بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

بررسی تجربی انتقال حرارت جوشش فیلمی حول استوانه نقره ای داغ غوطه ور در نانو سیال

پایان نامه کارشناسی ارشد تبدیل انرژی

حامد حبیبی خوشمهر

استاد راهنما

دکتر احمد صابونچی

۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته تبدیل انرژی آقای حامد حبیبی خوشمهر

تحت عنوان

بررسی تجربی انتقال حرارت جوشش فیلمی حول استوانه نقره ای داغ غوطه ور در نانو سیال

در تاریخ ۱۳۹۰/۰۲/۱۳ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر احمد صابونچی
۲- استاد مشاور پایان نامه	دکتر محمد بهشاد شفیعی
۳- استاد داور	دکتر احمد صداقت
۴- استاد داور	دکتر محمدرضا سلیم پور
سرپرست تحصیلات تکمیلی	دکتر سعید ضیایی راد

تقدیر و تشکر

پروردگارا:

اعتراف می‌کنم که نه زبان شکر تو را دارم و و نه توان تشکر از بندگانت را.

از کلیه اساتید ارجمندم در طول سالهای به یاد ماندنی شاگردیشان تشکر می‌نمایم. از اساتید محترم جناب آقای دکتر صابونچی و دکتر بهشاد شفیعی برای راهنمایی، مشاوره و هدایت این پایان‌نامه سپاسگذارم.

و در پایان از خانواده‌ام بویژه پدر، مادرم و همچنین برادر، فرشتگانی که بالهای محبت خود را گسترانیدند و با تحمل دشواری‌ها، سبب شدند تا در کمال آسودگی خیال و فراغت بال، شوق آموختن در من زنده بماند صمیمانه سپاسگزارم و این نیست جز جلوه‌ای از لطف و رحمت پرودگاری که از ادای شکر حتی یک نعمت او ناتوانم.

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

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب.....شش
چکیده ۱

فصل اول: جایگاه و اهمیت نانوسیال ها

۱-۱ مقدمه.....۳
۱-۲ نحوه آماده سازی نانو سیال ۳
۱-۲-۱ مواد مورد استفاده به عنوان نانوذره وسیال ۳
۱-۲-۲ روشهای تولید نانوذرات.....۳
۱-۲-۳ تعلیق نانوذرات در مایعات.....۴
۱-۳ یافته های تجربی ۵
۱-۳-۱ هدایت گرمایی.....۵
۱-۳-۲ لزجت (ویسکوزیته).....۱۱
۱-۳-۲ انتقال حرارت جابجایی.....۱۵
۱-۴- جمع بندی.....۱۷

فصل دوم: انتقال حرارت جوششی

۲-۱- مقدمه ۱۸
۲-۲- جوشش فیلمی با جابجایی طبیعی بر روی استوانه افقی ۱۹
۲-۳- جوشش گذرا.....۲۶
۲-۴- جوشش هسته ای ۲۶

فصل سوم: انتقال حرارت جوششی در نانو سیالات

۳-۱ – مقدمه.....۲۸
۳-۲ جوشش هسته ای و شار حرارتی بحرانی.....۳۱
۳-۳ جوشش فیلمی.....۳۵

