





دانشکده : مهندسی مکانیک

گروه : تبدیل انرژی

بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت نانوسیال در محیط متخلخل

دانشجو : مجتبی آشوری

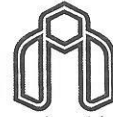
استاد راهنما : دکتر محمد حسن کیهانی

استاد مشاور: دکتر محسن نظری

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی شاهرود



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره:

تاریخ:

ویرایش:

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای مجتبی آشوری رشته مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت نانوسیال در محیط متخلخل که در تاریخ ۱۳۹۲/۱۰/۱۴ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

<input type="checkbox"/> مردود	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input type="checkbox"/> (امتیاز <u>۲</u>) عالی
--------------------------------	------------------------------------	---

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱- عالی (۱۹ - ۲۰)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استاد تمام	دکتر محمد حسن کیهانی	۱- استاد راهنما
	استادیار	دکتر محسن نظری	۲- استاد مشاور
	م.ری	مهندس احمد مددی	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر محمود نوروزی	۴- استاد ممتحن
	استادیار	دکتر علی سررشته داری	۵- استاد ممتحن

رئیس دانشکده:

امضاء

ت. مردان

امضاء
۱۳۹۲



تقدیم به:

پدر بزرگوار و مادر مهربانم

آن دو فرشته ای که از خواسته هایشان گذشتند، سختی ها را به جان خریدند و خود را سپر بلای مشکلات و ناملايمات کردند تا من به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده ام برسم.

و به خواهرم به خاطر تمام دلگرمی هایش.

تشکر و قدردانی:

بسم الله الرحمن الرحيم هست کلید در گنج حکیم

با سپاس فراوان از لطف خدای مهربان

با تشکر از دو استاد بزرگوام که شایسته ی هر نوع سپاس، تجلیل و تکریم‌اند:

جناب آقای دکتر محمد حسن کیهانی؛ استاد راهنمای ارجمند و جناب آقای دکتر محسن نظری؛
استاد مشاور محترم که با ایجاد عشق به نوشتن، صبورانه، با ارائه‌ی رهنمودها، انتقادهای و پیشنهادهایشان،
در تمامی مراحل اجرای پایان نامه مرا حمایت و تشویق نمودند.

از پدرم که در تمامی مراحل پایان نامه مشوق و حامی من بود.

از استادان محترمی که در طول دوران تحصیلی‌ام در دوره ی کارشناسی ارشد، جهت آموزش و
ارتقای علمی بنده، زحمت کشیده اند سپاسگزارم.

در پایان هم از همراهی دوستان عزیزم مهندس کرمی، تاشی، جعفری، شوقی و تمامی کسانی که
ذکر نامشان در این مقال نمی‌گنجد صمیمانه قدردانی نمایم 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.

بهمن ۱۳۹۳

تعهد نامه

اینجانب مجتبی آشوری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته تبدیل انرژی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت نانوسیال در محیط متخلخل تحت راهنمایی دکتر محمد حسن کیهانی متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

چکیده

توجه به افزایش راندمان فرایندهای انتقال حرارت در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. این توجه ویژه سبب شده تا سمت و سوی این تحقیقات به استفاده از روش‌ها و محیط‌های جدید سوق داده شود. نانوسیال از معلق سازی نانوذرات در سیالات پایه تولید می‌شوند و محیط‌های متخلخل نیز محیط‌هایی هستند که بصورت منظم یا نامنظم در ساختار آنها از ذرات و قسمت‌های جامد استفاده شده است. با توجه به مطالعات انجام شده در این زمینه، انتقال حرارت نانوسیال در محیط متخلخل به طور کامل بررسی نشده است؛ به عبارت دیگر این کار از اولین تحقیقاتی است که بصورت آزمایشگاهی به انتقال حرارت جابجایی نانوسیال در محیط متخلخل پرداخته است. در این پروژه انتقال حرارت جابجایی نانوسیال در یک لوله متخلخل در دو شرط مرزی متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. شرط مرزی اعمال شده در سطح لوله، شرط شار ثابت و شرط دما ثابت است. محیط متخلخل مورد استفاده توسط دو روش جایگزین در دو تخلخل ۰/۵ و ۰/۶۳ و قرار دادن ماده متخلخل در لوله (به ترتیب برای حالت دما ثابت و شار ثابت) ساخته شده است. از نانوسیال آلومینا با درصد حجمی ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد (تولید شده از نانوذرات با اندازه ۴۰ نانومتر) برای حالت دما ثابت و نانوسیال آلومینا با درصد حجمی ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد به همراه نانوسیال کربنی با درصد حجمی ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد (تولید شده از ذرات با اندازه کمتر از ۳۰ نانومتر) برای حالت شار ثابت که با روش دومرحله‌ای ساخته شده‌اند، بکار گرفته شده است. نانوسیال در سیکل طراحی شده جریان یافته و اندازه گیری‌های دما با توجه به پارامترهای مورد نیاز در هر یک از شرایط مرزی انجام می‌شود. همچنین افت فشار ایجاد شده در طول لوله آزمایش توسط یک دستگاه اندازه‌گیری افت فشار ثبت و گزارش می‌شود. آزمایش در دبی‌های مختلف و در هر در هر دبی ۳ مرتبه تکرار شده و نتایج آن بوسیله روش آماری بازه اطمینان^۱ با دقت ۹۵ درصد

^۱ Confidence Interval

آماری محاسبه می‌شوند. همچنین برای صحت سنجی نتایج با استفاده توسط یک لوله خالی با شرایط مشابه لوله متخلخل پارامترهای مورد نظر اندازه‌گیری و نتایج آن با روابط تک فاز موجود در مراجع مقایسه شده است. نتایج این مقایسه حاکی از خطای قابل قبول نسبت به نتایج پیش‌بینی شده است.

نتایج بدست آمده در حالت دما ثابت نمایانگر افزایش حداکثر ۵۷ درصدی انتقال حرارت جابجایی در عدد رینولدز ۳۷۰۴ برای تخلخل ۵۰٪ می‌باشد در حالی که انتقال حرارت حداکثر ۴۵ درصدی در رینولدز ۳۱۷۵ در تخلخل ۶۳٪ برای ناسلت نانوسیال آلومینا نسبت به سیال پایه در محیط متخلخل است. همچنین نتایج حاکی از افزایش شدید انتقال حرارت نسبت به لوله خالی در این حالت می‌باشد. نتایج در حالت شار ثابت نیز بسیار مشابه می‌باشد، افزایش حداکثر ۳۱ درصدی در رینولدز ۵۳۸۸ برای نانوسیال آلومینا با غلظت حجمی ۱٪ و افزایش حداکثری ۳۳ درصدی در رینولدز ۳۴۸۹ برای نانوسیال کربنی با غلظت حجمی ۵/۰٪ در این حالت مشاهده شده است. افت فشار اندازه‌گیری شده نیز نمایانگر افزایش شدید در محیط متخلخل نسبت به لوله خالی است. همچنین افزایش افت فشار نانوسیال نسبت به سیال پایه نیز برای تمامی حالات مشهود است.

کلمات کلیدی: نانوسیال، محیط متخلخل، بررسی تجربی، نانو ذرات، افت فشار

لیست مقالات مستخرج

- محسن نظری، مجتبی آشوری، محمد حسن کیهانی؛ بررسی آزمایشگاهی اثر ماده متخلخل بر

جابجایی اجباری جریان نانوسیال درون یک لوله دماثابت؛ تربیت مدرس (پذیرش)

- M. Nazari, M. Ashouri, M H. Kayhani, A. Tamayol; Experimental Study of Convective Heat Transfer of a Nanofluid through a Pipe Filled with Metalfoam; **Journal of Thermal Science (IF 2.5)** (Revise)

- M. Ashouri, M. Nazari, M H. Kayhani, M. Karami; Experimental investigation of heat transfer of Alumina and CNT nanofluids in a porous pipe with uniform heat flux; **Journal of Heat Transfer, ASME (IF 1.45)** (Submit)

لیست علائم

A سطح انتقال حرارت (m^2)

C ظرفیت ویژه حرارتی (kJ/kgK)

D قطر لوله (m)

m نرخ جرمی جریان (kg/s)

Q نرخ دبی حجمی (m^3/s)

q شار حرارتی (W)

T دما ($^{\circ}K$)

U سرعت (m/s)

h ضریب جابجایی (w/mK)

k هدایت حرارتی سیال

Nu عدد ناسلت

Re عدد رینولدز

St عدد استانتون

علائم یونانی

λ هدایت حرارتی محیط متخلخل

ρ چگالی جرمی (Kg/m³)

ϕ درصد حجمی

μ ویسکوزیته (N-s/m²)

زیرنویس ها

w دیواره

eff موثر

in ورودی

out خروجی

n نانوپودر

bf سیال پایه

b دمای بالک

e طول ورودی

فهرست مطالب

۱	۱- فصل یکم: اهداف و رؤوس مطالب
2	1-1-1- مقدمه
2	2-1-1- رؤوس مطالب
3	3-1-1- اهداف
۵	۲- فصل دوم: مروری بر مطالعات گذشته
6	1-2-1-1- مقدمه های بر مفهوم های فلزی
6	1-1-2-1- مفهوم مواد متخلخل
7	2-2-1-1- انواع و مفاهیم های فلزی
8	3-1-2-1- انتقال حرارت در مفهوم های فلزی
14	2-2-2-1- مقدمه های بر نوسه های ال
16	2-2-1-2-1- نوسه های نوسه های ال
16	2-2-2-2- بررسی نتایج بی انتقال حرارت هتت نوسه های ال
17	3-2-2-3- طالع انتحاطی هتت حرارتی
22	4-2-2-4- انتقال حرارت بی چلی نوسه های ال
26	3-2-3-3- انتقال حرارت بی چلی نوسه های ال در محیط متخلخل
۲۹	۳- فصل سوم: دستگاه آزمایشگاهی
32	1-3-1-1- مواد و تجهیزات
32	1-3-1-2- اول تقسرت
32	2-1-3-1- پمپ
32	3-1-3-1- تبدیل حرارتی
32	4-1-3-1- سرنسور
32	5-1-3-1- دستگاه ثبت دما
33	6-1-3-1- دستگاه اندازه گیری فلششار
34	7-1-3-1- نوسه های ال
38	8-1-3-1- نحوه اعمال شرط مرزی
38	3-2-3-2-1- الیتراسون و انجام آزمایشات
39	2-3-1-1- حالت شار ثبلیت
41	2-3-2-1- حالت دم ثبلیت
42	3-3-2-3- روش کار
۴۳	۴- فصل چهارم: صحت سنجی نتایج

- 44-4-1-1-4 44
- 44-1-1-4 عروق اسلت
- 52-1-4-2 غلدفش ار
- ۵۳ - فصل پنجم: بررسی نتایج لوله متخلخل
- 54-1-5-1 عروق اسلت در یوار لیلیه
- 54-1-1-5 عروق اسلت
- 59-1-5-2 غلدفش ار
- 62-2-5-1 عروق اسلت در یوار لیلیه
- 62-1-2-5 عروق اسلت
- 65-2-2-5 غلدفش ار
- ۶۹ - فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات
- 72-1-6 جگی ری
- 72-2-6 چیژن هادات
- ۷۵ - پیوست الف: فومهای فلزی
- 77-1-7 کابرد های مولدت خلخل
- 78-1-1-7 صنعت حمل و نقل
- 79-2-1-7 جذبکننده ضربه
- 79-3-1-7 سطوح وسیع
- 79-4-1-7 ذخیره و انتقال طعات
- 82-5-1-7 سجدل های حراتی و سردلقی ها
- 81-2-7 روش های تولیدی فوم های فلزی
- 82-1-2-7 فوم سازی از طریق تزریق گاز
- 83-2-2-7 روش عمل فوم سازی
- 85-3-2-7 روش عمل فوم سازی (تخت گیری)
- 85-4-2-7 روش عمل خارج شدنده تمام لوی پیودر
- 86-5-2-7 روش رسوگذار ی لالتولفی
- 87-3-7 نمونه های ازکار هایت جپی ان جامشده در زمین هساخت و فم لزی
- 92-4-7 خواص مولدت خلخل
- 92-5-7 خواص حراتی فوم های فلزی
- 93-1-5-7 دمای ذوب
- 93-2-5-7 گرمای ویژه
- 94-3-5-7 ضریب بقیس اط حراتی

۹۵	..... پیوست ب: نانوسیالات
97	..... 1-8-1 متی‌ن‌نوسه‌ال
97	..... 1-1-8-1 روش‌تی‌هک و حل‌های
122	..... 2-1-8-2 روش‌تی‌ه دو و حل‌های
123	..... 2-8-2 پیل‌داری‌ن‌ذرات در نوسه‌الات
124	..... 2-8-1 تی‌غیر pH سوسه‌یل‌یون
124	..... 2-2-8-2 لسته‌فاده از فع‌ال‌ن‌ده‌های سطح و پخش‌ن‌ده‌ها
125	..... 3-2-8-3 لسته‌فاده از نوسه‌ات‌ماورای‌صوت
125	..... 3-8-3 خصوسه‌ات‌ن‌وسه‌ال‌بر‌بنی‌ای و صد‌ح‌ج‌می و ج‌رم‌ی
127	..... 3-8-1-1 گ‌ج‌الی و ظ‌وی‌ت‌حراتی
127	..... 3-8-2 گ‌ران‌روی:
129	..... 3-8-3-3 ررس‌یت‌ج‌بی‌ت‌قال‌حرارت هط‌ت‌ن‌وسه‌الت
۱۱۱	..... مراجع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ انواع توزیع یک فاز در یک فاز دیگر، هر فاز می تواند یکی از سه حالت ماده باشد [۱] ۶
- شکل ۲-۲ تغییرات هدایت حرارتی λ ، با تغییر گرمای ویژه حجمی $C_p \rho$ برای فوم های موجود، هدایت حرارتی [۳] ۹
- شکل ۳-۲ نمونه محیط متخلخل مورد استفاده در [۱۶] ۱۲
- شکل ۴-۲ عدد ناسلت متوسط برای هوا [۱۶] ۱۲
- شکل ۵-۲ عدد ناسلت متوسط برای آب [۱۶] ۱۳
- شکل ۶-۲ ضریب هدایت حرارتی تعدادی از مواد [۱۸] ۱۵
- شکل ۱-۳ لوله تست با ماده متخلخل متصل ساخته شده با روش عامل فوم ساز ۳۱
- شکل ۲-۳ تخلخل بدست آمده با استفاده از جایگذاری توری آلومینیومی ۳۱
- شکل ۳-۳ دسیته گاه ثبت دما ۳۳
- شکل ۴-۳ دستگاه LD301 ۳۴
- شکل ۵-۳ تصویر SEM از نانوپودر کربنی مورد استفاده ۳۵
- شکل ۶-۳ ویسکوزیته سینماتیکی نانوسیال آلومینا در درصد حجمی های مختلف [۳۷] ۳۷
- شکل ۷-۳ هدایت حرارتی نانوسیال آلومینا در درصد حجمی های مختلف [۳۷] ۳۷
- شکل ۸-۳ نحوه اعمال شرط مرزی شار ثابت ۳۸
- شکل ۹-۳ شماتیک سیستم مورد استفاده در حالت شار ثابت ۳۹
- شکل ۱۰-۳ تصویر سیستم مورد استفاده در حالت شار ثابت ۴۰
- شکل ۱۱-۳ شماتیک سیستم در حالت دما ثابت ۴۱
- شکل ۱-۴ عدد ناست محاسبه شده تابعی از عدد رینولدز برای نانوسیال آلومینا ۴۶

- شکل ۴-۲ عدد ناسلت بدست آمده از آزمایش و مقایسه آن با روابط تئوری ۴۸
- شکل ۴-۳ میزان افزایش انتقال حرارت بر حسب رینولدز در لوله خالی ۴۹
- شکل ۴-۴ مقایسه افت فشار تجربی با رابطه بلازیوس ۵۱
- شکل ۴-۵ مقایسه خطای افت فشار روابط تئوری و آزمایشگاهی در لوله خالی ۵۲
- شکل ۵-۱ عدد ناسلت نانوسیال آلومینا بر حسب عدد رینولدز برای تخلخل ۵۰٪ با شرط مرزی دما ثابت ۵۵
- شکل ۵-۲ عدد ناسلت نانوسیال آلومینا بر حسب عدد رینولدز برای تخلخل ۶۳٪ با شرط مرزی دما ثابت ۵۵
- شکل ۵-۳ عدد ناسلت بر حسب برینولدز برای لوله های آزمایش با شرط مرزی دما ثابت ۵۶
- شکل ۵-۴ درصد افزایش عدد ناست نانوسیال آلومینا، تابعی از عدد رینولدز در لوله با تخلخل ۵۰٪ با دمای ثابت ۵۷
- شکل ۵-۵ درصد افزایش عدد ناست نانوسیال آلومینا، تابعی از عدد رینولدز در لوله با تخلخل ۶۳٪ با دمای ثابت ۵۷
- شکل ۵-۶ عدد استانتون بر حسب عدد رینولدز در لوله متخلخل با دمای دیواره ثابت ۵۸
- شکل ۵-۷ افت فشار لوله با تخلخل ۵۰٪ با دمای دیواره ثابت ۵۹
- شکل ۵-۸ افت فشار لوله با تخلخل ۶۳٪ با دمای دیواره ثابت ۶۰
- شکل ۵-۹ عدد ناست نانوسیال آلومینا، تابعی از عدد رینولدز در لوله متخلخل با شار ثابت ۶۳
- شکل ۵-۱۰ عدد ناست نانوسیال کربنی، تابعی از عدد رینولدز در لوله متخلخل با شار ثابت ۶۳
- شکل ۵-۱۱ درصد افزایش عدد ناست نانوسیال آلومینا، تابعی از عدد رینولدز در لوله متخلخل با شار ثابت ۶۴

