، عملکرد فشار پایین نانوسیال با سیال مبنای اتیلن-گلیکول در مقایسه با مخلوط ۵۰/۵۰ اتیلن گلیکول و آب باشد. این نانوسیال همچنین یک نقطه جوش دارد، که برای نگهداری جریان تک-فاز باید در نظر گرفته شود. به علاوه، مبرد با نقطه جوش بالاتر می‌تواند برای افزایش دمای عملکرد خنک‌کاری و سپس خروج بیشتر گرما از طریق سیستم مبرد خروجی کارآمدتر باشد. خروج گرمای بیشتر، اجازه تنوع در طراحی‌های زیباتر را می‌دهد که شامل موتورهای سنگین‌تر نیز می‌شود.

نتایج تحقیق روی نانوسیالات، هم اکنون در حال اجرا بر روی خنک‌کاری جعبه دنده‌های اتوماتیک نیز می‌باشد. تی‌ژنگ و همکاران^۱ [۳۱] نانوذرات اکسید مس و اکسید آلومینیوم را در روغن جعبه دنده خودرو معلق کردند. در پاسخ، جعبه دنده گشتاور چرخشی بهتری داشت که ماکزیمم دمای محلی در سرعت چرخشی بالا اتفاق می‌افتاد. به همین علت نرخ انتقال حرارت بهبود یافته از سیال جعبه دنده حائز اهمیت می‌باشد. توزیع دما در سطح خارجی پره چرخنده در چهار سرعت عملکرد موتور (۴۰۰، ۸۰۰، ۱۲۰۰، ۱۶۰۰ دور بر دقیقه) اندازه‌گیری شد و ترکیب بهینه نانوسیال با توجه به عملکرد انتقال حرارت بررسی شد. نتایج نشان داد که نانوسیال اکسید مس دمای کمتری را در هر دو سرعت چرخشی بالا و پایین تولید می‌کند. بنابراین استفاده از نانوسیال در جعبه دنده، فایده روشنی از نقطه نظر عملکرد حرارتی دارد. اگرچه در همه‌ی کاربردهای نانوسیال، ملاحظه‌ی عواملی همچون ته‌نشینی ذره، کلوخه‌شدن ذره و فرسایش سطوح باید در نظر گرفته شود.

در کاربردهای روغن‌کاری اتومبیل نیز، نانوذرات بهبودیافته سطحی به صورت پایدار و معلق درون روغن-های معدنی به صورت مؤثر در کاهش فرسودگی و افزایش ظرفیت حمل بار گزارش شده‌اند [۳۲]. نتایج اخیر از یک پروژه تحقیقاتی مرتبط با صنعت و دانشگاه، اشاره به استفاده از نانوذرات در روانکارها برای افزایش خواص تریبولوژی مثل ظرفیت حمل بار، مقاومت در برابر فرسایش و کاهش اصطکاک میان اجزاء مکانیکی متحرک دارد. دستیابی به چنین نتایجی برای بهبود نرخ انتقال حرارت در سیستم‌های اتومبیل با استفاده از نانوسیالات قابل تقدیر است.

۲-۵-۲- خنک‌کاری قطعات الکترونیک

شدت توان مدارهای مجتمع و میکروپروسورها در سالهای اخیر به صورت باورنکردنی افزایش یافته است. این رفتار باید برای آینده قابل پیش‌بینی باشد. اخیراً، نقشه راه جهانی فناوری برای نیمه‌هادی‌ها ادعا کرد

¹ Tzeng et al.

که تا سال ۲۰۱۸، مدارهای مجتمع با عملکرد بسیار بالا بیش از ۹,۸ میلیارد ترانزیستور را درون تراشه‌ای به مساحت ۲۸۰ میلی‌متر مربع که ۴۰ برابر بیشتر از تراشه‌های امروزی است قرار خواهد داد. پردازشگرهای آینده برای استفاده در ابرکامپیوترها و سرورها برای خروج بیشتر گرما در محدوده ۱۰۰ تا ۳۰۰ وات بر مترمربع طراحی شده‌اند. حتی اگر این مقادیر محقق نشود، چنین رفتار چشمگیری برای افزایش توان قطعات الکترونیکی ادامه دارد. تکنیک‌های خنک‌کاری هوایی موجود برای خروج این گرما با محدودیت مواجه است و تکنولوژی خنک‌کاری با استفاده از سیال برای جایگزینی، در حال توسعه است. سیالات تک‌فاز، سیالات دوفاز و نانوسیالات کاندیدهای جایگزین برای هوا محسوب می‌شوند. همه این‌ها قابلیت انتقال حرارت بیشتری را نسبت به سیستم‌های هوایی نشان داده‌اند و همگی در مرحله بررسی و تحقیق هستند.

از نانوسیالات به عنوان سیال عامل برای لوله‌های گرمایی در کاربردهای خنک‌کاری الکترونیک هم در نظر گرفته می‌شود. تی‌سای و همکاران^۱ [۳۳] از یک نانوسیال پایه آب در یک لوله گرمایی دایروی طراحی شده، به عنوان پخش کننده گرما در پردازنده^۲ یک کامپیوتر استفاده کردند. نتایج حاکی از کاهش قابل ملاحظه مقاومت حرارتی لوله گرمایی با نانوسیال در مقایسه با آب مقطر است. نتایج بدست آمده همچنین نشان داد که مقاومت حرارتی یک مولد گرمایی با اندازه نانوذرات تغییر می‌کند. در تحقیقی مشابه، ما و همکاران^۳ [۳۴] اثر نانوسیال را بر روی قابلیت انتقال حرارت یک لوله گرمایی چرخان بررسی کردند. نتایج تجربی نشان داد که در توان ورودی ۸۰ وات، یک نانوسیال با ۱٪ حجمی نانوذرات، اختلاف دمای میان تبخیرکننده و چگالنده را از ۴۰,۹ به ۲۴,۳ کاهش می‌دهد. این نتایج مثبت در حال ارتقا است و تحقیق و توسعه نانوسیالات برای چنین کاربردهایی ادامه دارد.

۲-۵-۳- صنایع دفاعی

¹ Tsai et al.

² CPU

³ Ma et al.

شماری از سیستم‌ها و وسایل نظامی نیازمند خنک‌کاری شارهای حرارتی بالا در دامنه‌ی دهها مگاوات بر متر مربع می‌باشند. نمونه‌های کاربردهای نظامی شامل خنک‌کاری قطعات الکترونیکی پرتوان و سلاح‌های پرنرژی می‌باشد. این تسلیحات با شارهای حرارتی بسیار بالا درگیر هستند (۵۰۰ تا ۱۰۰۰ وات بر سانتی-متر مربع) و فراهم کردن خنک‌کاری کافی برای آنها و ارتباط توان میان آنها نیازی جدی است. نانوسیالات پتانسیل فراهم آوردن خنک‌کاری مورد نیاز در چنین کاربردهایی در سیستم‌های نظامی، شامل تجهیزات نظامی، زیردریایی‌ها و دیویدهای لیزری با توان بالا، دارا می‌باشد. در بعضی موارد، تحقیق روی نانوسیال برای کاربردهای دفاعی شامل نانوسیالات چند منظوره با ذخیره انرژی حرارتی افزوده یا تولید انرژی از طریق واکنش‌های شیمیایی می‌باشد.

همچنین خنک‌کاری برخی قطعات برای نیروی دریایی همانند صنایع تولید توان با هدف کاهش اندازه و وزن مبدل حائز اهمیت است. به علاوه تقاضای در حال رشد برای تولید برق بیشتر می‌تواند به ضرورت جایگزینی و یا ارتقاء سوخت‌های نفتی متداول با یک نانوسیال بیانجامد. چنین بهبودهایی می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای ذخیره انرژی به دنبال داشته باشد. در ضمن دیده شده که خواص انتقال حرارت روغن-های ترانسفورماتور می‌تواند با استفاده از افزودنی‌های نانوذره بهبود قابل توجهی داشته باشد.

۲-۵-۴ - صنایع فضایی

یو و همکاران^۱ [۳۵] و واسالو و همکاران^۲ [۳۶] دامنه افزایش یافته وسیعی را در شار حرارتی بحرانی در جوشش استخری با نانوسیالات در مقایسه با سیال مبنای تنها گزارش کرده‌اند. در چنین شرایطی امکان افزایش توان تراشه در تجهیزات الکترونیک یا ساده‌سازی نیازهای خنک‌کاری برای کاربردهای فضایی ارائه می‌شود. شارهای حرارتی بحرانی بسیار بالا به جوشش اجازه می‌دهد تا با افزایش گرمای خروجی و افزودن

¹ You et al.

² Vassalo et al

دامنه ایمنی، کیفیت جوشش فیلمی را بالا ببرد. این مشخصه، نانوسیال را همانند کاربردهای فضایی که شدت توان بسیار بالا دارند، برای خنک کاری قطعات الکترونیک ترغیب می کند.

۲-۵-۵- خنک کاری سیستم‌های هسته‌ای

انستیتو تکنولوژی ماساچوست، مرکزی بین رشته‌ای در زمینه فناوری نانوسیال برای صنعت انرژی هسته-ای تأسیس کرده است. در حال حاضر، محققان آن مرکز در حال ارزیابی تأثیر پتانسیل استفاده از نانوسیالات روی ایمنی، خالص سازی و عملکرد اقتصادی سیستم‌های هسته‌ای هستند.

۲-۵-۶- بیوپزشکی

نانوسیالات و نانوذرات کاربردهای بسیاری در صنعت بیوپزشکی دارند. برای مثال، برای به دام انداختن برخی اثرات روش‌های سنتی درمان سرطان، نانوذرات پایه آهن می‌تواند به مانند داروها یا ابزارهای تشعشع بدون اینکه برای سلامتی بافت تهدیدی باشد مورد استفاده قرار گیرد. چنین ذراتی می‌توانند با استفاده از خروجی مغناطیسی برای دفع یک تومور به درون جریان خون هدایت شوند. نانوسیالات همچنین می‌توانند پس از عمل جراحی برای تولید اثرات خنک کاری حول ناحیه جراحی شده استفاده شوند و به موجب آن شانس بهبود بیمار و کاهش خطر را تضمین کنند. در کاربردی مقایسه‌ای برای خنک کاری، نانوسیالات می‌توانند برای تولید دمای بالاتر حول تومور برای کشتن سلولهای سرطانی بدون داشتن عوارض برای سلول‌های سالم مورد استفاده واقع شوند [۳۷].

۲-۵-۷- کاربردهای دیگر

شرایط بی‌پایان دیگری برای تأثیرات افزایش انتقال حرارت می‌تواند برای کیفیت، کمیت و یا هزینه یک محصول یا فرایند وجود داشته باشد. در بسیاری از این شرایط، نانوسیالات کاندیداهای مناسبی برای افزایش عملکرد انتقال حرارت می‌باشند. برای مثال، نانوسیالات پتانسیل کاربرد در ساختمان‌ها که راندمان انرژی در آن اهمیت دارد را بدون افزایش در توان پمپ داراست. چنین کاربردی باعث ذخیره انرژی در

گرمایش، سرمایش و سیستم تهویه مطبوع خواهد شد. در صنعت انرژی‌های تجدیدپذیر، نانوسیالات می-
توانند برای افزایش انتقال حرارت از کلکتورهای خورشیدی به مخازن ذخیره و افزایش نرخ توان به کار
گرفته شوند. مبردهای نانوسیال همچنین پتانسیل کاربرد در صنایع فرایندی تولیدی همچون مواد
شیمیایی، غذا و نوشیدنی، نفت و گاز، کاغذ و چاپ و منسوجات را دارند.

فصل سوم

تحقیقات انجام شده در زمینه انتقال

حرارت نانوسیالات

۳-۱- مطالعات تجربی هدایت حرارتی نانوسیال

قابلیت انتقال حرارت یک سیال جاری اغلب با عدد ناسلت^۱ بیان می‌شود که هدایت حرارتی سیال را مستقیماً و معمولاً به طور غیر مستقیم هم از طریق عدد پرانتل^۲ به حساب می‌آورد. بنابراین اولین ارزیابی از قابلیت انتقال حرارت یک نانوسیال در نظر گرفتن هدایت حرارتی آن است. تاکنون بیشتر تحقیقات برای انتقال حرارت نسبت به دیگر مسائل مربوط به نانوسیالات، در این زمینه منتشر شده است.

در بررسی تاریخچه، داده‌های تجربی محققان زیادی را جمع‌آوری کرده‌ایم. در هر مورد، نسبت بهبود هدایت حرارتی از اطلاعات داده شده در مقالات محاسبه شده است. ضریب بهبود هدایت حرارتی یا افزایش به صورت نسبت هدایت حرارتی نانوسیال به هدایت حرارتی سیال پایه تعریف می‌شود. درصد افزایش در هدایت حرارتی، برابر است با ضریب افزایش منهای یک ضرب در ۱۰۰٪. همچنین برای سهولت در این بخش، عبارت بهبود یا افزایش با توجه به هر پارامتر مثل هدایت حرارتی، ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت به ضریب افزایش برمی‌گردد.

بنا بر یافته‌های محققان، هشت پارامتر در افزایش هدایت حرارتی نانوسیالات مؤثر است که از میان نتایج آزمایشگاهی عبارتند از: (۱) درصد حجمی یا غلظت ذره، (۲) نوع ماده ذره، (۳) اندازه ذره، (۴) شکل ذره، (۵) نوع ماده سیال پایه، (۶) دما، (۷) مواد افزودنی و (۸) قدرت اسیدی. هر یک از این پارامترها جداگانه از منظر رفتار داده‌ها، بزرگی و تثبیت با آزمایشات متعدد بررسی می‌شوند.

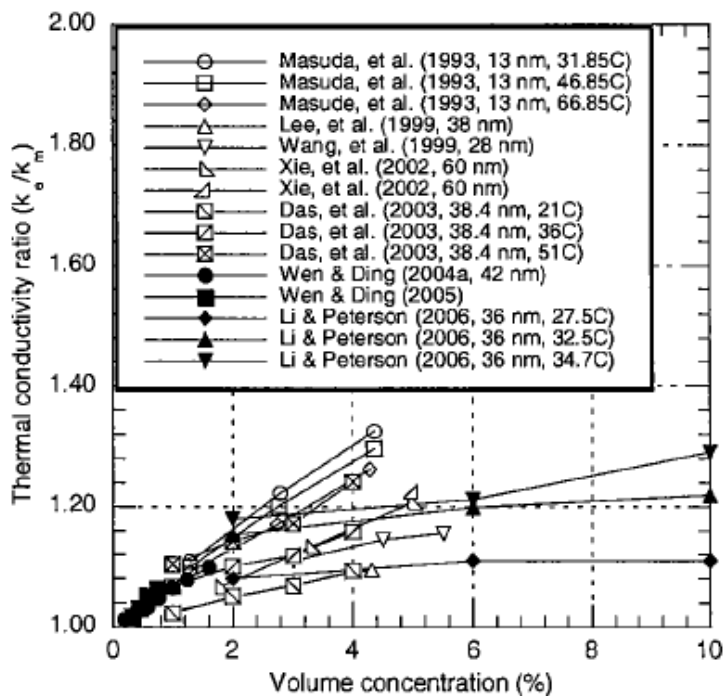
۳-۱-۱- اثر درصد حجمی ذره

اثر درصد حجمی و یا غلظت ذره روی افزایش هدایت حرارتی نانوسیال در شکل ۳-۱ نشان داده شده که کارهای تجربی ۷ گروه از محققان برای Al_2O_3 در آب ارائه شده است. اندازه ذره و دمای نانوسیال میان گروه‌ها در شکل ۳-۱ متغیر است، اما رفتار کلی روشن است: بهبود هدایت حرارتی با افزایش درصد

¹ Nusselt Number

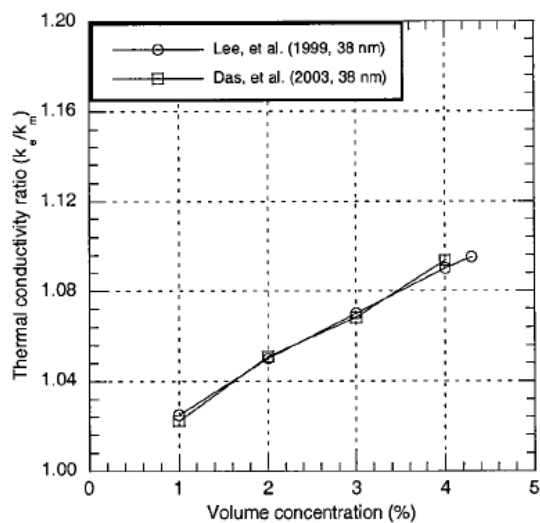
² Prandtl Number

حجمی ذره افزایش می‌یابد. به طور کلی درصدهای حجمی اکسید-ذره کمتر از ۴ تا ۵٪ هستند تا با متعادل نگه داشتن افزایش ویسکوزیته، حداقل بهبود در حدود ۱,۳ (۳۰٪) بیشتر از نمونه باشد.



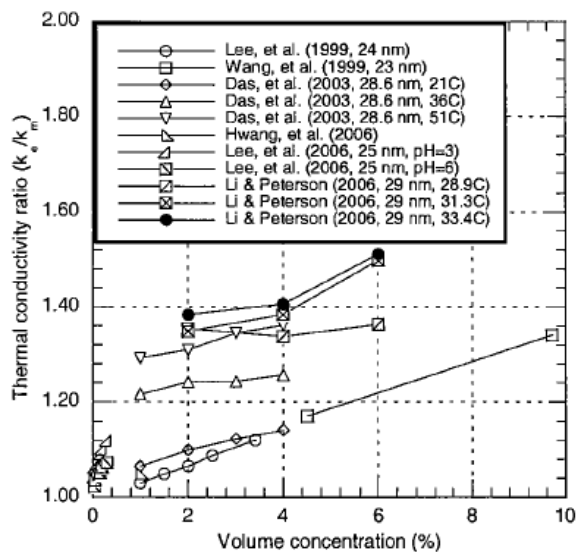
شکل ۳-۱: افزایش هدایت حرارتی Al_2O_3 در آب [۳۸]

اثر درصد حجمی ذره روی بهبود هدایت حرارتی در شکل ۳-۲ با مقایسه نتایج دو گروه با استفاده از همان اندازه‌های نامی ذره دیده می‌شود. با در نظر گرفتن اطلاعات در دسترس دو گروه در شکل ۳-۲ که از پارامترهای یکسانی استفاده کردند، نتایج تقریباً یکسانی حاصل شدند. (مقدار افزایش در شکل ۳-۲ به علت قطر نسبتاً کوچک ذره نسبتاً کم است.) همان رفتارها با ذرات دیگر و سیالات و اندازه‌های دیگر ذرات هم مشاهده شد.

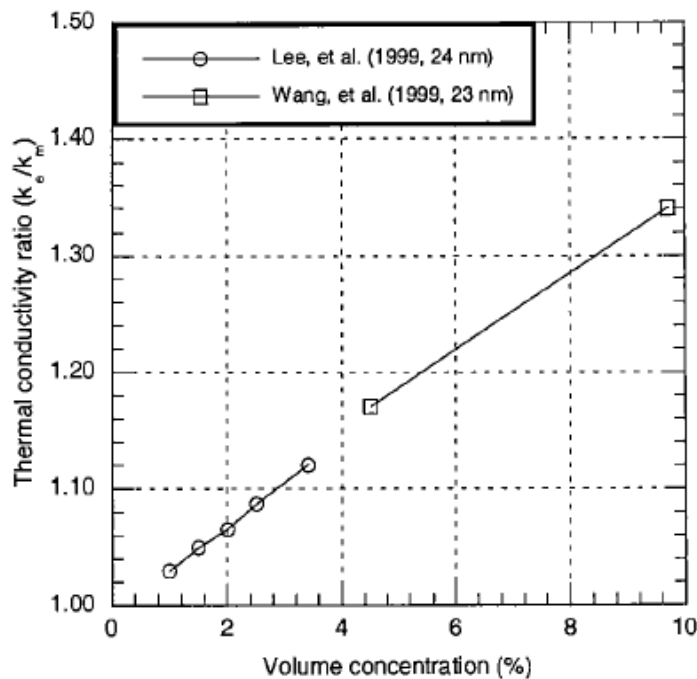


شکل ۳-۲: اثر غلظت ذره برای Al_2O_3 در آب [۳۸]

نتایج چند آزمایش دیگر برای افزایش هدایت حرارتی در شکل ۳-۳ برای CuO در آب نشان داده شده‌اند. مطابق شکل ۳-۱ دامنه‌ای از اندازه ذرات و دمای سیال در شکل ۳-۳ آمده است. پارامتر غلظت جداگانه در شکل ۳-۴ اشاره شده که از یک اندازه ذره و از یک دمای سیال استفاده شده است. رفتار کلی همانند شکل‌های ۳-۱ تا ۳-۴ است و مقادیر شکل‌های ۳-۲ و ۳-۴ بوسیله دو گروه از آزمایشات تأیید شده است.

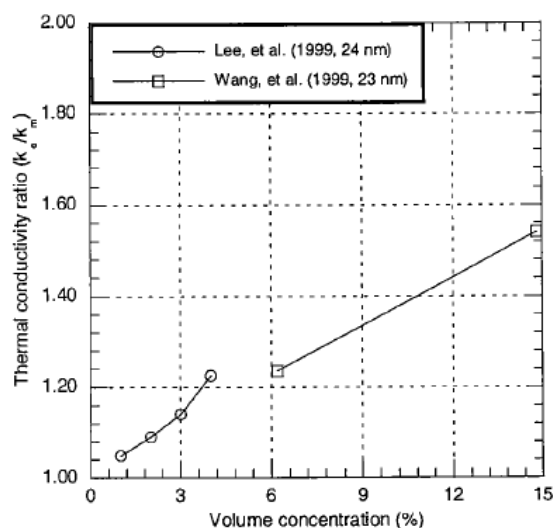


شکل ۳-۳: افزایش هدایت حرارتی CuO در آب [۳۸]



شکل ۳-۴: اثر غلظت ذره برای CuO در آب [۳۸]

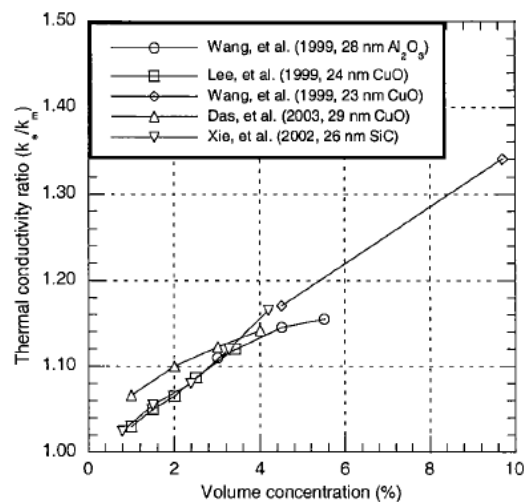
اثر درصد حجمی ذره با اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه در شکل ۳-۵ دیده می‌شود که همان رفتار و مقادیر آب را که در شکل ۳-۱ تا ۳-۴ است دارد. به علاوه مطابقت خوبی در مقادیر بین داده‌های دو گروه در شکل ۳-۵ آمده است. از شکل‌های ۳-۱ تا ۳-۵ واضح است که رفتار کلی به صورت افزایش هدایت حرارتی با افزایش درصد حجمی است. بررسی‌هایی نیز در مقایسات آورده شده است و گروه‌های مختلف راجع به مقادیر افزایش، گزارش‌های یکسانی از آزمایشات برای Al_2O_3 در آب (لی و همکاران و داس و همکاران)، CuO در آب (لی و همکاران و ونگ و همکاران) و CuO در اتیلن گلیکول (لی و همکاران و ونگ و همکاران) ارائه داده‌اند. در غلظت حجمی بالاتر، افزایش در بهبود انتقال حرارت کمتر می‌شود و یا حتی اثر عکس پیدا می‌کند. همچنین ویسکوزیته نانوسیال افزایش می‌یابد. هرچند در دامنه غلظت حجمی کاربردی در صنایع خودرو که در شکل‌ها نشان داده شده است، در تاریخچه هیچ نتیجه‌ای که تأیید یا تکذیب کند، یافت نشد.



شکل ۳-۵: اثر غلظت ذره برای CuO در اتیلن گلیکول [۳۸]

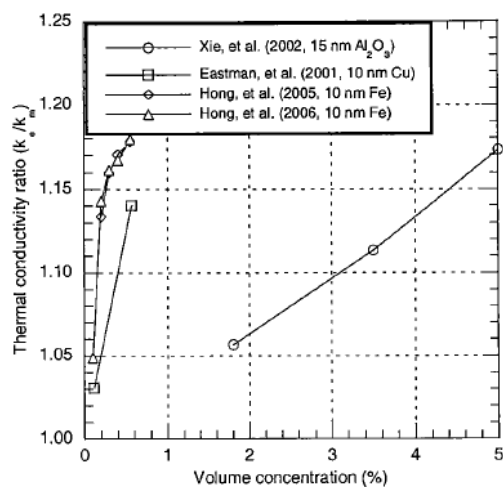
۳-۱-۲- اثر نوع ذره

اثر نوع ذره روی افزایش هدایت حرارتی در شکل ۳-۶ برای دو ذره اکسیدی و کریبید سیلیکون -همگی در آب- نشان داده شده‌اند. همه‌ی پارامترهای دیگر که تقریباً در شکل ۳-۶ ثابت هستند، تأثیر خاصیت مواد را متمایز کرده‌اند. همانطور که نشان داده شده، ماده ذره اثر مهمی روی بهبود این ذرات که هدایت حرارتی نسبتاً پایینی دارند، ندارد. شرایط، زمانی که از ذرات با هدایت حرارتی بالاتر استفاده شود، تغییر می‌کند که در ادامه آمده است.

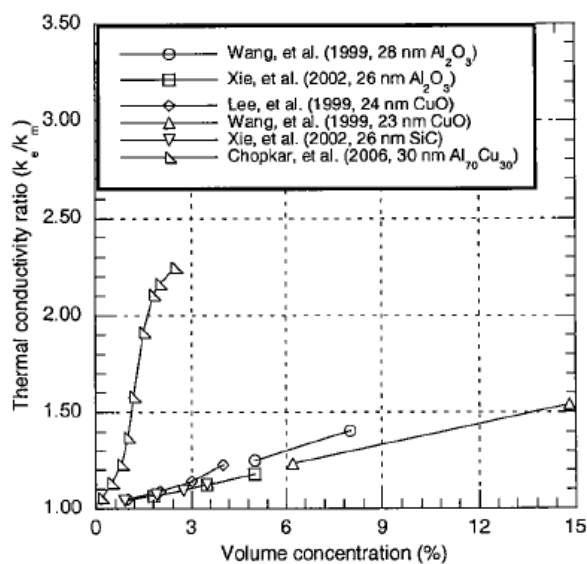


شکل ۳-۶: اثر نوع ذره برای ذرات در آب [۳۸]

نتایج افزایش هدایت حرارتی در شکل ۳-۷ آمده که برای مقایسه شامل دو ذره فلزی و یک اکسید می-شود. همانطور که مشاهده می‌شود، ذرات فلزی همان افزایش ذرات اکسیدی را تنها در غلظت‌های حجمی بسیار کمتر تولید کردند. البته انتظار می‌رفت که ذرات فلزی عملکرد بهتری از ذرات اکسیدی در پیشینه هدایت حرارتی ایجاد کنند. می‌دانیم که تولید نانوسیال با ذرات فلزی بدون اکسید شدن ذرات در طی فرایند تولید، بسیار مشکل است. ذرات Cu در شکل ۳-۷ به روش یک مرحله‌ای تولید شده‌اند.



شکل ۳-۷: اثر نوع ذره برای ذرات در اتیلن گلیکول [۳۸]

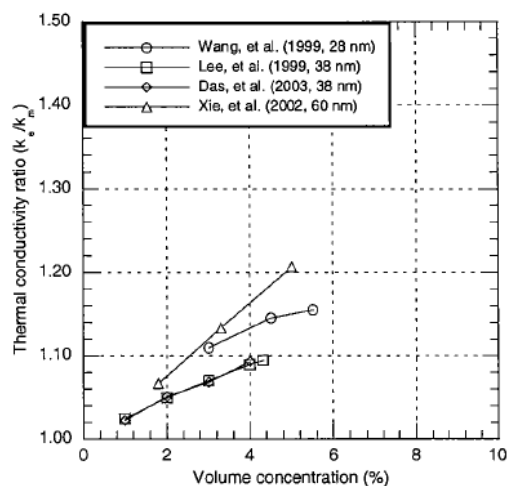


شکل ۳-۸: اثر نوع ذره برای ذرات در اتیلن گلیکول [۳۸]

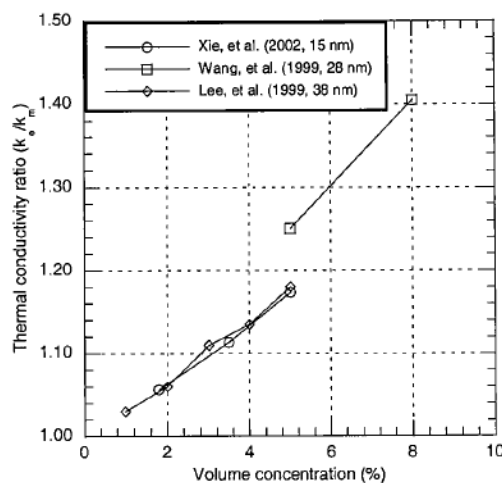
در شکل ۳-۷، می‌بینیم که ضریب هدایت حرارتی برای فلز از ذرات اکسیدی بیشتر است. نکته جالب توجه سقف غلظت ذرات برای بالاترین سطح در انجام آزمایشات است. بخشی از پاسخ در شکل ۳-۸ دیده می‌شود. در اینجا نتایج ذرات اکسیدی، کربیدهای سیلیکونی و ذرات فلزی ارائه شده است. اندازه ذرات در شکل ۳-۸ بزرگتر از ذرات شکل ۳-۷ هستند، اما مهم‌ترین اثر دیده شده افزایش بسیار زیاد هدایت حرارتی نانوسیال ذرات فلز هنگامی که درصد حجمی تا ۲٫۵٪ در مقایسه با ۰٫۷٪ برای ذرات فلزی شکل ۳-۷ افزایش یابد می‌باشد. در درصد حجمی ذرات فلز ۲٫۵٪، هدایت حرارتی نانوسیال در شکل ۳-۸، تا ۱۱۵٪ بالاتر از اتیلن گلیکول می‌رسد. این نتیجه به طور چشمگیر بالاتر از نتایج ذرات غیرفلزی شکل ۳-۸ است و اشاره به زمینه‌ای برای تحقیق و تولید نانوسیال دارد. هرچند همانگونه که قبلاً گفته شد، ایراد اصلی نانوسیالات ذرات فلزی، فرایند اکسیداسیون در طول تولید و سپس استفاده است. پوشش ذرات روشی است که برخی برای حل این مشکل به آن توجه کرده‌اند.

۳-۱-۳- اثر اندازه ذره

اثر اندازه ذره روی افزایش هدایت حرارتی در ادامه ملاحظه خواهد شد. تنها ذراتی در گزارشات آمده‌اند که کروی بودند. در اینجا پارامتر اندازه قطر نامی می‌باشد. نتایج در شکل ۳-۹ برای ترکیبی از آب/ذره مجرد حول دامنه‌ای از قطر ذرات از ۲۸ تا ۶۰ نانومتر نشان داده شده‌اند که رفتار یکسانی دیده نمی‌شود. میان داده‌های دو گروه مطالعه‌کننده از ذرات ۳۸ نانومتری شباهت وجود دارد. نتایج برای ذرات بزرگتر، یعنی ۶۰ نانومتر، افزایش در بهبود هدایت حرارتی را نشان می‌دهد. بر مبنای این نتایج، انتظار این است که ذرات کوچکتر، حداقل افزایش را نشان دهند. اما نتایج برای ذرات ۲۸ نانومتری بین دو ذره بزرگتر قرار می‌گیرد. دامنه در اندازه ذره در شکل ۳-۹ نسبتاً کوچک است، که برای اطلاعاتی است که با دیگر پارامترهای یکسان در دسترس بودند. نتایج شکل ۳-۹ راجع به رفتار، منحصر به فرد نیست. دقیقاً همان نتایج که برای اتیلن گلیکول بدست آمد، در شکل ۳-۱۰ دیده می‌شود.



