بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

بخش مهندسی مکانیک

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک

گرایش تبدیل انرژی

بررسی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال و ارائه مدلی برای ضریب هدایت حرارتی نانوسیال

استاد راهنما:

دکتر سید حسین منصوری

مؤلف:

زهره شمس

تیرماه 1389

تقدیم به

همراه همیشگی‌ام مجتبی

و مادرم که سرچشمه تمام خوبی‌هاست

تقدیر و تشکر

با تقدیر و تشکر از استاد ارجمند **جناب آقای پرفسور سید حسین منصوری** که چراغی فروزنده در مسیر علم وتحقیق و پژوهش‌اند و انجام این پایان نامه بدون کمک وراهنمایی‌های خردمندانه ایشان میسر نبود. همچنین زحمات تمامی اساتید گرانقدر بخش مهندسی مکانیک کرمان را پاس می‌نهم. بر خود لازم می‌دانم از زحمات بی‌دریغ خانواده‌ام، همسرم و اعضای خانواده‌اش کمال تشکر را داشته باشم.

چکیده

یکی از مسائلی که امروزه در فرآیندهای انتقال حرارت مطرح است، نیاز به انتقال حرارت با شدت بالا در زمان کوتاه است. نانوسیالات گروه جدیدی از سیالات هستند که از پخش ذرات بسیار ریز در ابعاد نانو درون سیال‌های انتقال حرارتی متداول نظیر آب، اتیلن گلیکول و روغن موتور بدست می‌آیند. از آنجا که این سوسپانسیون‌ها پتانسیل زیادی برای افزایش انتقال حرارت از خود نشان می‌دهند، در کانون توجه و مطالعه محققان قرار گرفته اند.

مطالعه حاضر را می‌توان به دو بخش کلی تقسیم کرد. بخش اول به ارائه مدلی برای ضریب هدایت حرارتی موثر نانوسیالات می‌پردازد. فرض‌های اساسی در گسترش مدل پیشنهادی، وجود لایه‌ی بین سطحی در سطح مشترک ذره سیال و هم‌چنین توزیع غیر یکنواخت اندازه‌ی نانوذرات معلق درون سیال است. مدل ارائه شده در مطالعه حاضر شامل اثرات ضریب هدایت حرارتی نانو ذره، ضریب هدایت حرارتی سیال پایه، اندازه نانو ذرات، درصد حجمی هر جزء، لایه بین سطحی، دما و حرکت برآونی می‌باشد. در این مطالعه با فرض وجود لایه بین سطحی، ذرات را بصورت نانو ذرات مرکب در نظر می‌گیریم. براساس توزیع فرکتال اندازه ذرات، یک مدل احتمالی برای اندازه نانو ذرات در نظر گرفته شده است. ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در این مدل به کمک یک روش عددی- تحلیلی بدست می‌آید.

نتایج بدست آمده از مدل پیشنهادی با اطلاعات آزمایشگاهی موجود و نتایج سایر مدل‌ها مقایسه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که نتایج مدل پیشنهادی تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشته و نتایج مناسب‌تری نسبت به سایر مدل‌ها ارائه می‌کند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که ضریب هدایت حرارتی موثر نانو سیال با افزایش درصد حجمی و کاهش اندازه متوسط نانوذرات افزایش می‌یابد.

مدل سازی عددی جریان آرام نانوسیال درون لوله با شرط مرزی دمای ثابت دیواره، در بخش دوم انجام شده است. معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود گسسته شده‌است. در این بخش از نتایج حاصل از بخش اول برای ضریب هدایت حرارتی نانوسیال استفاده شده است. به منظور بررسی صحت نتایج بدست آمده، نتایج مدلسازی برای آب خالص، با نتایج تئوری و نتایج

آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج حاکی از این است که ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت در جریان نانوسیال با افزایش درصد حجمی نانو ذرات و نیز افزایش عدد رینولدز، افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: نانوسیال ، نانوذره، ضریب هدایت حرارتی موثر، کسر حجمی، لایه بین سطحی، بعد فرکتال، ضریب انتقال حرارت جابجایی، عدد ناسلت.