- شکل ۵-۱۲ درصد افزایش عدد ناست نانوسیال کربنی، تابعی از عدد رینولدز در لوله متخلخل با شار ثابت
 ۶۴
- شکل ۵-۱۳ عدد استانتون بر حسب عدد رینولدز در لوله متخلخل با شار ثابت ۶۵
- شکل ۵-۱۴ افت فشار نانوسیال آلومینا در لوله متخلخل با شار ثابت ۶۶
- شکل ۵-۱۵ افت فشار نانوسیال کربنی در لوله متخلخل با شار ثابت ۶۶
- شکل ۷-۱ نمودار درختی روشهای تولید فوم های فلزی [۱] ۸۱
- شکل ۷-۲ ویژگی های کلی فومهای فلزی تولید شده با روش های مختلف [۳] ۸۲
- شکل ۷-۳ شماتیک تولید فوم فلزی با روش تزریق گاز [۳] ۸۳
- شکل ۷-۴ تولید فوم فلزی با روش عامل فوم ساز توسط شرکت Shinko wire [۳] ۸۴
- شکل ۷-۵ روش تولید فوم فلزی با عامل فوم ساز [۱] ۸۵
- شکل ۷-۶ روش متالوژی پودر برای ساخت فوم فلزی [۱] ۸۶
- شکل ۷-۷ تکنیک رسوب گذاری الکتریکی برای ساخت فوم فلزی سلول باز [۱] ۸۷
- شکل ۷-۸ فوم فلزی ساخته شده توسط جیانگ [۷۴] ۸۸
- شکل ۷-۹ دانه های سرامیکی به عنوان خارج شونده استفاده شده توسط چو [۷۵] ۸۸
- شکل ۷-۱۰ فوم سلول باز ساخته شده توسط چو [۷۵] ۸۹
- شکل ۷-۱۱ تصویر خارج شونده (کربومیاد) استفاده شده [۷۶] ۸۹
- شکل ۷-۱۲ تاثیر فشار اعمالی و اندازه خارج شونده بر شکل محیط متخلخل [۷۶] ۹۰
- شکل ۷-۱۳ فوم فلزی با حفرات باز که بین دو صفحه رسانای حرارتی قرار گرفته است. در اثر عبور سیال
 از داخل فوم به علت نسبت سطح به حجم زیاد آن، انتقال حرارت از صفحه رسانا به سیال به خوبی صورت
 میگیرد [۳] ۹۲

شکل ۸-۱ روش تک مرحله ای تهیه نانوسیال [۱۸] ۹۸

شکل ۸-۲ تصویر TEM نانوسیال حاوی نانوذرات مس که به طریق یک مرحله ای تهیه شده است [۸۲]

..... ۹۹

شکل ۸-۳ نانوسیال تهیه شده با استفاده از نانوذرات اکسید مس به طریق دو مرحله ای [۸۲] ۱۰۱

شکل ۸-۴ تصویر TEM از توده ای شدن نانوذرات [۸۸] ۱۰۲

١- فصل يكم: اهداف و رؤوس مطالب

۱-۱- مقدمه

در این تحقیق، ظرفیت بالقوه استفاده از تکنیک‌های جدیدی همچون استفاده از نانوسیالات و محیط‌های متخلخل در راستای بهبود کارایی سیستم‌های انتقال حرارت بررسی شده است. پیشرفت‌های اخیر در زمینه ساخت انواع جدید و کارآمدتر نانوسیالات و محیط‌های متخلخل باعث شده است تا محققان در سال‌های گذشته توجه ویژه‌ای به این حیطة داشته باشند. برای مثال ساخت نانوسیالات با ذرات ریزتر و پایداری بیشتر و گسترده شدن روش‌های ساخت و سازنده‌های مواد متخلخل از جمله این پیشرفت‌ها می‌باشند. البته مطالعاتی که در زمینه انتقال حرارت نانوسیالات در محیط‌های متخلخل انجام شده بسیار محدود و بیشتر به کارهای عددی پرداخته شده است، و می‌توان گفت این پروژه از اولین تحقیقات آزمایشگاهی در این زمینه است. هدف این پروژه بررسی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال در لوله متخلخل با دوشروط مرزی شار ثابت و دماتابت به منظور افزایش و بهبود انتقال حرارت در سیستم‌هایی است که قابلیت استفاده از این مواد را دارند. بیشتر سیستم‌های مدرن تولید انرژی در اندازه‌های بزرگ متکی به مکانیزم‌هایی است که انتقال حرارت جابجایی توسط سیال انجام می‌گیرد؛ بنابراین هر افزایش در انتقال حرارت جابجایی مستقیماً در مصرف انرژی تأثیر دارد. همچنین افت فشار نیز به‌عنوان یکی از پارامترهای مهم در صنعت در هر یک از آزمایشات مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۲- رئوس مطالب

ابتدا در این فصل (فصل اول) اهداف پایان‌نامه تبیین شده و پس از ذکر رئوس مطالب در ادامه مروری بر کارهای انجام شده در زمینه در زمینه انتقال حرارت نانوسیالات، محیط‌های متخلخل و تلفیق این دو حیطة بصورت جداگانه مورد بحث قرار گرفته شده است (فصل دوم). شیوه طراحی، معرفی تجهیزات استفاده شده و نحوه انجام آزمایش در فصل سوم مورد توجه قرار گرفته است. در فصل چهارم

نیز به بررسی صحت سنجی نتایج با استفاده از روابط تئوری و مقایسه آن با نتایج لوله خالی در حالت دما ثابت پرداخته ایم و فصل پنجم نتایج لوله متخلخل با هر دو شرط مرزی را مورد بحث قرار داده و در نهایت در فصل پایانی (فصل ششم) نتیجه‌گیری از نتایج بدست آمده و پیشنهادات کارهای آتی بیان شده است. در انتها نیز ویژگی‌ها و روش‌های ساخت نانوسیالات و مواد متخلخل در دو پیوست پایانی مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۳- اهداف

اهدافی مورد نظر در این پژوهش را می‌توان به این صورت خلاصه نمود:

- ✓ محاسبه انتقال حرارت نانوسیال در لوله خالی و مقایسه نتایج آن با روابط موجود برای سیال تک فاز؛
- ✓ محاسبه انتقال حرارت نانوسیال آلومینا در ۵ درصد حجمی در لوله متخلخل با دو تخلخل متفاوت با شرط مرزی دمای دیواره ثابت و مقایسه آن با نتایج لوله خالی؛
- ✓ محاسبه انتقال حرارت نانوسیال آلومینا در ۴ درصد حجمی و نانوسیال کربنی در ۳ درصد حجمی در لوله متخلخل با شرط مرزی شار یکنواخت در دیواره؛
- ✓ محاسبه و مقایسه انتقال حرارت نانوسیال و سیال پایه در هر یک از حالات ذکر شده؛
- ✓ اندازه‌گیری و مقایسه افت فشار ایجاد شده در اثر استفاده از لوله متخلخل برای هر یک از لوله‌های آزمایش؛
- ✓ اندازه‌گیری و مقایسه افت فشار ایجاد شده در اثر استفاده از نانوسیال نسبت به استفاده از سیال پایه.

حال با روشن شدن ابعاد و اهداف پروژه در فصول آینده به بررسی تفصیلی تحقیقات و فرآیند

آزمایشگاهی انجام شده در راستای نیل به اهداف مشخص شده می‌پردازیم.

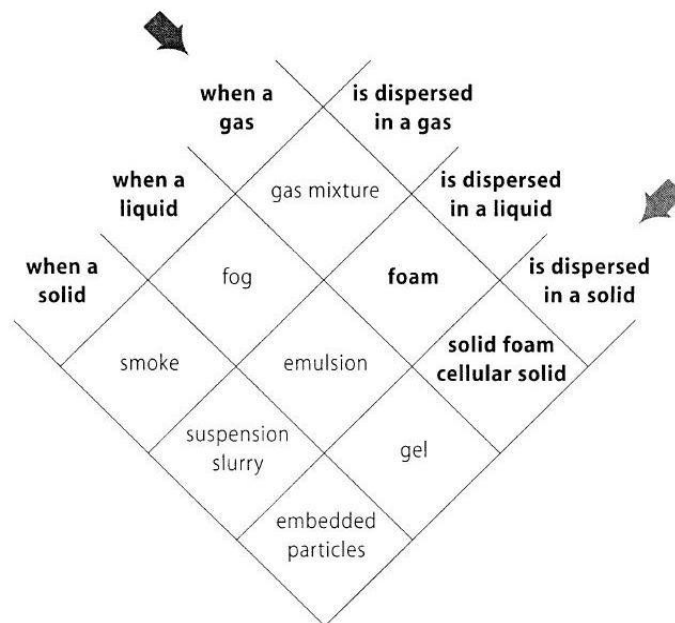
۲- فصل دوم: مروری بر مطالعات گذشته

۱-۲- مقدمه‌ای بر فوم‌های فلزی

۱-۱-۲- مفهوم مواد متخلخل

با پیشرفت تکنولوژی استفاده از مواد جدید از اهمیت ویژه‌ای برای دانشمندان برخوردار بوده و می‌تواند اثر بسیار شگرفی بر زندگی بشر داشته باشد. فوم‌های فلزی یکی از این مواد هستند که دانشمندان با بوجود آوردن آنها پای در فضای گسترده و جدید صنعتی گذاشتند. عموماً مابین ۳۰ تا ۹۵٪ ساختار فوم از منفذ ساخته شده است که می‌تواند متصل به هم یا به هم چسبیده باشد.

واژه فوم همیشه به درستی به کار نمی‌رود و بنابراین شاید لازم باشد تعریف روشنی از آن ارائه شود. شکل ۱-۲ همه‌ی توزیع‌های ممکن یک فاز در فاز دومی (که هر فاز می‌تواند یکی از سه حالت ماده باشد) را بیان می‌کند. فوم‌ها توزیع یکنواخت یک فاز گازی در یک فاز مایع یا جامد می‌باشند.



شکل ۱-۲ انواع توزیع یک فاز در یک فاز دیگر، هر فاز می‌تواند یکی از سه حالت ماده باشد [۱]

واژه فوم در معنی و بیان اصلی برای پراکندگی حباب‌های گازی در یک مایع به کار می‌رود. وقتی از فوم‌های فلزی صحبت می‌شود به طور کلی منظور فوم‌های جامد می‌باشد. اغلب اوقات این ساختارهای متخلخل را فوم می‌نامند اگرچه واژه اسفنج برای این مواد مناسب‌تر به نظر می‌رسد [۱].

۲-۱-۲- انواع فوم‌های فلزی

فوم‌های فلزی را می‌توان از لحاظ ساختار قرار گیری حفره‌ها در کنار یکدیگر به دو دسته کلی تقسیم نمود که هر یک از این دو نوع فوم داری ویژگی‌ها محاسن و معایبی هستند.

۲-۱-۲-۱- فوم فلزی سلول بسته

در این گونه از مواد متخلخل حفره‌ها با یکدیگر ارتباطی ندارند. و سیال قابلیت عبور از بین این مواد را ندارد. این نوع فوم‌ها معمولاً در کاربردهایی همچون جاذب صدا یا افزایش انتقال حرارت هدایت مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۲-۱-۲- فوم فلزی سلول باز

در این گونه از مواد متخلخل حفره‌ها بصورت پیوسته به یکدیگر متصل هستند. به عبارت دیگر این گونه قابلیت عبور سیال از میان حفره‌های خود را دارند که این سیال می‌تواند بسته به نوع استفاده، مختلف باشد. سطح تماس بالای این نوع فوم‌ها با سیال عبوری می‌تواند پتانسیل خوبی برای افزایش انتقال حرارت جابجایی این نوع مواد باشد. البته ساخت این نوع فوم‌ها دازای مشکلات فراوانی است از این- رو ساخت این نوع فوم یکی از دغدغه‌های پژوهشگران می‌باشد.

۲-۱-۳- انتقال حرارت در فوم‌های فلزی

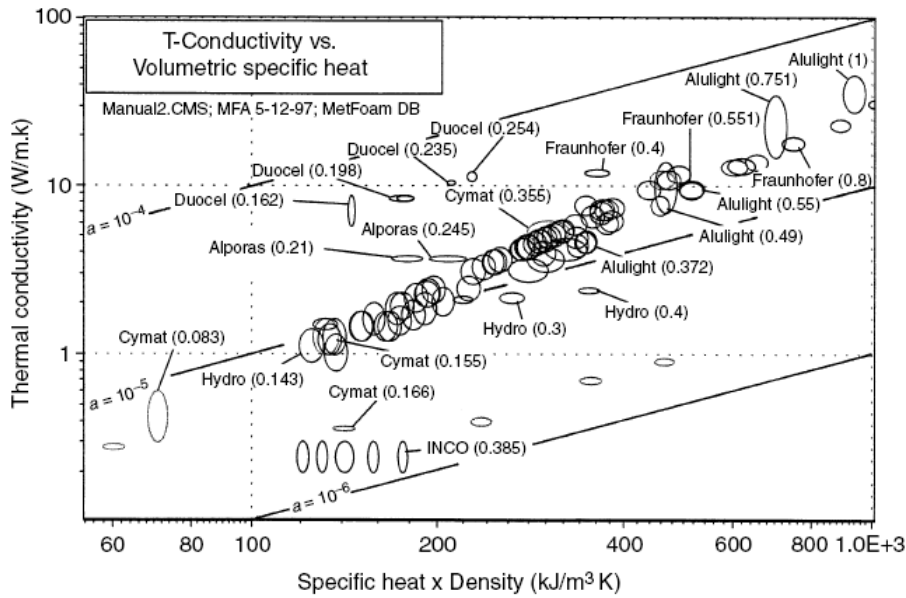
۲-۱-۳-۱- هدایت حرارتی

بدیهی است که هدایت حرارتی فوم‌های فلزی λ مقدار خیلی کمتری در مقایسه با توده فلز خواهد داشت. در مقایسه با هدایت الکتریکی، این خاصیت خیلی پیچیده‌تر است. چهار جز در هدایت حرارتی ساختار متخلخل مشارکت دارند: علاوه بر هدایت حرارتی دیواره‌های سلول جامد، هدایت حرارتی گازهای محبوس و اثر تابش و همرفت نیز باید در نظر گرفته شود.

$$\lambda = \lambda_s + \lambda_G + \lambda_r + \lambda_c \quad \text{معادله ۱-۲}$$

در معادله ۱-۲، S هدایت حرارتی دیواره‌های سلول جامد، G هدایت حرارتی گاز درون حفره‌ها، c همرفت در سلول‌ها و r تابش دیواره‌های سلول است. هم‌چنین حضور اکسیدهای فلزی (که هدایت حرارتی کمی دارند) بر روی سطح دیواره‌های سلول هدایت حرارتی فوم را تحت تاثیر قرار می‌دهند.

در فوم‌های فلزی تنها پارامتر λ_c در معادله نقش مهمی را ایفا می‌کند و سه پارامتر دیگر در دماهای معمول قابل چشم‌پوشی است. هدایت حرارتی گاز در درون حفرات λ_G در مقایسه با هدایت حرارتی فلز، بسیار کم است. پدیده همرفت تنها در فوم با اندازه حفرات بزرگتر از ۱۰ میلی‌متر که در دمای محیط با هوا پر شده‌اند، اثر قابل توجهی دارد و از آنجا که اندازه حفرات فوم‌های فلزی بطور معمول خیلی کوچکتر از این مقدار است، می‌توان از همرفت چشم‌پوشی کرد. هنگامی که هدایت حرارتی دیواره‌های سلول بیشتر از $20 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ است، می‌توان از تاثیر تابش دیواره‌های سلول در رابطه صرف نظر کرد. در نهایت می‌توان گفت هدایت حرارتی نیز مانند هدایت الکتریکی به دانسیته نسبی فوم بستگی دارد [۲].