فصل چهارم: کارهای تجربی و نتیجه گیری

۴-۱- مقدمه ۳۸

۴-۲- تئوری ۳۹

۴-۳- دستگاه آزمایش ۳۹

۴-۳-۱- نمونه های آزمایش ۴۲

۴-۳-۲- اهمیت و جایگاه نانوسیالات مورد استفاده ۴۶

۴-۴- روند آزمایش ۵۴

۴-۴-۱- توضیح مشاهدات در حین انجام آزمایش ۵۵

۴-۵- آزمایش های انجام شده ۵۶

۴-۵-۱- آب دی-یونیزه ونانو سیال نانوتیوب های کربنی ۵۷

۴-۵-۲- نانو سیال های مختلف ۶۸

۴-۵-۳- نانوسیال فرو ۷۰

۴-۶- تحلیل خطا ۷۶

۴-۶- جمع بندی نتایج ۷۷

۴-۷- پیشنهادها ۷۸

مراجع ۷۹

چکیده

افزایش انتقال حرارت یکی از اساسی ترین نیازها در بسیاری از تکنولوژیهای رایج و مورد استفاده در صنایع می باشدکه این در مواردی تنها با تغییر فاز سیال خنک کن میسر می باشد. بسیاری از سیستمهای مهندسی نظیر ایستگاههای انتقال قدرت شامل مسائل مرتبط با جوشش می باشند. براین اساس بسیاری از تکنیکها برای بهبود انتقال حرارت جوششی فرض شده و مورد مطالعه قرار گرفته است. پیشرفتهای اخیر در زمینه نانوتکنولوژی سبب ایجاد گرایش جدیدی در زمینه انتقال حرارت گردیده است. نانوسیالات معمولا سبب افزایش انتقال حرارت در مقایسه با سیالات معمول نظیر آب ، اتیلن گلیکول و روغن می شوند. لذا در استفاده از نانوسیالات برای خنک کاریها باید مراقب مشخصه های جوشش آنها بود. بسیار مهم است که رفتار نانوسیالات را تحت این نوع شرایط تغییر دما به دقت بدانیم تا از اثرات ناخواسته که سبب دگرگونی خواص و عدم اطمینان به مشخصه های خنک کاری می شود ، جلوگیری کنیم. بدین منظور ، مطالعه و فهم مشخصه های انتقال حرارت جوششی نانوسیالات در جایگاه حاضر بسیار حائز اهمیت است.هدف از انجام این پژوهش بررسی انتقال حرارت جوشش فیلمی برروی استوانه داغ نقره ای (به قطر یک سانتیمتر وطول ده سانتیمتر)غوطه ور در نانوسیال و آب می باشد.در این بررسی تغییرات دما در مرکز استوانه با دقت ثبت گردیده و از این طریق میزان شارحرارتی از استوانه به سیال در هر لحظه محاسبه می گردد. از روش انتقال حرارت معکوس در انجام آزمایش با فرض دمای یکنواخت استوانه استفاده گردید. فرض هم دمایی استوانه نقره ای با روش ظرفیت فشرده($Bi\cdot 0.1$) با استفاده از داده های تجربی و تئوری مورد بررسی قرار گفت وشرط را به خوبی ارضا نمود. از دو استوانه نقره ای با زبری های متفاوت جهت بررسی اثر زبری بر جوشش نانوسیال ها استفاده گردید. زبری سطوح توسط میکروسکوپ AFM اندازه گیری گردید. سطوح به ترتیب دارای زبری متوسط ۱۲۹ و ۶۹۰ نانومتر بودند. مشاهده گردید همین اختلاف کم در زبری های سطوح سبب اختلاف قابل توجه در زمان سرد شدن استوانه های نقره ای گردید. در این بررسی از نانوسیال های: نانو لوله های کربنی، کربن(الماس)، نقره و اکسید آهن در سیال پایه آب استفاده گردید. تقریبا در تمامی موارد میزان انتقال حرارت نسبت به آب کمتر بود، که این پدیده تابع نوع ذره، ته نشینی ذرات روی سطح داغ، خواص تشعشعی سطح انتقال حرارت، فعال کننده های سطح و غلظت نانوسیال می باشد. به منظور بررسی ته نشینی نانوذرات روی سطح داغ قبل و بعد از انجام آزمایش ها توسط میکروسکوپ SEM تصاویری از سطح نمونه گرفته شد. در نانوسیال اکسید آهن با اعمال میدان مغناطیسی، اثر میدان بر میزان انتقال حرارت جوششی مورد بررسی قرار گرفت. توزیع میدان مغناطیسی با استفاده از نرم افزار Femm شبیه سازی گردید و نحوه حرکت ذرات در میدان مغناطیسی با روش PIV به دست آمد. نتایج افزایش قابل ملاحظه در میزان انتقال حرارت جوششی را نشان دادند.

کلمات کلیدی: جوشش؛ نانوسیال؛ زبری سطح جوشش؛ نانو لوله های کربنی؛ میدان مغناطیسی

فصل اول

جایگاه و اهمیت نانوسیال ها

۱-۱ مقدمه

قابلیت خنک کاری بسیار بالا یکی از نیازهای حیاتی بسیاری از صنایع و تکنولوژی ها می باشد. با این وجود، قابلیت هدایت گرمایی[1] پایین مایعات (در مقایسه با جامدات که معمولا تشکیل دهنده اجزائ تجهیزات صنعتی می باشند) اولین محدودیت در راه رسیدن به این قابلیت بالا در انتقال حرارت می باشد. فن آوری نانو قادر به تولید ذرات فلزی یا غیر فلزی در ابعاد نانومتر می باشد. مواد نانو دارای خواص مکانیکی، اپتیکی، الکتریکی، مغناطیسی و گرمایی برتری می باشند. نانوسیالات با معلق کردن ذرات نانو با قطر متوسط کمتر از ۱۰۰ نانومتر در سیالهای متداول برای انتقال حرارت نظیر آب، روغن و اتیلن گلیکول می باشند. مقدار بسیار کمی از ذرات نانو با قرار گرفتن به صورت همگن در سیال پایه و پایدار ماندن در آن، می توانند بهبود بسیار چشمگیری خواص گرمایی سیال ایجاد نمایند. نانوسیالها (نانوذرات معلق در مایع) اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط چوی[2] ساخته شدند تا بحث جدید فن آوری نانو را در ترکیب با مسائل انتقال حرارت مورد بررسی قرار دهند. هدف نانوسیالات دستیابی به بالاترین خواص گرمایی ممکن با معلق سازی ذرات جامد (کمتر از ۱٪ حجمی) بصورت همگن و پایدار (با قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر) در سیال پایه می باشند. برای رسیدن به این هدف بسیار ضروریست که در یابیم چگونه نانو ذرات، انتقال انرژی در مایعات را بهبود می بخشند [۱].

---

[1] Thermal conductivity
[2] Choi

۱-۲ نحوه آماده سازی نانو سیال

مواد قابل استفاده به عنوان سیال و نانوذرات متفاوت می باشند. نانو سیال های پایدار به دو روش یک مرحله ای و دو مرحله ای تولید می شوند. هر دو روش برای آماده سازی با هدف تولید نانوذرات معلق در سیال پایه و جلوگیری از انباشتگی ذرات روی هم می باشند. بنابراین تجزیه و معلق سازی ذرات به صورت غیر انباشته و تقریبا بصورت تک ذره ای کلید تولید نانوسیالهایی با خواص گرمایی بالا می باشد.

۱-۲-۱ مواد مورد استفاده به عنوان نانوذره و سیال

فن آوری جدید در تولید ذرات امکان تولید بسیاری از مواد در ابعاد نانو متر را ممکن ساخته است. مواد نانوساختار[1] از موادی در ابعاد نانومتر ساخته شده اند که به عبارتی در ابعاد اتمی یا ملکولی بوده و دارای ویژگی هایی می باشند که مواد عادی فاقد آن ویژگی ها هستند.تمام مکانیزمهای فیزیکی برای توجیه رفتار مواد دارای طول بحرانی هستند که در طولهای کمتر از آن طول بحرانی خواص فیزیکی مواد کاملا تغییر می کنند. لذا ذرات کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر خواص کاملا متفاوتی با جامدهای هم جنس خود ولی در ابعاد معمول (ماکرو[2]) نشان می دهند. خواص جدید این نانو ذرات به دلیل وجود سهم زیادی از اتمهای تشکیل دهنده ذرات در مرزهای این ذرات می باشند. خواص گرمایی، مکانیکی، اپتیکی، مغناطیسی و الکتریکی مواد نانوفاز به طور کلی برتر از مواد در ابعاد معمولی می باشند. بنابراین، تحقیق و توسعه در زمینه مواد نانوفاز بخش قابل ملاحظه ای از تحقیقات در زمینه علم مواد را معطوف خود کرده است [۱].