فهرست مطالب

عنوان ..... **صفحه**

فصل اول: مقدمه 1

1-1 مقدمه 2

2-1 مروری بر کارهای گذشته 3

فصل دوم: نانوسیال 8

2-1 مقدمه 9

2-2 تهیه نانوسیال 10

2-2-1 روش تهیه یک مرحله‌ای 10

2-2-2 روش تهیه دو مرحله‌ای 10

2-3 اثرات و مزایای نانوسیال 11

2-3-1 بهبود انتقال حرارت 11

2-3-2 خنک‌سازی میکروکانال‌ها بدون انسداد 11

2-3-3 کاهش در اندازه سیستم‌های انتقال حرارت 12

2-3-4 کاهش در قدرت پمپاژ 12

2-3-5 پایداری 12

2-4 کاربردهای مهندسی 12

2-4-1 نانوسیال در حمل و نقل 12

2-4-2 در میکروکانال‌ها و تجهیزات 13

2-4-3 در گرمایش و تهویه مطبوع(HVAC) 13

2-4-4 نانوسیالات و کامیون های پیشرفته 13

2-5 روش‌های اندازه‌گیری انتقال حرارت هدایتی در نانوسیال 13

فصل سوم: هدایت در نانوسیال 15

3-1 مقدمه 16

3-2 مدل‌های کلاسیک 16

3-2-1 رابطه ماکسول 16

2-2-3 رابطه همیلتون - کراسر 16
3-2-3 رابطه وسپ 17
4-2-3 رابطه براگمن 18
3-3 مدل‌های جدید 18
1-3-3 مدل‌های استاتیک 19
2-3-3 مدل‌های دینامیک 19
4-3 پارامترهای موثر بر هدایت حرارتی نانوسیال 22
1-4-3 اندازه نانوذرات 22
2-4-3 لایه بین سطحی سیال - ذرات (نانولایه) 22
1-2-4-3 ضریب هدایت لایه بین سطحی 22
2-2-4-3 ضخامت لایه بین سطحی 23
3-4-3 حرکت برآونی نانوذرات 23
4-4-3 توزیع غیر یکنواخت اندازه نانوذرات 24
5-4-3 دمای سیال 24
5-3 مدل پیشنهادی برای هدایت حرارتی نانوسیال 24
1-5-3 مدل‌سازی جزء استاتیک هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال 25
2-5-3 مدل‌سازی جزء دینامیک هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال 28
3-5-3 مدل ترکیبی هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال 30
4-5-3 مدل فرکتال پیشنهادی 31
5-5-3 الگوریتم محاسبه هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال 33

فصل چهارم: جابجایی در نانو سیال 35
1-4 مقدمه 36
2-4 معادلات حاکم بر جریان سیال 36
3-4 شرط مرزی 37
1-3-4 دیواره جامد 37
2-3-4 مرز ورودی 37

3-3-4 مرز خروجی 38
4-4 خصوصیات نانو سیال 38
1-4-4 دانسیته و گرمای ویژه 38
2-4-4 ویسکوزیته نانوسیال 38
5-4 محاسبه عدد ناسلت 40
6-4 روش انجام مدل‌سازی 40

فصل پنجم: نتایج 42
1-5 مقدمه 43
2-5 نتایج مدل پیشنهادی برای ضریب هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال 43
3-5 نتایج مدل سازی عددی برای انتقال حرارت جابجایی 55

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات 63
1-6 نتیجه‌گیری 64
2-6 پیشنهادات 65

فهرست منابع 66

فهرست علائم

قطر	d
بعد فرکتال	D_f
تابع چگالی احتمال	f
ضریب انتقال حرارت جابجایی	h
ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط	hb
ضریب انتقال حرارت هدایتی	k
طول	L
وزن مولکولی	M
ضریب شکل تجربی	n
عدد آواگادرو	N_A
تعداد نانوذرات	N_t
عدد ناسلت	Nu
عدد ناسلت متوسط	Nub
عدد پرانتل	Pr
شار حرارتی	q
شعاع	r
عدد رینولدز	Re
دما	T
ضخامت لایه بین سطحی	t
حجم	V
سرعت	v

علائم یونانی

کسر حجمی	φ
قطر نانو ذره	λ
ویسکوزیته سینماتیکی	ν
ضریب کرویت	ψ
چگالی	ρ
ویسکوزیته	μ
ضریب پخش گرمایی	α