شکل ۲-۲ تغییرات هدایت حرارتی λ ، با تغییر گرمای ویژه حجمی $C_p \rho$ برای فوم های موجود، هدایت حرارتی [۳]

روابط زیادی برای تخمین ضریب انتقال حرارت هدایت فوم های فلزی پیشنهاد میشوند، در اینجا به

اختصار به دو نمونه از آنها اشاره می کنیم:

در معادله ۲-۲ تغییرات هدایت حرارتی λ ، با تغییر گرمای ویژه حجمی ρ ، C_p برای فوم های

موجود آورده شده است [۴].

$$R_A = \frac{4\lambda}{(2e^2 + \pi\lambda(1-e))k_s + (4 - 2e^2 - \pi\lambda(1-e))K_f}$$

$$R_B = \frac{(e - 2\lambda)^2}{(e - 2\lambda)e^2k_s + (2e - 4\lambda - (e - 2\lambda)e^2)k_f}$$

$$R_C = \frac{(\sqrt{2} - 2e)^2}{2\pi\lambda^2(1 - 2\sqrt{2}e)k_s + 2(\sqrt{2} - 2e - \pi\lambda^2(1 - 2\sqrt{2}e))k_f}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sqrt{2}(2 - \frac{5}{8})e^3\sqrt{2} - 3\varepsilon}{\pi(3 - 4\sqrt{2}e - e)}}, e = 0.339$$

$$k_e = \frac{1}{\sqrt{2}(k_A + k_B + k_C)}$$

معادله ۲-۲

معادله ۳-۲ که توسط برای یکی مکعب پر شده از استوانه‌های جامد معرفی شده است، این معادله

در دو جهت عمود و موازی راستای استوانه ها ارائه شده است [۵]:

$$k_{eff, series} = \frac{k_f k_s}{\varepsilon k_s + (1 - \varepsilon) k_f}, k_{eff, parallel} = \varepsilon k_f + (1 - \varepsilon) k_s \quad \text{معادله ۳-۲}$$

انتقال حرارت جابجایی محیط‌های متخلخل - ۲-۳-۱-۲

با توجه به مطالعات انجام شده بررسی‌ها در زمینه انتقال حرارت جابجایی در محیط‌های متخلخل بسیار اندک و بیشتر تمرکز بر روی انتقال حرارت هدایت این محیط‌ها است. با این حال توجه به این مواد در دهه گذشته بسیار افزایش یافته است [۶]. کاربردهای انتقال حرارت جابجایی انواع مختلف محیط‌های مخلخل در بسیاری از زمینه‌های مهندسی مانند موتورهای جت [۷] خنک کاری دستگاه‌های الکترونیکی، فرایندهای خشک کن، مبدل‌های حرارتی، لوله‌های حرارتی و سیستم‌های بازیابی [۸] مورد توجه قرار گرفته است.

پاول^۱ و همکاران [۸] از روش عددی و آزمایشگاهی به بررسی اثر نوع محیط فوم فلزی قرار داده شده در یک لوله دایروی بر روی انتقال حرارت جابجایی در این محیط پرداخته است، نتایج وی نشانگر افزایش انتقال حرارت محیط متخلخل می‌باشد. هیه^۲ [۹] بوسیله روش آزمایشگاهی مطالعه‌ای بر روی تاثیر تخلخل، سایز حفره‌ها، سرعت سیال بر روی کارکرد حرارتی فوم فلزی آلومینیوم پرداخته است. نتایج وی نمایانگر افزایش انتقال حرارت با افزایش چگالی حفره‌ها در ماده متخلخل است. این افزایش می‌تواند در

¹ Pavel

² Hsieh

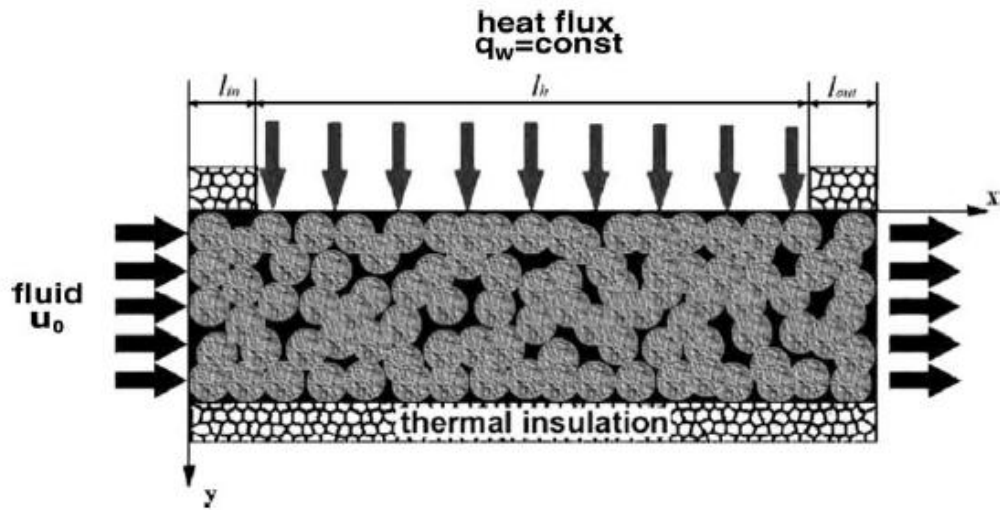
اثر افزایش سطح حرارتی باشد. کورتباس^۱ و همکاران [۱۰] نیز با روش آزمایشگاهی بر روی انتقال حرارت جابجایی مخلوط (اجباری و طبیعی) در کانال مربعی پر شده با فوم آلومینیومی پرداخته است. نتایج نشانگر افزایش ناگهانی عدد ناسلت پس از گذر از عدد رینولدز بحرانی تعریف شده است.

هانگ^۲ و همکاران [۱۱] نیز نشان دادند که افزایش یک لایه پروس آلومینیوم به نمونه مورد آزمایش باعث افزایش شدید انتقال حرارت جابجایی می‌شود. البانکی^۳ [۱۲] از روش آزمایشگاهی به بررسی انتقال حرارت و افت فشار در یک نمونه از فوم با جنس نیکل پرداخته است، نتایج وی افزایش افت فشار در نمونه نیکلی نسبت به بقیه نمونه‌ها است، همچنین افزایش انتقال حرارت نیز با همین روند در نمونه با جنس نیکل مشاهده شده است. نتایج مشابه در زمینه افزایش انتقال حرارت و افت فشار در مطالعات دیگران از جمله [۶, ۱۳, ۱۴] نیز آورده شده است.

جیانگ^۴ [۱۵] بصورت عددی انتقال حرارت جابجایی جریان آب در یک کانال متخلخل از جنس برنز پرداخته است، نتایج وی نشانگر افزایش ضریب جابجایی انتقال حرارت با افزایش دبی جرمی افزایش می‌یابد این افزایش با افزایش تعداد ذرات جامد نیز مشاهده شده است.

جیانگ و همکاران [۱۶] به صورت آزمایشگاهی انتقال حرارت جابجایی اجباری آب و هوا را در یک کانال متخلخل تحت شار ثابت را بررسی نموده است، وی تاثیر سرعت سیال، اندازه ذرات جامد، نوع ماده متخلخل (زینتر شده یا ساده) و نوع سیال را مورد بررسی قرار داده است. قسمت گزارش این آزمایش در دیده می‌شود:

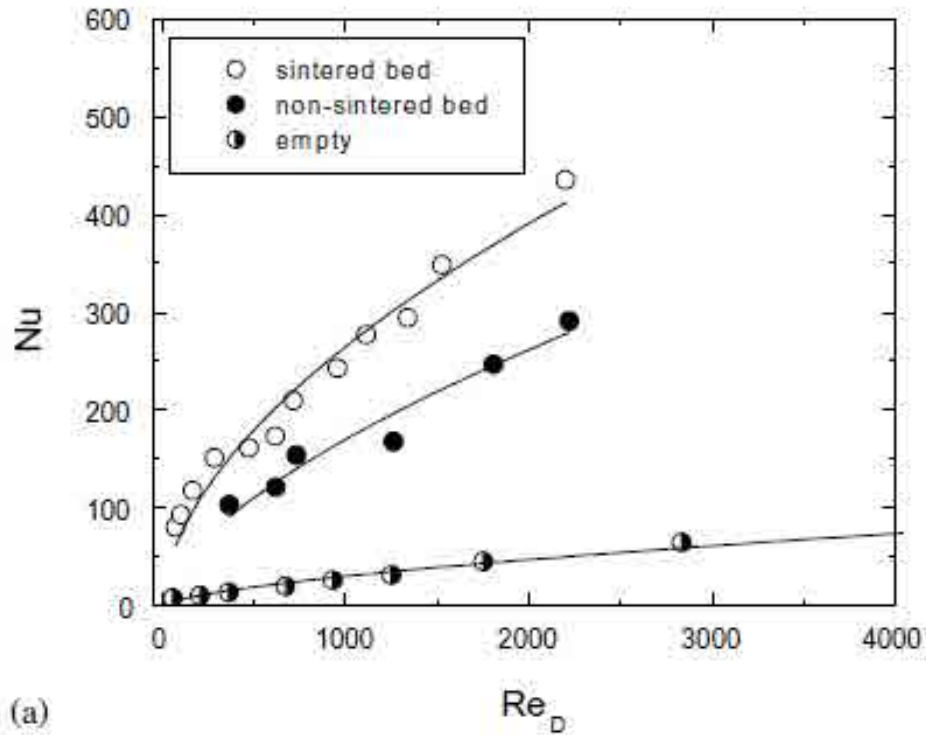
¹ Kurtbas
² Hung
³ Albanakis
⁴ Jiang



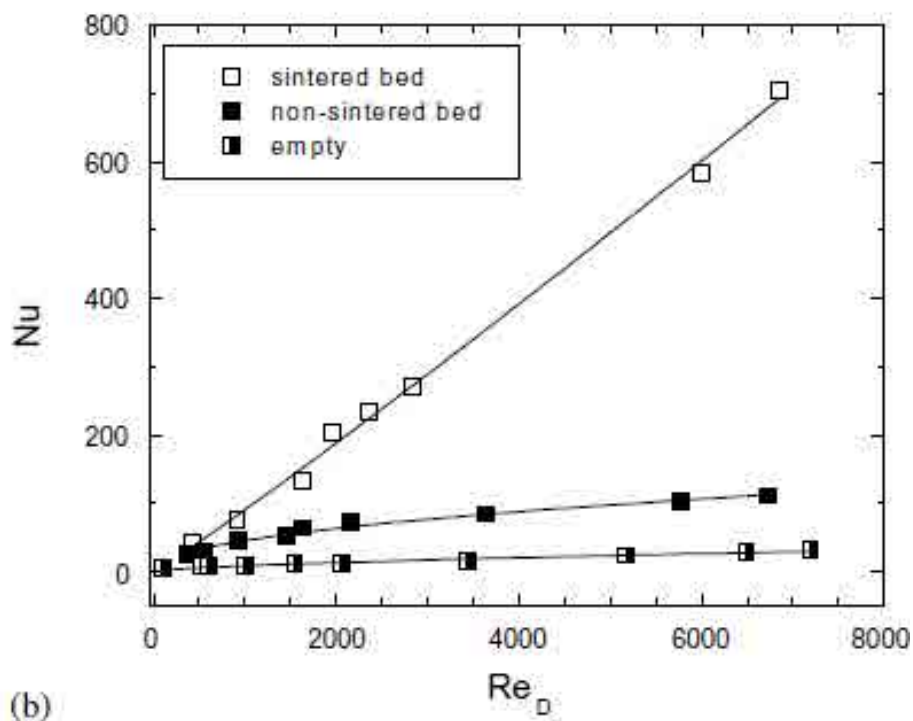
شکل ۳-۲ نمونه محیط متخلخل مورد استفاده در [۱۶]

عدد ناسلت بدست آمده بر حسب عدد رینولدز در این آزمایش برای آب و هوا در شکل ۴-۲ و شکل

۵-۲ دیده می شود:



شکل ۴-۲ عدد ناسلت متوسط برای هوا [۱۶]



شکل ۲-۵ عدد ناسلت متوسط برای آب [۱۶]

با توجه به نتایج گرفته شده در این آزمایش، داده‌ها را میتوان در چند دسته تقسیم بندی

کرد [۱۶]:

- محیط متخلخل تاثیر شدیدی بر انتقال حرارت جابجایی اجباری میگذارد. برای مثال حدود ۱۵ برابر برای آب و ۳۰ برابر برای انتقال حرارت هوا در حالت پروس زینتر شده؛
- افزایش ناگهانی انتقال حرارت با زیاد شدن دبی جرمی سیال؛
- در شرایط این آزمایش تاثیر اندازه ذرات زیاد نبوده است.
- انتقال حرارت بیشتر در حالت پروس زینتر شده.

با توجه به مطالعات انجام شده، تحقیقات در زمینه بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت جابجایی در

محیطهای متخلخل انگشت شمار بوده و نیاز به توجه بیشتری دارد.

توضیحات کاملتر در زمینه محیط‌های متخلخل، روش‌های ساخت و کاربرد آنها در پیوست الف آورده شده است.

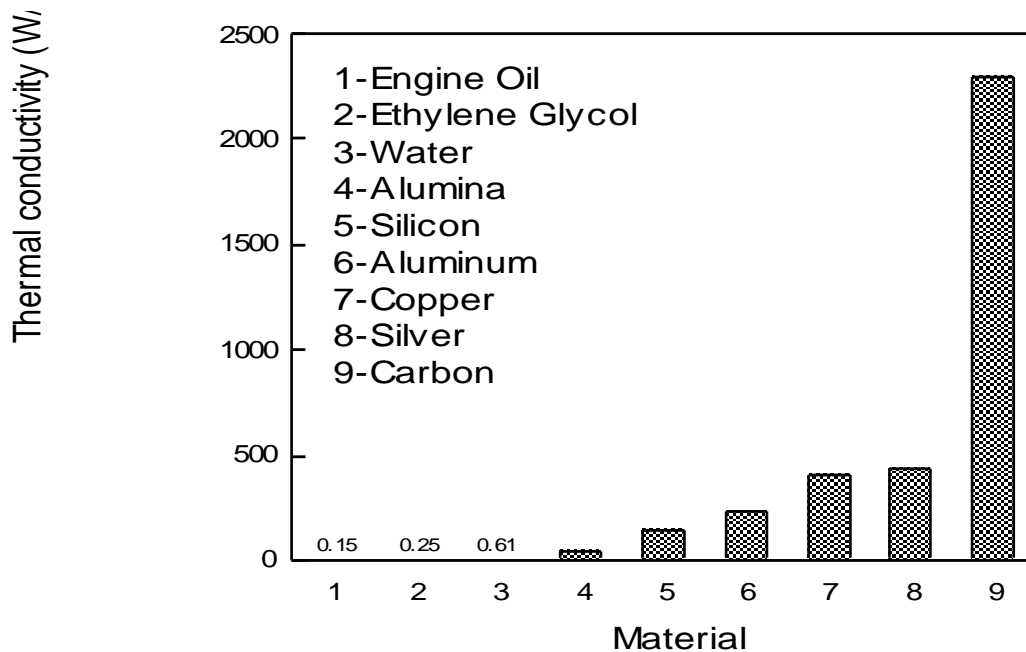
۲-۲- مقدمه‌ای بر نانوسیالات

انتقال حرارت به عنوان یکی از مهمترین فرآیندها در بسیاری از صنایع و محصولات شناخته شده است. هدایت حرارتی ضعیف ذاتی سیالات مرسوم، محدودیت بنیادی بر انتقال حرارت می‌گذارد. سیالات متداول در انتقال حرارت و حامل انرژی در صنایع را معمولاً سیالاتی نظیر آب، روغن‌ها و اتیلن‌گلیکول تشکیل می‌دهند. بیش از یک قرن قبل در زمان ماکسول^۱ دانشمندان و مهندسين تلاش بسیاری برای شکستن این محدودیت بنیادین با انتشار ذرات میلی‌متر یا میکرومتری در مایعات انجام دادند. در هر حال، بزرگترین مشکل استفاده از این ذرات بزرگ، ته‌نشینی سریع ذرات در سیالات بود. 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 ۲-۶). به همین دلیل انتظار می‌رود که سیالات حامل ذرات جامد معلق فلزی یا اکسیدفلزی دارای هدایت حرارتی بیشتری نسبت به سیالات خالص باشند.

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. مشخصات مکانیکی، بصری، الکتریکی مغناطیسی و حرارتی نانو ذرات بالاتر از حجم کلی مواد مرسوم با ساختار درشت

¹ Maxwell

آنهاست. نانوسیالات شکل جدیدی از تکنولوژی بر پایه سیالات انتقال دهنده حرارت مهندسی است که با انتشار ذرات با اندازه نانومتر و با اندازه هایی در محدوده ی ۱ تا ۱۰۰ نانومتر (ترجیحاً کوچکتر از ۱۰ نانومتر) در سیال انتقال دهنده حرارت قدیمی پدید می آید.



Thermal conductivity of typical materials

شکل ۲-۶ ضریب هدایت حرارتی تعدادی از مواد [۱۸]

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 ویسکوزیته ی سیال نیز تحت تأثیر قرار می گیرد. مجموعه تغییرات ایجاد شده در خواص ترموفیزیکی سیال سبب می شود تا علاوه بر افزایش هدایت حرارتی، در انتقال حرارت جابجایی نیز شاهد افزایش چشمگیر ضریب انتقال حرارت باشیم. مشخصات مکانیکی، بصری، الکتریکی مغناطیسی و حرارتی نانو ذرات بالاتر از حجم کلی مواد مرسوم با ساختار درشت آنهاست. نانوسیالات شکل جدیدی از تکنولوژی بر پایه سیالات انتقال دهنده حرارت مهندسی است که با انتشار ذرات با اندازه نانومتر و با اندازه هایی در محدوده ی ۱ تا ۱۰۰ نانومتر (ترجیحاً کوچکتر از ۱۰ نانومتر) در سیال انتقال دهنده حرارت قدیمی پدید می آید.