نانوذرات استفاده شده در نانوسیالها از مواد مختلفی ساخته شده اند، نظیر اکسید سرامیکها (CuO, Al_2O_3)، نیترید سرامیکها (SiN, AlN)، کربید سرامیکها (Tic, Sic)،فلزات (Au, Ag, Cu)، نیمه هادی ها (SiC, TiO_2)، نانوتیوبهای کربن(CNT) و مواد ترکیبی نظیر آلیاژ نانوذرات $Al_{70}Cu_{30}$ یا کامپوزیتهای پلیمری – هسته نانو ذره[۱].

بسیاری از سیالات نظیر آب، اتیلن گلیکول، انواع روغنها به عنوان سیال پایه مورد استفاده قرار می گیرند.

۱-۲-۲ روشهای تولید نانوذرات

تولید نانوذرات به دو بخش عمده شامل فرایند فیزیکی و شیمیایی تقسیم می گردند. همچنین روشهای زیادی در این دو بخش برای تولید نانو ذرات وجود دارند. روشهای فیزیکی شامل چگالش گاز خنثی[3] می باشدکه توسط گرانکویست[4] و همکارانش [۲] پیشنهاد گردیده است. روشهای شیمیایی شامل ته نشینی بخار شیمیایی[5]، تسریع شیمیایی[6]، میکرو تعلیق[7] و اسپری (پاشش) گرمایی[1] می باشد. اخیرا چوپکار[2] و همکارانش [۳] موفق به ساخت آلیاژ نانوذرات $Al_{70}Cu_{30}$ شده اند که با استفاده از آسیاب توپی این آلیاژ را ساخته اند.

---

[1] Nano Structure
[2] Macro
[3] Inert-gas condensation
[4] Granqvist
[5] Chemical vapor deposition
[6] Chemical precipitation
[7] Micro emulsion

۱-۲-۳ تعلیق نانوذرات در مایعات

تعلیق پایدار نانوذرات در سیالهای رایج در انتقال حرارت به دو روش عمده زیر تقسیم می شوند:

روشهای دو مرحله ای و روشهای یک مرحله ای. در روش دو مرحله ای ابتدا با یکی از روشهای فوق نانو ذرات را تولید کرده سپس آنها را در سیال پایه پخش می کنند. در روش یک مرحله ای بصورت همزمان تولید نانوذرات و پخش شدن آنها در سیال انجام می گردد. برای آماده سازی نانوسیالات با روشهای دو مرحله ای تکنیکهای معلق سازی نظیرتنش بالا[۳]، التراسونیک[۴] برای تولید ترکیب های مختلف مایع – جامد استفاده می شوند.

اکثرنانوسیالات شامل نانوذرات اکسیدی[۵] و نانوتیوبهای کربن[۶] توسط روش دو مرحله ای تولید می شوند. اگر نانوذرات به شکل پودر خشک تولید شوند، ممکن است برخی انباشتگی ها به دلیل نیروهای قوی واندروالس بین نانوذرات به وجود آیند که این انباشتگی ها اثری نامطلوب در فن آوری تولید نانوذرات می باشد. تولید نانوذرات با روشهای دومرحله ای این مشکل را دارند که به دلیل انباشتگی ذرات قبل از پخش شدن در سیال پایه، بخشی از این ذرات به سرعت در سیال پایه ته نشین می شوند. تعلیق نانوذرات به صورت پایدار با منفرد سازی ذرات و جلوگیری از انباشتگی آنها می باشد.

اگرچه نانوذرات در روش دو مرحله ای با تکنیک التراسونیک تحت ارتعاش[۷] قرار می گیرند و از هم جدا می شوند اما روش دو مرحله ای اساسا از حیث تولید سیالی با پخش مناسب و پایداری مناسب ذرات روش قابل اطمینانی نمی باشد.

در نتیجه مناسب نبودن پخش ذرات در سیال، هدایت گرمایی نانوسیال کاهش می یابد، بنابراین تنها راه رسیدن به سیالی با ویژگی های برتر گرمایی، پخش مناسب ذرات و تقریبا تک ذره ای بودن ذرات و جلوگیری از انباشتگی ذرات است.

روش مناسب برای تولید نانوذراتی بدون انباشتگی، چگال کردن پودرهای نانو از فاز بخار و تبدیل به سیال با فشار پائین می باشد. این روش در حدود سی سال پیش در ژاپن توسط آکوه[۸] و همکارانش [۴] برای اولین بار به کار گرفته شد که نام این روش وروس[۹] می باشد. وروس به شدت از طرف جامعه مواد نانوکریستالی مورد انتقادگرفته و رد شدکه دلیل آن مشکلات بعدی آن در جداسازی ذرات جامد از سیال و تولید پودر نانو بود. بر اساس روش وروس، ایستمن[۱۰] و همکارانش [۵] روش جدیدی را ابداع کردند که یک سیستم تبخیر مستقیم بود که بر تمام مشکلات پایداری و پخش مناسب فائق آمد. روش مستقیم تبخیر–چگالش منجر به تولید نانوذراتی با توزیع یکنواخت در سیال

---

[1] Thermal spray
[2] Chopkar
[3] High shear
[4] Ultrasonic
[5] Oxide nano particles
[6] Carbon nano tube
[7] Ultrasonic vibration
[8] Akoh
[9] Veros
[10] Eastman

پایه گردید. با این روش، نانوذراتی بدون هرگونه انباشتگی تولید کردند که از جنس مس بود و دارای مشخصه های پخش فوق العاده ای بود. هدایت گرمایی اتیلن گلیکول (به عنوان سیال پایه) با تنها ۰/۳٪ حجمی از این نانوذرات مس، افزایشی در حدود ۴۰٪ را نشان داد. این بالاترین افزایش در هدایت گرمایی گزارش شده در نانوسیالات بعداز نانوتیوبهای کربن می باشد.