اندیس‌ها

متوسط	av
بالک	b
کلاستر	cl
نانوذره مرکب	cp
موثر	eff
سیال پایه	f
لایه بین سطحی	lr
نانوسیال	nf
شعاع	r
دیوار	$wall$
مختصات در جهت محور	z

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

یکی از مسایلی که امروزه در فرآیندهای انتقال حرارت مطرح است لزوم افزایش قابل توجه فلاکس حرارتی و کوچک سازی تجهیزات انتقال حرارت است. توجه به محدودیت سوخت‌های فسیلی در دنیا موجب شده است که امروزه بهینه‌سازی مصرف انرژی در واحدهای فرآیندی، بیش از پیش مورد توجه قرارگیرد. از این‌رو تلاش بسیاری در جهت افزایش شدت انتقال حرارت و یا کوتاه کردن زمان انتقال حرارت در مبدل‌ها به عنوان مهم‌ترین بخش در ارتباط با مصرف انرژی صورت گرفته است.

روش متداول برای افزایش نرخ انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی استفاده از سطوح گسترش یافته[1] است. اما این کار از یک سو سبب افزایش حجم سیستم حرارتی شده و از سوی دیگر موجب افزایش افت فشار می‌گردد، بنابراین چندان مطلوب نمی‌باشد. از سوی دیگر، علیرغم نقش حیاتی سیالات عامل در فرآیند انتقال حرارت، خصوصیات ترموفیزیکی ضعیف سیالات عامل انتقال حرارت از قبیل آب، اتیلن گلیکول[2] (EG) یا روغن موتور[3] (EO)، عمدتاً کارایی سیستم‌ها را محدود ساخته است. در نتیجه، نیاز به تکنیک‌های پیشرفته و نیز نوآوری در سیالات عامل با عملکرد انتقال حرارتی بهتر نسبت به سیالات عامل متداول، احساس می‌شود.

چون هدایت حرارتی سیال نقش حیاتی در بهبود بازده انرژی تجهیزات انتقال حرارت بازی می‌کند، مطالعات تجربی و تئوری بسیاری روی افزایش هدایت حرارتی سیال از طریق پخش ذرات بسیار ریز درون سیال، انجام شده که به عنوان راهبردی جدید در عملیات انتقال حرارت مطرح گردیده است. واضح است که در دمای اتاق جامدات فلزی ضریب انتقال حرارت هدایتی بیشتری نسبت به سیالات دارند. برای مثال، ضریب هدایت حرارتی مس در دمای اتاق حدوداً ۷۰۰ برابر بیشتر از آب و حدوداً ۳۰۰۰ برابر بیشتر از روغن موتور است. بنابراین انتظار می‌رود ضریب هدایت حرارتی سیالاتی که شامل جامدات فلزی یا غیر فلزی (اکسید فلزات) هستند، بیشتر از سیالات انتقال حرارت پایه باشد و در نتیجه بازده انرژی وسایلی که از این سیالات استفاده می‌کنند بهبود یابد.

در این راستا ماکسول[4]، بیش از یک قرن قبل مطالعات آزمایشگاهی و تئوری زیادی بر روی افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی مایعات حاوی ذرات ریز معلق انجام داد. اما همه

[1] Extended heat transfer surface
[2] Ethylene Glycol
[3] Oil Engine
[4] Maxwell

مطالعات وی محدود به ذرات با سایزهای میلیمتری و میکرومتری بود [۱]. مسئله اساسی در کاربرد این مواد ته نشینی ذرات و در نتیجه کند شدن جریان درون کانال است. همچنین ساییدگی لوله‌ها و افت فشار شدید در جریان از معایب این سوسپانسیون‌هاست. به منظور جلوگیری از ته نشینی ذرات، سیال را در یک میدان چرخشی قرار می‌دادند که در این حالت نیز میکروذرات سبب آسیب رساندن به دیواره لوله‌ها و یا کانال‌ها شده که نتیجه‌اش فرسایش خواهد بود.