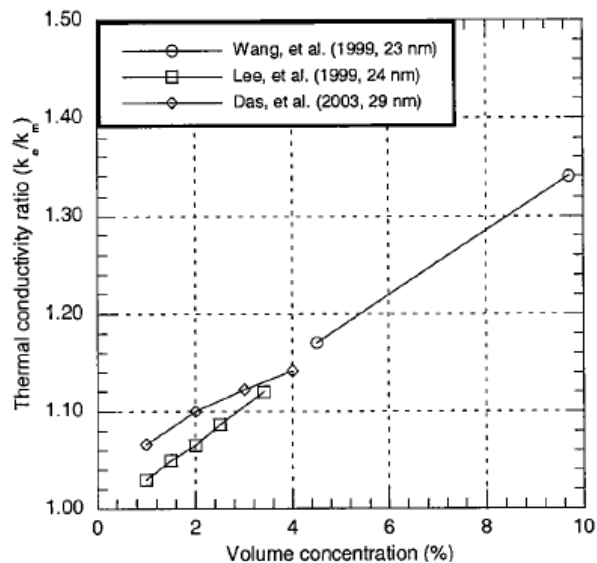
شکل ۳-۹: اثر اندازه ذره برای Al_2O_3 در آب [۳۸]



شکل ۳-۱۰: اثر اندازه ذره برای Al_2O_3 در اتیلن گلیکول [۳۸]

از رفتار شکل‌های ۳-۹ و ۳-۱۰ به غیر از نتایج ونگ و همکاران [۱۵]، رفتار ثابت در موردی که ذرات با قطرهای بزرگتر، افزایش بیشتری در هدایت حرارتی تولید می‌کنند را نتیجه می‌گیریم. این نتیجه در مخالفت با برخی از نظریه‌ها است که به توزیع یکنواخت ذرات کوچک حتی در بهترین روش تولید، می‌پردازد. کلوخه شدن ذره مهم‌ترین عامل مجهول ماندن آزمایشات هدایت حرارتی است، اثر اندازه ذره از آزمایش و تئوری نمی‌تواند به طور کامل یکسان و هماهنگ باشد. باید تأکید شود که در این مورد، در همه مقایسات داده‌های نانوسیال در این مطالعه، عدم قطعیت از دقت اندازه و شکل ذره گزارش شده ناشی می‌-

شود. این پارامترها اغلب با آزمایشات اندازه‌گیری نشدند، بلکه از اطلاعات نامی سازندگان ذرات گرفته می‌شوند.



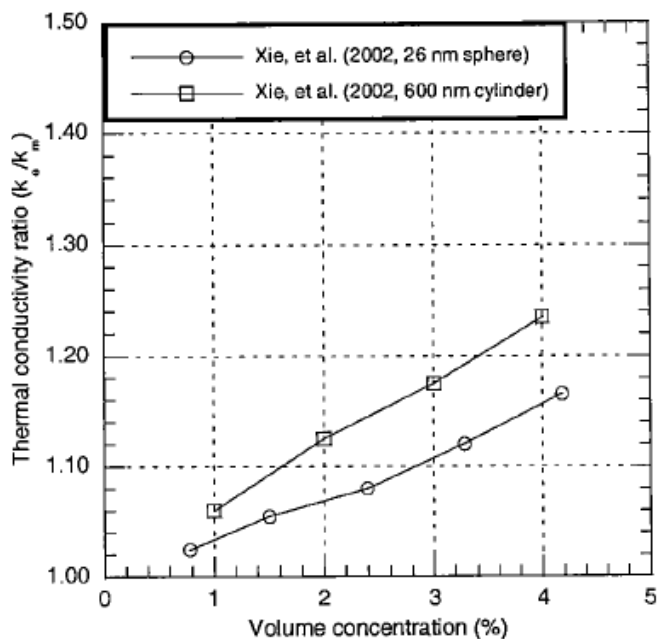
شکل ۳-۱۱: اثر اندازه ذره برای CuO در آب [۳۸]

مقایسه سوم اثر اندازه ذره روی افزایش هدایت حرارتی در شکل ۳-۱۱ برای CuO در آب نشان داده می‌شود. در اینجا نتایج ونگ و همکاران از دیگر گروه‌هایی که نتایج آنها نشان داده شد، جدا شده که به صورت افزایش در بهبود با افزایش در اندازه ذره است. نتایج شکل‌های ۳-۹ تا ۳-۱۱ پیشنهاد می‌کند که افزایش هدایت حرارتی با قطر ذرات نانومتری کروی معلق افزایش می‌یابد.

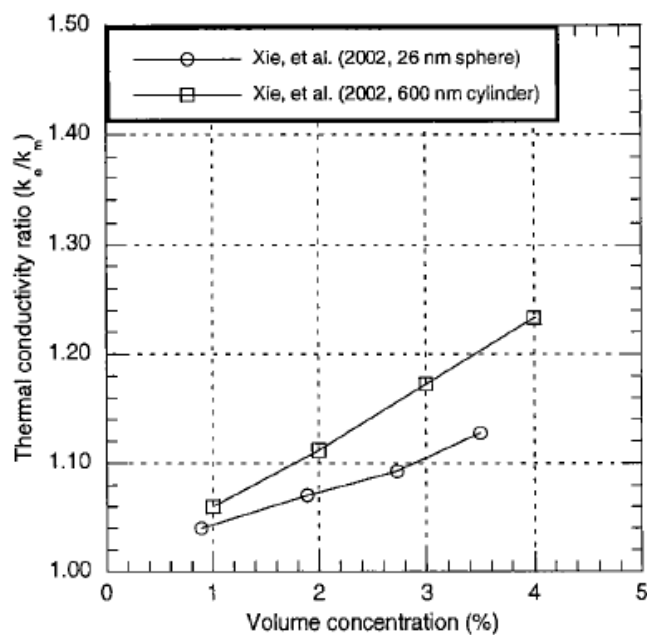
۳-۱-۴ - اثر شکل ذره

افزایش هدایت حرارتی در نانوسیالات با توجه به شکل هندسی ذرات هم مقایسه شد. در شکل ۳-۱۲، تأثیر شکل‌های ذرات کروی و استوانه‌ای با یکدیگر مقایسه شده است. ذرات استوانه‌ای افزایش در هدایت حرارتی را نشان می‌دهند، و به نظر می‌رسد این نتیجه به علت شبکه تشکیل شده بوسیله ذرات کشیده شده‌ای که گرما را از سیال هدایت می‌کنند باشد. نتایج شکل ۳-۱۲ از یک گروه گرفته شده و آن به یاد آورنده در دسترس بودن اطلاعات شکل‌های ۳-۱۳ و ۳-۱۴ است. با این وجود نتایج شکل‌های ۳-۱۲

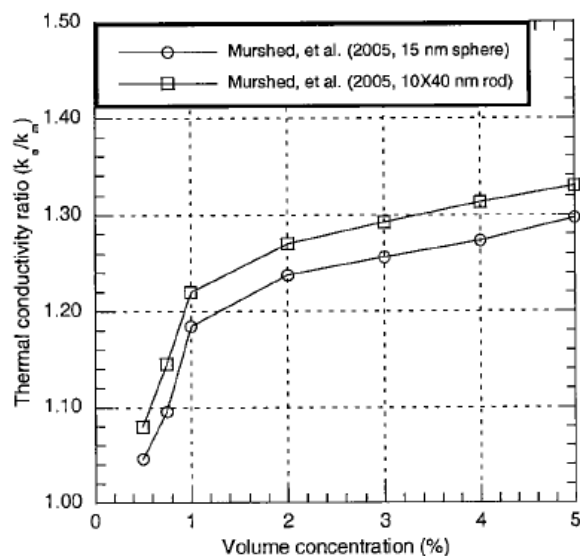
تا ۱۴-۳ نشان می‌دهند که ذرات کشیده‌تر نسبت به ذرات کروی از لحاظ افزایش هدایت حرارتی مقدم‌اند. این نتیجه اشاره به زمینه‌ای دیگر برای تحقیق و تولید نانوسیال می‌کند، اگرچه ذرات کروی اغلب در قیمت‌های مناسب‌تری در دسترس هستند.



شکل ۳-۱۲: اثر شکل ذره برای SiC در آب [۳۸]



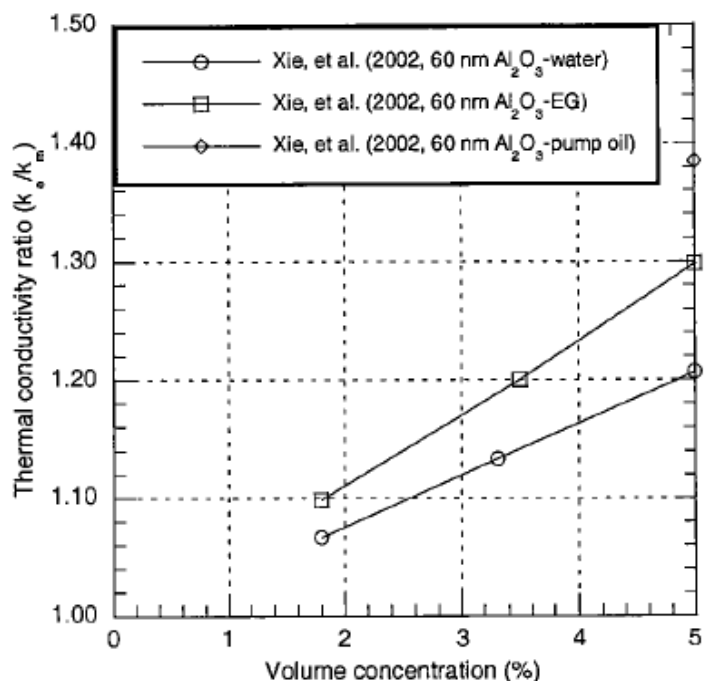
شکل ۳-۱۳: اثر شکل ذره برای SiC در اتیلن گلیکول [۳۸]



شکل ۳-۱۴: اثر شکل ذره برای TiO_2 در آب [۳۸]

۳-۱-۵- اثر نوع سیال مبنا

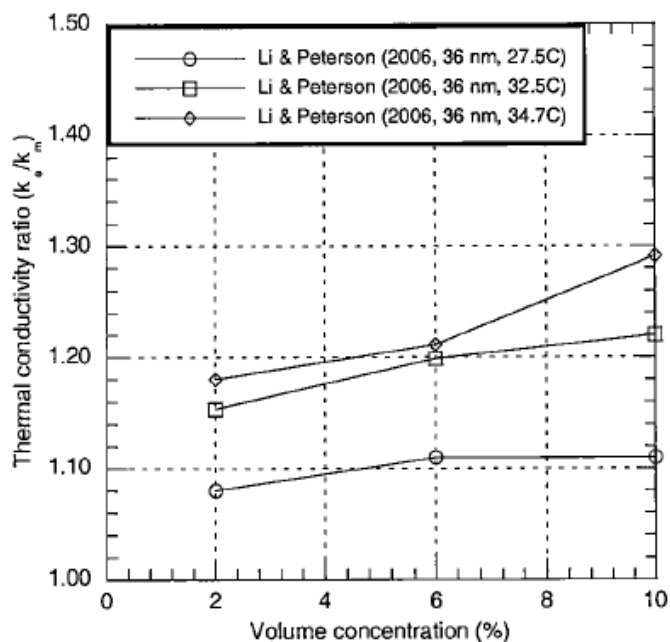
تأثیر سیال پایه به خودی خود (مثل آب، اتیلن گلیکول و روغن پمپ) روی افزایش هدایت حرارتی نانوسیالات در شکل ۳-۱۵ نمایش داده شده است. نتایج، نشان از افزایش بهبود هدایت حرارتی در سیالاتی که از نظر انتقال حرارت، ضعیف هستند دارد. نتایج شکل ۳-۱۵ حداقل افزایش را برای آب نشان می‌دهد، که بهترین سیال انتقال حرارت با بیشترین هدایت حرارتی در مقایسه با دیگر سیالات است. گرچه این رفتار در همه‌ی موارد برای داده‌های آزمایشی بررسی شده تأیید نشده است، اما آنها عموماً استثنا و موردی هستند. این نتیجه مورد دلخواه بسیاری از محققین می‌باشد، زیرا افزایش انتقال حرارت اغلب زمانی که سیالات درگیر، انتقال حرارت ضعیفی دارند مورد نیاز است. اتیلن گلیکول به تنهایی سیالی است با انتقال حرارت نسبتاً ضعیف در مقایسه با آب، و مخلوط‌های اتیلن گلیکول و آب میان دو انتقال حرارت مؤثر قرار می‌گیرند. بنابراین نانوذرات در مخلوط‌های اتیلن گلیکول و آب پتانسیل بالایی برای کاربردهای خنک‌کاری در موتور نشان می‌دهند.



شکل ۳-۱۵: اثر نوع سیال مبنا برای Al_2O_3 در آب [۳۸]

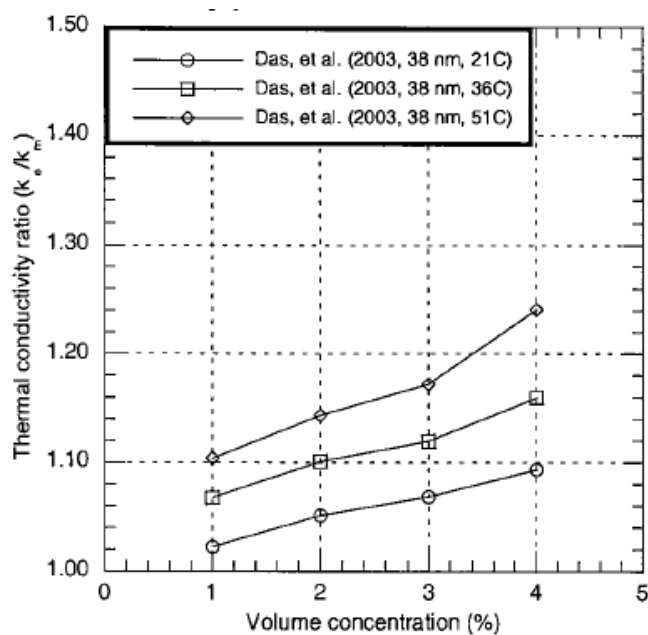
۳-۱-۶- اثر دما

به طور کلی، هدایت حرارتی نانوسیالات نسبت به دما حساس تر از سیال مبنا است. در نتیجه بهبود هدایت حرارتی نانوسیالات وابسته به دما است. در مقایسه اطلاعاتی که در پی می آید، نتایج برای هر یک از گروه‌های تحقیقاتی به طور همزمان رسم شده است. این شرایط اساساً ناشی از مقادیر دماهای معکوس استفاده شده بوسیله آزمایش کنندگان نشأت می‌گیرد. اگرچه هیچ مقایسه مستقیمی از داده‌های میان آزمایشات وجود ندارد، اما رفتار همه به غیر از یکی آنها نشان از افزایش هدایت حرارتی با افزایش دما دارد. داس و همکاران [۱۴] اطلاعات نانوسیال را حول یک دامنه دمایی کوچک برای Al_2O_3 در آب و CuO در آب ارائه کرده‌اند. آنها پیشنهاد کردند که وابستگی دمایی قوی هدایت حرارتی نانوسیال به علت حرکت نانوذرات است.

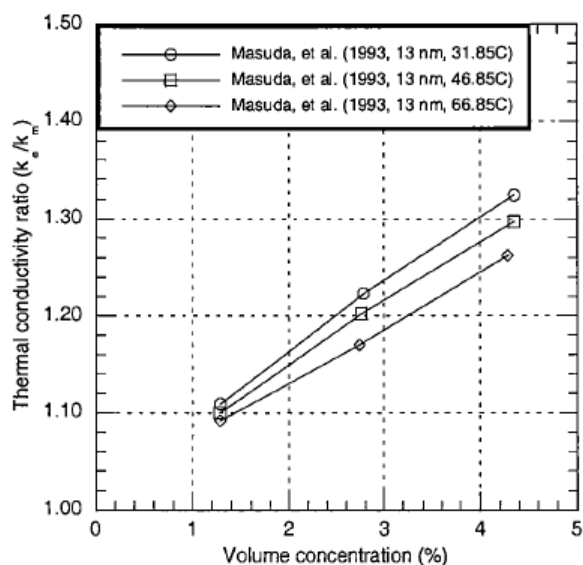


شکل ۳-۱۶: اثر دما برای Al_2O_3 در آب [۳۸]

نتایج برای Al_2O_3 در آب در شکل ۳-۱۶ تا ۳-۱۸ برای سه گروه نشان داده شده است. اندازه‌های ذرات و دماهای سیال در شکل‌ها متفاوت است، اما اندازه ذره در هر شکل ثابت و دما در هر یک متفاوت است. فقط نتایج ماسودا و همکاران با رفتار کلی متفاوت است.

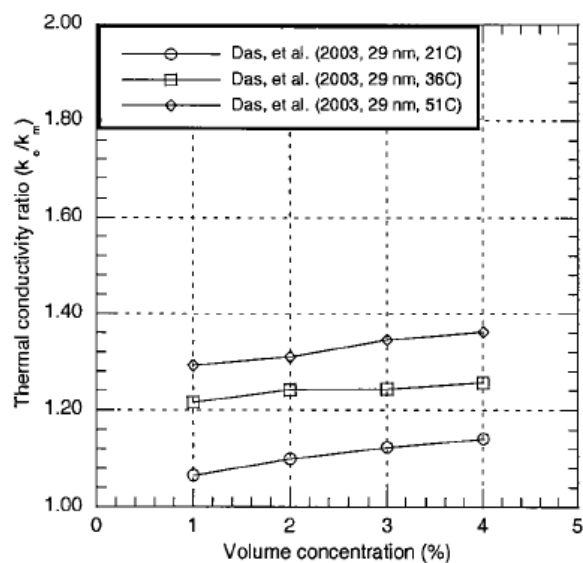


شکل ۳-۱۷: اثر دما برای Al_2O_3 در آب [۳۸]



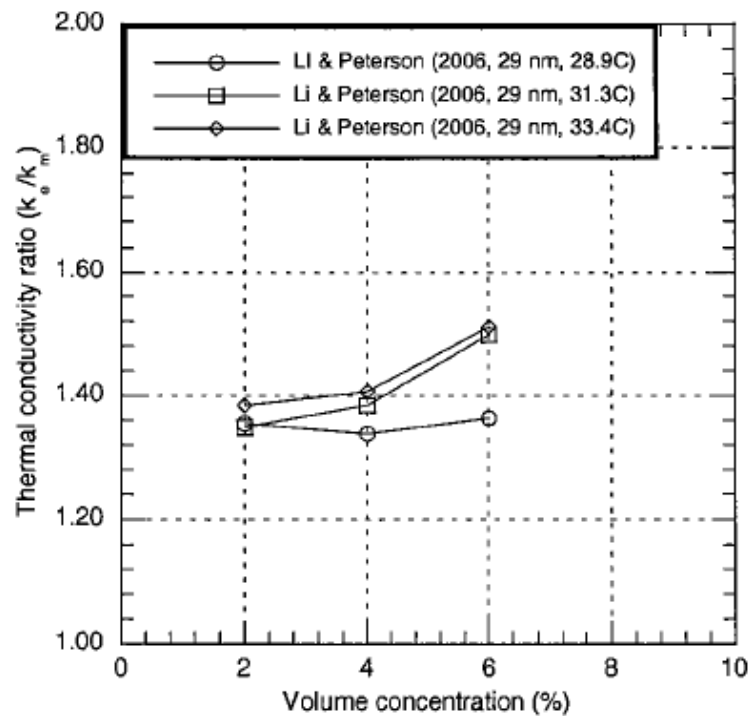
شکل ۳-۱۸: اثر دما برای Al_2O_3 در آب [۳۸]

افزایش هدایت حرارتی برای CuO در آب در شکل‌های ۳-۱۹ و ۳-۲۰ برای دو گروه از محققان نشان داده شده است. داده‌ها به روشنی رفتار دمایی کلی را که با افزایش دما، بهبود، افزایش می‌یابد بیان می‌کند. همانطور که در شکل‌های ۳-۲۱ و ۳-۲۲ نشان داده شده است، نتایج مشابه از دو مقدار آزمایشگاهی برای نانولوله‌های کربنی چند جداره^۱ در آب بدست آمده است.



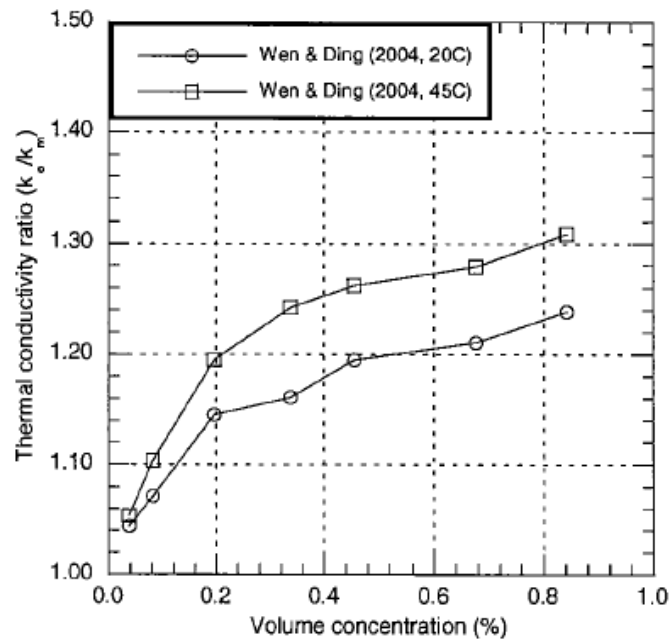
شکل ۳-۱۹: اثر دما برای CuO در آب [۳۸]

¹ Multi wall carbon Nanotube

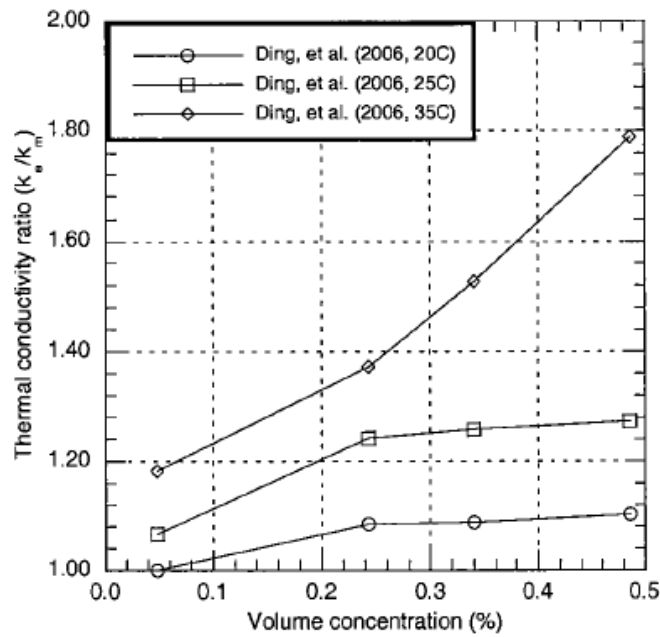


شکل ۳-۲۰: اثر دما برای CuO در آب [۳۸]

باید دقت شود که اگر رفتار برخی از داده‌ها با رفتار کلی دمایی همسان نیست به این معنی نیست که خود آزمایش کاملاً اشتباه باشد. رفتار دمایی متناقض بوسیله ماسودا و همکاران [۶] برای SiO₂ در آب گزارش شد، اما برای TiO₂ در آب نتایج با توجه به دما یکنواخت نبود و تناقض به گونه‌ای دیگر بود. به هر حال با ملاحظه همه‌ی نتایج درمی‌یابیم که اثبات کلی برای رفتار عمومی دمایی انجام شده است. این رفتار برای کاربردهای انتقال حرارت در صنایع حمل و نقل، که سیالات در دماهای در حال افزایش عمل می‌کنند مورد نیاز است.



شکل ۳-۲۱: اثر دما برای نانولوله‌های کربنی چندجداره در آب [۳۸]

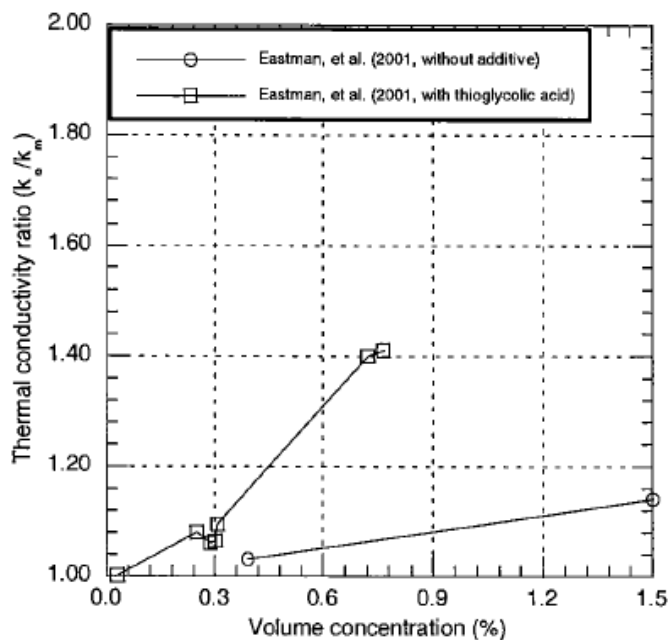


شکل ۳-۲۲: اثر دما برای نانولوله‌های کربنی چندجداره در آب [۳۸]

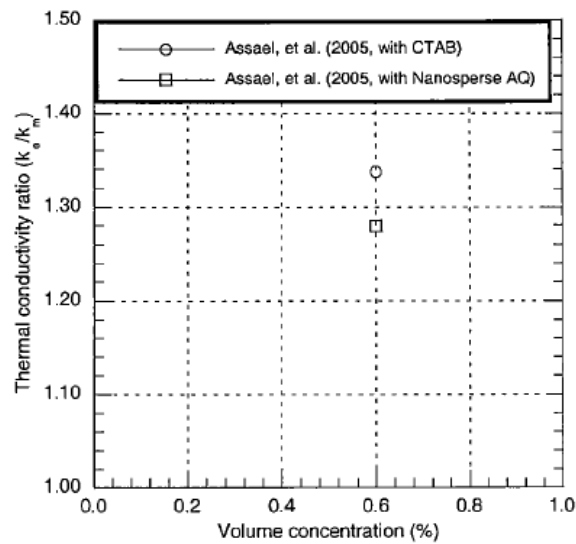
۳-۱-۷- اثر افزودنی‌ها

محققان از افزودنی‌هایی به سیالات استفاده می‌کنند تا تلاشی برای حفظ نانوذرات در محلول باشد و بوسیله آن از کلوخه‌شدن جلوگیری شود. نتایجی که از تاریخچه می‌توان فهمید این است که آزمایشات به

صورت پراکنده و در دامنه‌ای وسیع با توجه به نوع ماده افزودنی، غلظت و... آمده است. با این وجود بیشتر مطالعاتی که شامل مواد افزودنی است، افزایش در ضریب هدایت حرارتی را نشان می‌دهد. داده‌های دو گروه مطالعاتی در شکل‌های ۳-۲۳ و ۳-۲۴ برای نانوسیالات مختلف و افزودنی‌ها آمده است. در هر دو مورد، بهبود هدایت حرارتی با استفاده از افزودنی‌ها افزایش می‌یابد. در اینجا نیز زمینه برای تحقیقات آینده و بهبود ساخت وجود دارد. در حال حاضر، مطالعات اندکی راجع به این موضوع وجود دارد که آن را زمینه‌ای نو و بالقوه برای پیگیری می‌سازد.



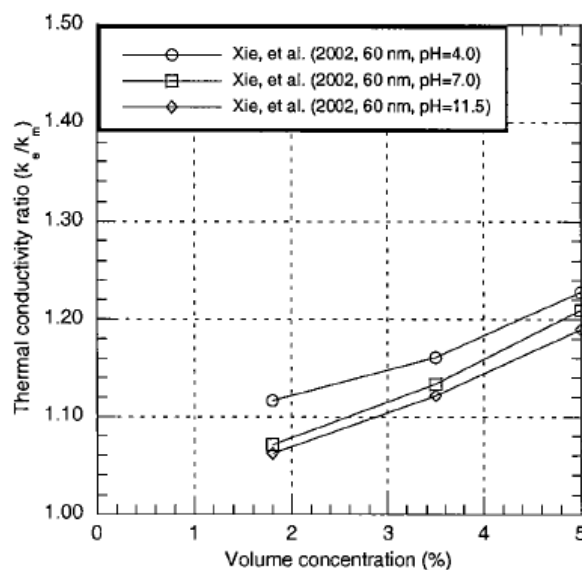
شکل ۳-۲۳: اثر افزودنی برای مس در اتیلن گلیکول [۳۸]



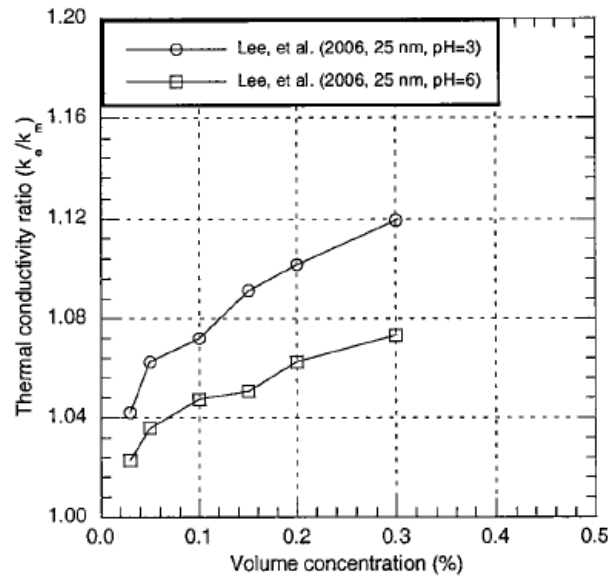
شکل ۳-۲۴: اثر افزودنی برای نانولوله‌های کربنی چندجداره در آب [۳۸]

۳-۱-۸ - اثر قدرت اسیدی (pH)

مطالعات اندکی راجع به اثر قدرت اسیدی سیال روی بهبود هدایت حرارتی نانوسیالات منتشر شده است. نتایج دو گروه، جداگانه در زیر ارائه شده است. نتایج شکل‌های ۳-۲۵ و ۳-۲۶ برای ذرات مختلف در آب رفتاری یکسان را نشان می‌دهند. با این حال در یافته‌هایی که قدرت اسیدی، بهبود هدایت حرارتی را افزایش می‌دهد، توضیحی داده نشد.