با این حال روش استفاده شده توسط ایستمن دارای دو ایراد بود: اول اینکه این روش قابل تولید انبوه برای استفاده در صنایع نبود و دوم اینکه برای سیالاتی که در فشار پائین تبخیر می شدند قابل استفاده بود.

ژو[1] و همکارانش [۶] روش شیمیایی یک مرحله ای را برای تولید نانوسیال پایدار مس در اتیلن گلیکول استفاده کردند که این کار را با بیرون آوردن مس از پنتاهیدرات سولفات مس ($CuSO_4.5H_2O$) با ترکیب هیپو فسفیت سدیم ($NaH_2PO_2.H_2O$) در اتیلن گلیکول تحت تشعشع امواج میکرو بدست آوردند. ادعای آنها بر این است که این روش یک مرحله ای شیمیایی سریعتر و ارزانتر از روش یک مرحله ای فیزیکی است. هدایت گرمایی بدست آمده از این روش نزدیک به هدایت گرمایی بدست آمده توسط ایستمن [۵] و همکارانش بوده است.

اگرچه روش دو مرحله ای برای نانوذرات اکسیدی مناسب می باشد اما برای نانو ذرات فلزی نظیر مس مناسب و قابل استفاده نیست. برای نانوسیالهای شامل فلزات با هدایت گرمایی بالا، واضح است که تکنیک یک مرحله ای بهتر بوده و استفاده از آن در مقایسه با روشهای دو مرحله ای در اولویت قرار دارد. اولین نانوسیالهای شامل نانوتیوبهای کربن در روغن ترکیبی[2] توسط روش دو مرحله ای توسط چوی و همکارانش [۷] تولیدشدند.

۱-۳ یافته های تجربی

۱-۳-۱ هدایت گرمایی

الف- تحقیقات انجام شده در خصوص اندازه گیری هدایت گرمایی نانوسیالها

بررسی های اولیه بر روی نانوسیالات در خصوص اندازه گیری هدایت گرمایی این دسته از سیالات بر حسب تغییرات غلظت نانوذرات، دما و اندازه ذرات بوده است. بعدها کارهای آزمایشگاهی معطوف به بررسی ویژگیهای جوشش و انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات گردید. اندازه گیری هدایت گرمایی نانوسیالات معمولا با روش سیم داغ گذرا[3] می باشد که البته این روش بهترین روش به لحاظ دقت برای اندازه گیری هدایت گرمایی است [۸]. از روش های دیگر در این حوزه می توان از دمای نوسانی[4] و همچنین حالت پایدار[5] نام برد.

در ذیل مختصرا به برخی از کارهای انجام شده در این زمینه می پردازیم.

لی[6] و همکارانش [۸] هدایت گرمایی و ویسکوزیته نانوسیال با نانوذرات آلومینا معلق در آب را در غلظت های حجمی ۰/۰۱ ٪ – ۰/۳٪ حجمی مورد بررسی قرار دادند. سیم داغ گذرا برای اندازه گیری هدایت گرمایی استفاده

---

[1] Zhu
[2] PAO
[3] Transient hot wire
[4] Oscillation temperature
[5] Steady state
[6] Lee

گردید. تمامی اطلاعات در بازه دمایی ۴۰-۲۰ درجه سلسیوس جمع آوری شدند. نتایج نشان دادند هدایت گرمایی نانوسیالها بصورت تقریبا خطی با افزایش نسبت حجمی ذرات افزایش می یابند وکاملا مطابق با مقادیر پیشگویی شده توسط مدل جانگ و چوی[1] می باشند.

داس[2] و همکارانش [۹] هدایت گرمایی آلومینا (Al_2O_3) و اکسید مس(CuO) معلق در آب را به عنوان تابعی از دما معرفی کردند. از روش دمای نوسانی برای اندازه گیری نوسانات هدایت گرمایی استفاده نمودند. اندازه گیری ها در بازه ۲۱ تا ۵۱ درجه سانتیگراد انجام گردید. نتایج نشان دادند هدایت گرمایی با افزایش دمای نانوسیال و غلظت ذرات افزایش می یابند. همچنین مشاهده گردید نانوسیال آلومینا در آب با نتایج مدل H-C[3] در دمای اتاق کاملا مطابقت دارند و برای نانوسیال اکسید مس در آب مدل H-C مقادیری که ارائه می دهد کمتر از مقادیر اندازه گیری شده در دمای اتاق است. اما با بالا بردن دما برای هر دو نانوسیال مدل H-C نتایج کاملا اشتباهی را ارائه می کند.

دانگ ووک اوه[4] و همکارانش [۱۰] هدایت گرمایی نانوسیالها را با روش 3ω با سیال پایه آب و اتیلن گلیکول مورد بررسی قرار دادند. آنها از نانوذرات آلومینا استفاده کردند و کلیه اندازه گیری ها در دمای اتاق صورت گرفت. نتایج به دست آمده از این بررسی به طور خلاصه در جدولی به شرح ذیل ارائه گردید.

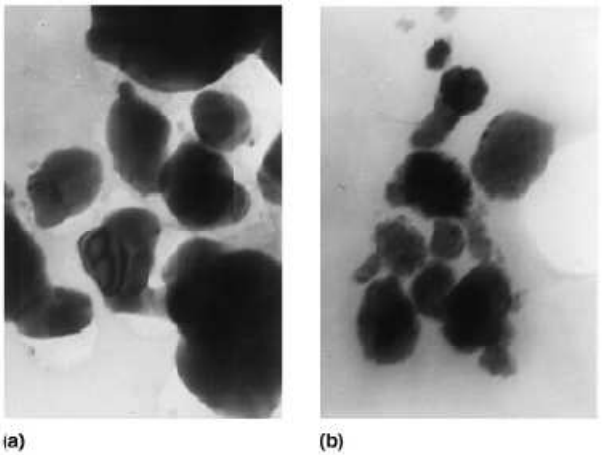
جدول۱-۱ گزارشی از افزایش هدایت گرمایی(W/m^oK) در بررسی ها مختلف [۱۰].