۲-۲-۱- 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، توده‌ای شدن^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: روش یک مرحله‌ای و روش دومرحله‌ای. توضیحات کامل در زمینه روش‌های تولید، روش‌های پایدارسازی، نحوه محاسبات خواص و کاربردهای نانوسیالات در پیوست ب بیان شده است.

۲-۲-۲- بررسی تجربی انتقال حرارت هدایت نانوسیالات

قابلیت انتقال حرارت یک سیال جاری اغلب با عدد ناسلت بیان می‌شود که هدایت حرارتی سیال را مستقیماً و معمولاً به طور غیر مستقیم هم از طریق عدد پرانتل^۴ به حساب می‌آورد. بنابراین اولین

¹ Stability

² Agglomeration

³ Settling

⁴ Prandtl Number

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.

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 در مقاله یو و همکاران [۱۹] به تفصیل بررسی شده است.

۲-۲-۳ - 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 [۲۰] یک مدل قدیمی موجود در هدایت حرارتی است که برای مخلوط-های جامد-مایع با ذرات نسبتاً بزرگ پیشنهاد شد. بسیاری از مدل‌های پیشنهادی بعدی بر مبنای مدل ماکسول پایه‌گذاری شده‌اند. هدایت حرارتی مؤثر، k_{eff} برابر است با:

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

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 [۲۱]. همیلتون و کراسر [۲۲] 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 مخلوط‌های دو جزئی با استفاده از این مدل، به صورت زیر می‌تواند تعیین شود:

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

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^۱ و لی [۲۳] 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 [۲۱] 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 اکسید مس مناسب نبود.

¹ Xuan

ونگ^۱ و همکاران [۲۴] مدلی برای پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات پیشنهاد کردند:

$$k_{eff, Wang} = \frac{(1-\phi) + 3\phi \int_0^{\infty} \frac{k_{cl}(r)n(r)}{k_{cl}(r) + 2k_1} dr}{(1-\phi) + 3\phi \int_0^{\infty} \frac{k_{cl}n(r)}{k_{cl}(r) + 2k_1} dr} k_1 \quad \text{معادله ۲-۵}$$

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^۲ [۲۵] 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 [۲۶] برای نانوسیال روغن-نانولوله کربنی و با داده‌های ژئی^۳ و همکاران [۲۷] 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^۴ [۲۸] 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

¹ Wang

² Xue

³ Xie

⁴ Yu & Choi

یک نانوذره جامد و یک توده سیال عمل می‌کند [۲۸]. رابطه به صورت:

$$k_{eff, Yu} = \frac{k_p + 2k_1 + 2(k_p - k_1)(1 + \beta)^3 \phi}{k_p + 2k_1 - (k_p - k_1)(1 + \beta)^3 \phi} k_1 \quad \text{معادله ۲-۶}$$

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.

۲-۲-۴ انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات

اگر بخواهیم عملکرد حرارتی نانوسیال‌ها به عنوان خنک‌کننده در صنایع مختلف را مورد بررسی قرار دهیم. ضریب انتقال حرارت جابجایی، به مراتب پارامتر مناسب‌تری نسبت به هدایت حرارتی خواهد بود. به همین دلیل، مدل‌سازی ضریب انتقال حرارت (h) مورد توجه محققان قرار گرفته است. 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. با این حال، مدل‌های ارائه شده تا به امروز دارای محدودیت‌های زیادی بوده و این تحقیقات به نوعی در مراحل ابتدایی خود به سر می‌برند. مدل‌های معرفی شده برای ضریب انتقال حرارت نانوسیالات، بسیار کمتر از مدل‌های موجود برای هدایت حرارتی بوده و در این زمینه کارهای بسیار کمتری انجام گرفته است. تمام معادلات معرفی شده

برای h به نوعی از روابط رایج مثل رابطه دیتوس - بولتر^۱ [۲۹] و یا رابطه نیلینسکی^۲ [۳۰] مشتق شده که پارامترهای تجربی را به آنها می افزایند. بنابراین، این معادلات تنها برای نانوسیالات خاص در یک محدوده مشخص پارامترها، صدق می کنند. در نتیجه به کارهای تجربی بیشتری در این قسمت نیاز بوده تا بتوان مدل های کلی کاربردی برای پیش بینی ضریب انتقال حرارت در نانوسیالات ارائه داد.

جدول ۴-۱ روابط پیش بینی انتقال حرارت نانوسیال را نشان میدهد.

رابطه پیشنهادی	نانوسیال	محقق
$Nu = 0.021Re^{0.8}Pr^{0.5}$	Al ₂ O ₃ - water , turbulent TiO ₂ -water	[۳۱]
$Nu = cRe_b^m Pr^{0.4}$ m,c پارامترهای وابسته به غلظت حجمی هستند .	Al ₂ O ₃ - water ,pool boiling	[۳۲]
$Nu = 0.0059(1.0+7.6286\phi_p^{0.6886} pe_p^{0.001})Re^{0.9238}pr^{0.4}$	Cuo- water, turbulent	[۳۳]
$Nu = cRe^m pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{D}{L}\right)^{\frac{1}{3}} (\mu_F/\mu_\infty)^{0.14}$ M,c پارامترهای تجربی وابسته به دمای نانوسیال هستند .	Graphite- intransmission fluid, graphite- synthetic oil mixture, laminar	[۳۴]

¹ Dittus & Boelter

² Gnielinski

$Nu = \frac{(f/8(Re - 1000)pr)}{1 + \delta_{\phi}^+ \left((f/8)^{\frac{1}{2}} (pr_{\phi}^{\frac{2}{3}} - 1) \right)}$ <p>δ_{ϕ}^+ ضخامت بدون بعد زیر لایه آرام بوده که یک پارامتر تجربی است .</p>	Turbulent	[۳۵]
$Nu = \frac{4\sqrt{5}}{3\Delta_{nf}} \left[\frac{\beta_r k_r^4}{378v_r^2(9\Delta_{nf} - 5)} Gr_b \right]_{1/4} (UWT)$ $Nu = \frac{6}{5} \left[\frac{2\beta_r k_r^4}{27v_r^2(9\Delta_{nf} - 5)} Gr_b \right]_{1/5} (UWT)$ $\Delta = \frac{\delta_T}{\delta} = \frac{\text{thermal boundary layer thickness}}{\text{dynamical boundary layer thickness}}$	Al ₂ O ₃ , Newtonian laminar, natural convection	[۳۶]

بدلیل کاربردهای گسترده جریان سیال در گرم کردن، خنک کاری و سیستم های حمل و نقل، انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات معمولاً از زمینه‌هایی است که بیشتر از هدایت حرارتی آنها مورد توجه محققان قرار گرفته است. تحقیقات آزمایشگاهی بسیاری در زمینه تاثیر جنس نانو پودر مورد استفاده، درصد حجمی نانوسیال و عدد رینولدز جریان بر انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات انجام شده است. در نشست سالیانه انجمن مهندسان مکانیک آمریکا چوی [۳۷] افزایش دو برابری ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات با هدایت حرارتی بسیار بالا با افزایش قدرت ۱۰ برابری پمپاژ را نشان داد. زینالی^۱ و همکاران [۳۸] به بررسی انتقال حرارت نانوسیال جریان آرام در لوله دایروی افقی با دمای دیواره ثابت پرداخته است، نتایج وی نشان دهنده افزایش انتقال حرارتی جابجایی در ازای افزایش غلظت نانوسیال و

¹ Zeinali

افزایش عدد پکلت است. کیهانی^۱ و همکاران [۳۹, ۴۰] به بررسی انتقال حرارت جابجایی و افت فشار نانوسیال آلومینا و تیتانیم در رنج گسترده ای از غلظت‌های ۰.۱ تا ۲ درصد در سیال پایه آب درون لوله مستقیم با شار حرارتی ثابت پرداخته است. نتایج وی نشان دهنده افزایش ۲۶ درصدی برای آلومینا/آب و ۸ درصدی برای تیتانا/آب با غلظت ۲ درصد است. دینگ و همکاران [۴۱] به بررسی عملکرد انتقال حرارت نانوسیالات حاوی نانولوله های کربنی در داخل لوله ای به قطر داخلی ۴/۵ میلی متر پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که افزایش در ضریب انتقال حرارت خیلی بیشتر از افزایش در ضریب رسانش حرارتی موثر نانوسیالات است. آنها علت این پدیده را عواملی چون بهبود هدایت حرارتی، افزایش تنش وارده در جریان، کاهش ضخامت لایه مرزی، نظم در آرایش ذرات و سطح زیاد نانولوله های کربنی بر شمرند. نتایج نشان می دهد که سطح بالای نانولوله های کربنی عامل مهمی در بهبود فوق العاده خواص حرارتی نانوسیال های آنها است.

یانگ^۲ و همکاران [۳۴] که بر روی خصوصیات انتقال حرارت جابجایی در نانوسیالات گرافیت در جریان آرام و در طول یک لوله دایره ای با قطر ۴/۵۷ میلی متر و طول ۴۵۷ میلی متر کار می کردند، به نتایج جالبی رسیدند. این محققان از ذرات دیسک مانند (قطر متوسط ۱ تا ۲ میکرومتر و ضخامت ۲۰ - ۴۰ نانومتر) استفاده کردند. نتایج این آزمایش کاملاً دور از انتظار بود، به طوری که افزایش ضریب انتقال حرارت سیستم خیلی کمتر از افزایش رسانش حرارتی موثر آن بود. این بدان معناست که جدا از رسانش حرارتی موثر، شکل ذرات و نسبت اندازه های نانوذرات (در اینجا ۰/۰۲) می تواند فاکتور مهمی در عملکرد حرارتی نانوسیالات باشد. این نتیجه گیری را در بررسی دینگ و همکاران [۴۱] روی سوسپانسیون های نانولوله های کربنی با نسبت اندازه بالا (>100) نیز می توان دید. برای روشن شدن این موضوع به بررسی های بیشتری نیاز است .

¹ Kayhani

² Yang

ژوان و همکاران [۳۳] مطالعه‌ای را بر روی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال مس/آب در هر دو جریان آشفته و آرام در یک لوله دایروی انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که انتقال حرارت جابجایی در سوسپانسیون نانوسیال بسیار بیشتر از سیال پایه در یک رینولدز خاص است و همچنین این افزایش با افزایش غلظت نانوسیال بیشتر می‌شود. برای نمونه آنها افزایش ۶۰ درصدی انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه در غلظت حجمی ۲٪ را مشاهده نمودند. لی^۱ و همکاران [۴۲] به بررسی انتقال حرارت اجباری جابجایی نانوسیال نقره/آب و نقره/اتیلن گلیکول-آب در مبدل حرارتی لوله‌ای پرداختند. آنها نشان دادند که انتقال حرارت نانوسیال بین ۵ تا ۱۳ درصد بیشتر از سیال پایه است.

پک^۲ و همکاران [۳۱] رفتار حرارتی نانوسیال الومینا (با اندازه ۱۳ نانومتر) و نانوسیال تیتانیوم (با اندازه ۲۷ نانومتر) در یک لوله دایروی در محدوده جریان آشفته را بصورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آزمایش آنها نشان داد ویسکوزیته نانوسیال به خصوص در مورد نانوسیال الومینا به مراتب بالاتر از سیال پایه است. همچنین نتایج این تحقیق نمایانگر افزایش عدد ناسلت نانوسیال نسبت به سیال پایه است. این افزایش در ناحیه توسعه یافته با افزایش عدد رینولدز و افزایش غلظت حجمی نانوسیال افزایش می‌یابد. نتایج آزمایشگاهی ون^۳ و همکاران [۴۳] نمایانگر افزایش انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال آلومینا نسبت به سیال پایه و همچنین افزایش انتقال حرارت با افزایش حجم نانوذره‌ها است. نتایج آنها نشان داد که این افزایش در طول ناحیه ورودی بیشتر است.

افزایش ۳۳ و ۴۰ درصدی ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال کربنی با غلظت حجمی ۰.۲۵ درصد و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به سیال پایه به ترتیب برای جریان آرام و آشفته در یک لوله

¹ Lee
² Pak
³ Wen

تحت شار ثابت نیز توسط امراللهی^۱ و همکاران [۴۴] نشان داده شده است. کیم^۲ و همکاران [۴۵] انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آلومینا و کربنی در رژیم‌های جریان آشفته و آرام درون یک لوله تحت شار حرارتی ثابت را مورد بررسی قرار دادند، نتایج آنها نیز افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت جابجایی نسبت به سیال پایه را نشان می‌دهد. آنها همچنین نشان دادند که افزایش انتقال حرارت جابجایی نانوسیال بسیار بیشتر از افزایش هدایت حرارتی این سیالات است. هیئت^۳ و همکاران [۴۶, ۴۷] تحقیقی را بر روی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آلومینا در لوله خالی با شار ثابت در محدوده جریان آرام و آشفته انجام دادند که نتایج آنها نیز از افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت جابجایی در اثر استفاده از نانوسیال حکایت می‌کند. همچنین مطالعه‌ای بر روی مکانیزم‌ها و دلایل افزایش انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات توسط چاندرسکار^۴، کاکا^۵ و همکاران [۴۸, ۴۹] ارائه شده است.

هریس^۶ و همکاران [۵۰] به بررسی انتقال حرارت نانوسیال الومینا/آب و اکسید مس/آب در لوله با دمای دیواره ثابت پرداختند، نتایج آنها علاوه بر تایید نتایج دیگران مبنی بر افزایش انتقال حرارت با افزایش غلظت حجمی نشان داد نتایج شرط مرزی دما ثابت بیشتر از شار دیواره ثابت که توسط دیگر نویسندگان انجام شده بود، است. میگا^۷ و همکاران [۵۱-۵۳] نیز مجموعه آزمایش‌هایی بر روی نانوسیال با ذرات الومینا و سیالات پایه آب و اتیلن گلیکول در هر دو جریان آشفته و آرام انجام دادند. نتایج نشان داد افزودن نانوپور به سیال پایه سبب افزایش انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه در یک لوله دایروی با شار دیواره ثابت می‌شود. افزایش نشان داده شده با سیال پایه اتیلن گلیکول به مراتب بیشتر است.

¹ Amrollahi

² Kim

³ Heyhat

⁴ Chandrasekar

⁵ Kakac

⁶ Heris

⁷ Maiga

فوتوکیان^۱ و همکاران [۵۴] نیز افزایش ۲۵ درصدی انتقال حرارت جابجایی و ۲۰ درصدی افت فشار نانوسیال اکسید مس/آب در یک لوله خالی با سطح مقطع دایروی مشاهده نمودند. نتایج مشابه در مورد افزایش انتقال حرارت جابجایی نانوسیالاتی نظیر آلومینا، اکسید مس، تیتانیوم و... در مطالعات مشابه [۵۵]-[۶۰] مشاهده شده است.

با در نظر گرفتن آزمایش‌ها و کارهای تجربی محدودی که روی جابجایی آزاد حرارت در نانوسیالات صورت گرفته، نمی‌توان نتیجه‌گیری خوب و روشنی داشت. اگرچه آزمایش‌های صورت گرفته رفتار حرارتی غیر عادی و پیچیده نانوسیالات را به خوبی نشان می‌دهد ولی استفاده از نانوسیالات برای کاربردهای حرارتی را نباید تنها به رسانش حرارتی آنها مرتبط کرد. پارامترهای فراوان دیگری مثل اندازه ذره، شکل و توزیع، میکرو - جابجایی میزان pH و برهمکنش ذره - سیال نیز هستند که اثر مهم و زیادی روی عملکرد حرارتی نانوسیالات در جابجایی آزاد داشته و در آینده باید بیشتر مورد بررسی قرار گیرند.

۲-۳ - انتقال حرارت جابجایی نانوسیال در محیط متخلخل

همانطور که گفته شد، انتقال حرارت جابجایی در محیط متخلخل برای سیالات متداول به تازگی مورد توجه قرار گرفته و تحقیقات زیادی در این زمینه موجود نیست، حال اینکه انتقال حرارت جابجایی نانوسیال در این محیط‌ها به صورت موردی و انگشت شمار، بخصوص در مورد بررسی‌های آزمایشگاهی مورد توجه قرار گرفته است.

حاجی پور^۲ و همکاران [۶۱] بررسی آزمایشگاهی بر روی انتقال حرارت مخلوط نانوسیال در یک کانال پر شده با ماده متخلخل پرداخته است. نتایج بدست آمده نشانگر بهبود حرارتی نانوسیال در قبال

¹ Fotukian

² Hajopur

سیال پایه است. تام^۱ و همکاران [۶۲]، متین^۲ و همکاران [۶۳] و مغربی^۳ و همکاران [۶۴] نیز بصورت عددی به بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر روی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال در کانال متخلخل پرداخته‌اند تقریبا تمامی کارهای انجام شده نمایانگر افزایش انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه در محیط-های متخلخل هستند.