شکل ۳-۲۵: اثر قدرت اسیدی برای Al₂O₃ در آب [۳۸]



شکل ۳-۲۶: اثر قدرت اسیدی برای CuO در آب [۳۸]

۳-۲- مطالعات تحلیلی هدایت حرارتی

همانطور که از کارهای محققان متعدد مشهود است، هدایت حرارتی نانوسیالات به صورت تابعی از هر دو هدایت حرارتی سیال پایه و نانوذرات، درصد حجمی، مساحت سطحی و شکل نانوذرات معلق در سیال می‌باشد. در حال حاضر هیچ فرمول تئوریکی در تاریخچه‌ی پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات مشاهده نمی‌شود. مدل ماکسول [۵] یک مدل قدیمی موجود در هدایت حرارتی است که برای مخلوط‌های جامد-مایع با ذرات نسبتاً بزرگ پیشنهاد شد. بسیاری از مدل‌های پیشنهادی بعدی بر مبنای مدل ماکسول پایه-گذاری شده‌اند. هدایت حرارتی مؤثر، k_{eff} برابر است با:

$$k_{eff,Maxwell} = \frac{k_p + 2k_1 + 2(k_p - k_1)\phi}{k_p + 2k_1 - (k_p - k_1)\phi} k_1 \quad (1-3)$$

که k_p هدایت حرارتی ذره، k_1 هدایت حرارتی سیال و ϕ درصد حجمی ذره در محلول است. مدل ماکسول نشان می‌دهد که هدایت حرارتی مؤثر محلول‌ها وابسته به هدایت حرارتی ذره کروی، سیال مبنا و درصد حجمی ذرات جامد است.

برای ذرات غیر کروی، هدایت حرارتی نانوسیالات نه تنها به درصد حجمی ذرات، بلکه به شکل ذرات هم بستگی دارد [۳۹]. همیلتون و کراسر [۴] مدلی برای هدایت حرارتی مؤثر مخلوط‌های دوجزئی توسعه دادند. این مدل تابعی از هر دو هدایت ذره و سیال مبنا و نیز شکل ذرات است. هدایت حرارتی مخلوط-های دو جزئی با استفاده از این مدل، به صورت زیر می‌تواند تعیین شود:

$$k_{eff, Hamilton} = \frac{k_p + (n-1)k_1 - (n-1)(k_1 - k_p)\phi}{k_p + (n-1)k_1 + (k_1 - k_p)\phi} k_1 \quad (2-3)$$

که n ضریب شکل تجربی به صورت $n = 3/\psi$ می‌باشد و ψ کرویت است که به صورت نسبت مساحت سطح یک کره - که معدل حجمی ذره است - به مساحت سطح ذره تعریف می‌شود.

ژوان و لی [۴۰] از مدل همیلتون-کراسر برای رسیدن به یک برآورد تقریبی هدایت حرارتی نانوسیالات برای مقادیر مختلف ψ از ۰,۵ تا ۱,۰ استفاده کردند. داده‌ها نشان دادند که نتایج مدل برای $\psi = 0,7$ نزدیک به داده‌های تجربی آنها بود. لی و همکاران [۳۹] نشان دادند که نسبت‌های هدایت حرارتی برای $\psi = 1$ (ذرات کروی) که از این مدل حساب شد در تطابق خوبی با نتایج تجربی آنها از نانوسیال Al_2O_3 بود. هرچند این مدل برای پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیال CuO مناسب نبود.

وَنگ و همکاران [۴۱] مدلی برای پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات پیشنهاد کردند:

$$k_{eff, Wang} = \frac{(1-\phi) + 3\phi \int_0^\infty \frac{k_{cl}(r)n(r)}{k_{cl}(r) + 2k_1} dr}{(1-\phi) + 3\phi \int_0^\infty \frac{k_{cl}n(r)}{k_{cl}(r) + 2k_1} dr} k_1 \quad (3-3)$$

که $k_{cl}(r)$ هدایت حرارتی خوشه‌های ذره و $n(r)$ تابع توزیع شعاعی است. با در نظر گرفتن اثر اندازه و جذب سطحی نانوذره، مدل پیشنهادی با داده‌های تجربی برای ذرات ۵۰ نانومتر CuO معلق در آب دیونیزه شده با غلظت‌های کمتر از ۰,۲۵٪ حجمی مطابقت داشت.

ژیو [۱۷] مدلی برای پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات ارائه کرد. مدل پیشنهادی بر مبنای نظریه ماکسول و نظریه قطبیت متوسط و با فرض وجود یک پوسته‌ی سطحی میان نانوذرات و سیال استوار بود. نتایج این مدل با داده‌های تجربی چوی و همکاران [۹] برای نانوسیال روغن-نانولوله کربنی و با داده‌های ژی و همکاران [۱۶] برای نانوسیال آب-نانوذره Al_2O_3 مقایسه شد. پیش‌بینی‌ها در تطابق خوبی با داده‌های تجربی برای همان فرض ضخامت پوسته ۳ نانومتر بود، اما با هدایت حرارتی پوسته سطح مشترک تفاوت داشت. هرچند دلیل استفاده از مقادیر فرضی ضخامت و هدایت حرارتی پوسته سطح مشترک بیان نشد.

عبارتی تحلیلی برای محاسبه هدایت حرارتی مؤثر مخلوط‌های جامد-سیال بوسیله‌ی یو و چوی [۴۲] معرفی شد. آنها پیشنهاد کردند که یک مدل ساختاری از نانوسیالات ممکن است شامل یک توده سیال، نانوذرات جامد و نانولایه‌های شبه جامد شود. نانولایه شبه جامد مثل یک پل حرارتی میان یک نانوذره جامد و یک توده سیال عمل می‌کند [۴۲]. رابطه به صورت:

$$k_{eff, Yu} = \frac{k_p + 2k_1 + 2(k_p - k_1)(1 + \beta)^3 \phi}{k_p + 2k_1 - (k_p - k_1)(1 + \beta)^3 \phi} k_1 \quad (۴-۳)$$

که β نسبت ضخامت نانولایه به شعاع ذره اصلی و k_p هدایت حرارتی معادل ذره معادل است. در این مدل، پیش‌بینی برای مهمترین تأثیر است، هنگامی که نانوذرات قطری کمتر از ۱۰ نانومتر دارند. مدل جدید دیگری برای پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات توسط جانگ و چوی [۴۲] پیشنهاد شد که به این صورت است:

$$k_{eff, Jang} = k_1(1 - \phi) + k_p \phi + 3C \frac{d_1}{d_p} k_1 Re_{d_p}^2 Pr \phi \quad (۵-۳)$$

که Re_{d_p} عدد رینولدز است که به صورت $Re_{d_p} = (\bar{C}_{RM} d_p) / \nu$ تعریف می‌شود. C ثابت نسبی، \bar{C}_{RM} سرعت حرکت تصادفی نانوذرات، ν ویسکوزیته سینماتیکی سیال مبنا و Pr عدد پرانتل است. پیش‌بینی‌ها

با این مدل در تطابق خوبی با داده‌های تجربی لی و همکاران [۳۹] ایستمن و همکاران [۸] و داس و همکاران [۲۷] بود.

۳-۳- تحقیقات تجربی انتقال حرارت جابجایی

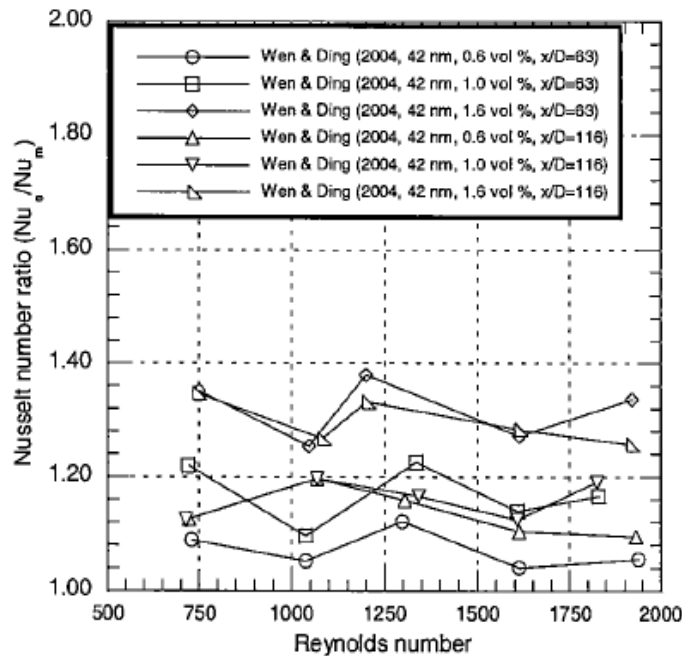
در حالی که افزایش در هدایت حرارتی مؤثر همانند تغییر در چگالی، گرمای مخصوص و لزجت علائم مهم بهبود رفتار انتقال حرارت نانوسیالات هستند، فایده اصلی نانوسیالات به عنوان سیالات انتقال حرارت از طریق ضریب انتقال حرارت جابجایی تعیین می‌شود. اگر نانوسیالات بتوانند ضریب انتقال حرارت تجهیزات و دیگر سیستم‌های حرارتی را بهبود ببخشند، می‌توانند کاهش اندازه چنین سیستم‌هایی را تسهیل کنند و منجر به افزایش راندمان انرژی و سوخت، کاهش آلودگی و بهبود ضریب اطمینان شوند. به این منظور اندازه‌گیری مستقیم عملکرد انتقال حرارت نانوسیالات تحت شرایط جریان نمونه و کاربردهای خاص ضروری است. تاکنون تحقیق گزارش‌شده‌ی کمی در این زمینه وجود دارد. خلاصه‌ای از متن کار در ادامه می‌آید.

در اینجا تحقیقات انتقال حرارت جابجایی نانوسیال را به شرایط سیال جریان آرام، جریان درهم و جوشش تقسیم کرده‌ایم. تعداد مطالعات در این زمینه‌ها اندک و مطالعات گزارش‌شده در شرایط جوشش بسیار کم است.

۳-۳-۱- افزایش انتقال حرارت در جریان آرام

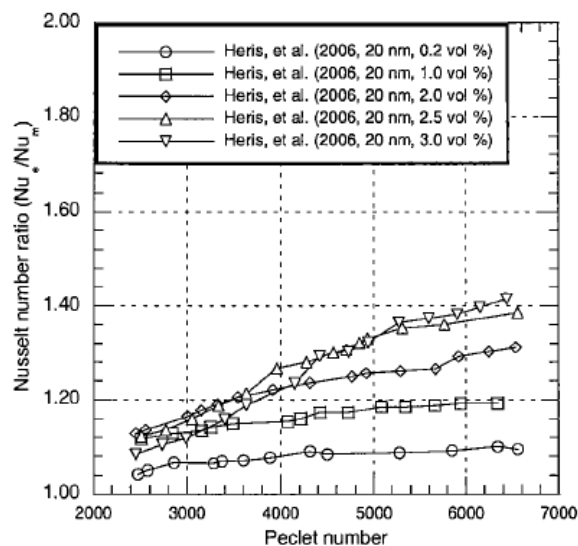
در شکل ۳-۲۷ نتایج برای Al_2O_3 در آب تحت جریان آرام تا انتقال به درهم نشان داده شده است. همانگونه که قبلاً بحث شد بهبود انتقال حرارت، همانند هدایت حرارتی با افزایش درصد حجمی ذره افزایش می‌یابد. در شکل ۳-۲۷ بهبود انتقال حرارت به اندازه ۴۰٪ است، در حالی که بهبود هدایت حرارتی کمتر از ۱۵٪ بود. سبقت افزایش انتقال حرارت بر افزایش هدایت حرارتی نمونه‌ای از نتایج گزارش شده توسط برخی محققان است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که حضور نانوذرات در جریان، بر انتقال حرارت

تأثیری فراتر از اثری که روی افزایش هدایت حرارتی انتظار می‌رفت دارد. برخی محققان این افزایش اضافی را به واکنش‌های ذره-سیال نسبت دادند. نتایج شکل ۳-۲۷ اثر افزایش انتقال حرارت به علت عدد رینولدز در رژیم جریان آرام در اعداد رینولدز بالا را نشان نمی‌دهد.



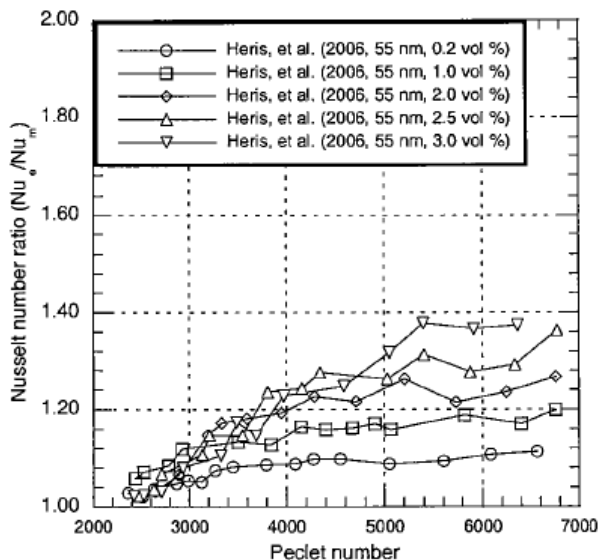
شکل ۳-۲۷: انتقال حرارت جریان آرام Al_2O_3 در آب [۳۸]

آزمایشات مشابه شکل ۳-۲۷ برای آلومینا در آب در شکل ۳-۲۸ از گروهی متفاوت نشان داده شده است. بهبود انتقال حرارت میان دو گروه (شکل‌های ۳-۲۷ و ۳-۲۸) را می‌توان مقایسه نمود، به گونه‌ای که در غلظت ذره کمتر از ۰.۲٪، افزایش حتی بیشتر از شکل ۳-۲۸ که درصد حجمی ذره در آن بیش از ۰.۲٪ است مشاهده می‌شود. این رفتار مشابه افزایش هدایت حرارتی با افزایش درصد حجمی ذره است، و دوباره افزایش انتقال حرارت بزرگتر از افزایش هدایت حرارتی شده است. همچنین نتایج برای درصد حجمی کمتر ذرات در شکل ۳-۲۸ نشان داده شده است که در همان دامنه در شکل ۳-۲۷ با نتایج شکل مطابقت دارد. همچنین در درصد حجمی بیشتر از ۰.۲٪، افزایش در عدد رینولدز در شکل ۳-۲۸، اثر مثبت روی افزایش انتقال حرارت دارد.

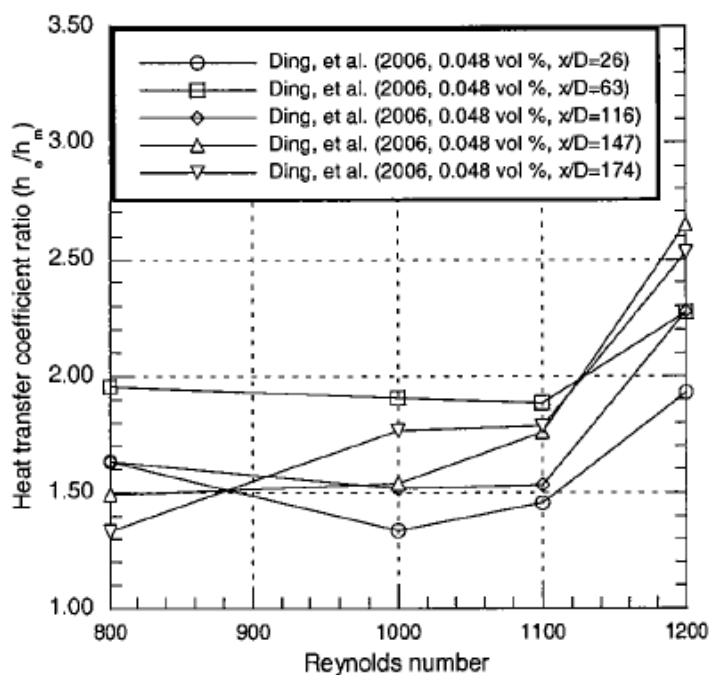


شکل ۳-۲۸: انتقال حرارت جریان آرام Al_2O_3 در آب [۳۸]

شکل‌های ۳-۲۸ و ۳-۲۹ افزایش انتقال حرارت را برای جریان آرام با انواع مختلف ذرات (CuO و Al_2O_3) و اندازه‌های ۲۰ و ۵۵ نانومتر نشان می‌دهد. غلظت‌های حجمی ذره و نسبت افزایش در همان دامنه‌ی دو شکل هستند. این نتایج بیان می‌کنند که اندازه ذره و نوع اکسید تأثیر کمی روی افزایش انتقال حرارت دارند، به گونه‌ای که به اندازه ۴۰٪ است. اطلاعات بیشتری از دیگر محققان برای تکمیل این نتایج نیاز است.



شکل ۳-۲۹: انتقال حرارت جریان آرام CuO در آب [۳۸]

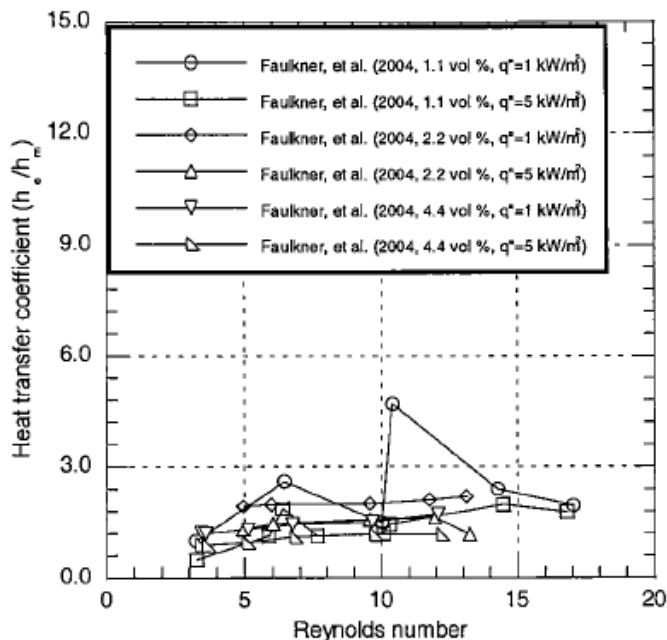


شکل ۳-۳۰: انتقال حرارت جریان آرام نانولوله کربنی چندجداره در آب [۳۸]

همچنانکه برای افزایش هدایت حرارتی قبلاً بحث شد، نتایج انتقال حرارت نانوسیال برای نانولوله‌های کربنی چند جداره در آب شکل ۳-۳۰ افزایش انتقال حرارت بسیار بالایی را نشان می‌دهد. در این دامنه از عدد رینولدز جریان متوسط، انتقال حرارت به سرعت در بالاترین مقادیر عدد رینولدز افزایش می‌یابد. همچنین در شکل ۳-۳۰ افزایش انتقال حرارت در پیشروی جریان پایین دست به صورت افزایش فاصله محوری به قطر لوله (x/D) نشان داده شده است.

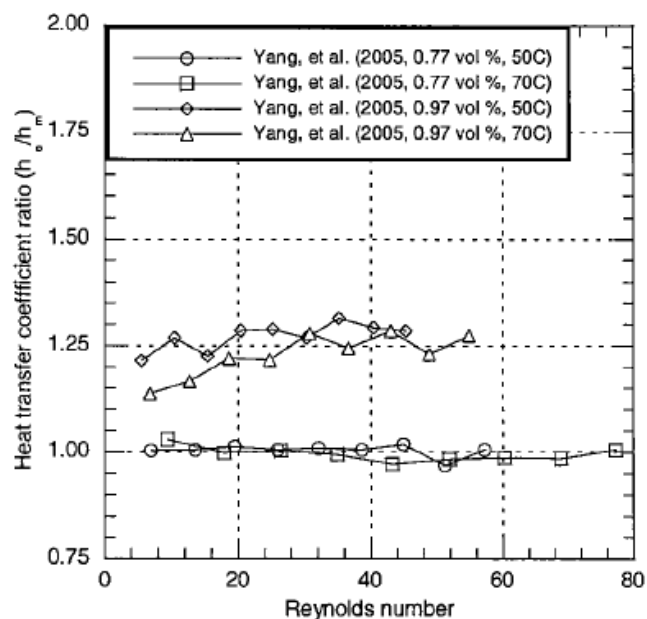
نتایج دیگر گروه‌های تجربی برای نانولوله‌های کربنی چند جداره در آب با ماده افزودنی NaDDBS در شکل ۳-۳۱ نشان داده شده است. به استثناء یک داده در شکل ۳-۳۱، افزایش انتقال حرارت تا ۲,۵ برابر، در توافق با نتایج شکل ۳-۳۰ است. هرچند برخی تفاوت‌های قابل توجه میان پارامترهای آزمایش در دو شکل وجود دارد. آزمایشات شکل ۳-۳۱ در درصد حجمی بسیار بالای نانولوله و در رینولدز بسیار کم انجام شد. در حات کلی گرچه سطح عمومی افزایش انتقال حرارت با نتایج شکل ۳-۳۰ مطابقت دارد، داده‌های شکل ۳-۳۱ رفتاری مخالف را برای افزایش انتقال حرارت به عنوان تابعی از درصد حجمی ذره

در مقایسه با دیگر آزمایشات نشان می‌دهد. از این نتایج دلایل بیشتری از رفتارها و مقادیری که در شرایط جریان خیلی کم مورد نیاز است ظاهر می‌شود.

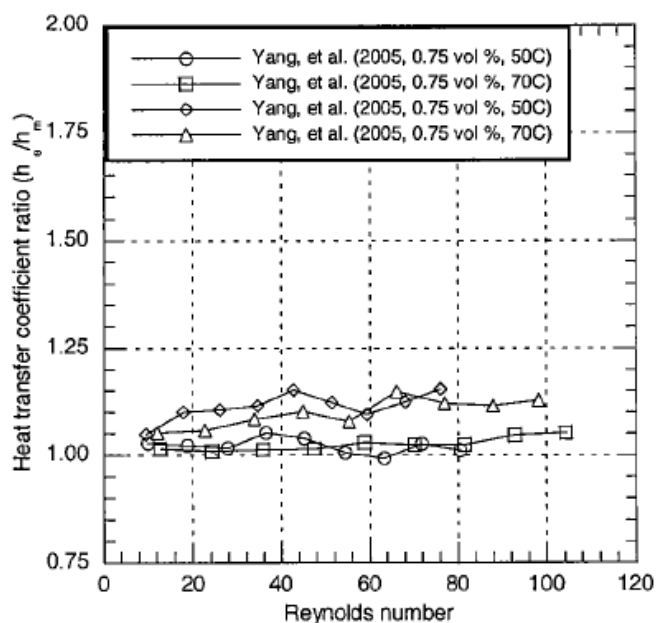


شکل ۳-۳۱: انتقال حرارت جریان آرام نانولوله کربنی چندجداره در آب با NaDDBS [۳۸]

نتایج اندکی راجع به افزایش انتقال حرارت نانوسیال برای دیگر سیالات مینا در شرایط جریان آرام در دسترس است. نتایج شکل ۳-۳۲ برای ذرات گرافیت در جریان انتقالی در حال حرکت، هیچ افزایشی در درصدهای حجمی ذره کم نشان نمی‌دهند، اما تا ۲۵٪ افزایش در درصدهای حجمی نزدیک به ۱٪ را نشان می‌دهند. در سنتز مخلوط‌های روغنی رفتارها بیشتر شبیه شکل ۳-۳۳ هستند که نانوسیالات از منابع مختلف ذرات گرافیتی ساخته می‌شوند.



شکل ۳-۳۲: انتقال حرارت جریان آرام گرافیت در سیال [۳۸]

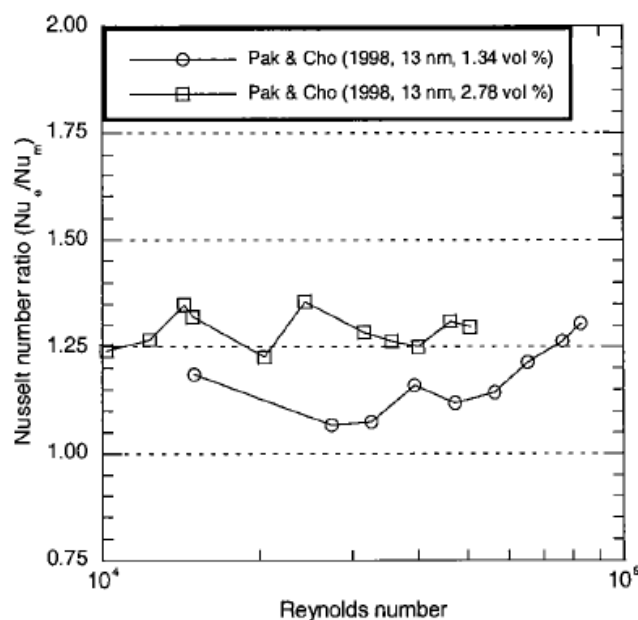


شکل ۳-۳۳: انتقال حرارت جریان آرام گرافیت در مخلوطی از روغن [۳۸]

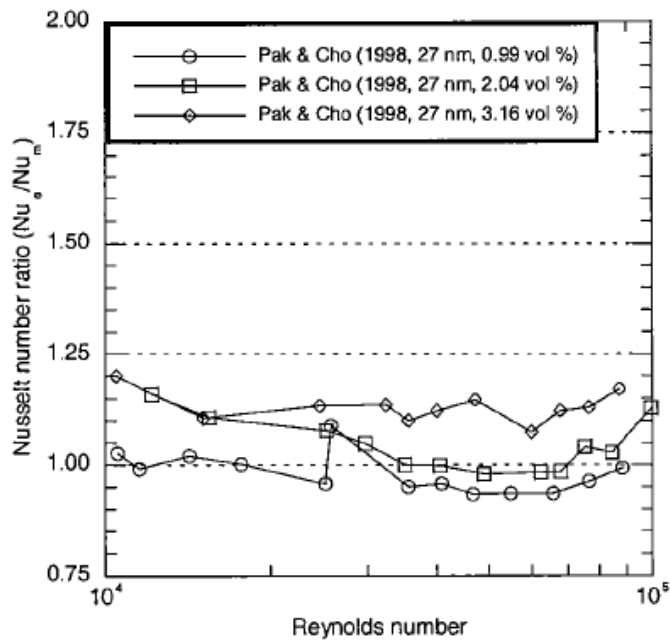
نتایج شکل‌های ۳-۳۲ و ۳-۳۳ رفتار دمایی ضعیفی را نشان می‌دهند. افزایش انتقال حرارت با افزایش دما کاهش می‌یابد (رفتاری که بر خلاف هدایت حرارتی است). هرچند، دامنه دمایی گزارش شده کوچک و وابستگی دمایی ضعیف است. بنابراین اطلاعات آزمایشگاهی بیشتری برای تعریف این رفتار نیاز است.

۳-۲-۳- افزایش انتقال حرارت در جریان درهم

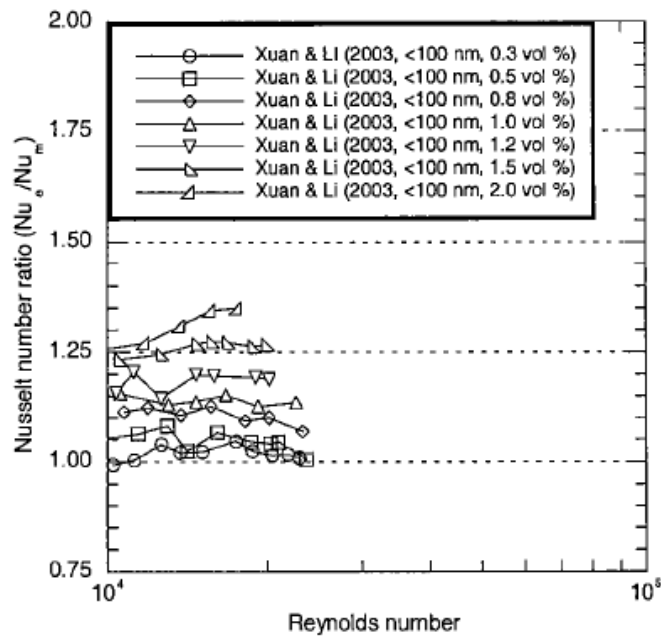
نتایج انتقال حرارت برای جریان درهم نانوسیالات از دو گروه در دسترس است که مورد بررسی قرار می-گیرد. نتایج افزایش انتقال حرارت در شکل‌های ۳-۳۴، ۳-۳۵ و ۳-۳۶ برای نانوسیالات پایه آب شامل ذرات TiO_2 ، Al_2O_3 و Cu نشان داده است. می‌بینیم که رفتار در هر سه شکل مشابه است. اثر ناچیزی از عدد رینولدز روی بهبود انتقال حرارت وجود دارد، و این بهبود با افزایش درصد حجمی ذره افزایش می‌یابد. افزایش انتقال حرارت برای ذرات Cu بیشترین است، سپس ذرات Al_2O_3 و پس از آن ذرات TiO_2 که همگی در درصد حجمی یکسان قرار دارند. از نقطه نظر هدایت حرارتی، شگفت‌آور نیست که نانوسیال مس در آب بیشترین هدایت حرارتی را نشان دهد. با این وجود افزایش هدایت حرارتی برای آلومینا و تیتانیا در آب قابل مقایسه هستند و تفاوت‌ها در افزایش انتقال حرارت را در شکل ۳-۳۴ و ۳-۳۵ منعکس نمی‌کند. همانطور که در بالا ذکر شد، اطلاعات پراکنده هستند و تأیید بیشتر محققان برای تثبیت رفتار افزایشی انتقال حرارت در جریان درهم به صورت تابعی از نوع ذرات مورد نیاز است.



شکل ۳-۳۴: انتقال حرارت جریان درهم Al_2O_3 در آب [۳۸]



شکل ۳-۳۵: انتقال حرارت جریان درهم TiO₂ در آب [۳۸]



شکل ۳-۳۶: انتقال حرارت جریان درهم مس در آب [۳۸]

برای جریان مغشوش، برخی محققان از رابطه‌ای محاسباتی برای مقایسه بهبود انتقال حرارت با بهبود هدایت حرارتی استفاده کرده‌اند. مثلاً استفاده از رابطه‌ی انتقال حرارت قدیمی برای جریان درهم، مثل رابطه دیتوس-بولتر، می‌تواند عدد ناسلت سیال پایه را به گونه‌ای قابل قبول پیش‌بینی کند. بنابراین

استفاده از هدایت حرارتی افزایش یافته‌ی نانوسیالات در همان رابطه دیتوس-بولتر به صورت یک شبیه-سازی تقریبی نانوسیال، می‌تواند یک عدد ناسلت برای نانوسیال پیش‌بینی کند. همانطور که قبلاً گفته شد، بعضی محققان بهبود انتقال حرارت بالاتر از بهبود هدایت حرارتی را به واکنش‌های ذره-سیال نسبت داده‌اند.

قابل ذکر است که نتایج برای هر دو جریان درهم و آرام برای تعیین رفتاری برای افزایش انتقال حرارت، تنها به صورت تابعی از اندازه ذره ناقص و ناکافی است. قبلاً دیده شد که بهبود هدایت حرارتی با اندازه ذره افزایش می‌یابد، اما آزمایشات بیشتری برای تثبیت چنین رفتاری با توجه به افزایش انتقال حرارت مورد نیاز است.

۳-۴- انتقال حرارت جوش در نانوسیالات

همانطور که قبلاً ذکر شد، افزایش هدایت حرارتی نانوسیالات آنها را برای کاربردهای خنک‌کاری مستعد می‌کند. استفاده از نانوسیالات در کاربردهای شار حرارتی بالا، فرایند انتقال حرارت جریان جوشش را به دنبال دارد. همانگونه که نانوذرات هدایت حرارتی سیالات متداول را افزایش می‌دهد، محققان انتظار دارند که نانوذرات پتانسیل قابل قبولی برای افزایش انتقال حرارت جوشش داشته باشند. این انگیزه چند مطالعه تجربی روی خصوصیات جوشش استخری نانوسیالات به بار آورد.