Al_2O_3 nanoparticle volume fraction (%)	Present experiment	Lee et al. (1999)	Wang et al. (1999)	Das et al. (2003)
(a) DI water nanofluids				
0	1.000 ± 0.006	–	–	–
1	1.044 ± 0.002	1.03	–	1.02
2	1.077 ± 0.005	1.05	–	1.05
3	1.112 ± 0.010	1.07	1.11	1.07
4	1.133 ± 0.008	1.09	–	1.09
4.3	–	1.10	–	–
4.5	–	–	1.15	–
5.5	–	–	1.15	–
Al_2O_3 nanoparticle volume fraction (%)	Present experiment	Lee et al. (1999)		Wang et al. (1999)
(b) EG nanofluids				
0	1.000 ± 0.013	–		–
1	1.019 ± 0.007	1.03		–
2	1.027 ± 0.010	1.06		–
3	1.075 ± 0.004	1.10		–
4	1.097 ± 0.004	1.14		–
5	–	1.18		1.25
8	–	–		1.41

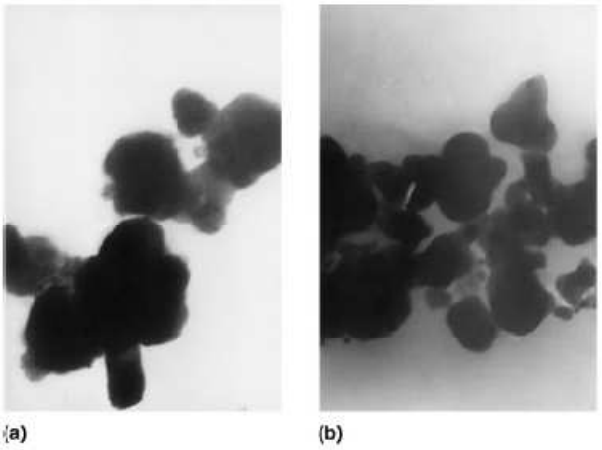
ژوان[5] و همکارانش[۱۱] به بررسی هدایت گرمایی نانوذرات مس معلق درآب دی یونیزه شده و روغن پرداختند. آنها در این آزمایش تأثیر شکل ذره، اندازه ذره و غلظت حجمی ذره را مورد بررسی قرار دادند. در این راه از دستگاه سیم د اغ گذرا برای اندازه گیری هدایت گرمایی استفاده کردند. در شکل های زیر عکس های گرفته شده از نانو ذرات معلق در آب دی یونیزه شده و روغن که توسط میکروسکوپ TEM[6] گرفته شده است نشان داده شده است. نتایج بررسی ها نشان دادند که هدایت گرمایی نانوسیال مس با سیال پایه آب به ازای تغییر غلظت حجمی

[1] Jang & Choi
[2] Das
[3] Hamilton-Crosser
[4] Dang-wook oh
[5] Xuan
[6] Transparent electron microscope

از ۲/۵٪ تا ۷/۵٪ به ترتیب از ۱/۲۴ تا ۱/۷۸ برابر تغییر می کند. این گروه در پایان با توجه به نتایج تجربی به دست آمده در این آزمایش، یک رابطه تجربی برای محاسبه هدایت گرمایی ارائه کردند.



شکل ۱-۲- تصویر TEM از نانوذرات مس معلق در روغن با غلظت حجمی a) ۲٪ و b) ۵٪ با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰۰ برابر [۱۱].



شکل۱-۳- تصویر TEM از نانوذرات مس معلق در آب دی یونیزه شده با غلظت حجمی a) ۵٪ و b) ۷/۵٪ با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰۰ برابر [۱۱].

مرشد[1] و همکارانش [۱۲] هدایت گرمایی نانوسیال با نانوذرات اکسیدتیتانیوم را در یک محفظه میله ای شکل به طول ۴۰ سانتیمتر و قطر۱۰ سانتیمتر اندازه گیری نمودند. ذرات در این آزمایش کروی شکل بوده و دارای قطر ۱۵ نانومتر بودند. از دستگاه سیم داغ گذرا برای اندازه گیری هدایت گرمایی نانوسیال استفاده گردید و در نهایت نتایج با مقادیر به دست آمده از مدلهای H-C، براگمن[2] و وسپ[3] مقایسه شد. نتایج نشان دادند هدایت گرمایی نانوسیالات به طور قابل ملاحظه ای با افزایش نسبت حجم نانوذرات افزایش می یابد. همچنین ابعاد و شکل نانوذرات در هدایت گرمایی نانوسیال مهم است که این تأثیر بیش از مقادیر اعمال شده در مدلهای مختلف می باشد.

[1] Murshed
[2] Bruggeman
[3] Vasp

هنگ[1] و همکارانش [۱۳] اثر ناشی از به هم چسبیدن نانوذرات[2] را بر روی هدایت گرمایی نانوذرات آهن و نانوذرات مس پخش شده در سیال پایه آب بررسی کردند. در این آزمایش از دستگاه سیم داغ گذرا برای اندازه گیری هدایت گرمایی در دمای اتاق استفاده شد. نتایج نشان دادند هدایت گرمایی نانوسیالات با خوشه ای شدن نانوذرات رابطه مستقیم دارند و بطور غیر خطی با افزایش غلظت حجمی افزایش می یابند. این غیر خطی بودن نشان دهنده تجمع سریع نانوذرات در نانوسیالات با چگالی بالاست. نهایتا نانوسیالات آهن افزایش بسیار سریعی در هدایت گرمایی نسبت به نانوسیالات مس از خود نشان دادند.