با توجه به مطالعات و بررسی‌های انجام شده تحقیقات زیادی بر روی بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات و محیط‌های متخلخل انجام نشده است. در حالی که بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت نانوسیال در محیط متخلخل تقریبا انجام نشده و این موضوع می‌تواند سر منشاء تحقیقات جدیدی در این زمینه باشد. پرفسور نیلد^۴ [۶۵] در مقاله خود اشاره داشته است که مقاله مغربی و همکاران [۶۴] اولین محققانی هستند که بررسی را بر روی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال در محیط متخلخل به صورت عددی انجام داده‌اند. بنابراین می‌توان گفت این پایان‌نامه اولین تحقیق آزمایشگاهی در زمینه بررسی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال در محیط متخلخل است.

¹ Tham

² Matin

³ Maghrebi

⁴ Nield

۳- فصل سوم: دستگاه آزمایشگاهی

همانطور که در مقدمه بیان شد هدف اصلی این پروژه بررسی قابلیت‌های انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات در محیط متخلخل است. به منظور انجام این کار، سیستم آزمایشگاهی بررسی انتقال حرارت جابجایی و افت فشار طراحی و ساخته شده است. طراحی، کالیبراسیون قطعات و نحوه انجام آزمایش در این فصل بیان خواهد شد. در این تحقیق انتقال حرارت نانوسیال در محیط متخلخل تحت دو شرط مرزی شار ثابت و دما ثابت مورد بررسی قرار گرفته است، قبل از بیان نحوه آزمایش به معرفی تجهیزات و نحوه طراحی سیستم می‌پردازیم.

۳-۱- مواد و تجهیزات

۳-۱-۱- لوله تست

در این آزمایش از دو نوع لوله متخلخل مختلف برای هر یک از شرایط مرزی دما ثابت و شار ثابت استفاده شده است.

- شرط مرزی دما ثابت: برای انجام این آزمایش از لوله متخلخل یکپارچه که از روش عامل فوم ساز (ریخته گری) که در (۷-۲-۳-) به آن اشاره شد استفاده شده است. پودر فلز مورد استفاده آلومنیوم بوده و از نمک طعام با اندازه ۳-۵ میلی‌متر بعنوان عامل خارج شونده استفاده شده است. عامل خارج شونده پس از قرار گرفتن در آب گرم با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد از فوم فلزی ساخته شده خارج می‌شود. دو لوله با تخلخل متفاوت (یکی با تخلخل ۵۰٪ و دیگری با تخلخل ۶۳٪) در این حالت مورد استفاده قرار گرفته است. این لوله با قطر خارجی ۲ سانتی‌متر و طول ۳۵ سانتی‌متر ساخته شده است. لوله تست مورد نظر در شکل ۳-۱ دیده می‌شود.

- شرط مرزی شار ثابت: در این حالت لوله متخلخل با استفاده از قرار دادن یک فلز متخلخل

درون یک لوله خالی، لوله تست مورد نظر ساخته شده است. توری آلومینیومی با اندازه سوراخ ۱ میلی‌متر درون لوله مسی با قطر ۱۶ میلی‌متر و طول ۳۵ سانتی‌متر جایگذاری شده است. تخلخل بدست آمده در این حالت ۸۵٪ می‌باشد. نمایی از تخلخل بدست آمده با این روش در شکل ۲-۳ دیده میشود.



شکل ۱-۳ لوله تست با ماده متخلخل متصل ساخته شده با روش عامل فوم ساز



شکل ۲-۳ تخلخل بدست آمده با استفاده از جایگذاری توری آلومینیومی

۳-۱-۲- پمپ

پمپ مورد استفاده در این آزمایش پمپ Pantax Pm45 از نوع پمپ‌های سانتیرفیوژ جابجایی مثبت با ماکزیمم دبی حجمی ۵۵۰ میلی‌لیتر بر ثانیه، هد ۳۵ متر و توان ۳۷۰۰ وات می‌باشد.

۳-۱-۳- مبدل حرارتی

مبدل‌های حرارتی لوله-پوسته‌ای^۱ یکی از بهترین نوع مبدل‌های حرارتی با سیال عامل ثانوی هستند. در این آزمایش لوله مسی حاوی سیال عامل (نانوسیال) بصورت مارپیچ از دورن یک پوسته فلزی که سیال خنک کار از آن عبور می‌کند، گذرانده شده است. سیال خنک کار مورد استفاده آب شهری است که از دورن یک تانک سیال (که به جهت تثبیت دمای اب استفاده شده است) به مبدل حرارتی پمپ می‌شود. جهت خنک کاری بهتر اب خنک کار در خلاف جهت حرکت سیال عامل وارد مبدل حرارتی میشود.

۳-۱-۴- سنسور

سنسورهای مقاومتی (RTD^۲) یکی از متداول‌ترین نوع سنسور برای اندازه‌گیری دما می‌باشند. PT100 یک نوع پرکاربرد از سنسورهای مقاومتی هستند که در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این سنسورها در هر دو نوع ساده (برای اندازه‌گیری دمای سطح و محیط) و غلاف دار (اندازه‌گیری دمای ورودی و خروجی) استفاده شده‌اند.

۳-۱-۵- دستگاه ثبت دما

برای ثبت دماهای سیستم تمامی سنسورها به دستگاه دیجیتالی ثبت دما متصل شده‌اند. این

¹ Shell and tube

² Resistance Temperature Detector

دستگاه از نوع ADAM4015 می‌باشد که قابلیت اتصال ۶ سنسور دمایی را بصورت همزمان داراست. دستگاه ADAM4561 نیز برای تبدیل داده‌ها، به اطلاعات قابل دسترس در کامپیوتر استفاده شده است. شکل ۳-۳ دستگاه‌های ثبت اطلاعات فوق را نشان می‌دهد. نرم افزار شرکت ADAM با عنوان AdamApax .NET Utility برای ثبت اطلاعات در کامپیوتر استفاده شده است. ثبت اطلاعات در این قسمت با دقت ۰/۰۱ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود.



شکل ۳-۳ دستگاه ثبت دما

۳-۱-۶- دستگاه اندازه‌گیری افت فشار

افت فشار توسط سیستم‌های مختلفی از جمله دیجیتالی و عقربه‌ای قابل اندازه‌گیری است. در این آزمایش دستگاه LD301 HRAT که بصورت دیجیتال افت فشار دو سر یک لوله را که توسط دو خط فرعی به این دستگاه وصل می‌شوند اندازه‌گیری می‌نماید. شکل ۴-۳ دستگاه LD301 را نشان می‌دهد. تغذیه این دستگاه توسط یک مبدل DC ۲۴ ولت انجام می‌شود.



شکل ۳-۴ دستگاه LD301

۳-۱-۷- نانوسیال

سیال عامل مورد استفاده در این آزمایش دو نانوسیال آلومینا (برای حالت شار ثابت و دما ثابت) و کربنی (برای حالت شار ثابت) می‌باشد. آماده سازی نانوسیال اولین مرحله برای استفاده نانوسیال جهت افزایش انتقال حرارت است. نانو پودر آلومینا با اندازه متوسط ۴۰ نانومتر و خلوص بالای ۹۹ درصد ساخته شرکت نانو و آمفوروس متریال^۱ برای نانوسیال آلومینا مورد استفاده قرار گرفته است، همچنین نانو پودر کربنی^۲ با اندازه کمتر از ۳۰ نانومتر و طول ۵ تا ۱۵ میکرومتر و خلوص بالای ۹۵ درصد ساخته شرکت شنزه نانتک پورت^۳ برای ساخت نانوسیال کربنی بکار گرفته شده است.

جهت پایدار سازی نانوسیال روش دو مرحله‌ای (ذکر شده در قسمت ۸-۱-۲-) استفاده شده است.

نانوپودر مورد استفاده در سیال پایه (آب) توسط دستگاه آلتراسونیک ۴۰۰ وات و ۴۰ کیلوهرتز پایدار شده

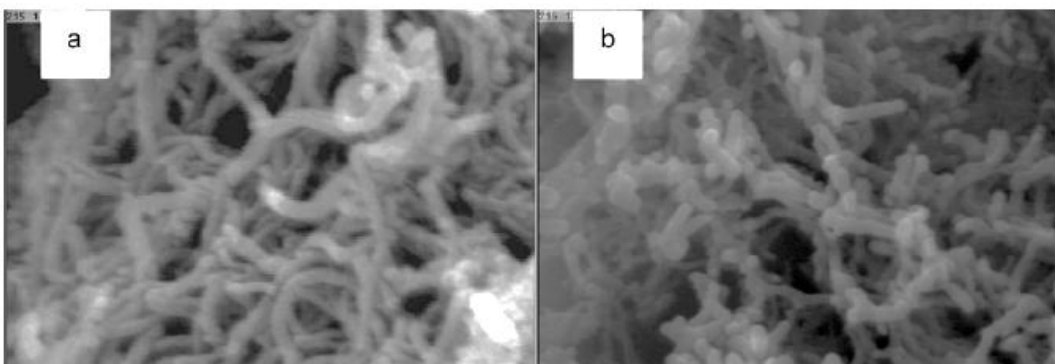
^۱ Nanostructured & Amorphous Materials

^۲ CNT (Carbon Nano Tube)

^۳ Shenzhen Nano-Tech Port

است. به منظور جلوگیری از تاثیر بر روی خواص حرارتی نانوسیال از هیچ گونه سورفکتانت یا اضافه کننده ای استفاده نشده است. این نکته قابل توجه است که برای استفاده از نانوپودر کربنی جهت پایدارسازی، این نانوپودر نیاز به عملیات سطحی دارد. این عملیات سطحی توسط امیری و همکاران [۶۶] گزارش شده است. تصویر SEM از نانوپودر کربنی مورد استفاده در شکل ۳-۵ آورده شده است.

نانوسیال آلومینا در ۵ درصد حجمی ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد در سیال پایه پایدار و برای حداقل ۴۸ ساعت پایدار می ماند. همچنین نانوسیال کربنی در سه درصد حجمی ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد آماده و برای حداقل ۲ هفته پایدار می ماند.



شکل ۳-۵ تصویر SEM از نانوپودر کربنی مورد استفاده

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 تأیید هستند [۳۵] و با توجه به خواص آب و ذرات نانو در دمای متوسط بالک تعیین می شوند. دانسیته نانوسیال با این تئوری برابر است با:

$$\rho_{nf} = \phi\rho_s + (1-\phi)\rho_w \quad \text{معادله ۳-۱}$$

که ϕ نسبت حجمی ذرات نانو، ρ_s دانسیته ذرات نانو و ρ_w دانسیته آب می باشد. محققان از دو

رابطه متفاوت برای برای محاسبه ظرفیت حرارتی یا گرمای مخصوص استفاده می کنند. محققان قدیمی تر از رابطه زیر که از همان دیدگاه رابطه دانسیته تبعیت می کند استفاده می کردند [۳۵]:

$$Cp_{nf} = \varphi Cp_s + (1 - \varphi)Cp_w \quad \text{معادله ۲-۳}$$

اما، در تحقیق حاضر از رابطه دقیق تر زیر برای گرمای مخصوص نانوسیالات که مبتنی بر مدل تعادل حرارتی است، استفاده شده است [۶۷]:

$$C_{peff} = \frac{(1-\phi_n)(\rho c)_{bf} + \phi_n(\rho c)_n}{(1-\phi_n)(\rho)_{bf} + \phi_n(\rho)_n} \quad \text{معادله ۳-۳}$$

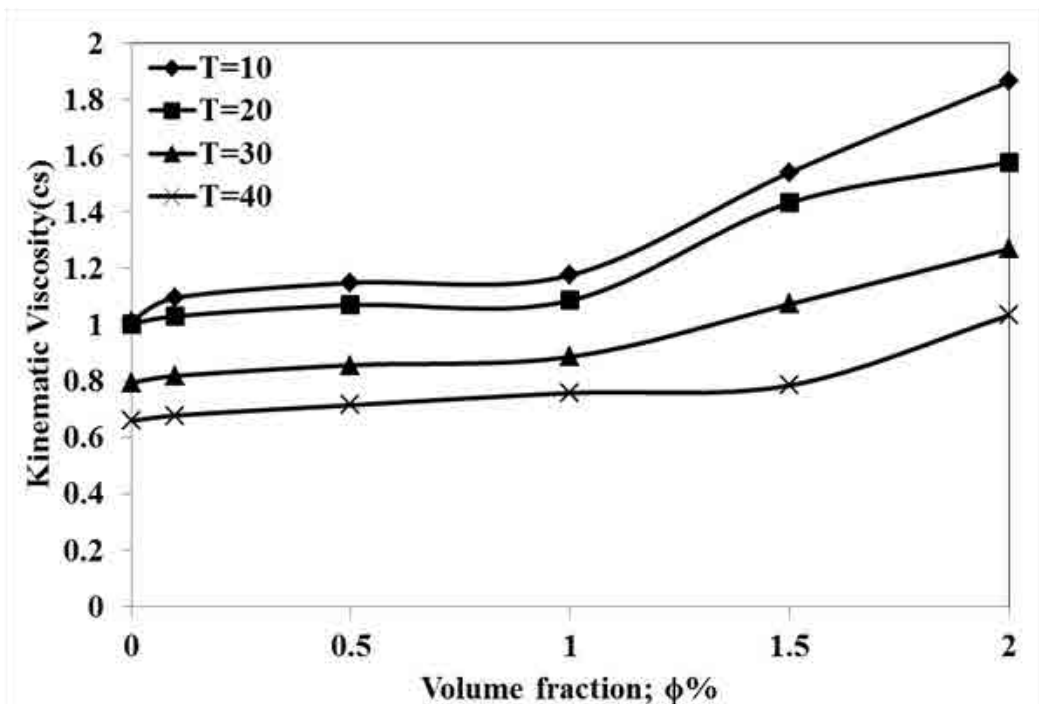
در روابط بالا Cp_s گرمای مخصوص ذرات نانو و Cp_w گرمای مخصوص آب است.

خواص نانوسیال کربنی بر حسب درصد حجمی در جدول ۱-۳ نشان داده شده است (ویسکوزیته در آزمایشگاه اندازه گیری شده است).

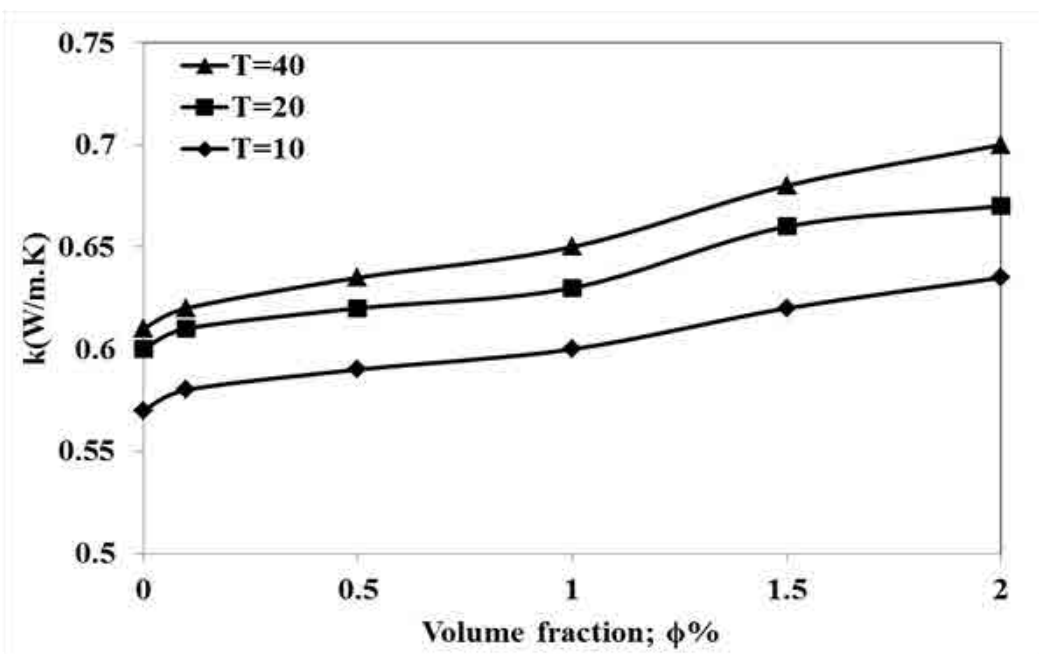
جدول ۱-۳ خواص نانوسیال کربنی مورد استفاده

CNT 0.1%	CNT 0.25%	CNT 0.5%	درصد حجمی
998	1000	10012	گچالی
1.342	1.476	1.673	ویسکوزیته (cp)

خواص نانوسیال آلومینا از جمله ویسکوزیته و هدایت حرارتی که توسط کار گذشته کیهانی و همکاران [۶۸] اندازه گیری شده، بصورت تابعی از درصد حجمی و در دماهای مختلف در شکل ۳-۶ و شکل ۳-۷ مشاهده می شود.