فرآیند تولید ذرات در ابعاد نانومتر را باید به عنوان انقلابی در افزایش انتقال حرارت دانست. نخستین بار چوی[1] در سال ۱۹۹۵، از بخش تکنولوژی انرژی آزمایشگاه ملی آرگون، افزودن مواد فلزی با ابعاد نانومتر به سیالات عامل معمولی مانند آب، اتیلن گلیکول، روغن صنعتی را تحت عنوان نانوسیال پیشنهاد کرد [۲]. تحقیقات آن‌ها نشان داد اضافه کردن ذرات فلزات و آلیاژها به سیالات پایه موجب افزایش چشمگیر رسانایی سیال پایه می‌گردد.

سیالات حاوی ذرات بسیار ریز معلق با اندازه نانومتر (۱- ۱۰۰nm) نانو سیال نامیده می شوند. نانوذرات پخش شده در سیال از جنس فلز، اکسید فلز و یا نانولوله‌های کربنی بوده و اغلب کروی شکل و یا استوانه‌ای می‌باشند. نانوسیالات سری جدیدی از سیالات واسط حرارتی‌اند که پتانسیل زیادی برای افزایش انتقال حرارت از خود نشان می‌دهند و به همین جهت توجه خاصی به این گروه از سیالات به عنوان محیط‌های انتقال حرارت انجام می‌گیرد.

خواص استثنایی نانوسیالات شامل هدایت حرارتی بیشتر نسبت به سیالات معمولی، رابطه غیرخطی بین هدایت و غلظت ذرات جامد و وابستگی شدید هدایت به دما است. خواص استثنایی، به همراه پایداری، روش تهیه نسبتاً آسان و ویسکوزیته مناسب باعث شده تا این سوسپانسیون‌ها به عنوان یکی از مناسب‌ترین و قویترین انتخاب‌ها در زمینه سیالات خنک کننده مطرح شوند.

۱-۲ مروری بر کارهای گذشته

بهبود مشخصات انتقال حرارت سیالات خنک کننده مدت‌ها تحت بررسی بوده است. با ظهور مواد جدید و تکنیک‌های مصنوعی تولید ذرات در اندازه نانو، کارهای تحقیقاتی روی نانو ذرات معلق درون سیال خنک کننده (مبرد) مورد توجه قرار گرفت.

مطالعات آزمایشگاهی زیادی بر روی قابلیت هدایت حرارتی نانوسیال گزارش شده است. نتایج منتشر شده در مورد هدایت حرارتی نانو سیال‌ها نشانگر هدایت حرارتی فوق العاده

[1] Choi

زیاد آن‌ها نسبت به سیالات پایه است. حتی زمانی که غلظت نانوذرات معلق خیلی پایین است، هدایت حرارتی بصورت قابل توجهی با درصد حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد.

اولین نتایج در مورد قابلیت هدایت حرارتی افزایش یافته نانوسیالات توسط استمن[1] و همکارانش [۳] گزارش شده است. با پخش نانو ذرات Al_2O_3 و CuO در آب، افزایش در هدایت حرارتی برای نانوسیالات با ۵ درصد حجمی، به ترتیب ۲۹ و ۶۰ درصد گزارش شد. به طور شگفت آوری در نانوسیال روغن/ مس، هدایت حرارتی فقط با پخش ۰/۰۵۲ درصد از نانوذرات مس در روغن $HE - 200$ حدود ۴۰ درصد افزایش یافت.

لی[2] و همکارانش [۴] گزارش کردند که سوسپانسیون ۴ درصد حجمی از نانوذرات CuO با اندازه ۳۵ نانومتر در اتیلن گلیکول، ۲۰ درصد افزایش در قابلیت هدایت حرارتی موثر دارد. آن‌ها افزایشی در قابلیت هدایت حرارتی نانوسیال حاوی نانوذرات سرامیکی (Al_2O_3 وCuO) پخش شده در آب و اتیلن گلیکول گزارش کردند. آزمایشات ماسودا[3] و همکارانش نیز قابلیت حرارتی فوق العاده زیاد این سوسپانسیون‌ها را نشان می‌داد [۵]. دیگر آزمایشات انجام شده توسط گروه‌های مختلف نیز افزایش مقادیر خواص فیزیکی از جمله ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته بصورت تابعی از درصد حجمی ذرات نانو و دما را نشان می‌داد [۶-۱۰].