در کار داس و همکاران [۲۷] [۲۸] آزمایشات برای برآورد جوشش استخری نانوسیالات با غلظت ذرات ۱، ۲ و ۴٪ در آب انجام شد. اثرات غلظت ذره، قطر هیتر و زبری سطح هیتر روی مشخصه‌های جوشش نانوسیالات مطالعه شد. نتایج ارائه شده با انتظارات مغایر بود؛ انتظار می‌رفت طی جوشش استخری، نانوسیالات مشخصه‌های انتقال حرارت را افزایش دهند. اما منحنی‌های جوشش نانوسیالات نشان داد که عملکرد جوشش آب با افزودن نانوذرات رو به زوال می‌رود، چون منحنی‌های جوشش به سمت راست

جابجا شدند. شیفت منحنی‌ها، وابسته به غلظت ذرات بودند و بستگی به زبری لوله داشتند و زوال عملکرد انتقال حرارت برای سطوح صافتر بیشتر بود.

از کارهای داس و همکاران [۲۷] [۲۸]، می‌توان فهمید که نانوذرات مشخصه‌های جوشش آب در ناحیه جوشش هسته‌ای را پایین‌تر آوردند. اما نکته قابل توجه این است که آزمایشاتشان به محدوده‌ی شار حرارتی بحرانی نرسیده بود. یو و همکاران [۳۵] تحقیقی تجربی برای یافتن منحنی جوشش و شار حرارتی بحرانی در جوشش استخری از یک هیتر مسی مسطح مربعی صاف معلق در نانوسیال آب- Al_2O_3 استفاده و بررسی کردند. درصد حجمی نانوذرات مختلف Al_2O_3 در دامنه بین ۰,۰۰۱ و ۰,۰۵ تست و با آب خالص مقایسه شد. در جریان جوشش هسته‌ای با استفاده از منحنی‌های جوشش نانوسیالات، افزایش انتقال حرارت یا کاهش مشاهده نشد. اما شار حرارتی بحرانی نانوسیالات افزایش چشمگیری داشت. هنگامی که درصد حجمی ذرات بیشتر از ۰,۰۰۵ شد، افزایش شار حرارتی بحرانی به حدود ۲۰۰٪ بیشتر از آب خالص رسید. هرچند در این آزمایش، اندازه نانوذرات مشخص نشد. آزمایش دیگری که افزایش شار حرارتی بحرانی نانوسیالات را تأیید می‌کند، بوسیله واسالو و همکاران [۳۶] انجام شد که مشخصه‌های جوشش نانوسیالات آب-سیلیکا را با غلظت ۰,۵٪ مطالعه کردند. همان آزمایشات برای هر دو محلول نانو و میکرو در همان غلظت آب انجام شد. از داده‌های منحنی‌های جوشش، هیچ افزایش انتقال حرارتی از نانوسیالات در رژیم جوشش استخری مشاهده نشد، اما شار حرارتی بحرانی افزایش محسوسی برای هر دو ذرات نانو و میکرو داشت. افزودن نانوذرات منجر به افزایش شار حرارتی ماکزیمم در حدود سه برابر آب خالص و تقریباً دو برابر آب با میکرو ذرات شد.

ژو [۳۶] به طور تجربی اثرات پارامترهای صوتی، غلظت نانوسیال و خنک‌کاری سیال روی خصوصیات انتقال حرارت جوشش یک نانوسیال مس-استون را بررسی کرد. نتایج نشان داد که حضور نانوذرات مس تأثیری روی وابستگی انتقال حرارت حفره‌های صوتی و خنک‌کاری سیال نداشت. بدون یک میدان صوتی،

انتقال حرارت جوشش نانوسیالات کاهش یافت. در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی داس و همکاران [۲۷]

[۲۸]، در این مطالعه انتقال حرارت جوشش استخری با افزایش غلظت نانوسیال کاهش نیافت. با یک میدان صوتی تولیدی برای نانوسیال، انتقال حرارت جوشش بهبود یافت و پسماند جوشش ناپدید شد. این بهبود با افزایش خنک‌کاری سیال، شدت منبع صوت و غلظت نانوذره آشکار شد.

فصل چهارم

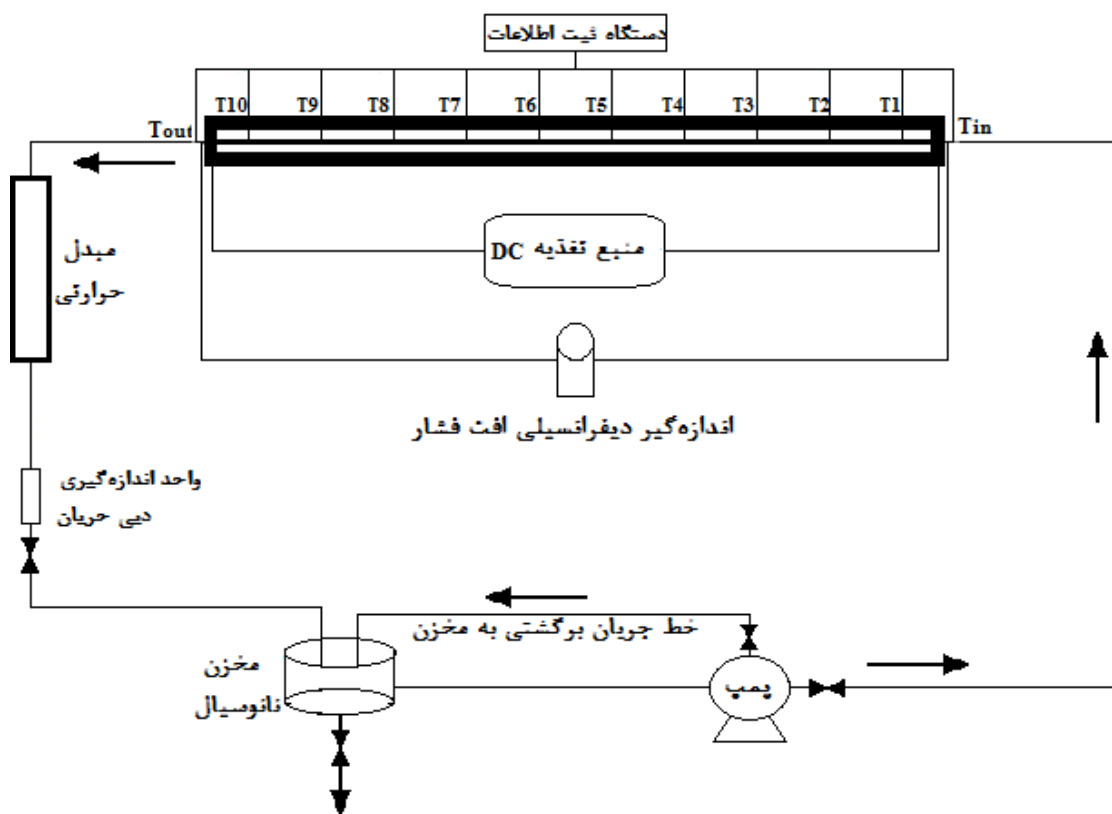
طراحی و ساخت سیستم

آزمایشگاهی

همانطور که در مقدمه بیان شد هدف اصلی این پروژه بررسی قابلیت‌های انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات است. به منظور انجام این کار، سیستم آزمایشگاهی انتقال حرارت جابجایی و افت فشار طراحی و ساخته شده است. طراحی، کالیبراسیون قطعات و بالاخره تست آب برای اطمینان از دستگاه آزمایشگاهی نانوسیال در این بخش بیان خواهد شد.

۱-۴- طراحی و ساخت

برای دستیابی به اهداف این تحقیق و انجام آزمایش بر روی نانوسیالات، سیستم آزمایشگاهی مطابق شکل ۱-۴ ساخته شده است. این سیستم آزمایش شامل یک مدار جریان، بخش‌های مختلفی همچون واحدهای اندازه‌گیری نرخ جریان، فشار و دما، بخش‌های سرمایش و گرمایش و سیستم کنترل جریان می‌باشد.



شکل ۱-۴: شماتیک سیستم آزمایشگاهی

بخش آزمایش متشکل از لوله‌ای از جنس مس، با قطر داخلی ۵ میلی متر، ضخامت ۰/۵ میلی متر و طول ۲ متر می‌باشد. آزمایشات در حالت شار حرارتی یکنواخت انجام شده است. به این منظور جهت ایجاد شار حرارتی یکنواخت در جداره به عنوان شرایط مرزی، از المنت حرارتی و منبع تغذیه الکتریکی استفاده شده است. مقدار ژول گرمای تولید شده برابر است با I^2R که I شدت جریان الکتریکی و R مقاومت الکتریکی می‌باشد. جهت کاهش اتلاف حرارت به بیرون، بخش آزمایش به کمک لایه‌ای به ضخامت ۵۰ میلی متر از جنس فویل پشم شیشه عایق بندی شده است.

جهت اندازه‌گیری دمای دیواره از ۱۰ عدد ترموکوپل نوع RTD PT100 استفاده شده که در فواصل مساوی ۲۰ سانتی متر از یکدیگر روی لوله داخلی توسط چسب حرارتی سیلیکونی نصب شده است. همچنین دو عدد ترموکوپل RTD PT100 نیز جهت اندازه‌گیری دمای بالک سیال در قسمت‌های ورودی و خروجی بخش آزمایش درون سیال معلق شده است. در نهایت انتخاب سیستم اکتساب اطلاعات^۱ مهم و ضروری است.

به منظور تعیین افت فشار جریان در بخش آزمایش از یک دستگاه اندازه‌گیر دیفرانسیلی افت فشار^۲ شده است، بطوری که می‌توان افت فشار را در طول بخش آزمایش و برای شدت جریان‌های مختلف اندازه‌گیری کرد. دستگاه اندازه‌گیر دیفرانسیلی افت فشار با دقت ۰/۱٪ همراه با شیر سه راهه نصب شده است، که به کمک شلنگ شفاف پلاستیکی به قطر داخلی ۱۰ میلی متر و توسط سه راهه‌های استاندارد به بخش‌های ورودی و خروجی متصل می‌شود. بنابراین افت فشار سیال از ورود تا خروج مشخص می‌شود. سیال خروجی از بخش آزمایش با عبور از یک لوله مسی که داخل جریان آب سرد قرار گرفته، به دمای تعادل می‌رسد.

¹ Data Acquisition

² Differential Pressure Transmitter

با توجه اینکه آزمایشات ما در هر دو رژیم جریان آرام و درهم سیال انجام می شود، لذا از یک عدد پمپ گریز از مرکز با قدرت ۱ اسب بخار استفاده شده است.

از یک مخزن شفاف به عنوان مخزن اصلی ذخیره سیال و همچنین جهت کنترل نرخ جریان سیال از یک خط برگشت به مخزن اصلی به همراه یک شیر استفاده شده است. برای تعیین شدت جریان از روش اندازه گیری زمان پر و خالی شدن ظرف شیشه‌ای با حجم ۲۵۰ سانتی متر مکعب استفاده شده است. لذا جهت اندازه گیری دبی از یک ظرف شیشه‌ای مدرج به حجم ۲۵۰CC که مجهز به شیر تخلیه است و یک زمان‌سنج با دقت اندازه گیری ۰/۰۱ استفاده می‌شود.

برای اندازه گیری دما، انواع مختلفی از حسگرها وجود دارد. برخی از این حسگرها عبارتند از: ترموکوپل‌ها، RTDها و ترمیستورها. این حسگرها به دلیل محاسن و کارایی زیاد بطور گسترده بکار برده می‌شوند. نسل جدید حسگرها مانند حسگرهای مدار مجتمع و ابزارهای سنجش دما به روش تابش، تنها برای تعداد محدودی از کاربردها، شناخته شده است و مورد استفاده قرار می‌گیرد. انتخاب نوع حسگر بستگی به میزان دقت، محدوده دمایی، سرعت پاسخ، اتصال حرارتی، شرایط محیط (از نظر شیمیایی، الکتریکی و یا فیزیکی بودن) و همچنین قیمت دارد.

۴-۲- کالیبراسیون

گام بعدی، کالیبراسیون سنسورهای مختلف در سیستم انتقال حرارت جابجایی است. ترموکوپل‌ها برای صحت آزمایش باید کالیبره شوند، اما بقیه دستگاه‌ها توسط شرکت‌های سازنده کالیبره شده‌اند. جهت کالیبره کردن ترموکوپل‌ها از ظرف آب صفر درجه و ظرف آب صد درجه به همراه ترمومتر شیشه‌ای مدرج استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که داده‌های ترموکوپل نوع RTD PT100 در بدبینانه‌ترین حالت با یک درجه سانتی گراد اختلاف با نتایج ترمومتر شیشه‌ای برابری می‌کند.

۴-۳- نانوسیالات در آزمایشات ما

بهبود خواص حرارتی نانوسیالات احتیاج به انتخاب روش تهیه مناسب این سوسپانسیون‌ها دارد، تا از ته-نشینی و ناپایداری آنها جلوگیری به عمل آید. متناسب با کاربرد، انواع بسیاری از نانوسیالات از جمله نانوسیالاتی از اکسید فلزات، نیتريت‌ها، کاربرد فلزات و غیرفلزات با یا بدون استفاده از سورفکتانت در سیالاتی مانند آب، اتیلن گلیکول، استون و روغن به وجود آمده است. همانگونه که قبلاً گفته شد دو روش اصلی در تهیه نانوسیالات وجود دارد که عبارتند از روش یک مرحله‌ای و روش دو مرحله‌ای. در آزمایشات ما برای تهیه نانو سیالات مورد نیاز از روش دو مرحله‌ای استفاده شده است.

در طی این آزمایشات، نانوسیال آب-آلومینا و آب-تیتانیا مورد مطالعه قرار گرفته است. ابعاد نانوذرات آلومینای مورد استفاده ۴۰ و تیتانیا ۱۵ نانومتر می‌باشد و هر دو، کروی شکل هستند که داخل آب پراکنده شده‌اند. با توجه به اینکه خواص حرارتی و فیزیکی یک محلول، بستگی زیادی به فرایند و کیفیت پراکنده‌سازی ذرات جامد در داخل مایع دارد، لذا به منظور عدم تغییر خواص سیستم از هیچ عامل پایدار ساز یا پراکنده‌سازی استفاده نشده است و فقط از سیستم همزن آلتراسونیک به منظور پراکنده‌سازی مناسب ذرات در داخل مایع استفاده گردیده است.

در طی این آزمایشات، غلظت‌های حجمی ۱/، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ درصدی ذرات آلومینا و تیتانیا مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور تهیه سوسپانسیون ابتدا وزن مناسبی از پودر نانو از روی دانستیه واقعی که توسط شرکت تولید کننده نانو ذره ارائه شده، تعیین و با آب مقطر مخلوط شده و سپس جهت ایجاد پراکنده‌گی، شکستن خوشه ذرات و ایجاد یک سوسپانسیون یکنواخت این مخلوط را در سیستم همزن آلتراسونیک به مدت دو الی سه ساعت قرار داده می‌شود. بعد از این مدت هیچ گونه ته‌نشینی برای سوسپانسیون‌های حاوی ذرات آلومینا و تیتانیا در مدت یک هفته مشاهده نشده است. نسبت حجمی و دانستیه نانوذرات در سوسپانسیون به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varphi = \frac{v_s}{v_t} \quad (1-4)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{v_s} \quad (2-4)$$

پس جرم لازم نانوذرات برای معینی از نانوسیال به کمک فرمول زیر تعیین می‌شود:

$$m_s = v_t \varphi \rho_s \quad (3-4)$$

۴-۴- روش انجام آزمایش

در گام اول و قبل از شروع به آزمایش می‌بایست المنت حرارتی را روشن کرد تا شار حرارتی یکنواخت در سرتاسر لوله برقرار شود. مرحله دوم ریختن نانوسیال مربوطه در مخزن ذخیره و روشن کردن پمپ است تا جریان نانوسیال در خط لوله برقرار گردد. برای شروع آزمایش در هر مرحله می‌بایست ابتدا نرخ جریان سیال را تعیین کنیم تا سرعت جریان و به دنبال آن عدد رینولدز مشخص شود. به علاوه در هر لحظه می‌توان مقدار افت فشار دو سر لوله را از نمایشگری که بر روی DP نصب شده خواند و یادداشت نمود. در هر شدت جریان بایستی ۵ الی ۱۵ دقیقه به سیستم اجازه کار دهیم تا سیستم به حالت پایدار برسد، بطوریکه دمای سیال ورودی به بخش آزمایش دچار تغییر نشود و همواره سیال با یک دما وارد بخش آزمایش گردد. با رسیدن سیستم به حالت پایا می‌توانیم دماهای ورودی و خروجی سیال به بخش آزمایش را از روی نمایشگرهای ترموکوپل‌های RTD PT100 بخوانیم. همچنین دمای بدنه را با اتصال ترموکوپل‌ها به نمایشگرهای دما می‌خوانیم. حال با در دست داشتن اطاعات فوق می‌توان ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت این جریان سیال را مشخص کرد.

۴-۵- تست آب

پس از تکمیل ساخت سیستم و کالیبراسیون حلقه جریان، تست کاربردی برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت و افت فشار لزجی آغاز می‌شود. تست اولیه با آب مقطر انجام می‌شود تا عملکرد و خواص آن با

نتایج علمی منتشر شده از آب مطابقت داده شود. تست‌های اولیه با دبی‌ها و دماهای ورودی مختلف انجام شده است. دماهای ورودی بین ۲۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد متغیر بود تا دمای جداره از نقطه‌ی جوش بیشتر نشود. همه‌ی تست‌ها در فشار اتمسفر انجام شده‌اند. این آزمایشات دستگاه را برای جریان‌های آرام و درهم برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک تأیید کرد.

۴-۵-۱- تست ضریب انتقال حرارت آب

گام‌های زیر در محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرند:
توان: توان به طور مستقیم از بخش آزمایش اندازه گرفته می‌شود. با فرض اینکه تلفات وجود ندارد $Q = IV$ (جریان I و اختلاف ولتاژ V) و شار حرارتی روی جداره داخلی لوله هم:

$$q'' = \frac{Q}{\pi D_{in} L} \quad (۴-۴)$$

فرض تلفات حرارتی از بالانس انرژی و افزایش دمای بالک در مرحله بعدی منظور شده است.

دمای جداره و بالک: می‌دانیم که چنین رابطه‌ای برای دبی جریان برقرار است: $\dot{m} = \rho VA$ دمای بالک ورودی را هم که اندازه گرفته‌ایم. بنابراین دمای بالک محلی با استفاده از بقاء انرژی برابر است با:

$$T_b(x) = \frac{Q(x)}{\dot{m} c_p} + T_{b,in} \quad (۵-۴)$$

برای اطمینان از صحت آن، این مقدار با دمای بالک خروجی مقایسه می‌شود. تمام آزمایشات نشان دادند که این خطا برای شارهای حرارتی کمتر از ۰.۵٪ است. بنابراین افت حرارت تأثیری در نتایج نخواهند گذاشت. در روابط بالا، D_{in} قطر داخلی لوله، V سرعت متوسط، ρ چگالی، c_p ظرفیت حرارتی مخصوص، Re عدد رینولدز و Pr عدد پرانتل است. A نیز مساحت مقطع داخلی لوله می‌باشد که برابر $\pi D^2/4$ می‌باشد.

ترموکوپل‌ها، دمای سطح خارجی جداره را اندازه می‌گیرند. اما با توجه به اینکه هدایت حرارتی مس بسیار بالاست و ضخامت جداره لوله بسیار اندک، می‌توان دماهای داخلی و خارجی را برابر فرض نمود.

ضریب انتقال حرارت: ضریب انتقال حرارت محلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$h_x = \frac{q''}{(T_{w,i} - T_{b,x})} \quad (6-4)$$

که همگی مقادیر در بالا تعریف شده‌اند. در نهایت بوسیله‌ی ضریب انتقال حرارت می‌توان عدد ناسلت جریان را از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$Nu(x) = h(x)D / k_{nf} \quad (7-4)$$

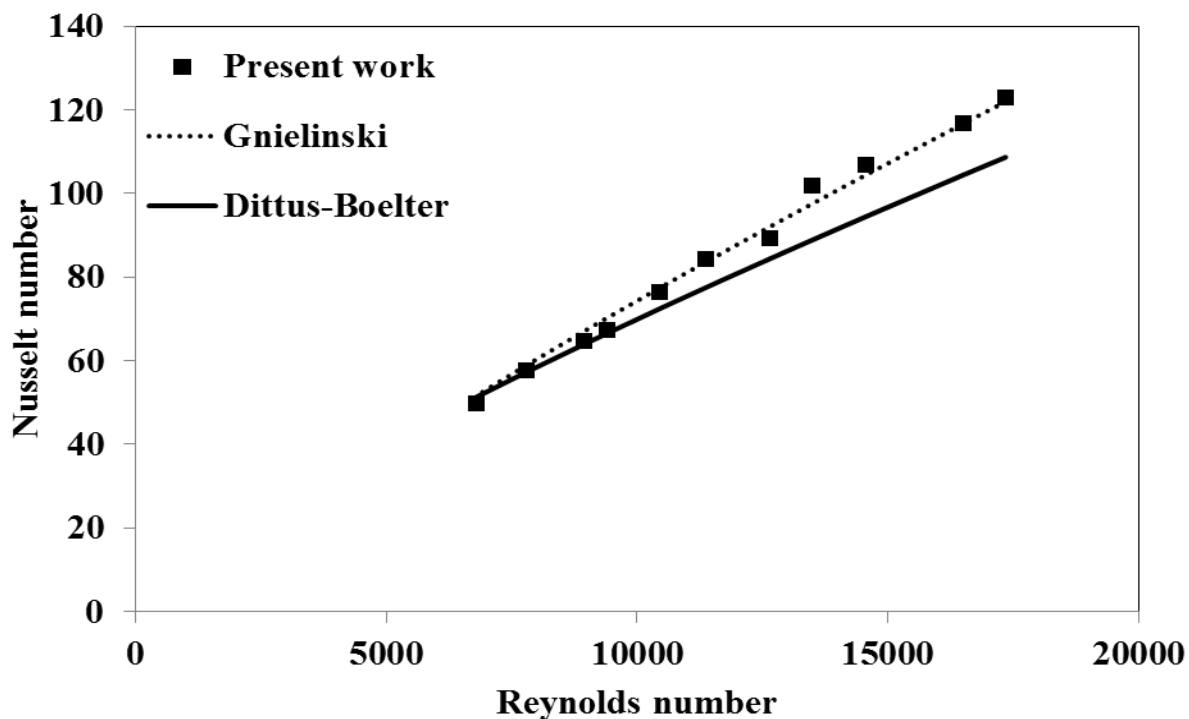
که k_{nf} هدایت حرارتی سیال بالک می‌باشد. به علاوه می‌توان این مقدار را با نتایج پیش‌بینی شده حاصل از معادلات گنیلینسکی [۴۴] و دیتوس-بولتر [۴۵] برای جریان درهم و از معادله شاه [۴۵] برای جریان آرام مقایسه نمود تا صحت نتایج بررسی شود. این معادلات به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Nu(x) = \frac{f/8(Re-1000)Pr}{1+12.7\sqrt{\frac{f}{8}}(Pr^{1/4}-1)} \left[1 + \left(\frac{d}{L}\right)^{2/3}\right] \text{ for } f = \frac{1}{(1.82 \log_{10} Re - 1.64)^2}; \quad (8-4)$$

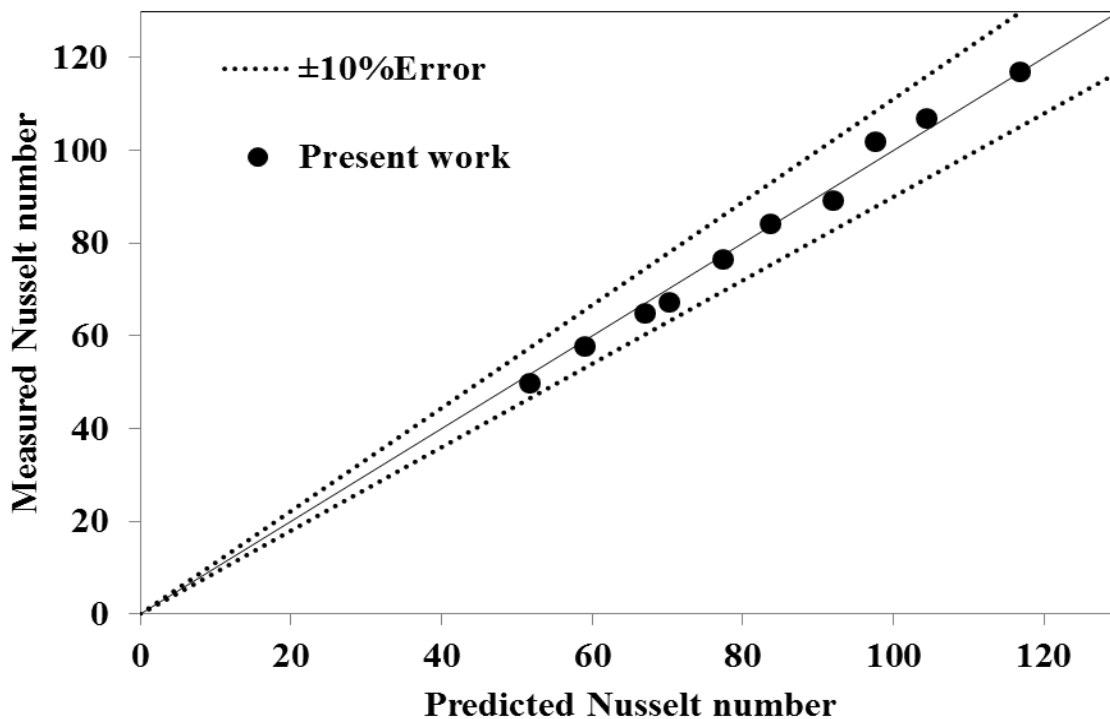
$$Nu(x) = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (9-4)$$

$$Nu = \begin{cases} 1.953(Re Pr \frac{D}{x})^{1/3} & (Re Pr \frac{D}{x}) \geq 33.3 \\ 4.364 + 0.0722 Re Pr \frac{D}{x} & (Re Pr \frac{D}{x}) < 33.3 \end{cases} \quad (10-4)$$

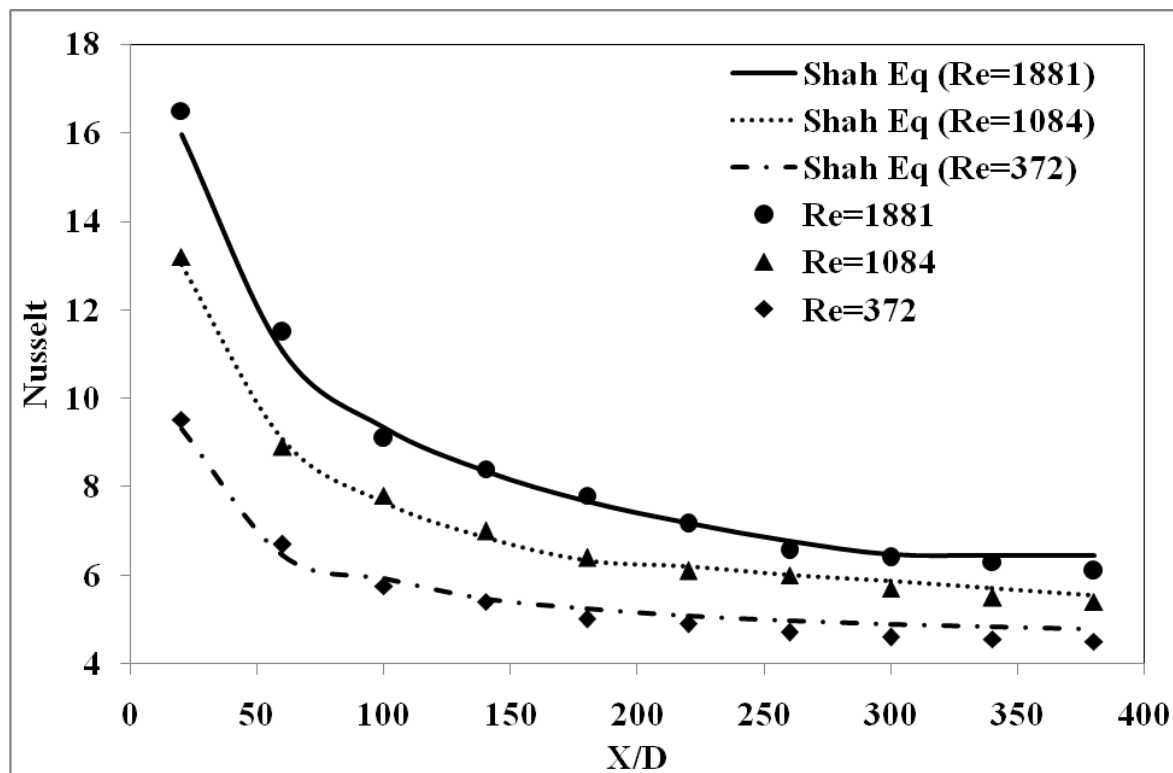
برای نمونه شکل ۲-۴ این مقایسه را برای جریان درهم نشان می‌دهد و بیان می‌کند که توافق خوبی بین نتایج تجربی و رابطه گنیلینسکی وجود دارد که بر صحت و اطمینان نتایج تأکید دارد. مشاهده می‌شود که رابطه گنیلینسکی مقادیر ناسلت را بهتر از معادله دیتوس-بولتر پیش‌بینی می‌کند.



شکل ۴-۲: مقایسه عدد ناسلت تجربی و روابط پیش‌بینی برای آب خالص در جریان درهم



شکل ۴-۳: مقایسه عدد ناسلت تجربی و رابطه گنیلینسکی برای آب خالص در جریان درهم



شکل ۴-۴: مقایسه عدد ناسلت تجربی و روابط پیش‌بینی برای آب خالص در جریان آرام

همچنین می‌توان در شکل ۳-۴ دید که تمامی داده‌ها در محدوده ۱۰٪ مقادیر پیش‌بینی شده قرار گرفته‌اند. به بیان دیگر در بدبینانه‌ترین حالت همه‌ی داده‌ها شامل عدم قطعیت ۱۰٪ شده‌اند. همانطور که در شکل‌های ۲-۴ تا ۴-۴ نشان داده شده است این اطلاعات، درهم ریختگی را کاهش می‌دهد و نتایج مطلوب را در شکل قابل درک و آسانتر و بدون از دست دادن داده‌ها نشان می‌دهد.