شکل ۶-۳ ویسکوزیته سینماتیکی نانوسیال آلومینا در درصد حجمی های مختلف [۴۰]

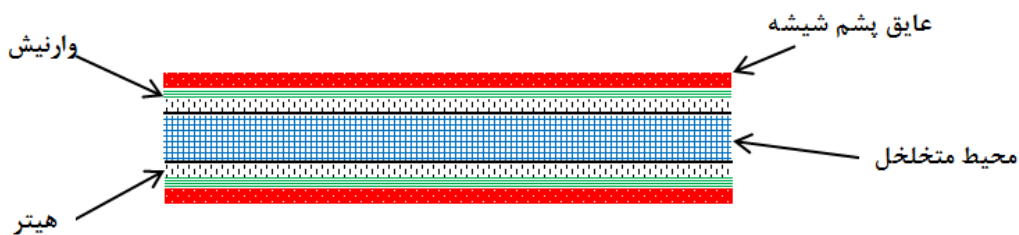


شکل ۷-۳ هدایت حرارتی نانوسیال آلومینا در درصد حجمی های مختلف [۴۰]

۳-۱-۸- نحوه اعمال شرط مرزی

دو شرط مرزی برای لوله آزمایش در آزمایش‌ها مد نظر قرار گرفته است:

- شرط مرزی شار ثابت: سیمی از جنس تنگستن به صورت منظم حول سطح خارجی لوله به منظور ایجاد شار حرارتی ثابت پچانده شده و دوسر سیم به اختلاف پتانسیل ۲۴ ولت مستقیم متصل است، سیم المنت توسط لایه ای از وارنیش به منظور عدم تماس مستقیم با سطح روکش شده و به منظور کاهش اتلاف حرارتی سطح خارجی مجموعه پس از المنت‌ها با پشم شیشه عایق کاری شده است. ساختار لوله آزمایش در این حالت در شکل ۳-۸ نشان داده شده است.



شکل ۳-۸ نحوه اعمال شرط مرزی شار ثابت

- شرط مرزی دما ثابت: مخلوط آب/یخ به منظور ثابت نگاه داشتن دمای محفظه استفاده شده است. برای این منظور لوله تست از محفظه‌ای که حاوی آب و یخ است گذارنده شده است.

۳-۲- کالیبراسیون و انجام آزمایشات

کالیبراسیون: کالیبراسیون و دقت سنسور ها توسط دو محفظه آب/یخ و آب جوش انجام شده

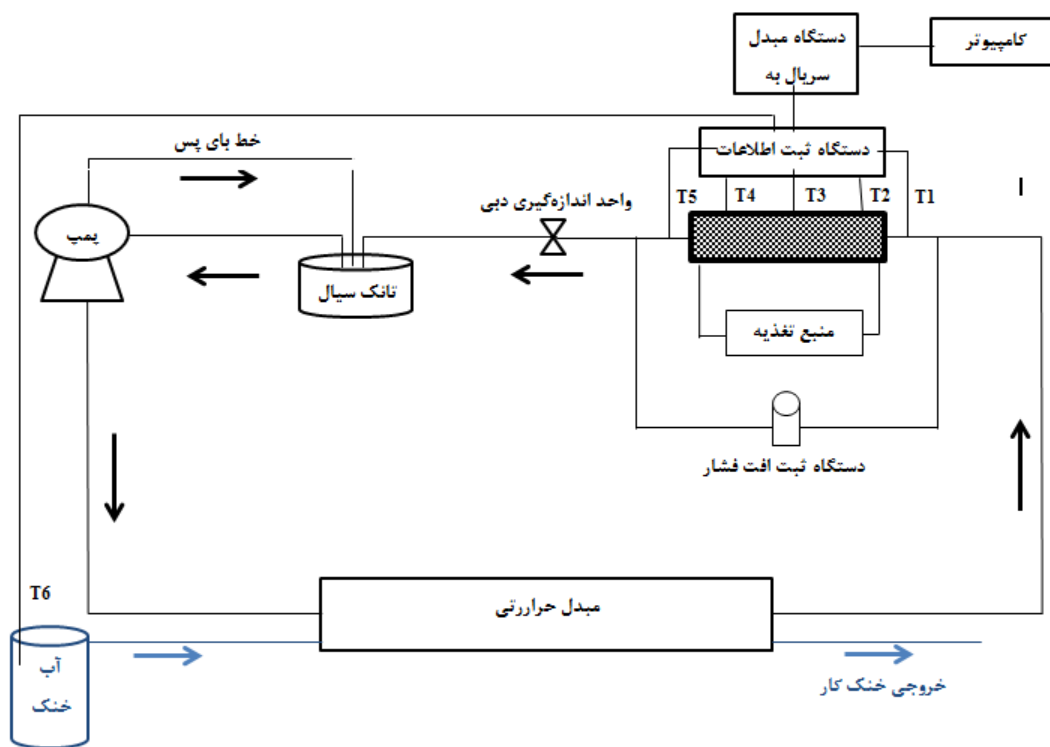
است.

ملاحظات رفع نویز: نتایج اندازه‌گیری‌های اولیه نمایانگر ایجاد نویز توسط دستگاه مبدل DC بر روی سنورها بود. رفع این نویزها توسط اتصال سیم بلندی به لوله آزمایش و جایگذاری در آب شهری جهت رفع این مشکل انجام شده است.

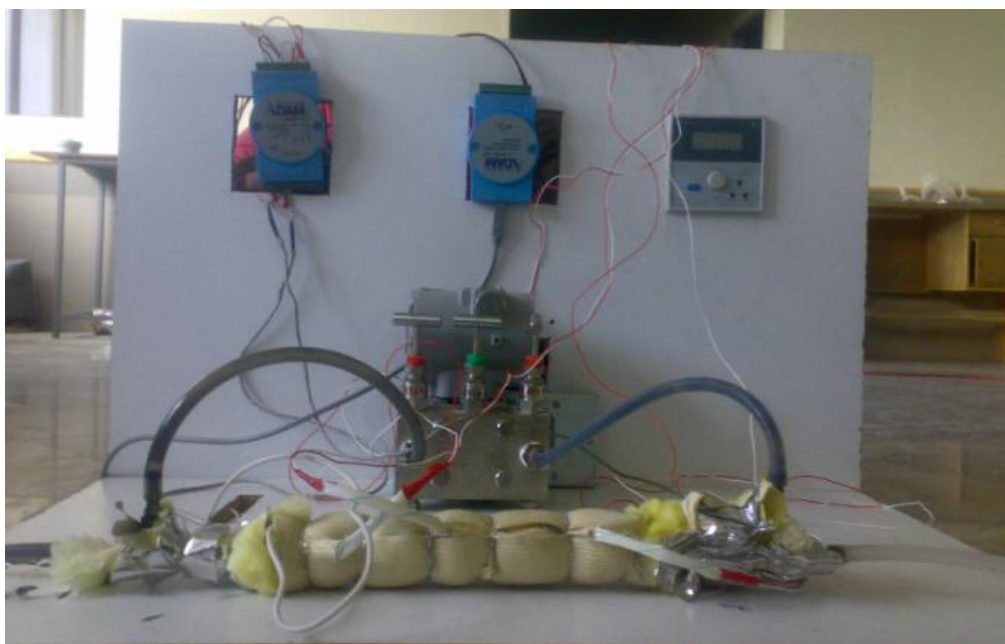
انجام آزمایشات:

۳-۲-۱- حالت شار ثابت

تصویری از سیستم مورد آزمایش و شماتیک فرایند انجام آزمایش در شکل ۳-۹ و شکل ۳-۱۰ آورده شده است:



شکل ۳-۹ شماتیک سیستم مورد استفاده در حالت شار ثابت



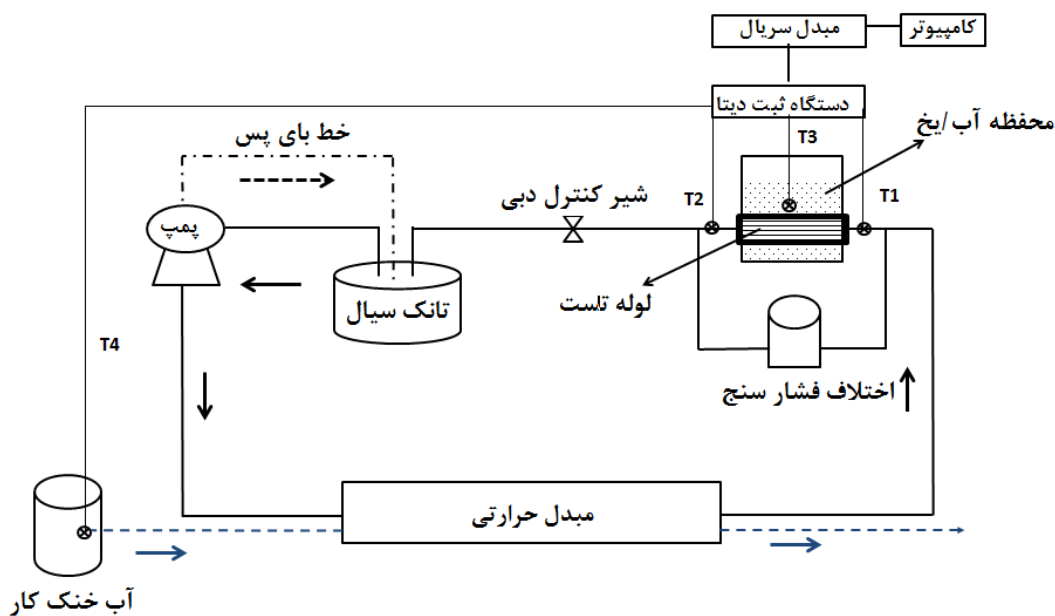
شکل ۳-۱۰ تصویر سیستم مورد استفاده در حالت شار ثابت

اندازه‌گیری دمای سطح لوله توسط سه سنسور که در فواصل مساوی روی سطح لوله تعبیه شده انجام می‌گیرد. برای تاثیر نگرفتن سنسور از المنت های هیتر یک لایه عایق وارنیش روی آن پیچیده شده است همچنین به منظور اتصال بهتر سنسور ها روی سطح، هر یک توسط دو بسط پلاستیکی روی سطح ثابت شده اند. دو سنسور هریک در ورودی و خروجی به منظور ثبت دما نصب شده اند. برای ثابت نگه داشتن شرایط آزمایش یک سنسور در استخر آب خنک کن مبدل حرارتی که وظیفه خنک کردن سیال گرم شده خروجی از سیستم را عهده دار است نصب شده و سنسور دیگری نیز درون محیط تعبیه شده است. تمامی سنسور ها به دستگاه ثبت دما و از طریق آن به کامپیوتر متصل هستند. دمای محیط نیز توسط یک ترمومتر ساده اندازه گیری میشود. سیال پس از عبور از محیط متخلخل و دریافت انرژی حرارتی وارد تانک سیال شده و توسط پمپ به مبدل حرارتی هدایت می‌شود و بعد از دست دادن حرارت خود در مجاورت مبدل حرارتی مجددا وارد محیط متخلخل می‌شود. افت فشار سیال درون لوله آزمایش توسط دستگاه سنجش افت فشار اندازه گیری و ثبت می‌شود. اندازه گیری دبی پس از لوله

متخلخل با دقت ± 1 میلیلیتر/ثانیه و کنترل دبی سیستم نیز توسط شیر بازگشت از پمپ انجام می‌پذیرد. آزمایشات در هر دبی سه بار انجام شده و مقادیر بصورت بازه اطمینان^۱ بیان شده است. دبی‌های مورد آزمایش از رنج ۱۰ میلیلیتر/ثانیه تا حداکثر ۶۰ میلیلیتر/ثانیه می‌باشد که با توجه به عملکرد هر یک از سیالات مورد آزمایش درون سیستم ممکن است دبی حداکثر کاهش یابد. ثبت اطلاعات سنسورها هر یک ثانیه انجام می‌شود و هر تست آنقدر ادامه می‌یابد تا دماهای سیستم به حالت پایا میل کند.

۲-۲-۳- حالت دما ثابت

شماتیک سیستم در حالت دما ثابت در شکل ۳-۱۱ دیده میشود:



شکل ۳-۱۱ شماتیک سیستم در حالت دما ثابت

نحوه انجام آزمایش در این حالت بسیار شبیه به حالت شار ثابت است، با این تفاوت که فقط از دو سنسور یکی در ورودی لوله و دیگری در خروجی آن جهت ثبت دما استفاده شده است، همچنین برای کنترل دمای محفظه آب و یخ نیز یک سنسور درون محفظه قرار گرفته است. سیال پس از دست دادن

¹ Confidence Interval

حرارت در قسمت تست وارد مبدل حرارتی شده و دمای آن ثابت میشود. به منظور ثابت سازی دما در ورودی سعی شده دمای تانک سیال خنک کار مبدل حرارتی ثابت نگاه داشته شود.

۳-۲-۳- روش کار

در گام اول و قبل از شروع به آزمایش می‌بایست المنت حرارتی را روشن کرد تا شار حرارتی یکنواخت در سرتاسر لوله برقرار شود (برای حالت شار ثابت) یا مقدار مناسبی یخ درون محفظه گذاشت تا زمانی که دمای محفظه ثابت شود (برای حالت دما ثابت). 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 ۱۰ الی ۲۰ دقیقه به سیستم اجازه کار دهیم تا سیستم به حالت پایا 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 نتایج توسط دستگاه ثبت اطلاعات در کامپیوتر برای ۱۰۰ ثانیه ثبت و از مقادیر آن متوسط گرفته میشود. حال با در دست داشتن اطاعات فوق می‌توان ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت این جریان سیال را مشخص کرد. در هر دبی حجمی، آزمایش سه مرتبه انجام و مقادیر بدست آمده به روش آماری در طول بازه اطمینان نشان داده می‌شود. پس از آزمایش هر درصد حجمی سیستم به مدت ۱۵ دقیقه با آب شستشو داده و آماده تست جدید می‌شود.

۴- فصل چہارم: صحت سنجی نتایج

صحت سنجی نتایج و اطمینان از نتیجه آزمایشات بدست آمده یکی از مراحل مهم آزمایشات است. از انجایی که باتوجه به پیچیده بودن ساختار محیط‌های متخلخل و متعدد بودن روش‌های ساخت و هندسه آنها روابط اطمینان بخشی برای بررسی انتقال حرارت در این محیط‌ها بصورت کلی وجود ندارد. بنا براین تست لوله خالی با دمای ثابت جهت صحت سنجی نتایج استفاده شده است. 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. سپس تست نانوسیال نیز انجام و با همان نتایج تئوری مقایسه خواهند شد.

۴-۱- تحلیل داده‌ها

۴-۱-۱- عدد ناسلت

ابتدا باید عدد ناسلت را با استفاده از نتایج آزمایش‌ها محاسبه نمود:

یکی از راه‌های مفید برای بررسی عملکرد حرارتی یک سیستم بررسی ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت جریان است. ضریب جابجایی را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$h = \frac{q}{A \Delta T_b} \quad \text{معادله ۴-۱}$$

که در آن q حرارت دفع شده از سیال در طول لوله تست و ΔT_b اختلاف میانگین بین دمای دیواره و مرکز لوله بین ورودی و خروجی است. انرژی دفع شده از سیستم را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$q = \dot{m} c_{peff} (T_{in} - T_{out}) \quad \text{معادله ۲-۴}$$

که در آن C_{peff} ضریب هدایت متوسط نانوسیال است [۶۹]:

$$c_{peff} = \frac{(1-\phi_n)(\rho c)_{bf} + \phi_n(\rho c)_n}{(1-\phi_n)(\rho)_{bf} + \phi_n(\rho)_n} \quad \text{معادله ۳-۴}$$

با توجه به هندسه پیچیده محیط متخلخل دمای بالک سیال در دسترس نیست. برای تخمین دمای بالک سیال از دو روش استفاده میشود:

- **دمای میانگین:** اولین روش تعیین دمای بالک بر اساس میانگین دمای ورودی و خروجی است:

$$\Delta T_b = T_w - \left(\frac{T_{in} + T_{out}}{2} \right) \quad \text{معادله ۴-۴}$$

- **روش LMTD:** روش دیگری که توسط رافتی و همکاران [۶۹] از آن برای محاسبه دمای بالک استفاده شده است:

$$\ln \frac{T_w - T_{in}}{T_w - T_{out}} \quad \text{معادله ۵-۴}$$

در این آزمایش از هر دو روش برای محاسبه دمای بالک استفاده شده است. نتایج بدست آمده نمایانگر حداکثر اختلاف ۱.۲ درصدی بین این دو روش است بنابراین روش LTMD در ارائه نتایج مورد استفاده قرار گرفت.