ژانگ[3] و همکاران [۱۴] هدایت گرمایی و پخش گرمایی نانوسیالهای مختلف را در دمای بین ۵ تا ۵۰ درجه سلسیوس با استفاده از روش سیم داغ گذرا اندازه گیری کردند. در این بررسی از نانوسیالهای Au-Toluene، Al_2O_3- Water، TiO_2-Water، CuO-Water و CNT-Water استفاده شد. قطر متوسط ذرات Au، Al_2O_3، TiO_2 و CuO به ترتیب ۱/۶۵، ۲۰، ۴۰ و ۳۳ نانومتر بوده و طول و قطر نانوتیوبهای کربن به ترتیب ۱۰ میکرومتر و ۱۵۰ نانومتر بوده است. نتایج آنها نشان داد هدایت گرمایی نانوسیالها به طور طبیعی بهبود می یابد و با مدل H-C بطور دقیق برای نانوذرات کروی شکل قابل پیش بینی خواهد بود.

تیموفیوا[4] و همکارانش [۱۵] بر روی هدایت گرمایی و ویسکوزیته نانوذرات Al_2O_3 در سیال پایه آب و اتیلن گلیکول به صورت تجربی و تئوریک کار کردند. نانوذرات با قطر متوسط ۱۱، ۲۰ و ۴۰ نانومتر در این آزمایشات مورد مطالعه قرار گرفتند. آنالیزور خواص گرمایی[5] برای اندازه گیری هدایت گرمایی استفاده شد، که این نوع اندازه گیری هدایت گرمایی بر مبنای سیم داغ گذرا می باشد. تمامی اطلاعات در دمای ۲۹۶ درجه کلوین جمع آوری شده است. نتایج نشان دادند هدایت گرمایی اندازه گیری شده مقادیر کمتری نسبت به پیش بینی تئوری داشته اند. در بررسی تئوری، یک مدل برای هدایت گرمایی نانوسیالها و اختلاط پارامترهای هندسی مختلف به دست آوردند. محاسبات نشان دادند هدایت گرمایی نانوسیالها با نانوذرات به شکل باریک و کشیده و به صورت شاخه ای بیشتر از نانوسیالها با نانوذرات کروی شکل برای یک غلظت حجمی یکسان است. در نهایت نویسندگان مقاله پارامترهای اصلی برای کنترل هدایت گرمایی و بهبود آن را حالت خوشه ای شدن ذرات و مقاومت سطح نانوذرات عنوان کردند.

ب- بررسی های تئوری

همانطور که از تحقیقات تجربی که به برخی از آنها اشاره گردید مشخص است نانوسیالها دارای ویژگیهایی متفاوت با سیالهای رایج می باشند و لذا برای کاربردی بودن این قبیل سیالها در صنعت و خنک کاری سیستمهای عظیم حرارتی نمی توان به تحقیقات فوق بسنده نمود وبه منظور درک صحیح تأثیر پارامترهای مختلف بر ویژگیهای ترموفیزیکی این قبیل سیالات نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه احساس می شود. از میان این خواص مهمترین آنها

---

[1] Hong
[2] Agglomeration
[3] Zhang
[4] Timofeeva
[5] Thermal Property Analyzer

که در اکثر فرآیندهای انتقال حرارت خاصیتی مهم و تعیین کننده می باشد هدایت گرمایی است. لذا علاوه بر کارهای تجربی انجام شده در این زمینه، بررسی های تئوری نیز برای توجیه افزایش هدایت گرمایی در نانوسیالات صورت گرفته و روابطی نیز ارائه شده اند.

در زیر اشاره ای به برخی از این بررسی ها برای افزایش هدایت گرمایی می شود.

کومار[1] و همکارانش [۱۶] یک مدل تئوری گسترده برای بهبود هدایت گرمایی نانوسیالها با توجه به تغییرات اندازه ذرات، حجم نسبی ذرات و دما در نظر گرفتند. نتایج نشان داد بهبود زیاد نرخ انتقال حرارت در نانوسیالها به دلیل سطح زیادی است که نانوذرات تولید می کنند، حتی وقتی غلظت آنها آنقدر پائین باشد که در سیال پایه قابل مشاهده نباشند. این بهبود، نسبت عکس با شعاع ذرات داشته و در غلظت های کم، با غلظت یک رابطه خطی دارد. این مدل برای غلظت های بالا کاربرد ندارد زیرا در غلظت بالا اثر برخورد بین ذرات هم قابل ملاحظه می شود ونمی توان از آن صرفنظر کرد.

کبلینسکی[2] و همکاران [۱۷] چهار نوع توضیح مناسب برای افزایش غیر عادی هدایت گرمایی نانوسیالات ارائه نمودند:

- حرکت براونی ذرات
- لایه های سطح مولکولی در مایع سطح مشترک مایع- ذره
- طبیعت انتقال حرارت نانوذرات
- تأثیر انباشتگی نانوذرات

آنها تأثیر هر یک از عوامل فوق بر افزایش هدایت گرمایی نانوسیالات را مورد بررسی قرار دادند و به نتایج زیر رسیدند:

حرکت براونی در افزایش هدایت گرمایی نقش چندانی ندارند ولی در مورد مکانیزم های دیگر باید کارهای تجربی و شبیه سازی بیشتری صورت گیرد. نیاز کلیدی در این آزمایشات یافتن تأثیر عوامل مختلف بر هدایت گرمایی بصورت جداگانه است. برای مثال وارد کردن فعال کننده سطح در سیال سبب جلوگیری از انباشتگی ذرات می شود که ممکن است توضیحی بر نقش انباشتگی "تماس-مستقیم" باشد.

نتایج حاصل از تحقیقات را می توان بصورت زیر تقسیم بندی نمود:

پ- رابطه غیر خطی بین هدایت گرمایی و غلظت نانوذرات

هدایت گرمایی بالای نانوتیوبهای کربن در کنار دانسیته کم این نانوتیوبها در مقایسه با فلزات، آنها را تبدیل به گزینه های مناسب برای استفاده در جهت تولید نانوسیالات کرده است.