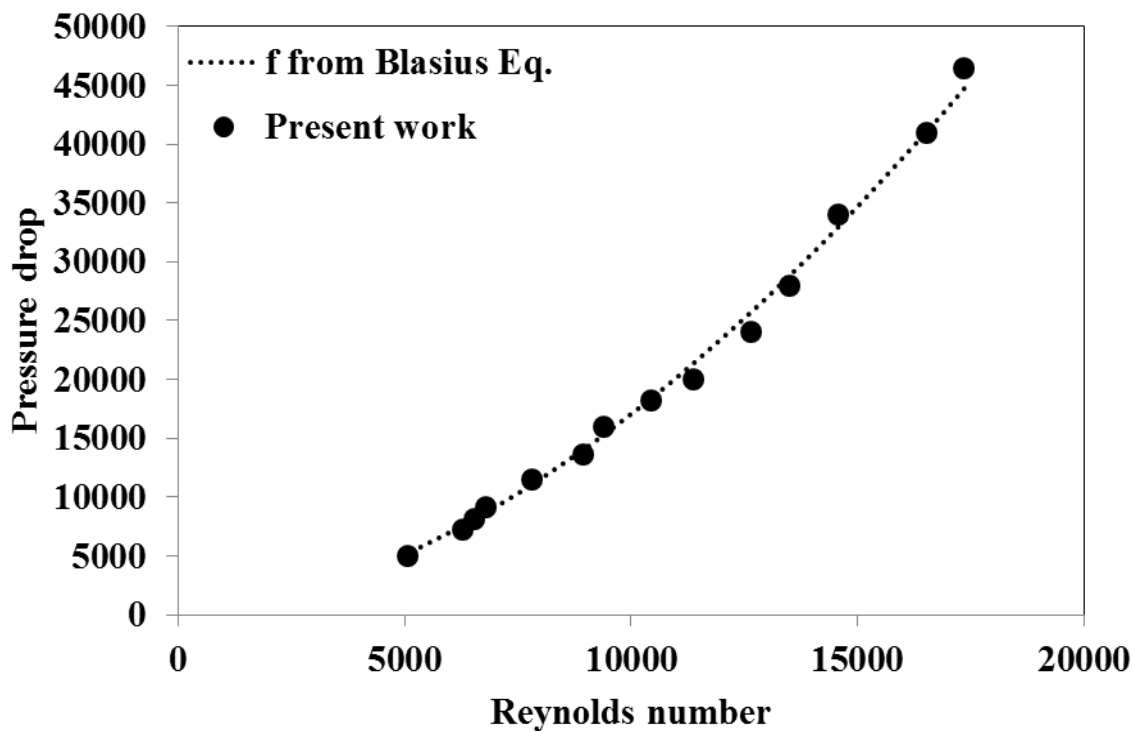
۴-۵-۲- تست افت فشار لزجی آب

در بخش شارثابت تجهیزاتی استفاده شده‌اند تا داده‌های افت فشار را بررسی کنند. مقادیر اندازه‌گیری شده را می‌توان با رابطه‌ی تجربی افت فشار مقایسه نمود که برابر است با:

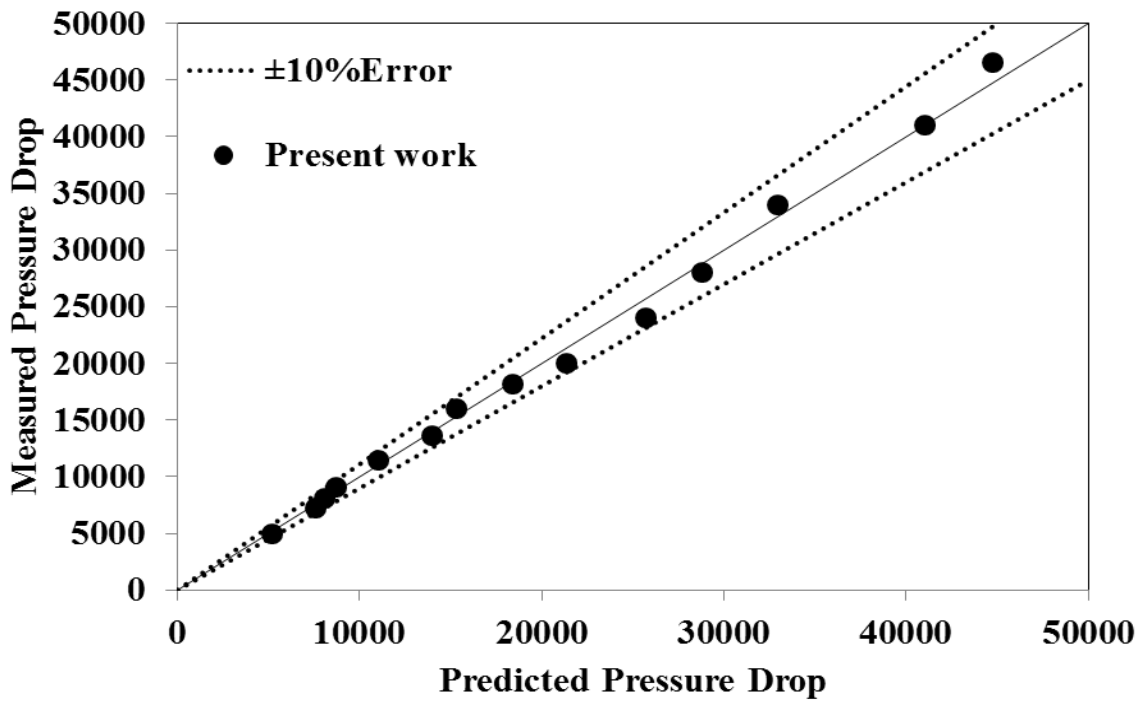
$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad (11-4)$$

که f ضریب اصطکاک است و می‌تواند در جریان درهم کاملاً توسعه‌یافته با استفاده از $f = 0.316Re^{-0.25}$ که رابطه‌ی بلازیوس نام دارد در ناحیه $Re < 30000$ محاسبه شود. در جریان آرام نیز f از رابطه $f = 64/Re$ بدست می‌آید.

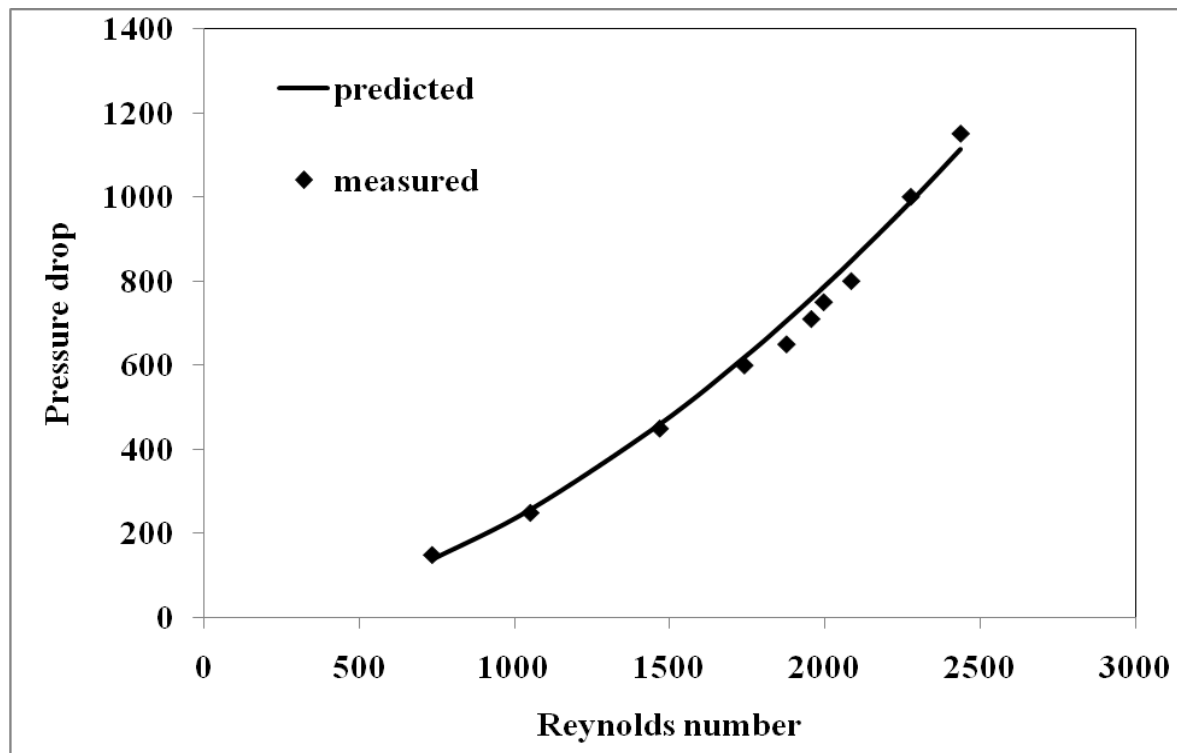
نتایج افت فشار در شکل‌های ۴-۵ تا ۴-۸ دیده می‌شود. مقادیر اندازه‌گیری شده درون ۱۰٪ مقادیر پیش‌بینی شده قرار می‌گیرند.



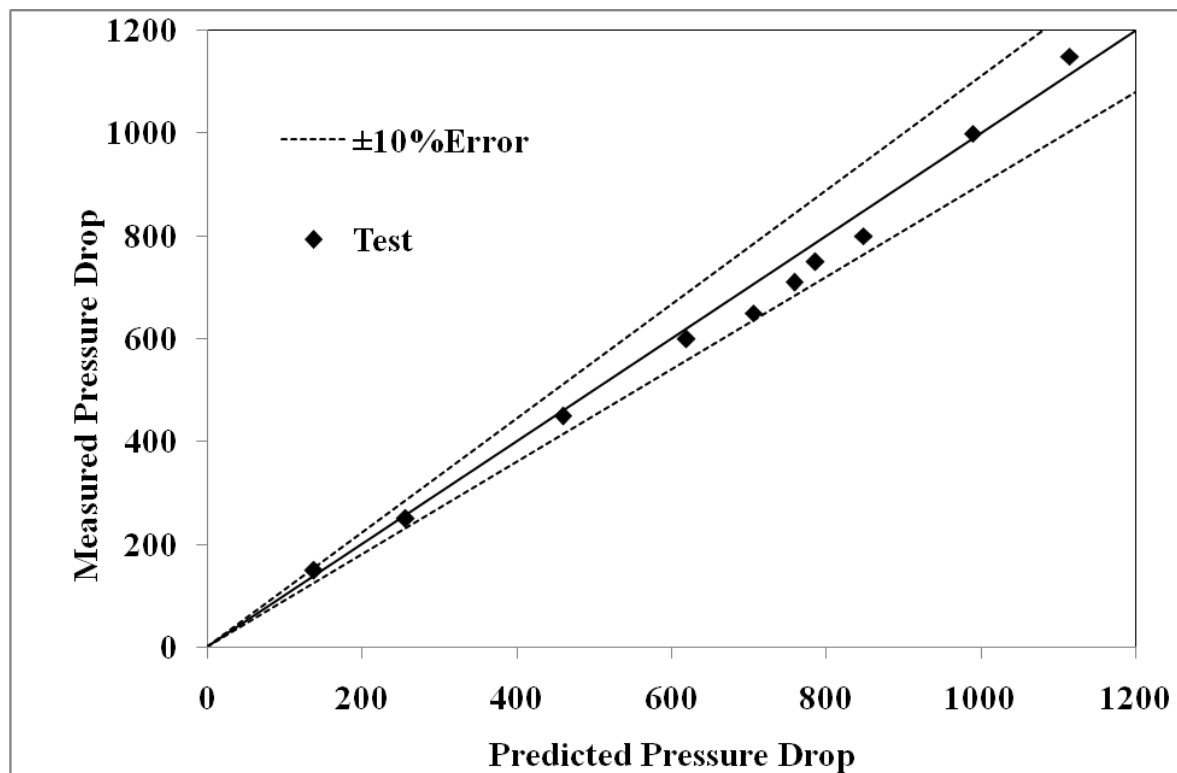
شکل ۴-۵: افت فشار برای آب خالص در جریان درهم



شکل ۴-۶: مقایسه افت فشار اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده برای آب مقطر در جریان درهم



شکل ۴-۷: افت فشار برای آب خالص در جریان آرام



شکل ۴-۸: مقایسه مقایسه افت فشار اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده برای آب مقطر در جریان آرام

از این نتایج به نظر می‌رسد که آزمایشات به خوبی انجام شده است. تکمیل تست‌گیری از آب تأیید کرد که دستگاه به درستی قادر به اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت و افت فشار لزجی سیالات در حالت شار ثابت است.

فصل پنجم

نتایج آزمایشات نانوسیال

این فصل مهم‌ترین قسمت پروژه است که آزمایشات انتقال حرارت جابجایی و افت فشار لزجی نانوسیال را در بر می‌گیرد. بکارگیری نانوسیالات در سیستم نیازمند برخی عملیات جانبی است. بهتر است که انجام آزمایشات با ذرات مختلف (Al_2O_3 و TiO_2)، و در غلظت‌های متفاوت (۰/۲٪، ۰/۵٪، ۱٪، ۱/۵٪ و ۲٪) صورت گیرد. در این فصل نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها نشان داده خواهد شد. مراحل همانند آزمایش آب است و آزمایشات به صورتی است که در ادامه می‌آید. ابتدا نانوسیال آلومینا تست خواهد شد. بعد از انجام این آزمایشات، سیستم با استفاده از آب تمیز و مجدداً برای اطمینان از ته‌نشین نشدن ذرات با آب تست می‌شود. سرانجام نانوسیال تیتانیا تست خواهد شد. همچنین این نتایج با تحلیل‌های تئوری تفسیر خواهد شد. یکی از اهداف آزمایشات، بررسی تأثیر غلظت ذرات نانو بر روی انتقال حرارت جابجایی است که این امر با هدف استفاده از خصوصیات درست در ارزیابی اطلاعات به کار خواهد آمد. نانوسیالات تست شده برای تأیید خواص نگه‌داشته خواهند شد. هر نانوسیال در دبی‌ها، دماهای ورودی بالک و شارهای حرارتی مختلف بررسی می‌شود. هرچند شار حرارتی باید محدود باشد تا جوشش اتفاق نیافتد. اگر تغییری هم روی نرخ جریان نانوسیال اتفاق بیفتد، دبی جریان باید اندازه‌گیری شود.

۵-۱- تست نانوسیال آلومینا/آب

نانوذرات آلومینا از کمپانی نانوامور^۱ تهیه شده است. تبدیل میان درصد حجمی و وزن با فرض چگالی $3920 \left(\frac{kg}{m^3}\right)$ برای آلومینا انجام شده است.

۵-۱-۱- بدست آوردن خواص نانوسیال آلومینا/آب

خواص فیزیکی مورد استفاده برای نانوسیال شامل دانسیته، ویسکوزیته، حرارت مخصوص و ضریب هدایت حرارتی هستند. برای دانسیته و ظرفیت حرارتی نانوسیال روابط کلاسیک مخلوط‌های دوفاز برقرار و مورد

^۱NanoAmor

تأیید هستند [۱۹] و با توجه به خواص آب و ذرات نانو در دمای متوسط بالک تعیین می‌شوند. دانسیته نانوسیال با این تئوری برابر است با:

$$\rho_{nf} = \varphi\rho_s + (1-\varphi)\rho_w \quad (۱-۵)$$

که φ نسبت حجمی ذرات نانو، ρ_s دانسیته ذرات نانو و ρ_w دانسیته آب می‌باشد. محققان از دو رابطه متفاوت برای محاسبه ظرفیت حرارتی یا گرمای مخصوص استفاده می‌کنند. محققان قدیمی‌تر از رابطه زیر که از همان دیدگاه رابطه دانسیته تبعیت می‌کند استفاده می‌کردند [۱۹]:

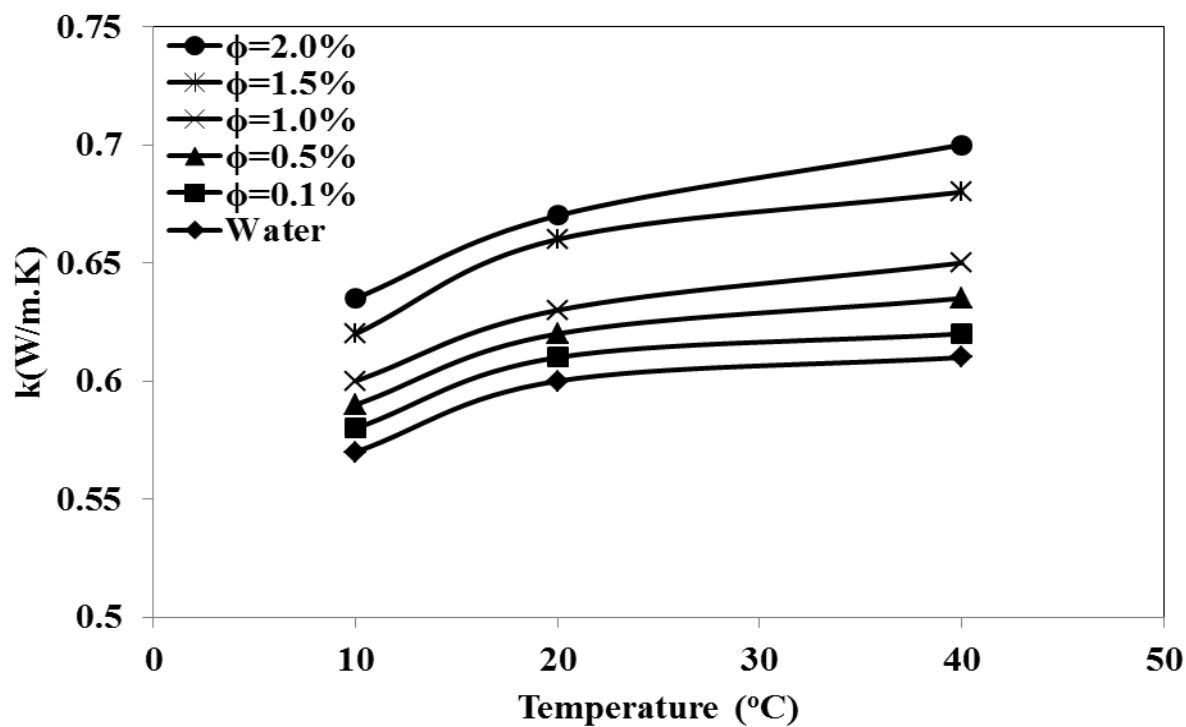
$$Cp_{nf} = \varphi Cp_s + (1-\varphi)Cp_w \quad (۲-۵)$$

اما، در تحقیق حاضر از رابطه دقیق‌تر زیر برای گرمای مخصوص نانوسیالات که مبتنی بر مدل تعادل حرارتی است، استفاده شده است [۴۶]:

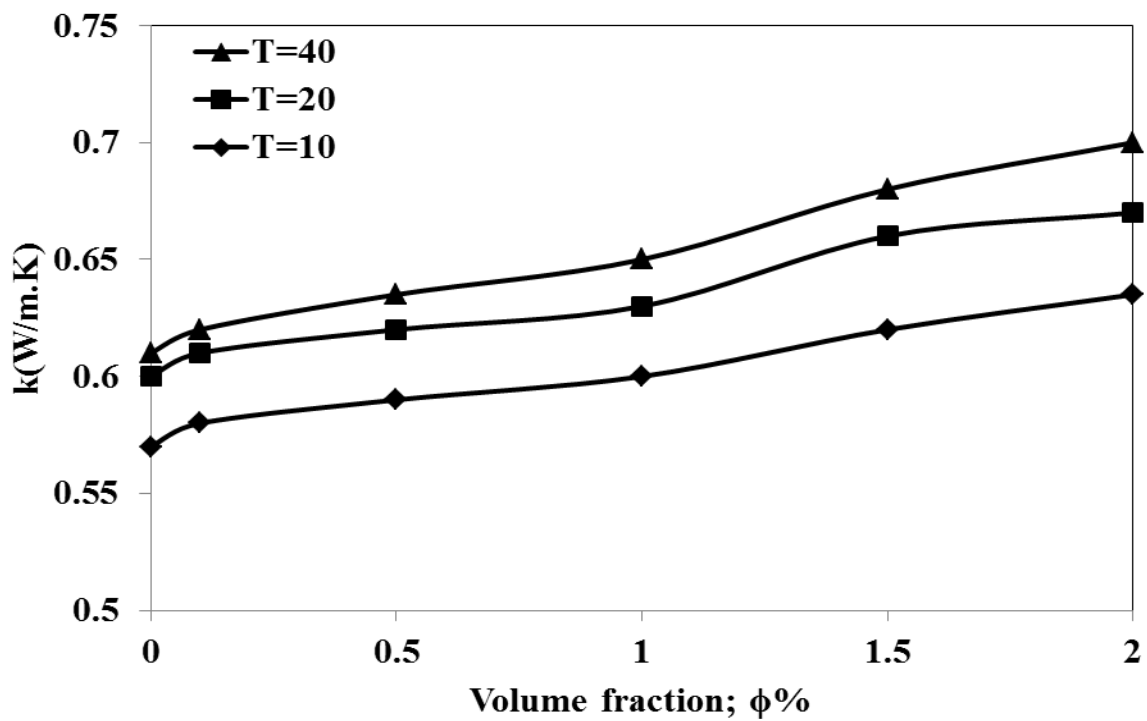
$$Cp_{nf} = \frac{\varphi(\rho_s Cp_s) + (1-\varphi)(\rho_w Cp_w)}{\rho_{nf}} \quad (۳-۵)$$

در روابط بالا Cp_s گرمای مخصوص ذرات نانو و Cp_w گرمای مخصوص آب است.

هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیالات باید اندازه‌گیری شود تا وابستگی آنها به غلظت و دما بدست آید. با آزمایش ضریب هدایت حرارتی، نتایج این خواص برای نانوسیال آلومینا/آب به صورت شکل‌های زیر بدست آمده‌اند:



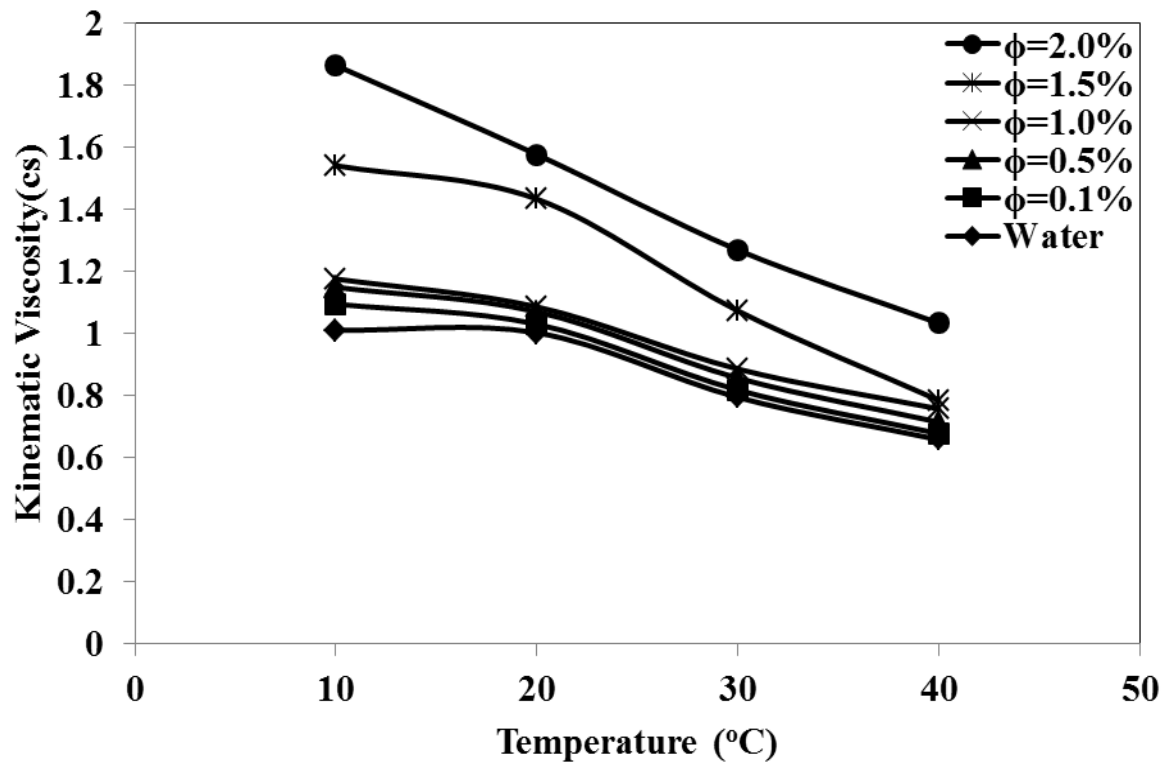
شکل ۵-۱: ضریب هدایت حرارتی وابسته به دما برای نانوسیال آلومینا/آب



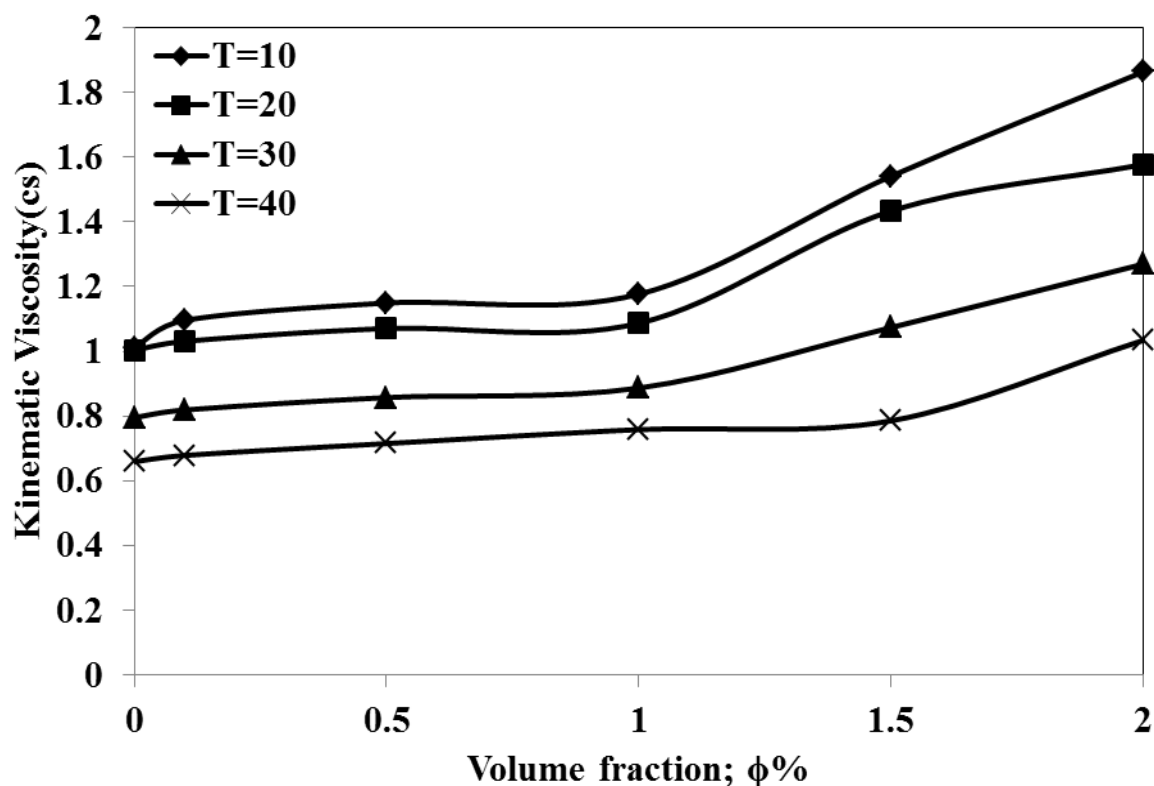
شکل ۵-۲: ضریب هدایت حرارتی وابسته به غلظت حجمی برای نانوسیال آلومینا/آب

از شکل‌های ۱-۵ و ۲-۵ مشخص است که ضریب هدایت حرارتی برای نانوسیال آلومینا/آب با افزایش غلظت نانوذرات، افزایش چشمگیری دارد. اما تغییرات دما، تغییرات قابل توجهی روی هدایت حرارتی نمی‌گذارد یا تأثیر اندکی دارد.

اندازه‌گیری ویسکوزیته نیز به صورت تجربی انجام شد که نتایج به صورت شکل‌های ۳-۵ و ۴-۵ می‌باشند:



شکل ۳-۵: ویسکوزیته سینماتیکی وابسته به دما برای نانوسیال آلومینا/آب

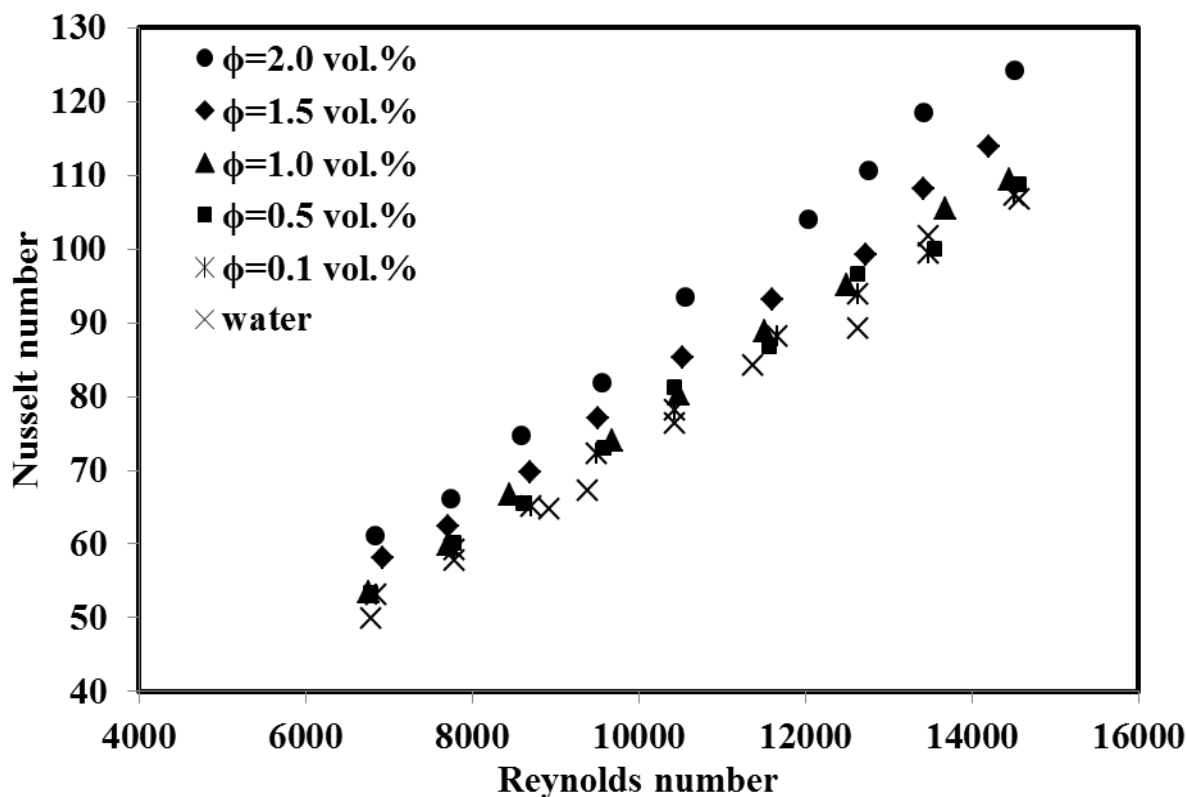


شکل ۴-۵: ویسکوزیته سینماتیکی وابسته به غلظت حجمی برای نانوسیال آلومینا/آب

نتایج مربوط به آزمایشات ویسکوزیته نشان از رفتار پیش‌بینی شده‌ای دارد. با افزایش دما و کاهش غلظت حجمی نانوذرات، ویسکوزیته کاهش می‌یابد و برعکس.