با توجه به بدست آمدن دمای بالک سیستم ضریب جابجایی بصورت زیر تعریف می شود:

$$h = \frac{\dot{m} c_{peff} (T_{in} - T_{out})}{A \ln \frac{T_w - T_{in}}{T_w - T_{out}}} \quad \text{معادله ۴-۶}$$

در نهایت می‌توان عدد ناسلت جریان را به صورت معادله ۲-۱ محاسبه نمود:

$$Nu = \frac{hD}{k_{eff}} \quad \text{معادله ۴-۷}$$

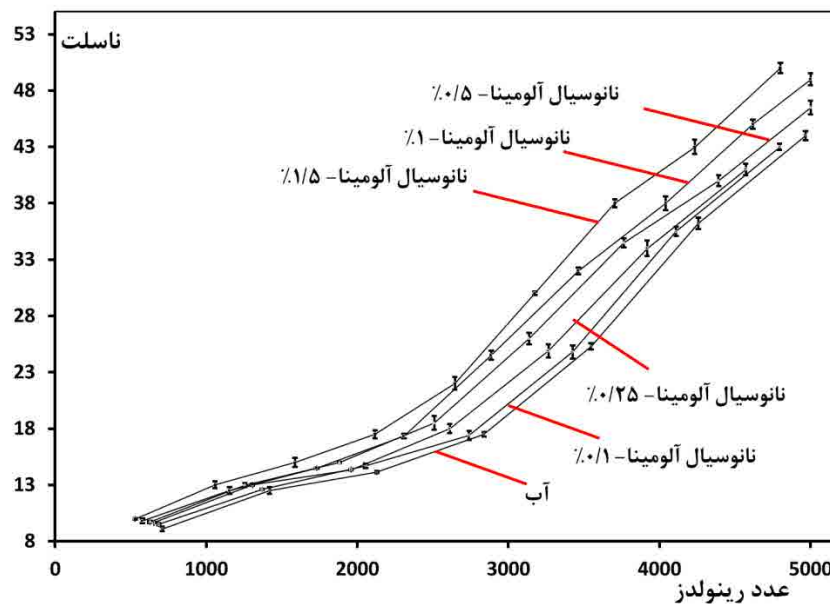
عدد رینولدز را به صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$Re = \left(\frac{\rho}{\mu}\right)_{eff} UD \quad \text{معادله ۴-۸}$$

که در آن U سرعت متوسط سیال و D قطر لوله مورد استفاده است.

عدد ناسلت محاسبه شده تابعی از عدد رینولدز در لوله خالی با دمای ثابت در شکل ۴-۱ آورده

شده است.



شکل ۴-۱ عدد ناسلت محاسبه شده تابعی از عدد رینولدز برای نانوسیال آلومینا

برای بالا بردن دقت نتایج در هر دبی، آزمایش‌ها سه مرتبه انجام و بر اساس روابط آماری و از روش Confidence Interval با دقت بالای ۹۵ درصد محاسبه شده است. این بازه اطمینان در شکل ۴-۱ نمایش داده شده است.

حال می‌بایست روابط تئوری مناسبی در جهت صحت سنجی نتایج بدست آمده آزمایشات ارائه نمود:

برای استفاده از روابط تئوری موجود در حالت دما ثابت ابتدا باید مشخص شود که جریان از لحاظ توسعه یافتگی و طول ورودی هیدرودینامیکی و حرارتی در چه وضعیتی قرار دارد، با توجه به مشخصات لوله و جریان و مقایسه آن با روابط طول ورودی و جریان توسعه یافته در کتاب اینکرپرا [۷۰] مشخص میشود که جریان آرام (رینولدز کمتر از ۲۳۰۰) در طول ورودی و جریان درهم در ناحیه توسعه یافته حرارتی و هیدرودینامیکی قرار دارد. حال نتایج بدست آمده تجربی را با نتایج تئوری آورده شده در مطالعات قبلی مقایسه می‌کنیم.

عدد ناسلت برای جریان آرام (رینولدز > ۲۳۰۰) در ناحیه ورودی حرارتی توسط اخوان^۱ [۷۱] ارائه شده است:

$$Nu_D = 3.66 + \frac{0.0668 \left(\frac{D}{L}\right) Re_D Pr}{1 + 0.04 \left[\left(\frac{D}{L}\right) Re_D Pr \right]^{\frac{2}{3}}} \quad \text{معادله ۴-۹}$$

همچنین نیلیسکی رابطه‌ای را برای جریان گذار در ناحیه توسعه یافته حرارتی و هیدرودینامیکی (برای عدد رینولدز > 0022) بصورت زیر ارائه داده است:

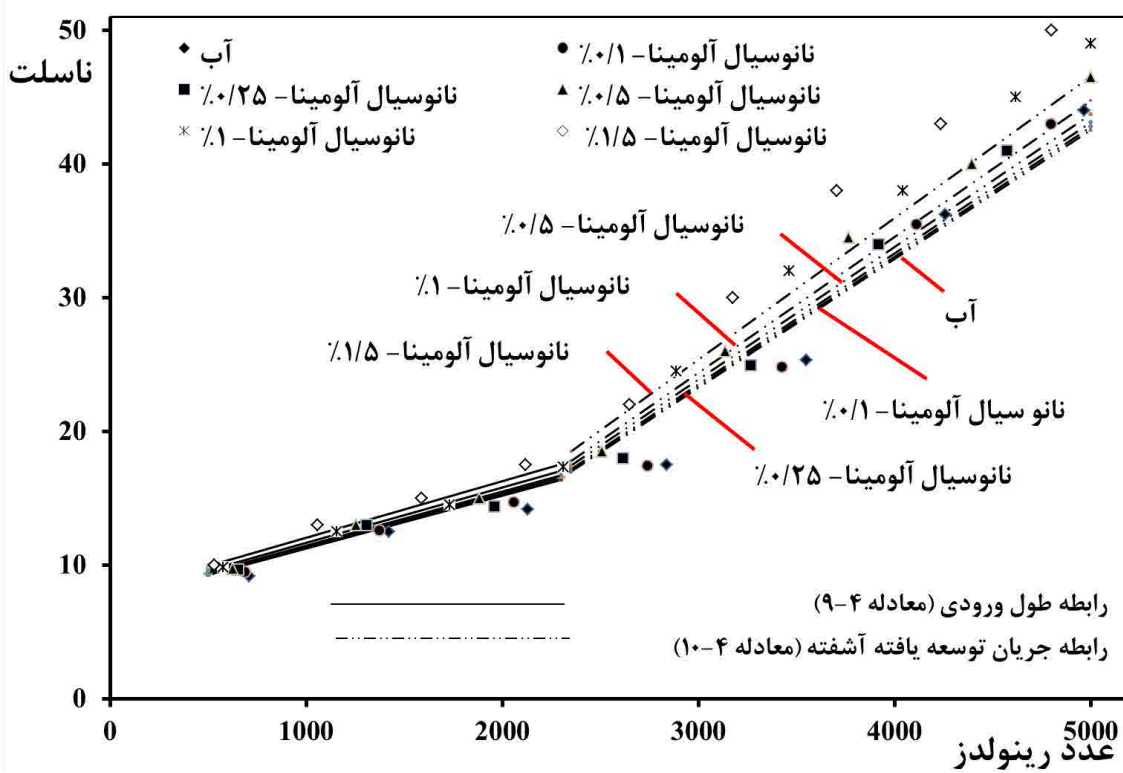
¹ Akhavan

$$Nu_D = \frac{\frac{f}{8}(Re-1000)Pr}{1+12.7\sqrt{\frac{f}{8}}(Pr^{\frac{2}{3}}-1)} \left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{0.11} \left[1+\left(\frac{D}{L}\right)^{\frac{2}{3}}\right] \quad \text{معادله ۱۰-۴}$$

این رابطه برای رنج $0.5 < Pr < 10^6$ و $2300 < Re < 5 \times 10^6$ ارائه و پارامتر f در آن بصورت زیر تعریف

می‌شود:

$$f = \frac{1}{(1.82 \log_{10} Re - 1.64)^2} \quad \text{معادله ۱۱-۴}$$

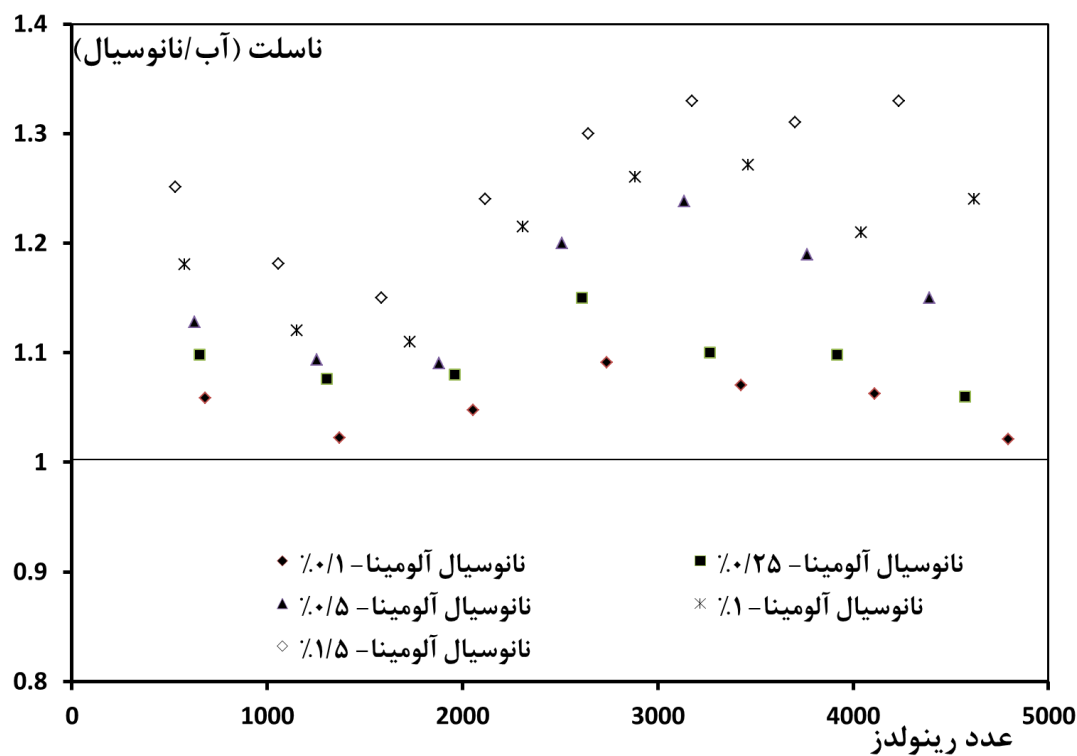


شکل ۲-۴ عدد ناسلت بدست آمده از آزمایش و مقایسه آن با روابط تئوری

شکل ۲-۴ مقایسه عدد ناسلت روابط تئوری اشاره شده با نتایج آزمایشات را بر حسب عدد رینولدز

نشان می‌دهد. نسبت حجمی نانوسیال آلومینای مورد استفاده بازه ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد را

شامل می‌شود. نتایج بدست آمده نشانگر خطای قابل قبول از روابط تئوری است. نتایج نمایانگر افزایش انتقال حرارت نانوسیال در مقایسه با سیال پایه می‌باشد. شکل ۳-۴ میزان افزایش عدد ناسلت در قبال سیال پایه بر حسب رینولدز را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود افزایش انتقال حرارت در جریان آشفته بیشتر است. این افزایش بصورت میانگین در هر غلظت حجمی در جدول ۶-۱ نشان داده شده است.



شکل ۳-۴ میزان افزایش انتقال حرارت بر حسب رینولدز در لوله خالی

نتایج بدست آمده نشان دهنده تاثیر غلظت حجمی نانوسیال بر انتقال حرارت جریان در طول لوله است، این اثر می‌تواند ناشی از تغییرات سه پارامتر مهم که در انتقال حرارت مهم است از جمله عدد پرانتل، ویسکوزیته و هدایت حرارتی باشد.

جدول ۴-۱ میانگین درصد افزایش عدد ناست در هر غلظت حجمی

میانگین درصد افزایش عدد ناست		غلظت نانوسیال
جریان آرام	جریان آشسته	
۴	۷	آلومینا- ۰/۱٪
۸	۱۲	آلومینا- ۰/۲۵٪
۱۰	۲۰	آلومینا- ۰/۵٪
۱۵	۲۵	آلومینا- ۱٪
۱۹	۳۱	آلومینا- ۱/۵٪

۴-۱-۲- افت فشار

بدلیل تاثیر افت فشار جریان در مصرف انرژی این پارامتر در کاربرد های صنعتی از اهمیت زیادی برخوردار است. برای صحت سنجی آزمایش نتایج آزمایش سیال پایه با رابطه تئوری موجود مقایسه می-شود. معادله بلازیوس و ضریب اصطکاک مربوط به آن توسط کیهانی و همکاران [۴۰] در معادلات ۶-۱۲ و ۶-۱۳ آورده شده است [۷۲]:

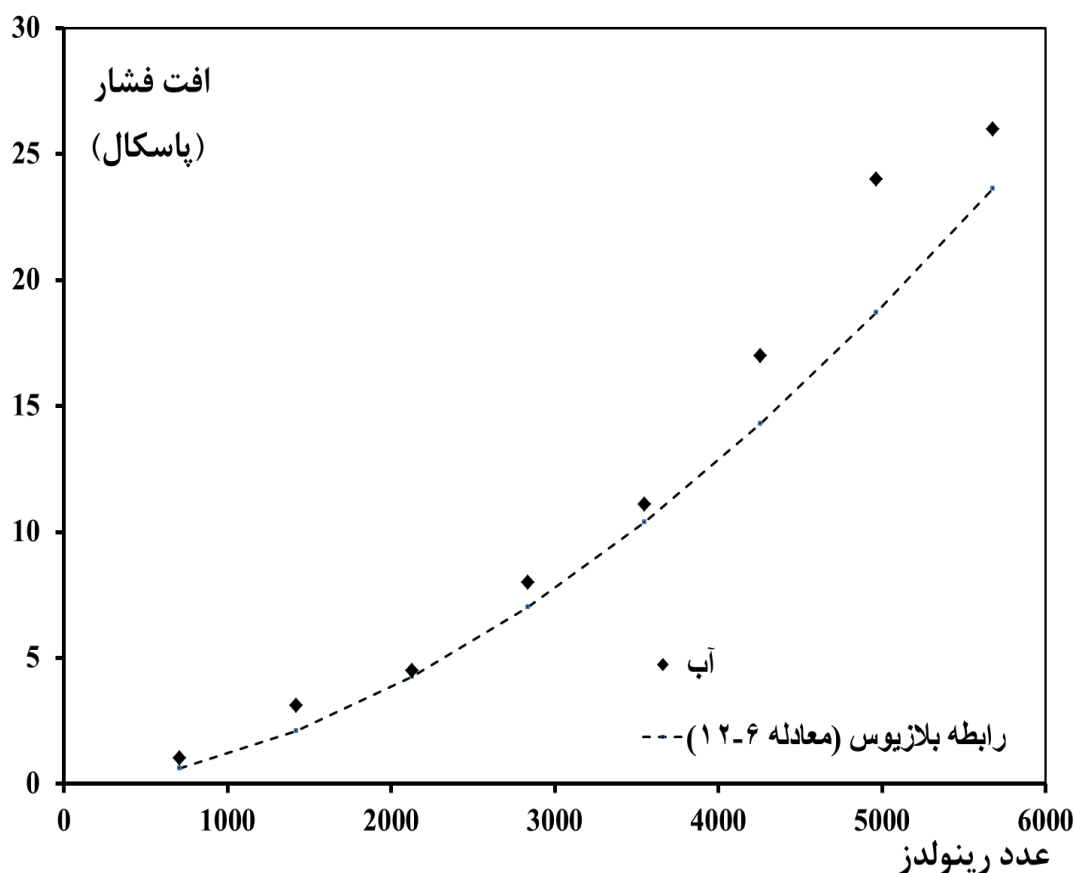
$$\Delta P = f_r \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{\rho U^2}{2} \right) \quad \text{معادله ۴-۱۲}$$

که ضریب اصطکاک را میتوان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$f_r = 0.316 \text{Re}^{-0.25} \quad \text{معادله ۴-۱۳}$$

شکل ۴-۴ مقایسه ای نتایج ناشی از افت فشار آب در لوله خالی با نتایج تئوری رابطه بلازیوس را ارائه می کند. نتایج بدست آمده خطای زیادی را از رابطه تئوری نشان نمی دهد، برای روش شدن این موضوع شکل ۴-۵ نتایج تجربی افت فشار نانوسیال و آب را در برابر نتایج تئوری نشان می دهد. خط میانی، خط انطباق کامل نتایج تئوری و تجربی است و انحراف از این خط بعنوان خطای آزمایش منظور