چوی و همکارانش [۷] اولین کسانی بودند که نانوتیوبهای کربن چنددیواره ای(MWNTs)[1] را در سیال پایه روغن[2] با روش دو مرحله ای پخش کردند و هدایت گرمایی نانوتیوب در روغن را اندازه گیری نمودند. آنها افزایش

---

[1] Kumar
[2] Keblinski

بسیار زیاد در هدایت گرمایی این نانوسیالها را مشاهده نمودند (تا ۱۵۰٪ افزایش هدایت گرمایی به ازای ۱٪ حجمی نانوتیوب) که بسیار بیشتر از هدایت گرمایی سایر نانوسیالها بود که تا آن زمان اندازه گیری شده بود. این مقدار هدایت گرمایی نانوسیالهای حامل نانوتیوبها بسیار بیش از مقادیر پیشنهاد شده توسط روابط مختلف بود. در واقع مقادیر به دست آمده توسط این روابط در غلظت های پائین معتبر بودند. یک نکته غیر عادی در این بررسی، رابطه غیر خطی بین افزایش هدایت گرمایی با افزایش غلظت نانوتیوبها بود در حالیکه تمامی روابط موجود یک رابطه خطی بین این دو را نشان می دادند. در صورتیکه این رفتار غیر خطی در سایر سیال های معمول دارای ذره های معلق نظیر سیالهای میکرو و نانوسیال ها با غلظت های پائین مشاهده نمی شوند.

ژی[3] و همکارانش [۱۸] برای اولین بار نانوتیوبهای کربن چند دیواره ای را در آب و اتیلن گلیکول بدون هرگونه فعال کننده سطح مورد آزمایش قرار دادند. یانگ[4] و همکارانش [۱۹] اثر انرژی پخش گرمایی بر روی هدایت گرمایی نانوسیالهای شامل نانوتیوبهای کربن را مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که نسبت طول به قطر نانوتیوبها[5] با افزایش انرژی پخش گرمایی کاهش می یابد. که این کار توسط اسائل[6] و همکارانش [۲۰] نیز بعدها مورد تائید قرار گرفت. دینگ[7] و همکارانش [۲۱] اولین گروه بودند که بر روی اثر دما بر هدایت گرمایی نانوسیال شامل نانوتیوبهای کربن با سیال پایه آب تحقیقاتی را صورت دادند. رابطه غیر خطی بین هدایت گرمایی و غلظت با کار هنگ و همکارانش [۲۲] بر روی نانوذرات آهن معلق در اتیلن گلیکول (Fe-Ethylene glycol) مشاهده گردید. قابل توجه است که بر طبق این تحقیق گزارش شده است افزایش هدایت گرمایی این نانوسیال بیشتر از افزایش هدایت گرمایی گزارش شده توسط ایستمن و همکارانش [۵] می باشدکه نانوسیال مس را مورد بررسی قرار داده بودند. مرشد و همکارانش [۱۲] نیز رابطه غیرخطی بین غلظت و هدایت گرمایی را با تحقیق روی نانوسیال با نانوذرات TiO_2 با اشکال کروی و استوانه ای در سیال پایه آب به دست آوردند. نانوسیال با ذرات $Al_{70}Cu_{30}$ که توسط چوپکار و همکارانش [۳] تولید شدند نیز رفتار غیرخطی شدیدی از خود نشان دادند و بیش از ۲۰۰٪ افزایش هدایت گرمایی به ازای کمتر از ۲٪ حجمی نانوذره مشاهده گردید که این پدیده شاید به دلیل پخش مناسب نانوذرات در اتیلن گلیکول بوده است.

ت- وابستگی شدید هدایت گرمایی به دما

داس و همکارانش [۹] متوجه گردیدند که هدایت گرمایی نانوسیالات نسبت به سیالات پایه به شدت تابع دما می باشند. نتایج آنها برای نانوسیالات با سیال پایه آب شامل Al_2O_3 یا CuO، ۲ تا ۴ برابر افزایش هدایت گرمایی به ازای تغییر دما در بازه ۲۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس را نشان داد. این ویژگی فوق العاده نانوسیالات آنها را تبدیل به سیال هایی با قابلیت خنک کاری بالا برای استفاده در وسایل با شار حرارتی بالا کرده است. داس بر این عقیده است که این تغییر زیاد هدایت گرمایی با تغییرات دما به دلیل حرکت نانو ذرات می باشد.

---

[1] Multi Wall Nano Tube
[2] α- olefin
[3] Xie
[4] Yang
[5] Aspect ratio
[6] Assael
[7] Ding

ث- وابستگی شدید هدایت گرمایی به اندازه ذره

اندازه نانوذرات پخش شده در نانوسیال بر روی خواص نانوسیال ها بسیار تأثیر گذار می باشد. چون[1] و همکارانش [۲۳] وابستگی هدایت گرمایی به دما و اندازه ذرات را اندازه گیری نمودند.چوپکار و همکارانش [۳] اثر اندازه ذره بر روی هدایت گرمایی نانوسیال ها با سیال پایه اتیلن گلیکول شامل $Al_{70}Cu_{30}$ را به دست آوردند و در نتایج تحقیقاتشان وابستگی شدید هدایت گرمایی به اندازه ذره را نشان دادند.

۱-۳-۲ لزجت (ویسکوزیته)

الف- تحقیقات انجام شده در خصوص اندازه گیری ویسکوزیته نانوسیالها

پک[2] و همکارانش [۲۴] آزمایش هایی را بر روی Al_2O_3 و TiO_2 در آب انجام دادند. در این آزمایش آب در لوله های افقی با مقطع دایروی شکل حرکت می کرد و شار حرارتی ثابت در مرزها وجود داشت. قطر نانوذرات از ۱۳ تا ۲۷ نانومتر متغیر بوده است. در این آزمایش ازویسکومتر بروک فیلد[3] برای اندازه گیری ویسکوزیته نانوسیال در دمای اتاق استفاده کردند و طبق انتظار مشاهده گردید ویسکوزیته با افزایش غلظت افزایش می یابد. همچنین در این آزمایش، ویسکوزیته نسبی TiO_2-water و Al_2O_3-water به ترتیب ۳ و ۲۰۰ گزارش شده است.