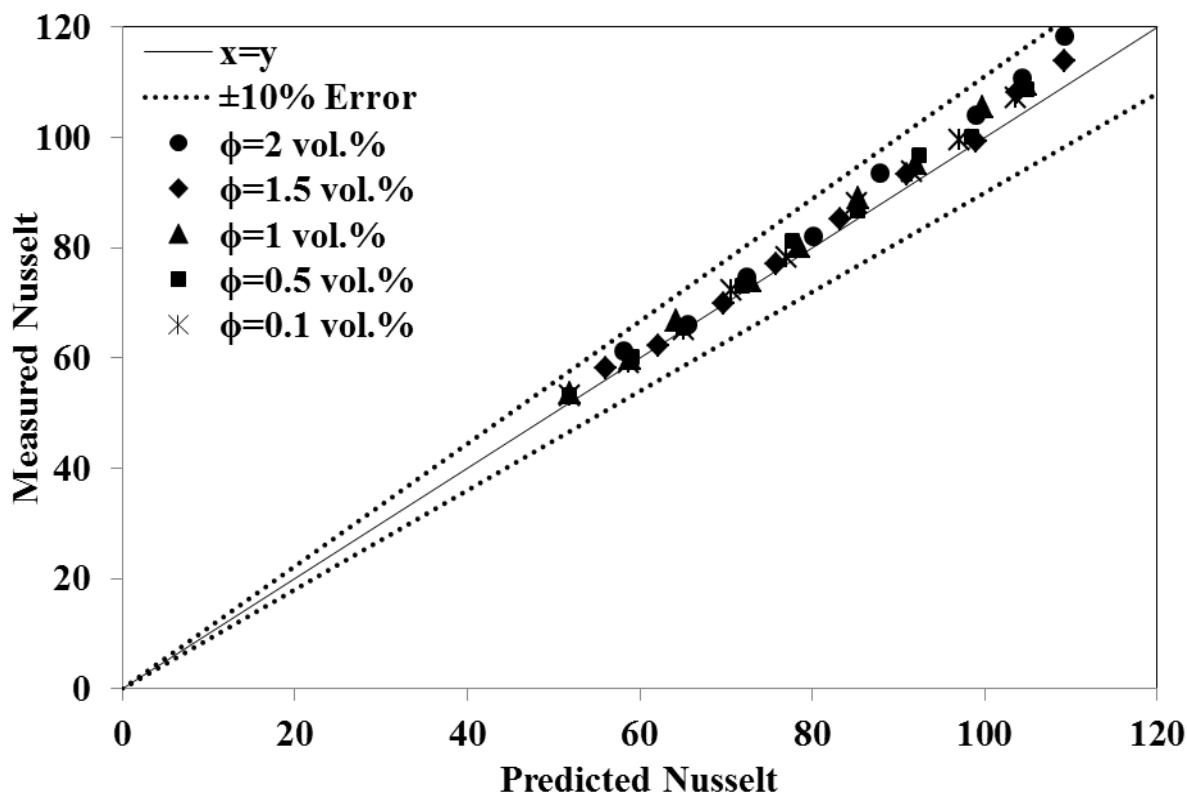
۵-۱-۲- آزمایشات انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آلومینا/آب

شکل ۵-۵ عدد ناسلت نانوسیال آلومینا/آب را در غلظت‌های مختلف بر حسب عدد رینولدز در جریان درهم نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل مشخص است افزایش غلظت نانوذرات آلومینا منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی در یک عدد رینولدز ثابت می‌گردد.



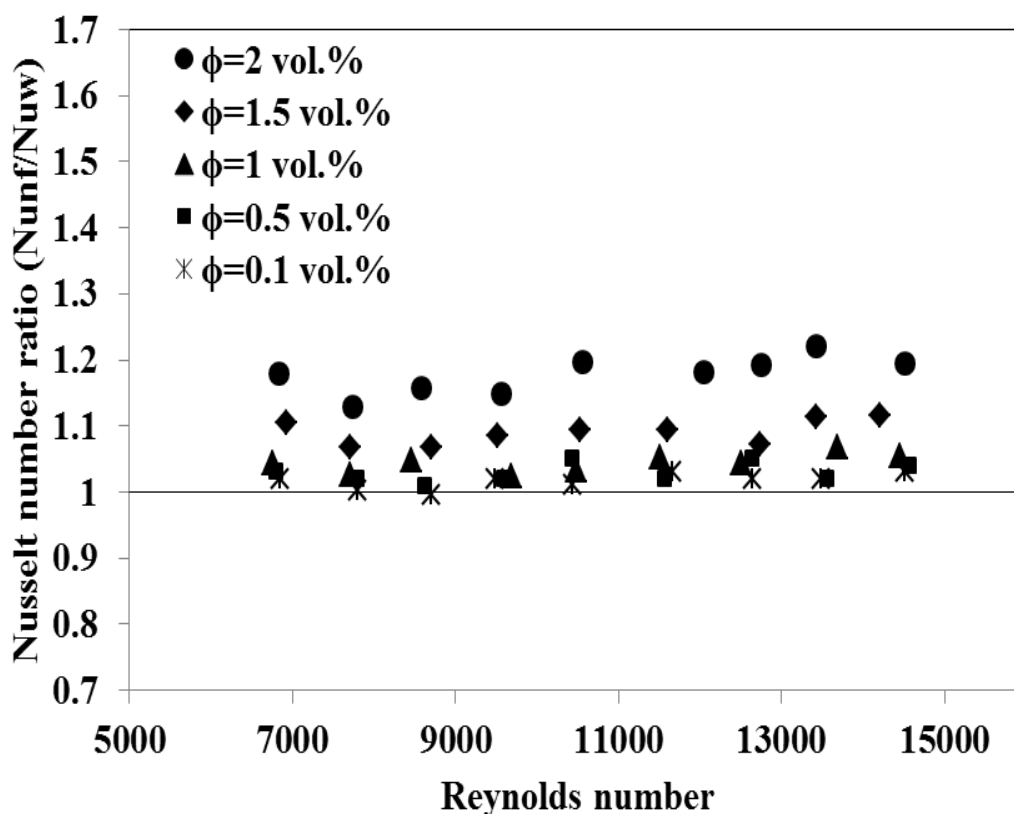
شکل ۵-۵: تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز برای نانوسیال آلومینا/آب در جریان درهم

نمودار بهتری از این نتایج در شکل ۶-۵ نشان داده شده است. همانگونه که از شکل ۶-۵ پیداست، عدد ناسلت اندازه گیری شده با عدد ناسلت پیش‌بینی شده از معادله‌ی گنیلینسکی که در فصل ۴ بیان شد مقایسه شده است. از شکل دیده می‌شود که عدد ناسلت تجربی در مقایسه با نتایج حاصل از معادله گنیلینسکی با استفاده از خواص نانوسیال به درستی در محدوده ۱۰٪ مقادیر پیش‌بینی شده قرار گرفته است.



شکل ۵-۶: مقایسه عدد ناسلت تجربی با پیش‌بینی‌ها بر حسب عدد رینولدز برای نانوسیال آلومینا/آب در جریان درهم

شکل ۵-۷: نسبت عدد ناسلت نانوسیال به آب خالص را در همان اعداد رینولدز به صورت تابعی از عدد رینولدز نشان می‌دهد. دیده می‌شود که افزایش قابل توجه انتقال حرارت با تعلیق ذرات نانومتری Al_2O_3 در آب حاصل می‌شود. در آزمایشات انجام شده نسبت Nu_{nf}/Nu_w برای غلظت ۲٪ نانوذرات آلومینا در آب در رینولدز ۱۳۵۰۰ برابر با ۱٫۲۲ بدست آمد. بنابراین ۲۲٪ افزایش که این مقدار بالاترین افزایش در آزمایشات ما بوده است. همچنین مطابق با ادعاهای پک و چو [۲۳] و ژوان و لی [۲۴]، و با توجه به شکل این نسبت مستقل از عدد رینولدز می‌باشد. به بیان دیگر در این تحقیق دیده شده است که نسبت Nu_{nf}/Nu_w با افزایش عدد رینولدز تغییری نمی‌کند.

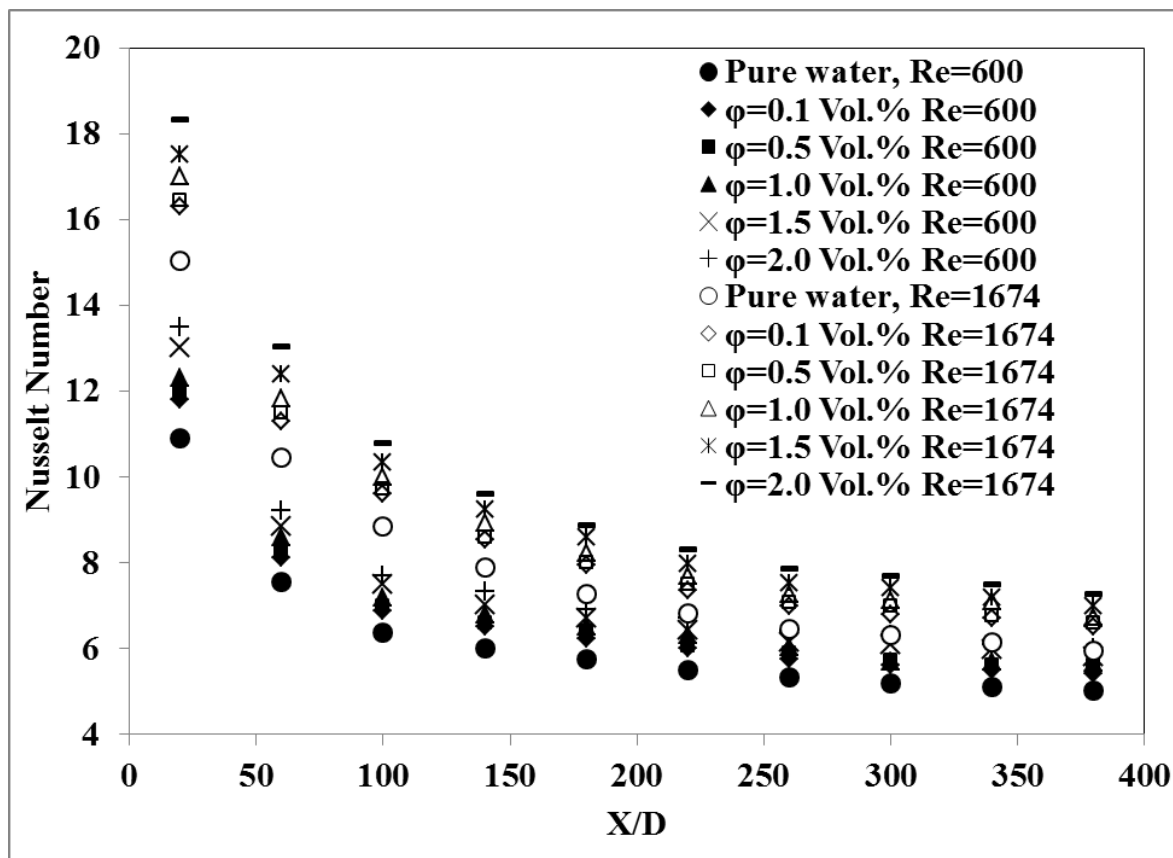


شکل ۵-۷: نسبت افزایش عدد ناسلت (Nu_{nf}/Nu_w) بر حسب عدد رینولدز برای نانوسیال آلومینا/آب

علاوه بر این‌ها، شکل ۵-۸ مقادیر عدد ناسلت بر حسب رینولدز را در جریان آرام نشان می‌دهد. دیده شده که در رینولدز ۱۶۷۴ و غلظت ۰.۲٪، عدد ناسلت تا ۰.۲۵٪ افزایش یافته است.

این افزایش قابل توجه دلایل دیگری به غیر از افزایش ضریب هدایت حرارتی دارد. از جمله تئوری‌های پرداخته شده می‌توان به مهاجرت ذرات اشاره کرد. حرکات نامنظم ذرات یا حرکت براونی^۱ که با جابجا شدن آنها، مخصوصاً در کنار دیواره‌ها منجر به کاهش لایه مرزی حرارتی شده و پروفیل دما را تغییر می‌دهد. این امر فرایند تبادل انرژی را شتاب می‌دهد.

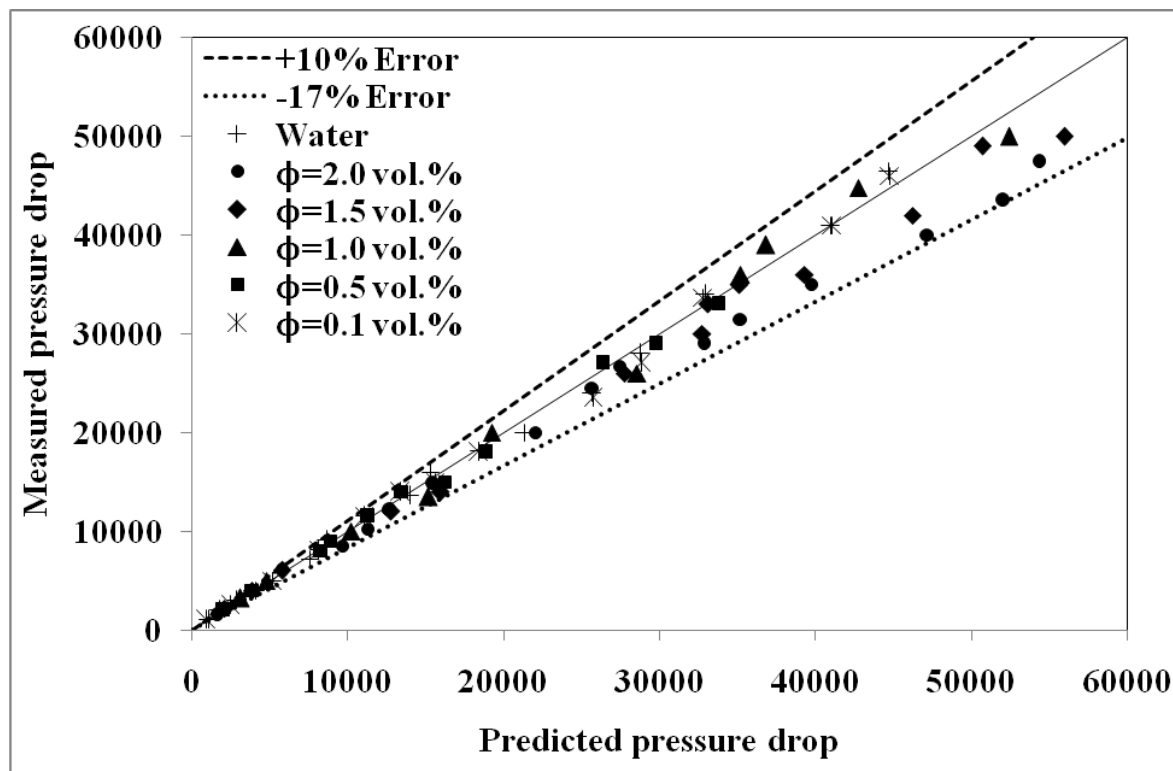
¹ Brownian Motion



شکل ۵-۸: تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز برای نانوسیال آلومینا/آب در جریان آرام

۵-۱-۳- آزمایشات افت فشار لزجی نانوسیال آلومینا/آب

به منظور به کار بردن نانوسیال در کاربردهای صنعتی، افت فشار نانوسیال باید مورد بررسی قرار گیرد. افت فشار لزجی نیز با روابط ارائه شده در فصل ۴، مقایسه می‌شود. نتایج اندازه‌گیری‌های افت فشار لزجی در شکل ۵-۹ نشان داده شده‌اند. تمام آزمایشات و نتایج در حداکثر اختلاف بین ۱۰٪ و ۱۷٪- پیش‌بینی می‌شود. با توجه به شکل‌ها می‌توان دریافت که افزودن نانوذرات در غلظت‌های پایین به سیال مبنا در این تحقیق موجب افزایش قابل توجه در افت فشار نشده است. بنابراین نتایج این شکل بیان می‌کند که رابطه افت فشار و ضریب اصطکاک برای جریان تک‌فاز می‌تواند برای نانوسیال آلومینا/آب نیز تعمیم داده شود.



شکل ۵-۹: مقایسه افت فشار اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده برای نانوسیال آلومینا/آب

۵-۲- تست نانوسیال تیتانیا/آب

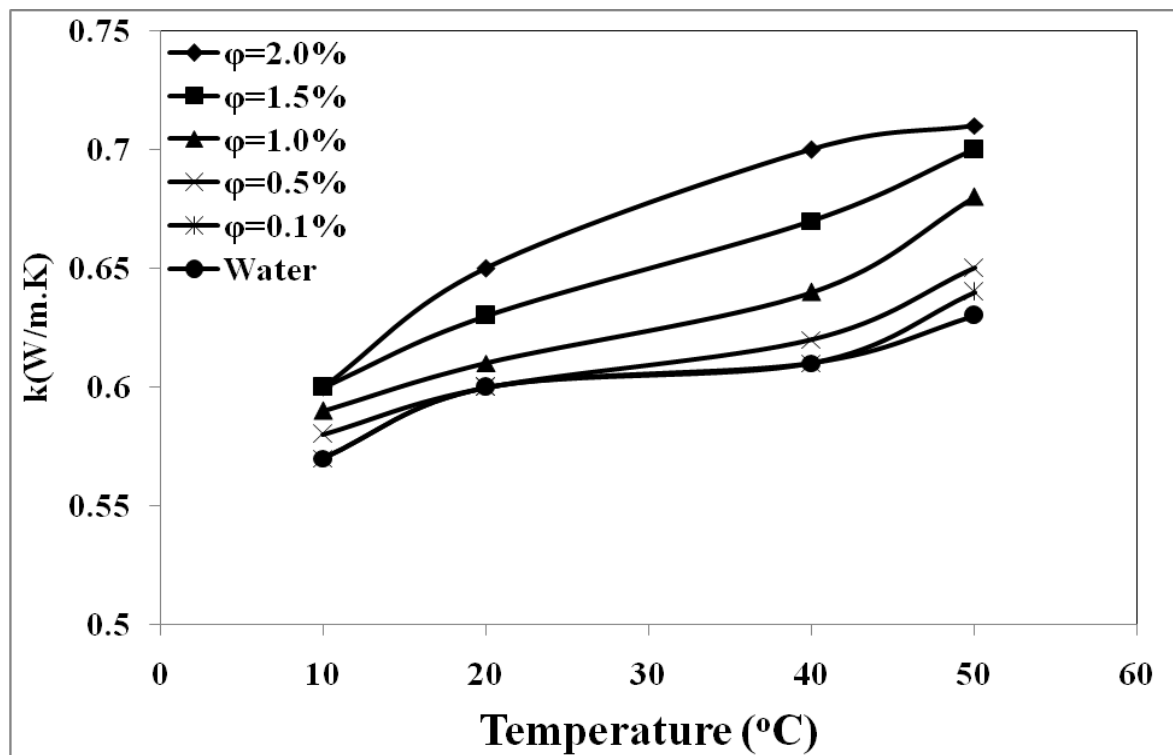
تیتانیا نیز برای ۵ غلظت مختلف تست شده است. نانوذرات تیتانیا از کمپانی پلاسماکم^۱ تهیه شده است.

تبدیل میان درصد حجمی و وزن با فرض چگالی $3900 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$ برای تیتانیا انجام شده است.

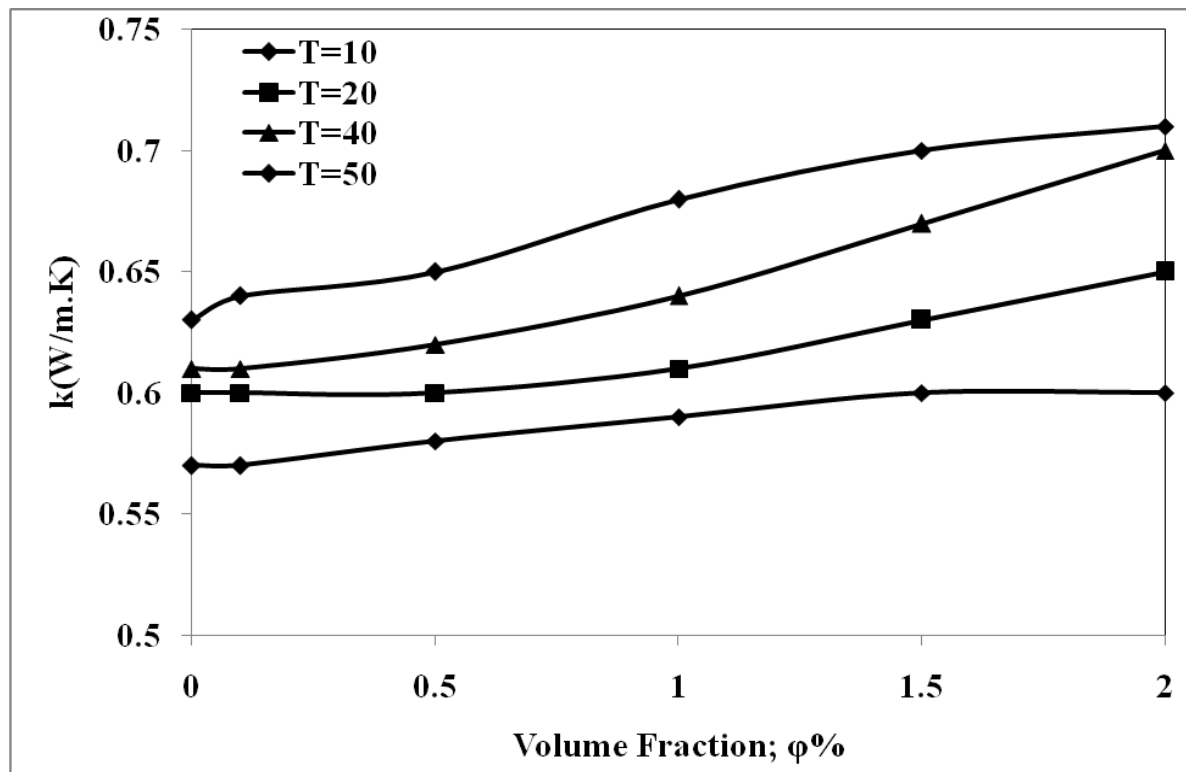
۵-۲-۱- بدست آوردن خواص نانوسیال تیتانیا/آب

برای به‌دست آوردن خواص نانوسیال تیتانیا/آب همانند نانوسیال آلومینا/آب عمل می‌کنیم. به بیان دیگر برای تعیین دانسیته و ظرفیت حرارتی از روابط ۵-۱ و ۵-۳ استفاده و برای تعیین هدایت حرارتی و ویسکوزیته از طریق اندازه‌گیری مشخص می‌نماییم. با آزمایش اندازه‌گیری ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی، نتایج این خواص برای نانوسیال تیتانیا/آب به صورت شکل‌های زیر بدست آمده‌اند:

^۱Plasmachem



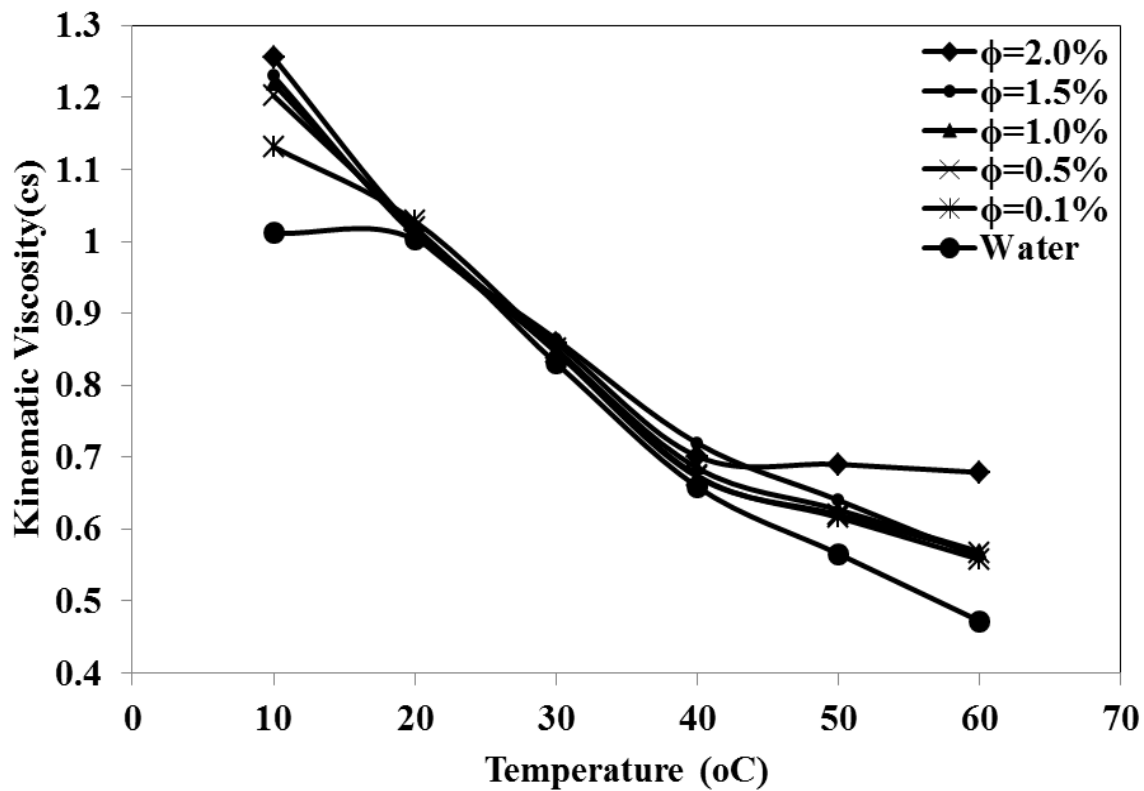
شکل ۵-۱۰: ضریب هدایت حرارتی وابسته به دما برای نانوسیال تیتانیا/آب



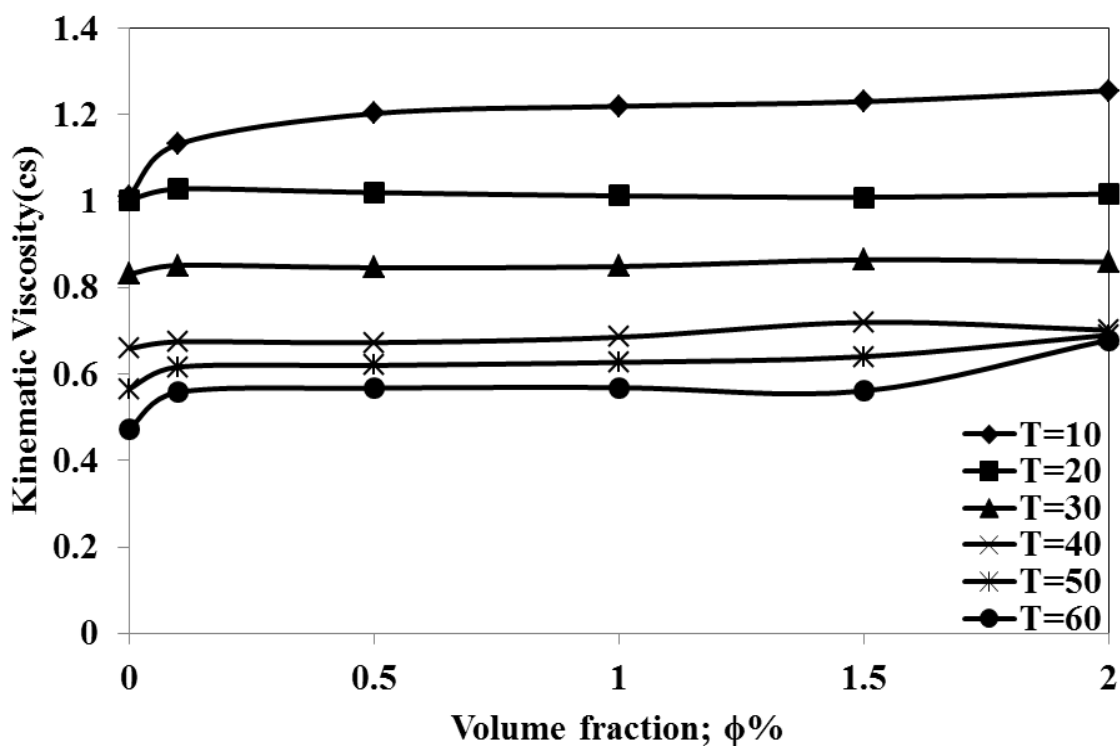
شکل ۵-۱۱: ضریب هدایت حرارتی وابسته به غلظت حجمی برای نانوسیال تیتانیا/آب

از شکل‌های ۱۰-۵ و ۱۱-۵ می‌بینیم که ضریب هدایت حرارتی برای نانوسیال آلومینا/آب با افزایش غلظت نانوذرات، افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد. هرچند تغییرات دما، تغییرات قابل توجهی روی هدایت حرارتی نمی‌گذارد یا تأثیر کمی دارد.

اندازه‌گیری ویسکوزیته نیز به صورت تجربی انجام شد که نتایج به صورت شکل‌های ۱۲-۵ و ۱۳-۵ می‌باشند:



شکل ۱۲-۵: ویسکوزیته سینماتیکی وابسته به دما برای نانوسیال تیتانیا/آب

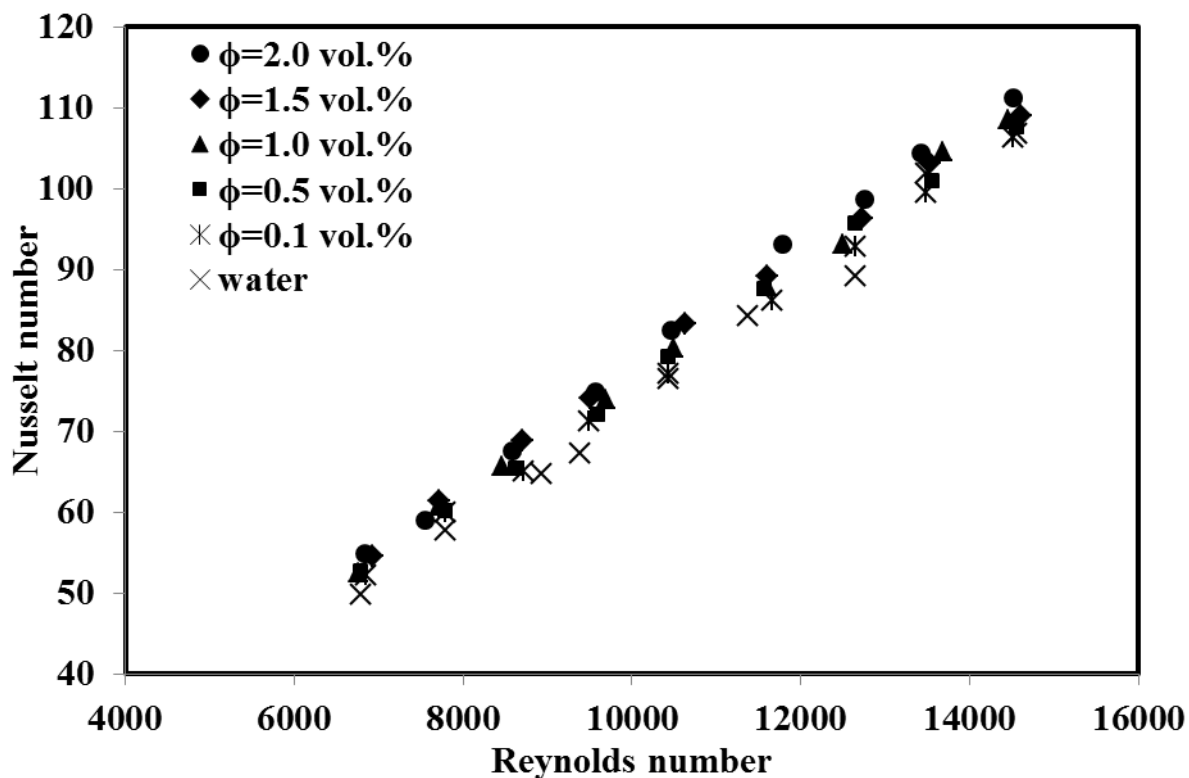


شکل ۵-۱۳: تغییرات ویسکوزیته سینماتیکی نسبت به غلظت حجمی برای نانوسیال تیتانیا/آب

با توجه به شکل‌های ۵-۱۲ و ۵-۱۳ درمی‌یابیم که ویسکوزیته با دما رابطه‌ای معکوس دارد. نتیجه جالب این است که ویسکوزیته این نانوسیال با افزایش غلظت تغییری نمی‌کند. به عبارت دیگر، برای نانوسیال تیتانیا/آب، ویسکوزیته مستقل از تغییرات غلظت است.