مدل‌های کلاسیک قابلیت هدایت حرارتی برای سوسپانسیون‌های حاوی میلی یا میکروذرات با غلظت پایین ارائه شده‌اند. از آن‌جا که مدل‌های کلاسیک نظیر مدل ماکسول [۱]، همیلتون-کراسر[4] [۱۱] و براگمن[5] (هوی[6] و همکاران [۱۲]) قادر به پیش‌بینی دقیق هدایت حرارتی افزایش یافته نانوسیالات نیستند، از این‌رو ارائه یک مدل قابل قبول برای هدایت حرارتی مؤثر نانوسیالات یکی از موضوعات جالب و مورد توجه در این حوزه است. تا کنون مدل‌های زیادی با در نظر گرفتن فرضیات مختلف پیشنهاد شده‌است.

کبلینسکی و همکارانش [۱۳] چهار مکانیزم ممکن برای افزایش غیر عادی در انتقال حرارت نانوسیال‌ها را توضیح دادند: ۱) حرکت برآونی[7] نانوذرات ۲)لایه مایع در سطح بین مایع / ذره ۳)اثر کلاستر[8] نانو ذرات ۴)طبیعت انتقال حرارت در نانوذرات. آن‌ها نشان دادند که حتی در محدوده ذرات بسیار کوچک، پخش حرارتی خیلی سریع‌تر از پخش برآونی است. وانگ و

[1] Eastman
[2] Lee
[3] Masuda
[4] Hamilton-Crosser
[5] Bruggeman
[6] Hui
[7] Brownian motion
[8] Cluster

همکارانش [۱٤] نشان دادند که حرکت برآونی[1] سهم قابل توجهی در انتقال انرژی حرارتی در نانوسیال‌ها ندارد و لایه دوگانه الکتریکی و نیروی واندروالس می‌توانند اثرات الکتروسینتیک زیادی روی نانو ذرات داشته باشند.

گروهی از محققان [۱۵-۱۸] با اصلاح مستقیم مدل ماکسول و یا همیلتون-کراسر و در نظر گرفتن اثر لایه بین سطحی مدل‌های جدیدی ارائه کردند. لئونگ[2] و همکارانش [۱۹] با فرض نانوذره مرکب (نانوذره + نانولایه) مدلی برای ضریب هدایت حرارتی موثر نانوسیال پیشنهاد کرده‌اند. مدل پیشنهادی مورشد[3] [۲۰] شامل اکثر مکانیزم‌های موثر در هدایت حرارتی افزایش یافته نانوسیالات مانند اندازه ذرات، نانولایه، حرکت ذرات و فعل و انفعال ذرات می‌باشد. آن‌ها نشان دادند که عامل اصلی این افزایش در مکانیزم‌های استاتیک است.

اغلب محققان اندازه ذرات پخش شده در سیال را یکنواخت در نظر گرفته‌اند. در حالی-که در واقع، ذرات درون سیال ممکن است اندازه‌های مختلف داشته، برخی از آن‌ها به هم چسبیده و کلاسترهایی در اندازه‌های متفاوت تشکیل دهند. هانگ[4] و همکاران [۲۱] به مطالعه اثر کلاستر شدن نانوذرات بر هدایت حرارتی نانوسیال پرداخته‌اند. آن‌ها اندازه متوسط کلاسترها را محاسبه کردند. هاولین و بن– آوراهام[5] [۲۲]، توزیع اندازه نانوذرات و توزیع نانوذرات در سوسپانسیون را نشان دادند.

وانگ[6] و همکارانش [۲۳] با آزمایشات خود نشان دادند که توزیع اندازه نانوذرات و کلاسترها از قانون فرکتال[7] پیروی می‌کند. با این حال کاربرد مدل آن‌ها بسیار پیچیده است. ایکسیو[8] و همکاران [۲٤] بر اساس توزیع فرکتال اندازه ذرات و انتقال حرارت جابجایی ناشی از حرکت برآونی نانوذرات، یک مدل فرکتال برای قابلیت هدایت حرارتی موثر نانوسیال ارائه کردند. اخیر اً نیز فنگ[9] [۲۵] بر مبنای توزیع فرکتال اندازه ذرات و انتقال حرارت جابجایی ناشی از حرکت برآونی، یک مدل تحلیلی- عددی ارائه کرده است.