کواک[4] و همکارانش [۲۵] خواص جریان نانوسیال CuO-Ethylene glycol را بررسی کردند. در این آزمایشات ذرات نانو CuO با قطر متوسط ۱۲نانومتر در دمای ۲۹۸ کلوین مورد بررسی قرار گرفت.

کو[5] و همکارانش [۲۶] افت فشار و ویسکوزیته نانوتیوب های کربنی را که در آب مقطر پراکنده شده بودند در غلظت های مختلف مورد بررسی قرار دادند. این آزمایش در شرایطی انجام شده که نانوسیال در یک لوله افقی جریان داشت. همچنین در این آزمایش از AR 2000 rheometer (TA Instrumenet) برای اندازه گیری ویسکوزیته نانوسیالات استفاده شد. نتایج این بررسی نشان داد که نانوسیال های آماده شده با روش TCNT[6] ویسکوزیته بسیار کمتری در قیاس با نانوسیال های آماده شده با روش PCNT[7] دارا هستند، و همچنین نتیجه شد که ویسکوزیته نانوسیالات با افزایش غلظت حجمی ذرات افزایش می یابد.

تیموفیوا و همکارانش [۱۵] بر روی ویسکوزیته و هدایت گرمایی نانوذرات Al_2O_3 پخش در آب و اتیلن گلیکول به صورت تجربی و تئوریک کار کردند. نانوذرات با قطر متوسط ۱۱، ۲۰ و ۴۰ نانومتر در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفتند و از Ubbeholder Capillary Viscometer (Fisher Scientific) برای اندازه گیری ویسکوزیته استفاده شد. تمامی اطلاعات در دمای ۲۳ درجه سانتیگراد جمع آوری شد.

---

[1] Chon
[2] Pak
[3] Brook field viscometer
[4] Kwak
[5] Ko
[6] Treated CNT nanofluids
[7] pristine CNT nanofluids

هی[1] و همکارانش [۲۷] انتقال حرارت و مشخصه های جریان نانوسیال اکسید تیتانیوم در آب مقطر (TiO_2-Distilled Water) را در لوله های عمودی که جریان به سمت بالاست تحت شرط مرزی شار حرارتی ثابت در هر دو رژیم آرام و مغشوش بررسی کردند. نانو ذرات با قطر ۹۵ نانومتر و در دمای ۲۲ درجه سانتیگراد مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین از Bohlencvo Rheometer (Malvern Instrument, UK) برای اندازه گیری ویسکوزیته استفاده شد. نتایج آزمایش نشان داد ویسکوزیته با افزایش نسبت حجمی ذرات و همچنین افزایش اندازه ذرات نانو افزایش می یابد.

لی و همکارانش [۸] ویسکوزیته و هدایت گرمایی را با نانو ذرات Al_2O_3 معلق در آب با نسبت حجمی ۰/۳- ۰/۰۱ درصد حجمی بررسی کردند. از Oscillation Viscometer برای اندازه گیری ویسکوزیته استفاده شد. اطلاعات در محدوده دمایی ۴۰-۲۰ درجه سانتیگراد جمع آوری شد. مشاهده شده ویسکوزیته اندازه گیری شده با غلظت حجمی ذرات یک نسبت غیرخطی داشته و با افزایش غلظت حجمی ذرات افزایش می یابد.

مرشد و همکارانش [۲۸] ویسکوزیته و هدایت گرمایی نانوسیال ها را به صورت تئوری و آزمایشگاهی بررسی نمودند. نانوذرات Al_2O_3,TiO_2 پخش شده در آب دی یونیزه و اتیلن گلیکول و نانوذرات Al پخش شده در اتیلن گلیکول و روغن موتور مورد مطالعه در این آزمایش قرار گرفتند. تمامی اطلاعات در دمای ۶۰-۲۰ درجه سانتیگراد اندازه گیری شدند. نتایج نشان دادند هدایت گرمایی و ویسکوزیته نانوسیال ها از سیالات پایه بیشتر هستند و با افزایش غلظت حجمی ذرات افزایش می یابند.

نگوین[2] و همکارانش [۲۹] تاثیر دما و غلظت حجمی را بر روی ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال Al_2O_3-Water به صورت علمی مورد بررسی قرار دادند. اطلاعات مربوط به ویسکوزیته به کمک ویسکومتر تجاری نوع سیلندری[3] جمع آوری گردید که در شکل ۱-۴ نشان داده شده است. در محدوده دمایی که از دمای اتاق شروع شده تا ۷۵ درجه سانتیگراد، دو اندازه مختلف نانو ذرات به قطر متوسط ۳۶ و ۴۷ نانومتر مورد بررسی قرار گرفت. دستگاه مورد استفاده ترکیبی از ویسکومتر با مدول کنترل کننده و پوشش[4] می باشد. بیشترین اطلاعات جمع آوری شده برای نانوسیال Al_2O_3-Water برای دو اندازه ذره ۳۶ و ۴۷ نانومتر در غلظت حجمی ۱ تا ۹/۴٪ و دمای ۲۱ تا ۷۵ درجه سانتیگراد بوده است.

نتایج آزمایش نشان داد برای غلظت حجمی مشخص، یک دمای بحرانی وجود دارد که در بیش از آن دما رفتار ویسکوزیته نانوسیال به کلی دگرگون می شود. در واقع اگر سیال نمونه بیش از درجه حرارت بحرانی گرم شود، افزایش ناگهانی در ویسکوزیته اتفاق می افتد و پس از آن که اجازه می دهیم سیال خنک شود (بعد از اینکه دما از دمای بحرانی بالاتر رفت) پدیده هیسترزس اتفاق می افتد.

---

[1] He
[2] Nguyen
[3] Piston-Type
[4] Heating Jacket