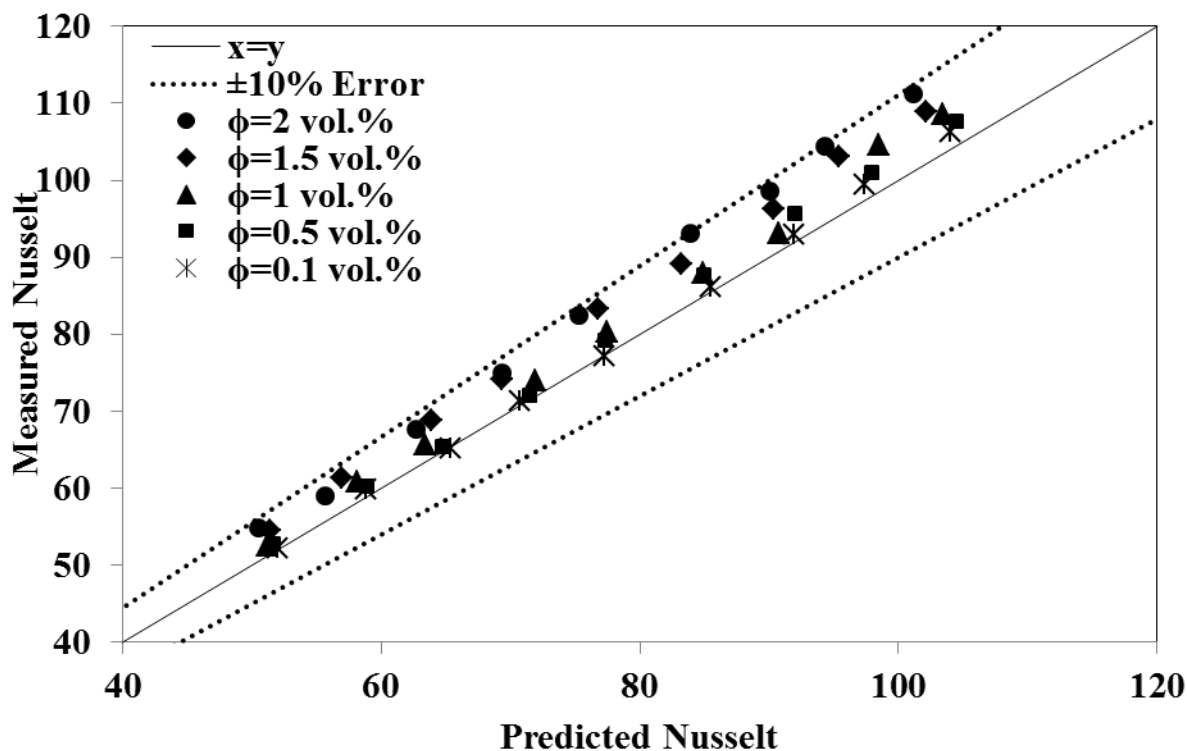
۵-۲-۲- آزمایشات انتقال حرارت جابجایی نانوسیال تیتانیا/آب

شکل ۵-۱۴ عدد ناسلت نانوسیال تیتانیا/آب را در غلظت‌های مختلف بر حسب عدد رینولدز در جریان درهم نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل مشخص است افزایش غلظت نانوذرات آلومینا منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی در یک عدد رینولدز ثابت می‌گردد.



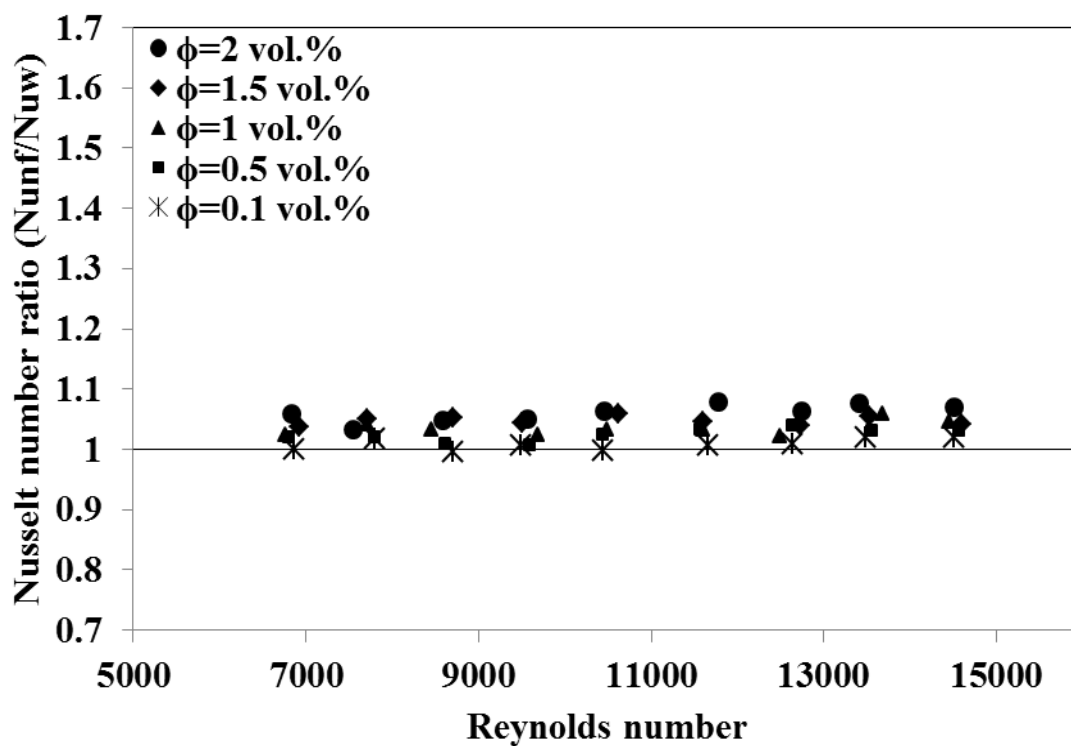
شکل ۵-۱۴: تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز برای نانوسیال تیتانیا/آب در جریان درهم

در شکل ۵-۱۵، عدد ناسلت اندازه گیری شده با عدد ناسلت پیش‌بینی شده از معادله‌ی گنیلینسکی که در فصل ۴ بیان شد مقایسه شده است. از شکل دیده می‌شود که عدد ناسلت تجربی در مقایسه با نتایج حاصل از معادله گنیلینسکی با استفاده از خواص نانوسیال به درستی در محدوده ۱۰٪ مقادیر پیش‌بینی - شده قرار گرفته است.



شکل ۵-۱۵: مقایسه عدد ناسلت تجربی با پیش‌بینی‌ها بر حسب عدد رینولدز برای نانوسیال تیتانیا/آب در جریان درهم

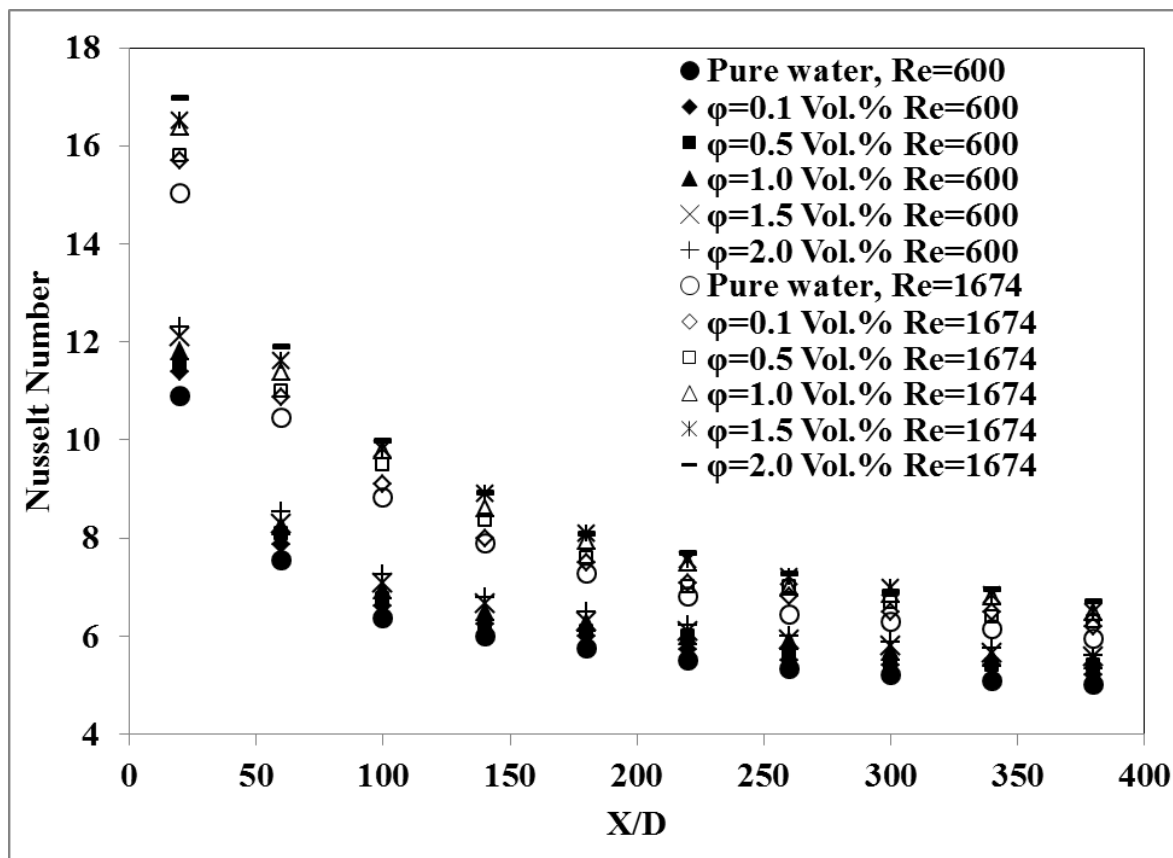
شکل ۵-۱۶: نسبت عدد ناسلت نانوسیال به آب خالص را در همان اعداد رینولدز به صورت تابعی از عدد رینولدز نشان می‌دهد. دیده می‌شود که انتقال حرارت سیال با تعلیق ذرات نانومتری TiO_2 در آب افزایش می‌یابد. در آزمایشات انجام شده نسبت Nu_{nf}/Nu_w برای غلظت ۲٪ نانوذرات تیتانیا در آب تقریباً در رینولدز ۱۱۸۰۰ در حدود ۱,۰۸ بدست آمد. بنابراین ۸٪ افزایش که این مقدار بالاترین افزایش در آزمایشات ما بوده است. همچنین با توجه به شکل، نسبت Nu_{nf}/Nu_w مستقل از عدد رینولدز می‌باشد و با افزایش عدد رینولدز تغییری نمی‌کند.



شکل ۵-۱۶: نسبت افزایش عدد ناسلت (Nu_{nf}/Nu_w) بر حسب عدد رینولدز برای نانوسیال تیتانیا/آب

در غلظت بسیار پایین ۰,۱٪، در دو مورد، نه تنها بهبود در انتقال حرارت دیده نشد، بلکه نسبت Nu_{nf}/Nu_w به ۰,۹۹٪ رسید.

شکل ۵-۱۷ مقادیر عدد ناسلت بر حسب رینولدز را در جریان آرام نشان می‌دهد. دیده شده که در رینولدز ۶۰۰ و غلظت ۰,۲٪، عدد ناسلت تا ۰,۱۴٪ افزایش یافته است.

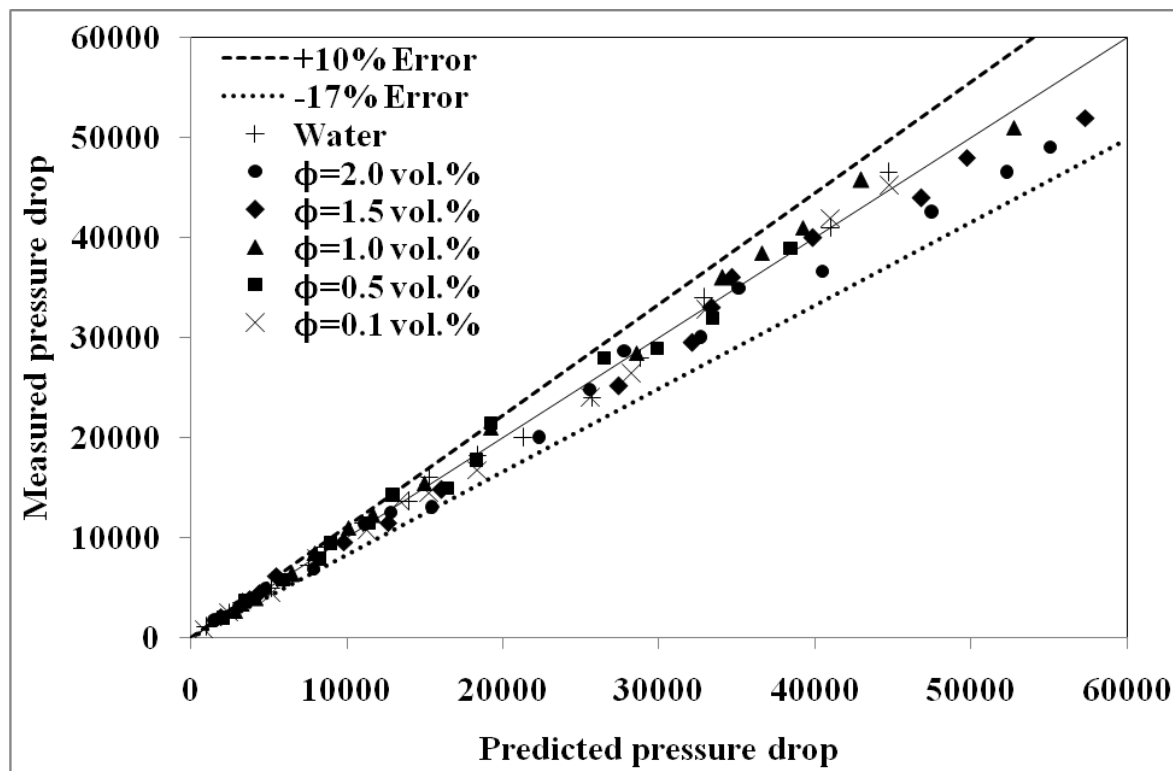


شکل ۵-۱۷: تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز برای نانوسیال آلومینا/آب در جریان آرام

همانگونه که در قسمت قبلی برای نانوسیال آلومینا/آب گفته شد مهاجرت ذرات باعث تغییر در پروفیل دما خواهد شد. لذا افزایش نسبت حجمی ذرات نانو، برخوردها و کنش‌های متقابل ذرات نانو را که عامل اصلی انتقال حرارت در نانوسیال می‌باشد، افزایش می‌دهد.

۵-۲-۳- آزمایشات افت فشار لزجی نانوسیال تیتانیا/آب

افت فشار لزجی نانوسیال نیز اندازه‌گیری و نتایج در شکل ۵-۱۸ نشان داده شده‌است. تمام آزمایشات و نتایج در حداکثر اختلاف بین ۰.۱۱٪ و ۰.۱۷٪- پیش‌بینی می‌شود. با توجه به شکل‌ها می‌توان دریافت که افزودن نانوذرات به سیال مبنا در غلظت‌های پایین موجب افزایش قابل توجه در افت فشار نمی‌شود.



شکل ۵-۱۸: مقایسه افت فشار اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده برای نانوسیال تیتانیا/آب

بنابراین، اگر وابستگی دمایی و غلظتی خصوصیات نانوسیال مورد توجه قرار گیرد، نانوسیالات رفتاری مشابه سیالات تک-فاز خواهند داشت. به عبارت دیگر، اثبات شده که روابط تجربی موجود برای افت فشار لزجی و ضریب انتقال حرارت در یک لوله، توصیفی از نانوسیال مورد بررسی است.

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات آلومینا-آب و تیتانیا/آب در داخل لوله‌ای به طول ۲ متر با شرط مرزی شار حرارتی ثابت در جداره در جریان آرام و درهم مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر غلظت ذرات روی انتقال حرارت جابجایی و افت فشار و وابستگی آنها به هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال بوده است. داده‌های تجربی نشان داده‌اند که افزودن نانوذرات به سیال مینا باعث افزایش ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت می‌شود. در حقیقت، درصد ذرات معلق عامل کلیدی برای افزایش انتقال حرارت می‌باشد. برای نانوسیال آلومینا/آب در غلظت ۲٪ حجمی، عدد ناسلت تا ۲۲٪ در رینولدز ۱۳۵۰۰ افزایش داشته است. در جریان آرام نیز در غلظت ۲٪ شاهد افزایش ۲۵٪ در رینولدز ۱۶۷۴ بوده‌ایم. همچنین برای نانوسیال تیتانیا/آب در غلظت ۲٪، برای رینولدزهای ۱۱۸۰۰ و ۶۰۰ به ترتیب ۸٪ و ۱۴٪ بهبود در انتقال حرارت مشاهده شده است. مقایسه میان داده‌های تجربی با روابط موجود برای ضرایب انتقال حرارت جابجایی و افت فشار نانوسیالات نشان از نتایج تقریباً یکسانی حداقل در جریان درهم دارند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که اگر از ویسکوزیته نانوسیال استفاده شود، به خوبی می‌توان مقادیر افت فشار و ضریب اصطکاک درهمی در نانوسیالات را به وسیله‌ی روابط سنتی ضریب اصطکاک برای سیالات خالص پیش‌بینی نمود. به طور کلی اگر وابستگی دمایی و غلظتی و خصوصیات نانوسیال مورد توجه قرار گیرد، نانوسیالات در جریان درهم، رفتاری مشابه سیالات تک-فاز خواهند داشت. باید به ای نکته توجه داشت که افزایش انتقال حرارت جابجایی تنها به دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال نسبت به سیال مینا نبوده، بلکه عوامل دیگری همچون مهاجرت ذرات، حرکات براونی و بی‌نظم نانوذرات و نیز برخورد ذرات با یکدیگر در این مورد تأثیرگذار هستند که باید مد نظر قرار گیرند. هرچند محققان عواملی را برای این افزایش پیشنهاد داده‌اند که در ادامه می‌آید، اما تحقیقات تجربی بیشتری برای فهم مشخصه‌های انتقال حرارت و افت فشار در نانوسیالات متفاوت ضروری است.

بر طبق فرضیه‌های موجود، ۴ عامل ممکن برای فهم مکانیزم انتقال حرارت در نانوسیالات ارائه می‌شود که عبارتند از: حرکت براونی ذرات، لایه‌ای شدن مولکول‌های سطح سیال در سطح مشترک سیال و ذره، طبیعت انتقال حرارت در نانوذرات و اثرات خوشه‌ای شدن نانوذرات. ایجاد لایه‌ای شدن سیال در سطح مشترک سیال-ذره، هدایت حرارتی بالاتری از نانوسیال به بار می‌آورد و خوشه‌ای شدن ذرات باعث اثری منفی در افزایش هدایت حرارتی می‌شود. افزایش هدایت حرارتی خوشه‌های با پیوندهای ضعیف بیشتر از خوشه‌های با پیوند محکم است. دیدگاه‌های محققان نشان می‌دهد برخی از آنان در آزمایشات خود با تحلیل نانوسیالات فرض کردند که افزایش انتقال حرارت جابجایی از پخش ذرات معلق بوجود آمده است. در حالی که برخی دیگر پیشنهاد کردند که افزایش می‌تواند از تشدید درهمی به علت حضور نانوذرات نشأت گرفته باشد.

به طور کلی عواملی که سبب بهبود انتقال حرارت در نانوسیالات می‌شود بطور خلاصه عبارتند از: سوسپانسیون نانوذرات ضریب هدایت حرارتی سیالات پایه را افزایش می‌دهند، حرکات تصادفی و نامنظم نانوذرات سبب ایجاد اغتشاش و نوسان در سیالات شده که منجر به شتاب یافتن فرایند انتقال انرژی می‌شود. به نظر می‌رسد حرکات تصادفی، جابجایی و برخورد ذرات نانو مخصوصاً در اعداد رینولدز بالا ساختار جریان را تغییر داده و منجر به تغییر پروفیل دمایی می‌شود. همچنین نفوذ و پراکندگی ذرات نانو در کنار دیواره منجر به افزایش سریع انتقال حرارت از دیواره به توده سیال می‌شود.

جهت مد نظر قرار دادن عواملی نظیر نوع، ابعاد، غلظت و شکل ذرات نانو و نیز تأثیر جابجایی، نفوذ، پراکندگی و برخورد نانوذرات در انتقال حرارت، نیاز به مطالعه بیشتری در زمینه ساختار جریان و انتقال حرارت جابجایی نانوسیال می‌باشد.

۶-۲- پیشنهادات

با توجه به مطالب ارائه شده در این پایان نامه، مواردی برای بهبود و ادامه این تحقیق به شرح ذیل پیشنهاد می شوند:

◀ انجام آزمایشات با نانوذرات دیگر

◀ انجام آزمایشات با شرایط مرزی دیگر اعم از تغییر هندسه و نیز شرایط مختلف حرارتی در دیواره

◀ توسعه و بهبود پایداری نانوسیالات و حفظ مشخصه‌های آن برای افزایش راندمان و کاربرد در

صنایع و ماشین آلات

در خاتمه پیشنهاد می شود جهت بررسی نتایج آزمایشگاهی انجام شده، مطالعه عددی نیز با همین ابعاد ذرات و سیستم آزمایش و شرط مرزی شار حرارتی ثابت دیواره برای نانوسیالات آلومینا/آب و تیتانیا/آب انجام شود و نتایج با داده‌های تجربی مقایسه شود و در مورد عوامل ایجاد اختلاف بحث گردد.

پیوست الف

نانوذرات و روش‌های تولید

نانوتکنولوژی فعالیت در دنیایی با مقیاس نانومتری است. یکی از زمینه‌های فعالیت این فناوری جدید تولید ذرات با ابعاد نانومتری (نانوذرات) است. بنا بر بعضی تعاریف ابعاد نانوذره در حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر می‌باشد. نانوذرات انواع فلزی، اکسیدهای فلزی، عایق‌ها و نیمه هادی‌ها، نانوذرات ترکیبی نظیر ساختارهای هسته لایه را در برمی‌گیرند. باید خاطرنشان ساخت که نانولوله‌های کربنی را نیز می‌توان از اعضاء این خانواده به شمار آورد. نانوذرات دارای خواص منحصر به فردی هستند که آنها را از مواد توده‌ای با ابعاد معمولی و بزرگ متمایز می‌سازد. این خواص منحصر به فرد موجب پیدایش پتانسیل‌های فراوانی برای کاربرد این مواد شده است. از دامنه‌های کاربرد آنها می‌توان به سیستم‌های بیولوژیکی، پزشکی، توزیع دارو در بدن، کاتالیست، سرامیک، الکترونیک و مغناطیس، و محیط زیست و انرژی اشاره کرد. نانو سیال که از مخلوط کردن نانوذرات در یک سیال پایه حاصل می‌شود، از جمله کاربردهای مهم نانوذرات است. این بخش به معرفی فرآیندهای تولید نانوذرات و نانولوله‌ها پرداخته شده است.

الف-۱ سنتز نانوذرات

روش‌های بسیاری برای تولید نانوذرات ابداع و توسعه یافته است. این روش‌ها را می‌توان به دو دسته شیمیایی و فیزیکی تقسیم نمود. هر چند برخی از فرآیندهای تولید را می‌توان در دسته جداگانه‌ای تحت عنوان فرآیندهای مکانیکی-شیمیایی نیز جای داد. در یک دسته‌بندی دیگر روش‌های تولید نانوذرات را می‌توان به فرآیندهای حالت بخار، مایع و جامد نیز تقسیم‌بندی کرد. در این قسمت به معرفی فرآیندهای متداول اعم از فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی، فرآیندهای حالت بخار، مایع و جامد پرداخته می‌شود.

الف-۱-۱ فرآیندهای حالت بخار [۴۷]

فرآیندهای حالت بخار در سنتز نانوذرات را به سه دسته زیر می توان تقسیم کرد.

الف-۱-۱-۱ فرآیند رسوب فیزیکی بخار^۱ PVD

اساس فرآیند رسوب فیزیکی بخار، تولید فاز بخار از ماده مورد نظر از طریق فرآیندهای تبخیر، سایش لیزری^۲ و یا اعمال پرتوهای یونی می باشد. در این فرآیندها اتم ها از سطح ماده کنده شده و وارد فاز بخار می گردند. با اعمال عملیات سرمایش، چگالش بخارات صورت می گیرد. چگالش سریع و ناگهانی یا آرام بخارات در اندازه و توزیع اندازه ذرات تشکیل شده مؤثر خواهد بود.

الف-۱-۱-۲ چگالش گاز خنثی^۳

در فرآیند چگالی گاز خنثی، ماده اولیه درون محفظه ای که تحت خلاء بسیار زیادی قرار دارد در محیط اتمسفری خنثی تبخیر می گردد. بخارات تشکیل شده به طرف نواحی سرد گازهای درون محفظه مهاجرت می نمایند. این بخارها به دلیل برخورد با مولکول های گاز خنثی انرژی خود را از دست می دهند. به دلیل محدودیت حرکتی ایجاد شده به واسطه برخورد بخارات ماده و مولکول های گاز خنثی ناحیه فوق اشباعی حاصل شده و با تجمع بخارات تعداد زیادی خوشه^۴ ایجاد می گردد. در ناحیه سرد این کلاسترها در اثر چگالش تبدیل به نانوذرات می شوند. مهمترین عوامل مؤثر در اندازه، شکل و سرعت رشد کلاسترها را شدت رسیدن مولکول های بخار به ناحیه فوق اشباع، شدت اتلاف انرژی مولکول های بخار داغ و شدت تولید کلاسترها تشکیل می دهند.

الف-۱-۱-۳ فرآیند رسوب شیمیایی فاز بخار^۵ CVD

¹ Physical vapor Deposition

² Laser Ablation

³ Inert Gas Condensation

⁴ Cluster

⁵ Chemical Vapor deposition

رسوب شیمیایی بخار روشی است که در آن جذب سطحی گاز روی سطح داغ برای تولید ماده مورد نظر انجام می گیرد. در این روش ماده موردنظر آنقدر گرم می شود تا بصورت گاز درآید. سپس مولکول های گاز تحت خلاء بر روی یک سطح ایجاد ذرات نانومتری جامد می نمایند.

این فرآیند را می توان برای تولید انواع نانوذرات فلزی اکسیدی و نیز کاربیدهای فلزات بکار برد. تولید ذرات خالص مزیت مهم این روش است. با توجه به منبع مورد استفاده برای فعال سازی واکنش های شیمیایی، فرآیند CVD به سه دسته فرآیند CVD با فعال ساز حرارتی، CVD با فعال ساز لیزری و فرآیند CVD با فعال ساز پلاسما تقسیم بندی می شود.

اگر در فرآیند CVD از فعال ساز حرارتی استفاده شود، دمای بالای لازم برای فرآیند از طریق دیواره های حرارتی راکتور تأمین می گردد. در حالیکه در فرآیند CVD با فعال سازی لیزری از پرتوهای لیزر برای فعال سازی واکنش های شیمیایی استفاده می گردد. این فرآیند امکان کنترل ترکیب رسوب و تولید محصولی با کیفیت مطلوب در دمای کمتر را فراهم می سازد. فرآیند CVD با فعال ساز پلاسما قادر است تا رسوب مورد نظر را در دمای پایین تولید نماید. در این فرآیند می توان از انواع منابع انرژی مانند فرکانس رادیویی، جریان مستقیم یا ماکروویو استفاده کرد.

الف-۱-۲ فرآیندهای حالت مایع و حالت جامد [۴۷]

دسته دیگری از روش های تولید نانوذرات را فرآیندهای حالت جامد تشکیل می دهد. در این روش نانوذرات را از طریق آسیاب کردن و پودر نمودن تهیه می کنند. خواص نانوذرات حاصل از این روش تحت تأثیر نوع گلوله های آسیاب کننده، زمان آسیاب و محیط اتمسفری آن قرار می گیرد. از این فرآیند می-توان برای تولید نانوذراتی استفاده نمود که از طریق فرآیندهای حالت بخار و حالت مایع به آسانی تولید

نمی شوند. از موارد استفاده روش حالت جامد می توان به آلیاژسازی مکانیکی و فرآیندهای شیمیایی- مکانیکی^۱ اشاره کرد.

الف-۱-۳ فرآیند سل ژل^۲

فرآیند سل ژل به هیدرولیز و تراکم پیش مواد با پایه آلکوکسید مانند $Si(OEt)_4$ (تترا اتیل ارتوسیلیکات یا TEOS) اطلاق می شود. فرآیند سل ژل را می توان به یکسری از مراحل مشخص تقسیم کرد: مرحله اول: تشکیل محلول های پایدار آلکوکسید می باشد.

مرحله دوم: تولید ژلاتین از تشکیل یک شبکه پلدار الکلی یا اکسیدی بوسیله واکنش تراکم پلیمری^۳ یا پلی استریفیکیشن^۴ که باعث افزایش تدریجی ویسکوزیته محلول می گردد. در این مرحله می توان ژل را قالب گیری نیز نمود.

مرحله سوم: فرآیند زمان دهی به ژل نامیده می شود. در طول مدت زمانی که واکنش های تراکم پلیمری ادامه دارد تا ژل به توده جامد تغییر شکل دهد، در این فرآیند به سفت شدن بوسیله انقباض شبکه ژل و خروج حلال ها از سوراخ ژل نیز مساعدت می شود. فرآیند زمان دهی به ژل می تواند بیش از هفت روز نیز به طول بیانجامد. زمان دهی بیشتر می تواند باعث ایجاد ترک هایی در ژل قالب گیری بشود.

مرحله چهارم: این مرحله خشک کردن ژل می باشد. این فرآیند به واسطه تغییرات اساسی در ساختار ژل بسیار پیچیده می باشد. فرآیند خشک شدن خود به چهار مرحله مجزا تقسیم بندی می شود: (i) دوره سرعت ثابت (ii) نقطه بحرانی (iii) دوره اولیه افت سرعت (iv) دوره ثانویه افت سرعت. اگر خشک کردن از روش تبخیر گرمایی انجام شود مونولیت حاصل به Xerogel موسوم می باشد، اما اگر حلال تحت شرایط فوق بحرانی یا نزدیک به شرایط بحرانی آن جدا گردد به محصول Aerogel می گویند.

¹ Mechanochemical Synthesis

² Sol – Gel

³ Poly condensation

⁴ Polyesterification

مرحله پنجم: آب گیری- با حذف پیوندهای M-OH از سطح ژل است. ژل در برابر آب گیری مجدد مقاوم می گردد و این مرحله از فرآیند با کلسینه کردن مونولیت در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد انجام می شود.

مرحله ششم: متراکم کردن و تجزیه نمودن ژل در دماهای بالا ($T > 800C$)، می باشد. در این مرحله سوراخ های شبکه ژل پر شده و ذرات آلی باقی مانده تبخیر می شوند.

الف-۱-۳-۱ روشهای سنتز سل ژل

الف-۱-۳-۱-۱ سنتز سل ژل از اکسیدها

تراکم و خشک کردن فوق بحرانی پیش ماده $Zr(NO_3)_4 \cdot 5H_2O$ یا $Zr(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$ در الکل می تواند نانوذرات ZrO_2 با اندازه تقریبی یک نانومتر را تولید کند. کلسینه کردن محصول در دمای $400^\circ C$ نانوذرات کلوخه شده ای با اندازه 2-3 nm و ساختار مرکب تتراگونال-منوکلینیک ایجاد می کند.