در ادامه مطالعات روی قابلیت هدایت حرارتی، بررسی‌ها روی انتقال حرارت جابجایی در نانوسیال‌ها آغاز شد. هر چند حتی قبل از مطالعات روی هدایت، پک و چو[10] [۲٦] انتقال حرارت

---

[1] Brownian motion
[2] Leong
[3] Murshed
[4] Hong
[5] Havlin and Ben-Avraham
[6] Wang
[7] Fractal low
[8] Xu
[9] Feng
[10] Pak and Cho

جابجایی در رژیم جریان مغشوش را به صورت تجربی بررسی نمودند و دریافتند که عدد ناسلت نانوسیال با افزایش درصد حجمی نانوذرات معلق و عدد رینولدز افزایش می‌یابد.

اولین مطالعات آزمایشگاهی بررسی انتقال حرارت جابجایی جریان آرام با شرط مرزی شار ثابت در دیواره‌ها انجام شد. برای مثال، ون و دینگ[۱]، زینلی هریس[۲] و همکارانش و هوانگ[۳] و همکارانش، عملکرد نانوسیال آب/ آلومینا را در لوله‌های افقی در شرایط آرام بررسی و افزایش قابل ملاحظه‌ای در انتقال حرارت مشاهده کردند [۲۷-۲۹]. لی و موداوار[۴]، همچنین جونگ[۵] و همکارانش، افزایش انتقال حرارت نانوسیال، در شرایط جریان آرام درون میکروکانال‌ها را گزارش دادند [۳۰-۳۱]. پک و چو[۶]، عملکرد نانوسیال‌های مختلف درون لوله‌های افقی را، در جریان آشفته، بررسی کرده و افزایش در نرخ انتقال حرارت را مشاهده کردند[۳۲].

در این راستا ویلیامز[۷] و همکارانش افزایش غیر عادی در نرخ انتقال حرارت جریان آشفته نانوسیال، درون لوله افقی را مشاهده نکردند. آنها بیان کردند که اگر از داده‌های درست خصوصیات فیزیکی نانوسیال‌ها استفاده گردد، می‌توان از روابط عادی، عملکردشان را پیش‌بینی کرد [۳۳].

اخیرا نگاین[۸] و همکارانش کاربرد نانوسیال آب/ آلومینا را در یک سیستم الکتریکی خنک کننده مایع بررسی کردند. آن‌ها افزایش قابل توجهی از ضریب انتقال حرارت جابجایی حدود ۴۰ درصد، برای غلظت حجمی حدود ۷ درصد از نانوذرات را مشاهده کردند [۳۴]. دانگشنگ و یولانگ[۹] برای نانوسیال اکسید آلومینیوم در حالت آرام، مطالعه‌ای به صورت آزمایشگاهی انجام دادند و بازده حرارتی را برای رینولدزهای مختلف بررسی کردند [۳۵].

جو و تزنگ[۱۰]، جابجایی طبیعی نانوسیال را داخل یک حفره مستطیلی به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند با افزایش درصد حجمی نانوذرات، ضریب هدایت حرارتی متوسط افزایش می‌یابد [۳۶].

بسیاری از مطالعات عددی برای ارزیابی کاربرد نانوسیال‌ها در تجهیزات انتقال حرارت انجام شده است. دوانگتونگساک[۱] و وانگویسز[۲] مطالعه تجربی را روی انتقال حرارت جابجایی

---

[1] Wen and Ding
[2] Zeinali Heris
[3] Hwang
[4] Lee and Mudawar
[5] Jung
[6] Pak and Cho
[7] Williams
[8] Nguyen
[9] Dongsheng and Yulong
[10] Jou and Tzeng

اجباری و مشخصه‌های جریان نانوسیال آب/ اکسید تیتانیوم[3] (با غلظت حجمی ۲%) درون یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای با جریان مخالف و در شرایط جریان آشفته انجام دادند. آن‌ها دریافتند که ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال % ۶ تا ۱۱% بیشتر از حالت سیال پایه شده است که با افزایش نرخ جریان جرمی سیال گرم و نانوسیال و با کاهش دمای نانوسیال افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده کردند دمای سیال گرم تأثیر چندانی بر ضریب انتقال حرارت ندارد [۳۷].