کلسینه کردن یک Xerogel یا Aerogel ساختار کریستالی نمونه را بهبود می بخشد اما معمولاً آگلومر شدن را زیاد می کند، این مشکل را می توان با ملایم نگهداشتن شرایط کلسیناسیون مرتفع نمود.

هامده^۱ و همکارانش [۴۸] نانوذرات $Ge_{0.5}Fe_{2.5}O_y$ با ساختار اسپینیلی^۲ را با هیدرولیز مخلوطی از $Fe(OAc)_2$, $Ge(OMe)_4$ و متانل و در ادامه خشک کردن محصول به روش فوق بحرانی تهیه کردند و علیرغم بازپخت^۳ در دمای $500^\circ C$ فقط مقدار کمی از نانوذرات دچار کلوخه شدگی شدند.

لیو^۴ و همکارانش [۴۹] تاثیر نور UV بر روی هیدرولیز و تراکم $Ti(Opr)_4$ را در پروپیل الکل مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که پرتوی UV غلظت نقص اکسیژنی را در TiO_2 آمورف بالا می برد و لذا تبدیل به فرم کریستالی آناتاس^۵ در دماهای پایینی مانند $100^\circ C$ نیز امکانپذیر می باشد.

¹Hamede

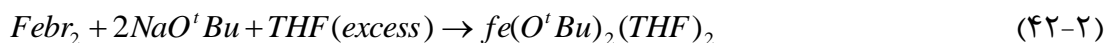
²Spinel- structured

³Annealing

⁴Liu

⁵Anatase

جهت بیان و اثبات مناسب بودن پیش مواد برای تولید شبکه یکنواخت از کاتیون های فلزی مخلوط، یوو و همکارانش نانوذرات 60nm فاز خالص $PbTiO_3$ را از هیدرولیز و تراکم یک پیش ماده حاوی لاکتات سرب $(pb(CH_3CHOHCOO)_2)$ و $Ti(OBu)_4$ و در ادامه کلسینه کردن محصول در دمای ۴۲۰ درجه سانتیگراد یا بالاتر، تهیه نمودند. به طریق مشابه گونکو^۱ و همکارانش [۵۰] نیز پیش ماده مناسب و مخصوص را برای شیمی هیدرولیز/تراکم فرآیند سل ژل تهیه نمودند، در این حالت این پیش مواد دچار جایگزینی آلکوکسیدهای فلزی می شود:



پیش ماده تولید شده در واکنش فوق نهایتاً به وسیله پرتو افکنی اولتراسوند تجزیه و رسوب باقیمانده در دمای 300°C خشک می شود تا نانو ذرات Fe_3O_4 با اندازه تقریباً ۱۵ nm حاصل شود.

به عنوان مثالی از تنوع موادی که می توان از تراکم فلزات هیدرولیز شده به دست آورد، می توان به نانوپودر $BaSnO_3$ با اندازه ۲۰۰-۵۰۰ nm اشاره کرد که با کلسینه کردن یک ژل تشکیل شده بین $Ba(OH)_2$ و k_2SnO_3 در pH=۱۱ حاصل می شود. محصول دارای ناخالص $BaCO_3$ می باشد که می توان آن را در دمای بالای ۱۰۰۰ °C حذف نمود. اما با اعمال این دما تجمع نانو ذرات صورت می پذیرد. در سال های اخیر کاربرد Xerogel ها و Aerogel ها در باطری های انرژی الکتروشیمیایی مورد توجه بسیار زیادی واقع شده است. مساحت بالا و ساختارهای مزوپوروس^۲ مربوط به Xerogel و Aerogel ها باعث می شود تا مقدار انرژی بیشتری نسبت به ترکیبات چگال از همان جنس در خود ذخیره کنند. بیشتر تحقیقات در این زمینه به Aerogel های $RuO_2 - TiO_2, MnO_2, MoO_3, V_2O_5$ محدود شده است.

الف-۱-۳-۱-۲ سنتز سل ژل از ترکیبات معدنی دیگر

^۱Gunko

^۲Mesoporous

اگرچه روش های سل ژل متداولترین روش ها برای سنتز اکسیدها می باشند ولی سنتز کربیدها، نیتريدھا و سولفیدھا نیز به روش سل ژل گزارش شده است. سنتز TiN بوسیله تجزیه گرمایی پیش ماده تیتانیم آلکوکسی هیدرازید انجام می شود. پیش ماده مذکور را از افزایش هیدرازین بدون آب به تیتانیم (IV) ایزوپروپوکسید در استونیتریل بدون آب و به دست آوردن کمپلکس $Ti(Opr)_{0.83}(N_2H_3)_{1.17}(NH)_23CH_3CN$ و در ادامه تجزیه پیش ماده تحت اتمسفر نیتروژن در دمای $1000^{\circ}C$ تولید می کنند.

عدم حضور اکسیدھا در محصول، مایه تعجب می باشد و دانشمندان این مسئله را به حضور کربن (مربوط به CH_3CN) که از کریستالیزاسیون یک فاز اکسیدی ممانعت به عمل می آورد، نسبت داده اند. نانوذرات کلوخه شده NbS_2, TiS_2 را می توان توسط واکنش $Ti(OPr)_4$ یا $Nb(OEt)_5$ یا H_2S در محلول های بنزن و استونیتریل و سپس آلکوکسی سولفیدھا فلزی را در دمای $600^{\circ}C - 800^{\circ}C$ و تحت جریان گاز H_2S به سولفیدھا فلزی تبدیل نمود.

الف-۱-۴ تولید نانوذرات با استفاده از روش سیال فوق بحرانی

اخیراً سیال های فوق بحرانی یا گازهای فشرده به عنوان یک محیط مناسب برای انجام فرآیند تبلور و تولید نانوپودرها پیشنهاد شده اند. یک سیال فوق بحرانی ترکیبی است که در دما و فشار بالاتر از نقطه بحرانی خود قرار دارد. به عنوان مثال سیال فوق بحرانی مورد استفاده می تواند کربن دی اکسید باشد که علاوه بر ارزان بودن، اثر آلایندهی نیز ندارد و پارامترهای بحرانی آن $(T_c = 31.1^{\circ}C, P_c = 73.9bar)$ در یک دستگاه صنعتی به سادگی قابل حصول است. استفاده از سیال فوق بحرانی، کنترل دقیق فرآیند تبلور و توانایی تولید ذرات بسیار ریز و یکسان (از نظر اندازه) با مورفولوژی های مناسب را فراهم می آورد. همچنین وجود خواصی نظیر نفوذ شبه گازی آن و امکان حذف کامل آن در انتهای فرآیند، باعث جلب

توجه زیاد به سمت آن شده است. به طور کلی این سیال ها در تکنولوژی های تولید نانوپودرها، در سه حالت جسم حل شونده، ضد حلال و کمک حلال مصرف می شوند.

الف-۱-۴-۱ روش های تولید نانوپودرها بر پایه سیال فوق بحرانی [۵۱] [۵۲]

الف-۱-۴-۱-۱ انبساط سریع سیال فوق بحرانی

انبساط سریع سیالات فوق بحرانی یک نوع فرآیند تبلور است که از خواص یک سیال فوق بحرانی مثل CO_2 به عنوان یک حلال برای تسهیل تولید نانوپودر استفاده می کند. فرآیند انبساط سریع سیالات فوق بحرانی از طریق وارد کردن CO_2 مایع با دما و فشار بالا به منظور دستیابی به سیال فوق بحرانی آغاز می شود.

سیال فوق بحرانی سپس در اتوکلاو با حل شونده مخلوط می شود. در این سیستم، سرعت جریان تا زمانی مهم است که تعادل ترمودینامیکی برقرار نباشد. مرحله بعدی مستلزم کاهش فشار مخلوط از فشار بالا به فشار اتمسفری به وسیله نازل است. این کاهش سریع فشار موجب هسته زایی (به وسیله کاهش قدرت انحلال حلال) می شود. زمانی که CO_2 گازی در شرایط محیط قرار می گیرد، مواد حل شوند رسوب می کنند و در یک مخزن جمع می شوند. سپس CO_2 از طریق یک دریچه به بیرون از محفظه منتقل، و نهایتاً تصفیه و بازیافت می شود. مورفولوژی نانوپودرها و کریستال ها هر دو به ساختار ماده و پارامترهای حاکم بر فرایند انبساط سریع سیالات فوق بحرانی (دما، افت فشار، هندسه نازل و...) وابسته است. از جمله محصولات می توان به تولید ریز ذرات پلیمری نظیر پلی کاپرولاکتون و پلی متیل متاکریلات، تولید نانوذرات *CdS* (سولفید کادمیم)، تولید نانوپودرهای سرامیکی از جمله آلومینا و سیلیس اشاره نمود. فرآیند انبساط سریع سیالات فوق بحرانی دارای مزایای متعددی است. هر چند این فرآیند در فشارهای بالا اتفاق می افتد اما دمای مورد نیاز نسبتاً پایین است. مزیت دیگر این فرآیند نبود خطرات محیطی است. البته بزرگترین مزیت آن قابلیت ساخت ذرات بسیار کوچک در مقیاس میکرو و نانو با توزیع اندازه

ذرات مناسب و عاری از حلال است. از معایب اصلی فرآیند می توان به نسبت بالای گاز/ ماده به واسطه حلالیت پایین ماده، نیاز به فشار بالا و مشکل جدایش ذرات زیر میکرون از حجم بزرگی از گاز در مقیاس صنعتی اشاره کرد.

الف-۱-۴-۱-۲ فرآیند ضد حلال فوق بحرانی

فرآیند ضد حلال فوق بحرانی از سیستم های دوتایی حلال / ضدحلال برای تولید میکروپودرها و نانوپودرها استفاده می کنند. در این روش، سیال فوق بحرانی (به طور مثال CO_2) به عنوان یک ضد حلال عمل کرده و باعث متبلور شدن جسم حل شونده می شود. دو تکنیک اساسی برای این فرآیند وجود دارد که در ذیل شرح داده می شوند.

۱- عملیات ناپیوسته

در این تکنیک یک سیال فوق بحرانی، به عنوان ضد حلال سبب ترسیب جامدات می شود. جامدات ابتدا در یک مایع حل می شوند و یک سیال برای ترسیب ذرات جامد افزوده می شود. افزایش سریع سیال، موجب کاهش ناگهانی دانستیه مایع و انبساط حجمی آن شده و باعث می شود که مخلوط مایع به حالت فوق اشباع برسد. و ماده حل شونده به صورت ذرات میکرو یا نانومتری رسوب کند. مزیت این تکنیک کنترل اندازه ذرات از طریق سرعت تزریق ضد حلال، غلظت اولیه مواد در محلول و دما است. در فرآیند ناپیوسته، پروفیل انبساط حجمی مایع تابعی از دما، پروفیل فشار، نوع حلال و ضد حلال و قدرت همزن است.

۲- عملیات نیمه پیوسته یا پیوسته

به طور کامل در تکنیک های ضد حلال ناپیوسته به دلیل حذف شدن فاز مایع، تکنیک ضد حلال پیوسته توسعه داده شده است. در تکنیک های ضد حلال پیوسته مثلاً سیستم های استخراج حلال آیروسل،

فازهای مایع و فوق بحرانی به طور پیوسته به داخل یک محفظه وارد می شوند. قطرات مایع خیلی کوچک، در ابعاد زیر میلی متر، با یک مقدار مازاد از سیال فوق بحرانی برخورد می کنند. در فرآیند ضد حلال پیوسته برای تولید قطرات مایع کوچک در نازل، محلول مایع در فشار 20 bar بیشتر از فشار کاری محفظه تبلور پمپ می شود. محدوده اندازه ذرات تولید شده از ۱ تا ۲۵۰ میکرون قابل تغییر است. در فرآیند ضد حلال پیوسته، اثر متغیرهای دما، فشار، غلظت محلول تزریقی، طبیعت حلال های مایع و سیال فوق بحرانی بر خواص فیزیکی محصول بررسی و بهینه می شود. از فرآیند ضد حلال فوق بحرانی برای تولید ترکیبات منفجره، کاتالیست ها، ابر رساناها، پلیمرها، نانواسفرها یا میکرواسفرها، میکروفیبرهای با قطرهای $0.01 \mu\text{m}$ و بیشتر و برخی ترکیبات دارویی استفاده می شود.

الف-۱-۴-۳ تولید ذره از طریق فرآیند محلول اشباع گازی

در تولید ذره از طریق فرآیند محلول اشباع گازی، از یک سیال فوق بحرانی به عنوان جسم حل شونده برای ایجاد تبلور در یک محلول استفاده می شود. فرآیند محلول اشباع گازی برای ساخت نانوذرات با توانایی کنترل توزیع اندازه ذرات به کار برده می شود. نیروی محرکه فرآیند محلول اشباع گازی افت ناگهانی دمای محلول تا زیر نقطه ذوب حلال است. با این عمل محلول از فشار کاری به شرایط اتمسفری تغییر وضعیت می دهد که در نتیجه آن می توان اثر ژول تامسون را مشاهده کرد. سرمایش سریع محلول موجب تبلور جسم محلول شده و هسته زایی هموزن برای تشکیل ذرات به وجود می آید. فرآیند محلول اشباع گازی یک فرایند دو مرحله ای است.

در این فرآیند محلولی از ذوب کردن محصول مورد نظر تحت اثر سیال فوق بحرانی ایجاد می شود. این شرایط موجب افزایش حلالیت سیال فوق بحرانی در محلول مایع حاصل می شود به طوری که یک محلول اشباع گازی به دست می آید. در این مرحله محلول به تعادل و یکنواختی می رسد و سپس تا

شرایط اتمسفر منبسط می شود. یک فیلتر در محفظه انبساط پودرهای تولید شده را جمع آوری می کند. محصول به دلیل عاری بودن از حلال نیاز به شست و شو ندارد و می توان سیال فوق بحرانی را در صورت نیاز برگشت داد. محققان اثرات چشمگیر تغییرات فشار بر روی مورفولوژی ذرات را نشان داده اند. در فشارهای بالاتر (۱۶-۱۸ Mpa) مورفولوژی ذرات حاصل به صورت کروی خواهد بود. وقتی فشار به ۱۲-۱۴ Mpa افت می کند مورفولوژی به طور چشمگیری تغییر می کند. ذرات حاصل پهن تر هستند و برجستگی های سطح آن ها گسترش می یابد. این برجستگی ها میخی شکل هستند و در نتیجه افت فشار تمایل به بزرگتر شدن دارند.

به علاوه، کاهش فشار باعث افزایش تجمع و انباشتگی ذرات می شود. این اختلاف در مورفولوژی ها می تواند به واسطه تفاوت در شروع هسته زایی باشد. در فشارهای پایین تر هسته زایی در فرآیند انبساط سریع سیالات فوق بحرانی زودتر شروع می شود و این امر موجب به وجود آمدن ساختارهایی رشته مانند خواهد شد. جهت به دست آوردن ذرات کروی نیاز به فشارهای بالاتر است. بنابراین هسته زایی در فرآیند انبساط دیرتر شروع می شود. اگرچه تغییر فشار تأثیر قابل توجهی در مورفولوژی ذرات دارد اما هیچ اثری روی اندازه یا توزیع اندازه ذرات ندارد. مزیت مهم فرآیند محلول اشباع گازی نیاز آن به فشار پایین تر در مقایسه با انبساط سریع سیالات فوق بحرانی، مصرف پایین تر گاز به دلیل نسبت های کمتر گاز در مایع و توانایی تشکیل نانوپودرها بدون نیاز به حلال است که هزینه های عملیاتی را به دو دلیل کاهش می دهد: اولاً اینکه نیاز به حلال های شیمیایی گران کاهش می یابد. ثانیاً به دلیل به کار نرفتن حلال ها محصول از خلوص بالایی برخوردار است و نیازی به حذف باقی مانده حلال نیست. یکی از عیوب فرآیند محلول اشباع گازی، نیاز به یک سیال فوق بحرانی است که بایستی در داخل یک حلال حل شود. عیب دیگر فرآیند محلول اشباع گازی در مشکلات مربوط به حل کردن یک سیال فوق بحرانی داخل چندین حلال با حلالیت های متفاوت سیال فوق بحرانی است.

الف-۱-۴-۱-۴ کاهش فشار محلول آلی مایع منبسط شده

برخلاف هر روش دیگر روش کاهش فشار محلول آلی مایع منبسط شده، فرآیندی است که برای تشکیل نانوپودرها از یک سیال فوق بحرانی به عنوان کمک حلال استفاده می کند. فرآیند کاهش فشار محلول آلی مایع منبسط شده برای حل شونده های آلی در حلال های آلی و مخصوصاً برای تولید پلیمرها، رنگ ها و ذرات دارویی مفید است. نیروی محرکه این فرآیند افت شدید و سریع دما است. این اتفاق وقتی رخ می دهد که محلول فشرده شده از فشار عملیاتی تا فشار اتمسفر منبسط شود. به دلیل اینکه سیستم قبل از شروع انبساط برای رسیدن به تعادل تلاش می کند، لذا افت فشار و دما در سراسر محلول یکنواخت است. این افت سریع دما به علت کاهش ظرفیت اشباع محلول باعث تبلور ذرات حل شده می شود. کاهش فشار محلول آلی مایع منبسط شده دارای فرآیندی سه مرحله ای است. مرحله اول عبارت از انحلال ماده حل شونده در داخل حلال آلی است. انجام این مرحله در درون یک محفظه مقاوم به فشار صورت می گیرد. این محفظه برای به دست آوردن دمای عملیاتی مورد نیاز گرم می شود. وقتی مرحله اول کامل شد، سیال فوق بحرانی پیش گرم شده داخل حلال حل می شود تا فشار عملیاتی مورد نیاز حاصل شود. در این حال زمان کافی برای محلول سه جزئی فراهم می شود تا به تعادل و دمای کار برسد. بعد از رسیدن به تعادل، محلول در فشار اتمسفری منبسط می شود. نیتروژن خالص در داخل محفظه محلول پمپ می شود تا فشار عملیاتی را در مدت انبساط حفظ کند. یک فیلتر در بالای محفظه انبساط قرار می گیرد تا پودرهای حل شده را جمع کند. پودرهای حاصل می توانند با استفاده از سیال فوق بحرانی شست و شو شوند و حلال های مورد استفاده در این فرآیند نیز به آسانی جدا و در صورت نیاز برگشت داده شوند.

اگر فرآیند تبلور از طریق کاهش فشار محلول آلی مایع منبسط شده به یک افت دمای بزرگ وابسته باشد بازده روش می تواند از طریق افزایش مقداری از سیال فوق بحرانی مورد استفاده زیاد شود. با این وجود مشکل محدودیت در مقدار مورد استفاده از سیال فوق بحرانی وجود دارد. اگر این محدودیت بروز کند

فرآیند کاهش فشار محلول آلی مایع منبسط شده امکان ناپذیر خواهد بود و در عوض تبلور از طریق فرآیند ضد حلال فوق بحرانی اتفاق می افتد. وقتی غلظت سیال فوق بحرانی به غلظت محدود کننده می رسد، اندازه ذرات و توزیع اندازه ذرات به حداقل می رسد. بنابراین کنترل اندازه ذرات از طریق کنترل غلظت سیال بحرانی امکان پذیر است. از طریق این روش ذراتی در مقیاس نانو، میکرو و ماکرو قابل دست یابی خواهند بود.

روشهای سنتز نانوذرات معدنی در فاز مایع به روش های مذکور محدود نبوده و فرآیندهای دیگری نیز در این دسته بندی جای می گیرند.

- [1] Maxwell, J. C., (1954), *Treatise on Electricity and Magnetism*, Dover, New York.
- [2] Ahuja, A. S., (1974), "Measurement of thermal conductivity of stationary blood by unsteady-state method" **J. Appl. Physiol.**, 37(5), pp. 765–770.
- [3] Ahuja, A. S., (1975), "Augmentation of Heat Transport in Laminar Flow of Polystyrene Suspensions," **J. Appl. Phys.**, 46, pp. 3408–3416.
- [4] Hamilton, R. L., and O. K. Crosser (1962). "Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems", **Ind. Eng. Chem. Fundam.**, 1: 187–191.
- [5] Maxwell-Garnett, J. C., (1904), "Colours in Metal Glasses and in Metallic Films," **Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A**, 203, pp. 385–420.
- [6] Masuda, H., Ebata, A., Teramae, K., and Hishinuma, N., (1993), "Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles (Dispersion of Al₂O₃, SiO₂, and TiO₂ Ultra-Fine Particles)," **Netsu Bussei**, 4(4), pp. 227–235.
- [7] Choi, S. U. S., D. A. Siginer and H. P. Wang, eds., (1995), "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles," **Developments and Applications of Non-Newtonian Flows**, American Society of Mechanical Engineers, New York.
- [8] Eastman, J., Choi, S. U. S., Li, S., Yu, W., and Thompson, L. J., (2001), "Anomalously Increased Effective Thermal Conductivities of Ethylene-Glycol-Based Nanofluids Containing Copper Nanoparticles," **Appl. Phys. Lett.**, 78(6), pp. 718–720.
- [9] Choi, S. U. S., Z.G. Zhang, W. Yu, F.E. Lockwood, and E. A. Grulke (2001). "Anomalous thermal conductivity enhancement in nano-tube suspensions", **Appl. Phys. Lett.**, 79: pp. 2252–2254.
- [10] Eastman, J. A., S. U. S. Choi, S. Li, L. J. Thompson, and S. Lee (1997). "Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids", **Proc. Symposium Nanophase and Nanocomposite Materials II**, Materials Research Society, Boston, MA, 457: pp. 3–11.
- [11] Jang, S. P., and S. U. S. Choi (2004). "Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids", **Appl. Phys. Lett.**, 84: pp. 4316–4318.
- [12] Keblinski, P., S. R. Phillpot, S. U. S. Choi, and J. A. Eastman (2002). "Mechanisms of

Heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids)”, **Int. J. Heat and Mass Transfer**, 45: pp. **855–863**.

[13] Keblinski, P., J. A. Eastman, and D.G. Cahill (2005). “Nanofluids for thermal transport”, **Mater. Today**. June, pp. **36–44**.

[14] Das, S. K., N. Putra, P. Thiesen, and W. Roetzel (2003). “Temperature dependence of Thermal conductivity enhancement for nanofluids”, **J. Heat Transfer**, 125: pp. **567–574**.

[15] Wang, X., X. Xu, and S. U. S. Choi (1999). “Thermal conductivity of nanoparticle fluid mixture”, **J. Thermophys. Heat Transfer**, 13: pp. **474–480**.

[16] Xie, H. Q., Wang, J. C., Xi, T. G., Liu, Y., Ai, F., and Wu, Q. R. (2002). “Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles”, **J. Appl. Phys.**, 91: pp. **4568–4572**.

[17] Xue, Q. Z. (2003). “Model for effective thermal conductivity of nanofluids”, **J. Phys. Lett. A**, 307: pp. **313–317**.

[18] Xie, H., J. Wang, T. Xi, and Y. Liu (2002). “Thermal conductivity of suspensions containing nanosized SiC particles”, **Int. J. Thermophys.**, 23 (2): pp. **571–580**.

[19] Buongiorno, J., (2006), “Convective Transport in Nanofluids,” **ASME J. Heat Transfer**, 128, pp. **240–250**.

[20] Zeinali Heris, S., Etemad, S.Gh., Nasr Esfahany, M., (2006). “Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer”, **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 33: pp. **529–533**.

[21] Zeinali Heris, S., Nasr Esfahany, M., and Etemad, S. Gh., (2007), “Experimental Investigation of Convective Heat Transfer of Al₂O₃/Water Nanofluid in Circular Tube,” **Int. J. Heat Fluid Flow**, 28, pp. **203–210**.

[22] Wen, D., and Ding, Y., (2005) “Effect of Particle Migration on Heat Transfer in Suspensions of Nanoparticles Flowing Through Minichannels,” **Microfluid. Nanofluid.**, 1(2), pp. **183–189**.

[23] Pak, B. C., and Cho, Y. I., (1998), “Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles,” **Exp. Heat Transfer**, 11(2), pp. **151–170**.

[24] Xuan, Y., and Li, Q., (2003), “Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids,” **ASME J. Heat Transfer**, 125(1), pp. **151–155**.

- [25] Xuan, Y., and Roetzel, W., (2000), “Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids,” **Int. J. Heat Mass Transfer**, 43(19), pp. 3701–3707.
- [26] Williams, W. C., (2007), “Experimental and Theoretical Investigation of Transport Phenomena in Nanoparticle Colloids (Nanofluids)”, *Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology*, Cambridge, MA.
- [27] Das, S. K., N. Putra, and W. Roetzel (2003). “Pool boiling characterization of nanofluids”, **Int. J Heat Mass Transfer**, 46: pp. 851–862.
- [28] Das, S. K., N. Putra, and W. Roetzel (2003). “Pool boiling nano-fluids on horizontal narrow tubes”, **Int. J Multiphase Flow**, 29: pp. 1237–1247.
- [29] Choi, S.U.S., (2002), “Two are better than one in nanofluids”, *Argonne National Laboratory*, <http://at.knu.ac.kr/Colloquium.pdf>
- [30] Putra, N., Roetzel, W., Das, S. K. (2003), “Natural Convection of Nanofluids”, **Heat Mass Transfer**, 39: pp. 775–780.
- [31] Tzeng, S. C., Lin, C. W. and Huang, K. D., (2005). “Heat Transfer Enhancement of Nanofluidic in Rotary Blade Coupling of Four-wheel-Drive Vehicles”. **Acta Mechanica** 179: pp. 11-23.
- [32] Zhang, Z., and Que, Q., (1997). “Synthesis, Structure and Lubricating Properties of Dialkyldithiophosphate-Modified Mo-S Compound Nanoclusters”. **Wear** 209: pp. 8-12.
- [33] Tsai, C. Y., H. T. Chien, P. P. Ding, B. Chen, T. Y. Luh, P. H. Chen (2004). “Effect of Structural Character of Gold Nanoparticles in Nanofluid on Heat Pipe Thermal Performance”, **Materials Letters**, 58: pp. 1461-1465.
- [34] Ma, H. B., Wilson, C., Borgmeyer, B., Park, K., Yu, Q., Choi, S. U. S., and Tirumala, M., (2006). “Effect of Nanofluid on the Heat Transport Capability in an Oscillating Heat Pipe”. **Applied Physics Letters**, 88: 143-160.
- [35] You, S. M., Kim, J. H., and Kim, K. H., (2003). “Effect of Nanoparticles on Critical Heat Flux of Water in Pool Boiling Heat Transfer”. **Applied Physics Letters**, 83: pp. 3374-3376.
- [36] Vassallo, P., Kumar, R. and D’Amico, S., (2004). “Pool Boiling Heat Transfer Experiments in Silica-Water Nano-Fluids”, **International Journal of Heat and Mass Transfer** 47: pp. 407-411.

- [37] Jordan, A., Scholz, R., Wust, P., Fahling, H., and Felix, R., (1999). “Magnetic Fluid Hyperthermia (MFH): Cancer Transment with AC Magnetic Field Induced Excitation of Biocompatible Superparamagnetic Nanoparticles”. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 201: pp. 413-419.
- [38] Yu, W., France, D. M., Routbort, J. L., Choi, S. U. S., (2008), “Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements”, **Heat Transfer Engineering**, 29(5): pp. 432–460.
- [39] Lee, S., Choi, S. U. S., Li, S., Eastman, J. A., (1999), “Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles”. **ASME J Heat Transfer**, 121: pp. 280–289.
- [40] Xuan, Y. and Li, Q., (2000), “Heat transfer enhancement of nanofluids”. **Int J Heat Fluid Flow**, 21: pp. 58–64.
- [41] Wang, B. X., Zhou, L. P., Peng, X. F., (2003), “A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles”. **Int J Heat Mass Transfer**, 46: pp. 2665–2672.
- [42] Yu, W., Choi, S. U. S., (2003), “The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model”, **J Nanoparticle Res**, 5: pp. 167–171.
- [43] Zhou, D. W., (2004), “Heat transfer enhancement of copper nanofluid with acoustic cavitation”. **Int J Heat Mass Transfer**, 47: pp. 3109–3117.
- [44] Gnielinski, V., (1976), “New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow”, **Int. Chem. Eng.** 16: pp. 359-365.
- [45] Incropera, F.P., DeWitt, D.P., (2002), *Introduction to Heat Transfer*, **John Wiley & Sons**, New York. pp. 459–463.
- [46] Zhou, S.-Q., and Ni, R., (2008), “Measurement of the Specific Heat Capacity of Water-Based Al₂O₃ Nanofluid,” **Appl. Phys. Lett.**, 92: pp. 93–100.
- [47] Nalawa, H. S., (2002), *Nanostructured materials and nanotechnology*, Academic Press.
- [48] Hamada, N., Sawada, S., Oshiyama, A., (1992), “New one-dimensional conductors: Graphitic microtubules”, **Phys. Rev. Lett.**, pp. 68-79.

[49] Liu, M. S., Lin, M. C. C., Wang, C. C., (2005), "Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids", **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 32: pp. 1202-1208.

[50] Gun'ko, Y. K., Pillai, S. C., McInerney, D., (2001) "Magnetic Nanoparticles and nanoparticle assemblies from metallorganic precursors", **J. Master. Sci. Mater. Electron**, 12: pp. 299-303.

[۵۱] روح الله مهدی نواز اقدم، اکبر صمدی، سید علی زمزمی، بررسی روش‌های تولید نانوپودرها با

استفاده از سیالات فوق بحرانی، مهدی گنجعلی خسروشاهی، <http://nano.ir>.

[۵۲] سیروس قطبی، وحید تقی خانی، ابراهیم نعمتی، کاربرد فرایندهای فوق بحرانی در تولید

میکرو و نانوذرات، <http://nano.ir>.

Abstract:

Nanofluid is prepared by stable dispersing of nanoparticles in base fluid. In this thesis, the convective heat transfer and pressure drop characteristics of alumina/water and titania/water nanofluids flowing inside a horizontal circular tube were studied experimentally. To do this, a flow loop facility was constructed to conduct the experiments that the assumed boundary condition of the test section was the constant heat flux in the wall. The Al_2O_3 nanoparticles in 40 nm and the TiO_2 nanoparticles in 15 nm were prepared and dispersed in distilled water to form stable suspension containing 0.1%, 0.5%, 1.0%, 1.5% and 2.0% volume concentrations of nanofluids. Results indicated that heat transfer and Nusselt number increase with addition of nanoparticles and the enhancement increases with increasing the volume concentration. The maximum enhancement of the Nusselt number was about 22% at $\text{Re}=13500$ using 2% alumina nanoparticles. However the enhancement for titania nanoparticles was approximately 8% at $\text{Re}=11800$.

One differential pressure transmitter is also employed to measure the differential pressure between inlet and outlet of the tube. The measured pressure drop using nanofluids is almost equal to that of the base fluid. These experiments are also performed with water and the results compared to those obtained with nanofluids. Moreover, the experimental results are also compared to predictions made using the existing single-phase correlations of convective heat transfer coefficient and pressure drop in turbulent regime.

In general, if the measured temperature and valume dependent thermal conductivities and viscosities of the nanofluids are used in calculating the Reynolds, Prandtl, and Nusselt numbers, the existing correlations accurately predict the convective heat transfer and pressure drop behavior in tubes.

Key words: Nanofluid - Experimental Investigation - Convective Heat Transfer - Pressure Drop - Nanoparticle



**Shahrood University of Technology
Department of Mechanical Engineering**

**Experimental Investigation of Heat Transfer and
Pressure Drop of Nanofluid in a Forced Convective
Flow through a Horizontal Tube**

Hamed Soltanzadeh

**Supervisor:
Dr. Mohammad Hasan Kayhani**

**Co-Supervisors:
Prof. Farshad Kowsari
Dr. Mohsen Nazari**

May 2011