نامبارو[4] و همکارانش جریان آشفته و انتقال حرارت نانوسیال‌های مختلف (اکسید آلومینیوم، اکسید سیلیسیوم و اکسید مس) درون آب و اتیلن گلیکول را درون لوله دایروی در شرایط شار ثابت بصورت عددی مطالعه کردند. آنها دریافتند که نانوسیال‌ها شامل نانوذرات با قطر کوچکتر، ویسکوزیته و عدد ناسلت بالاتری را دارا هستند. همچنین ضریب انتقال حرارت نانوسیال با افزایش غلظت حجمی نانوذرات و عدد رینولدز زیاد می‌شود. دمای عملکرد بالای نانوسیال‌ها نیز درصد افزایش نرخ انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. در غلظت‌های مشابه و عدد رینولدز خاص، نانوسیال اکسید سیلیسیوم عملکرد حرارتی بالاتری را نسبت به اکسید مس و اکسید آلومینیوم دارد [۳۸].

پک و چو مطالعاتی را در مورد ویسکوزیته، افت فشار و انتقال حرارت نانوسیال دی اکسید تیتانیوم تا غلظت حجمی ۳% انجام دادند. آنها رابطه‌ی تکفازی را برای نانوسیال‌ها بدست آوردند و گزارش دادند که ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال با افزایش غلظت حجمی و عدد رینولدز افزایش می‌یابد [۳۲].

زوان و لی[5] آزمایش تجربی را روی نانوسیال آب-مس در غلظت حجمی ۲% انجام دادند و رابطه عدد ناسلت را توسعه دادند. آنها دریافتند که این نانوسیال در رینولدزهای مشابه، افت فشار مشابهی را در مقایسه با آب دارد [۳۹].

اکبری‌نیا و بهزادمهر جابجایی ترکیبی نانوسیال در شرایط جریان آرام را در یک لوله خمیده بصورت عددی بررسی کردند و گزارش دادند که در گراشف‌های بالا اصطکاک سطحی کاهش می‌یابد[۴۰]. مایگا[6] نیز رفتارهای گرمایی و هیدرودینامیکی نانوسیال آب/ آلومینا[7] در جریان متلاطم کاملاً توسعه یافته درون لوله در شرایط شار ثابت را مطالعه کرده است [۴۱].

---

[1] Duangthongsuk
[2] Wongwises
[3] TiO2
[4] Namburu
[5] Xuan and Li
[6] Maiga
[7] Al2O3

فصل دوم

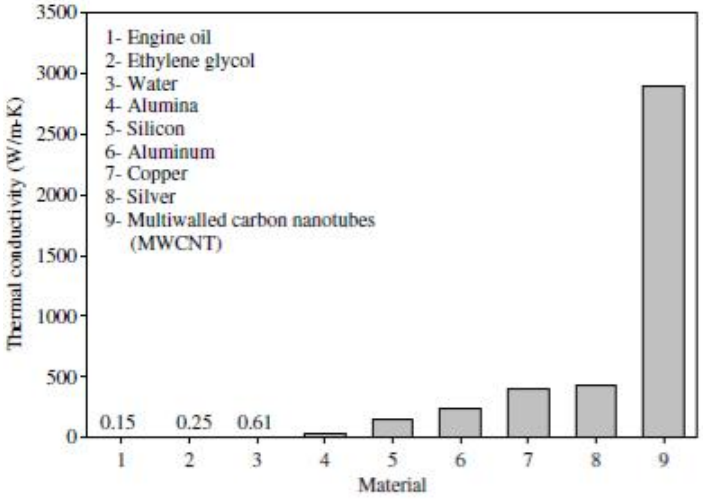
نانوسیال

۲-۱ مقدمه

نانوسیال به سیالات حاوی ذرات معلق در ابعاد نانو (کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر) اتلاق می-شود. این سوسپانسیون‌ها پتانسیل زیادی برای افزایش انتقال حرارت از خود نشان می‌دهند و به همین جهت توجه خاصی به این گروه از سیالات به عنوان محیط‌های انتقال حرارت انجام می-گیرد. نانو سیالات به علت نسبت سطح به حجم بالایشان معلق باقی مانده و در مقایسه با سوسپانسیون‌های حاوی میلی یا میکروذرات، گرفتگی و فرسایش مجاری را کاهش می‌دهند. همچنین برای استفاده در میکروسیستم ها مناسب اند چراکه به مراتب کوچکتر از میکروسیالات هستند. نانوسیال دارای دو جزء اصلی است:

الف) سیال پایه: منظور از سیال پایه سیالی است که نانوذره به آن افزوده می‌شود. با توجه به اینکه رویکرد نانوسیال بهبود انتقال حرارت توسط سیالات متداول نظیر آب می‌باشد، سیال پایه یکی از انواع سیالات حامل انرژی خواهد بود.

ب) نانوذرات: جزء دوم نانو سیال را نانو ذرات تشکیل می‌دهند. نانو ذرات مورد استفاده می‌توانند انواع نانوذرات اکسیدی نظیر اکسید آلومینیم یا اکسید مس، نانوذرات فلزی مانند مس و یا نانوتیوپ‌های کربنی باشند. واضح است که در دمای اتاق جامدات فلزی ضریب انتقال حرارت هدایتی بیشتری نسبت به سیالات دارند. نمودار یک این مقایسه را نشان می‌دهد [۴۹].



شکل ۲-۱: قابلیت هدایت حرارتی مواد در دمای محیط [۴۹]

۲-۲ تهیه نانوسیال

تهیه نانوسیال اولین مرحله کلیدی بررسی عملکرد انتقال گرمای نانوسیال در مطالعات آزمایشگاهی است. یک نانوسیال به معنای مخلوط ساده‌ای از سیال و نانوذرات نیست، شیوه‌های پخش صحیح و پایدار نانوذرات درون سیال، یا تهیه نانوسیال‌های پایدار بطور مستقیم، بسیار مهم می‌باشد. دو شیوه اصلی برای تهیه نانوسیال‌ها وجود دارد [۲] و [۳]:

۲-۲-۱ روش تهیه یک مرحله‌ای

در روش یک مرحله‌ای یا روش تبخیر مستقیم، نانوذرات درون خود سیال تولید و پراکنده می‌شوند. این روش شامل تبخیر منبع فلزی تحت شرایط خلأ است. به عنوان مثال برای تولید نانوذرات فلزی در یک سیال، بخار فلز مستقیماً به درون سیال پایه هدایت می‌شود تا به شکل نانوذرات متراکم گردد. مزیت استفاده از این روش این است که، بعلت اینکه سطح نانوذرات در معرض شرایط نامطلوب قرار نمی‌گیرند، بسیار تمیز باقی می‌مانند. همچنین پدیده کلوخه‌ای شدن[۱] و انباشتگی[۲] نانوذرات، به حداقل می‌رسد. اشکال این روش این است که سیال باید فشار بخار کمی داشته باشد و با این روش مقدار بسیار کمی نانوسیال می‌توان تهیه کرد. با این حال روش‌های شیمیایی تک مرحله‌ای برای تهیه نانوسیال‌ها بوجود آمده است که از آن جمله می‌توان به روش احیای نمک فلزات و تهیه سوسپانسیون آن در حلال‌های مختلف برای تهیه نانوسیال فلزات اشاره کرد.

۲-۲-۲ روش تهیه دو مرحله‌ای

در فرآیند دو مرحله‌ای، ابتدا نانوذرات یا نانولوله‌ها با روش رسوب بخار شیمیایی در فضای گاز بی اثر بصورت خشک تهیه می‌شوند، سپس درون سیال پخش می‌گردند. برای این کار از روش‌هایی مانند لرزاننده‌های مافوق صوت، همزن مغناطیسی و همگن‌ساز[۳] استفاده می‌شود، تا توده‌های نانوذره‌ای به حداقل رسیده و باعث بهبود رفتار پراکندگی شود. روش دو مرحله‌ای برای بعضی موارد، مانند اکسید فلزات در آب دیونیزه شده، مناسب می‌باشد و برای نانوسیال‌ها شامل نانوذرات فلزی سنگین کمتر موفق بوده است. روش پخش صحیح و کسر حجمی کوچک نانوذرات برای تهیه نانوسیال‌های پایدار توسط این روش مهم می‌باشند. مزیت استفاده از روش دو

[1] Clustering
[2] Crowding
[3] Homogenizer