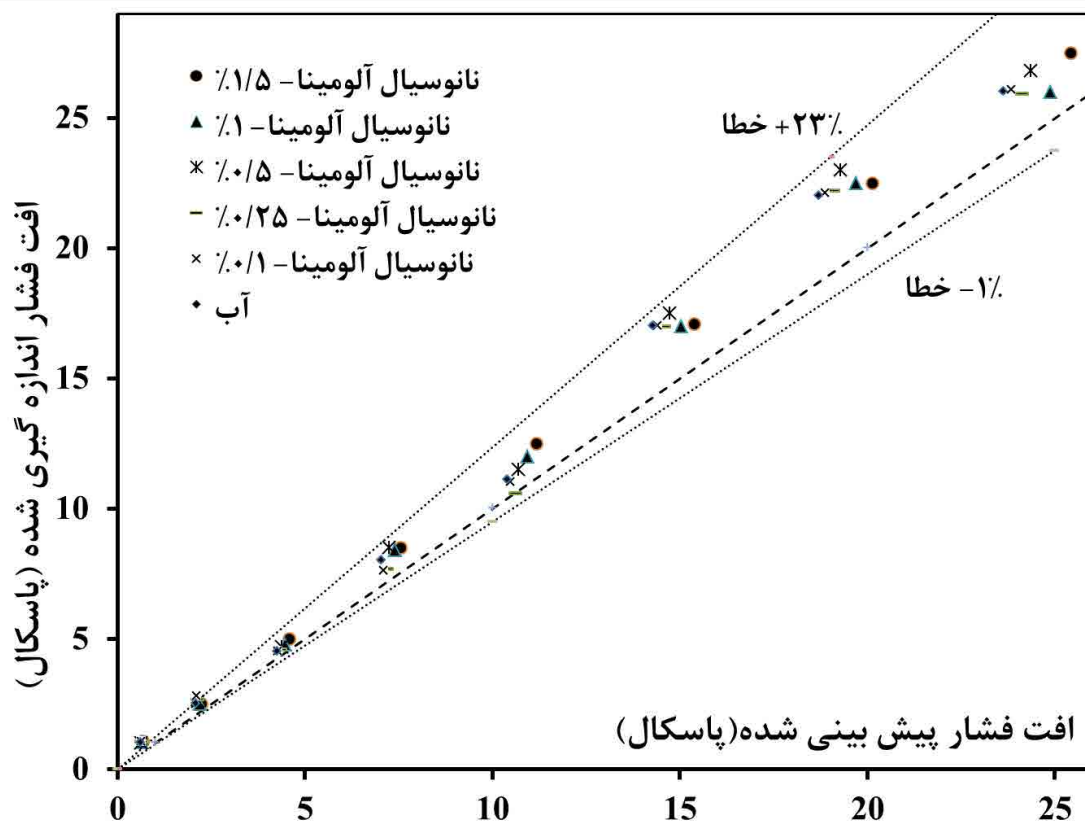
شده است. خطای حداکثری ۲۳ درصد و حداقل ۱- درصدی نسبت به نتایج تئوری توسط این نمودار گزارش شده است. نتایج آزمایشات افزایش قابل ملاحظه افت فشار به ازای استفاده از نانوسیال و بالا رفتن غلظت نانوپودر در سیال پایه را نشان می‌دهد. سجادی^۱ و پنگ^۲ و همکاران [۷۴, ۷۳] نیز مشابه این افزایش را برای نانوسیال در لوله خالی مشاهده کرده‌اند. افزایش ویسکوزیته نانوسیال نسبت به آب یکی از عواملی است که منجر به افزایش افت فشار در نانوسیال نسبت به آب باشد.



شکل ۴-۴ مقایسه افت فشار تجربی با رابطه بلازیوس

¹ Sajadi

² Peng



شکل ۴-۵ مقایسه خطای افت فشار روابط تئوری و آزمایشگاهی در لوله خالی

مقایسه انتقال حرارت و افت فشار لوله خالی در حالت دما ثابت خطای قابل قبولی را در آزمایشات

نسبت به روابط تئوری گزارش می‌کند، بنابراین با تکیه بر صحت سنجی بدست آمده آزمایشات لوله

متخلخل انجام و گزارش شده است.

۵- فصل پنجم: بررسی نتایج لوله متخلخل

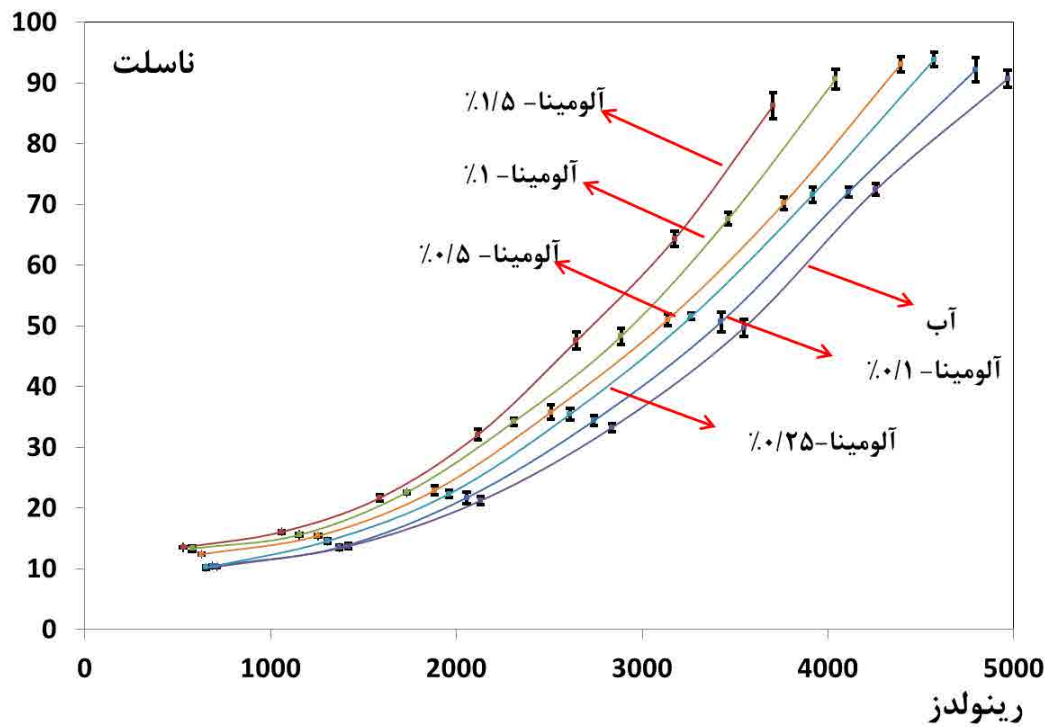
این فصل مهم‌ترین قسمت پروژه است که آزمایشات انتقال حرارت جابجایی و افت فشار لزجی نانوسیال در محیط متخلخل را در بر می‌گیرد. استفاده از نانوسیالات نیازمند پایداری مناسب آن‌ها است که در مورد آن در فصل ۳ و ۵ بصورت کامل توضیح داده شده است. نانوسیال آلومینا در غلظت حجمی‌های مختلف از ۰/۱ تا ۱/۵ درصد و نانوسیال کربنی در سه غلظت حجمی ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد تولید شده است، با توجه به خواص ویژه نانوسیال کربنی از جمله چسبندگی بالا و اثر لایه‌ای، این سیال فقط در تست شار ثابت مورد استفاده قرار گرفته است. همانطور که پیش‌تر گفته شد آزمایشات در دو شرط مرزی شار ثابت و دما ثابت انجام و نتایج آن گزارش شده است. 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. در این فصل نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها نشان داده خواهد شد. روال انجام آزمایش شبیه آزمایش لوله خالی است که در فصل ۳ و ۴ توضیحات آن آمده است.

۵-۱- نتایج شرط مرزی دما ثابت در دیواره لوله

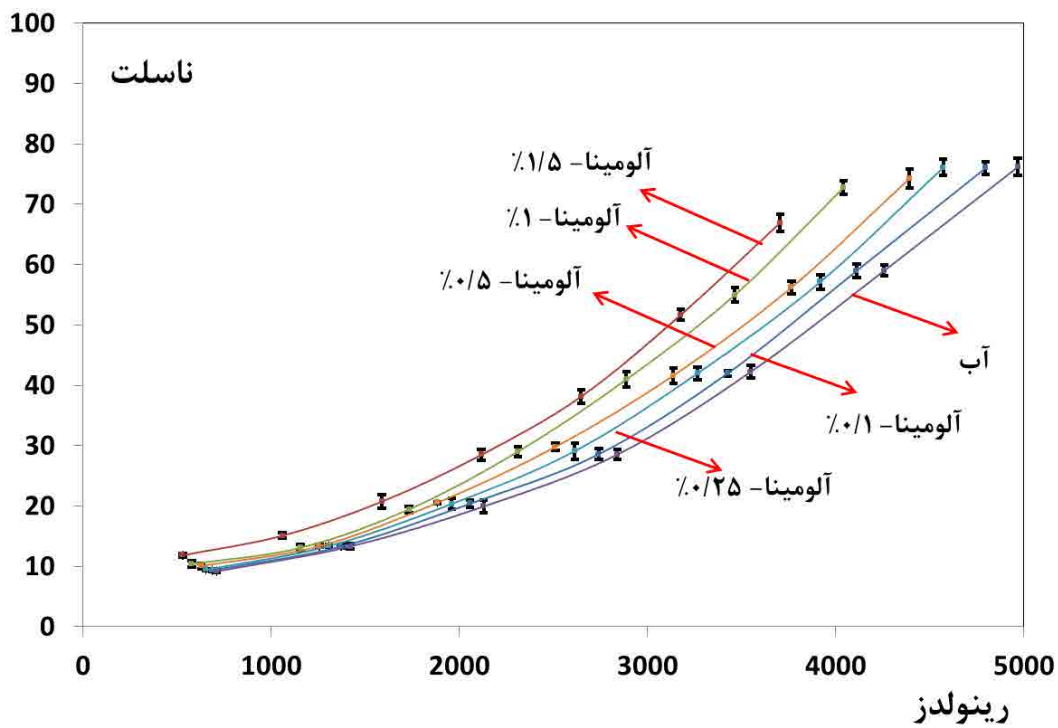
شماتیک سیستم آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش در ۳-۲-۲- بصورت کامل توضیح داده شده است. برای محاسبه عدد ناسلت جریان در هر دبی حجمی محاسبه عدد رینولدز از روابط فصل ششم معادله ۴-۱ تا معادله ۴-۸ استفاده شده است.

۵-۱-۱- عدد ناسلت

عدد ناسلت جریان تابعی از عدد رینولدز در لوله متخلخل با تخلخل ۵۰٪ و ۶۳٪ به ترتیب در شکل ۵-۱ و شکل ۵-۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز بصورت چشمگیری افزایش می‌یابد، همچنین استفاده از نانوسیال موجب افزایش انتقال حرارت نسبت به سیال پایه شده و این افزایش با افزایش غلظت حجمی نانوپودر بصورت قابل ملاحظه افزایش می‌یابد.

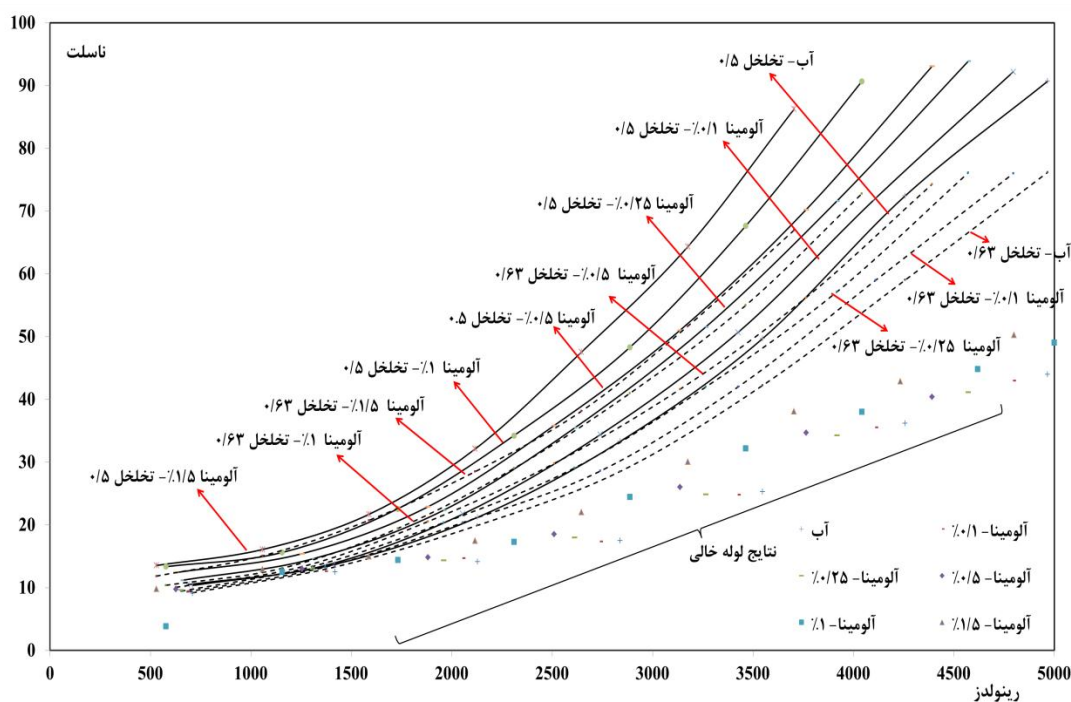


شکل ۵-۱ عدد ناسلت نانوسیال آلومینا بر حسب عدد رینولدز برای تخلخل ۰.۵٪ با شرط مرزی دما ثابت



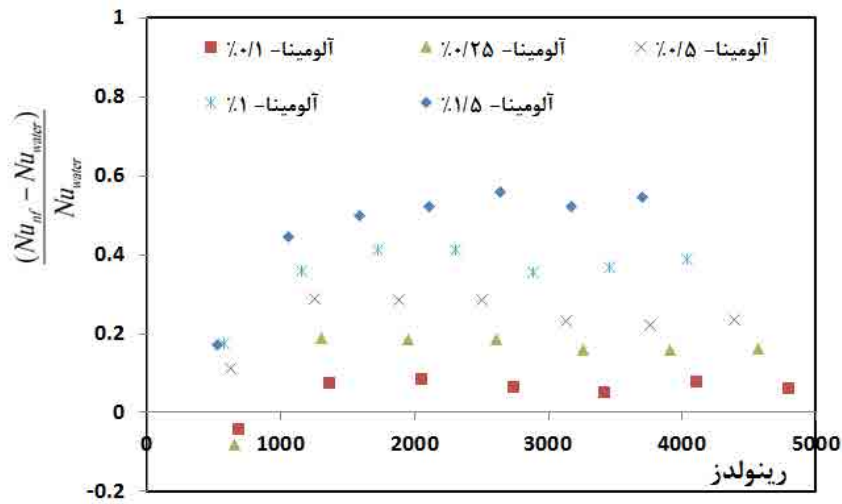
شکل ۵-۲ عدد ناسلت نانوسیال آلومینا بر حسب عدد رینولدز برای تخلخل ۰.۶۳٪ با شرط مرزی دما ثابت

تمامی نتایج در بازه اطمینان اندازه گیری شده، نمایش داده شده‌اند. خطای قابل قبول این آزمایشات در این بازه نمایش داده شده است. مقایسه‌ای از نتایج لوله خالی و نتایج لوله متخلخل نیز در شکل ۳-۵ مشاهده می‌شود، نکته قابل توجه در این مقایسه افزایش شدید انتقال حرارت در محیط متخلخل بخصوص در رینولدزهای بالا (حدود دو برابر در رینولدزهای بالا در تخلخل ۵۰ درصد) نسبت به نتایج لوله خالی است، مشابه این نتایج برای دوسیال آب و هوا در محیط متخلخل توسط جیانگ و همکاران [۱۶] گزارش شده است.

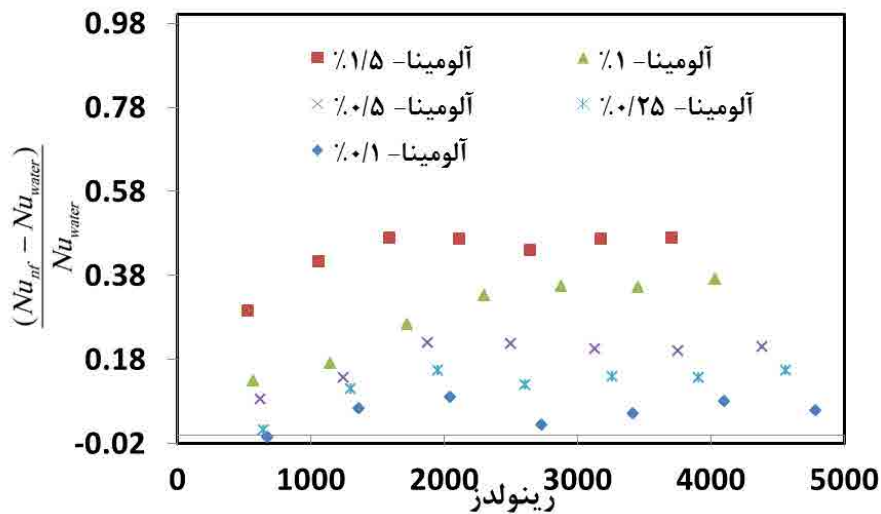


شکل ۳-۵ عدد ناسلت بر حسب برینولدز برای لوله های آزمایش با شرط مرزی دما ثابت

شکل ۴-۵ و شکل ۵-۵ به ترتیب نمایانگر میزان افزایش عدد ناسلت نانوسیال آلومینا نسبت به سیال پایه (آب) $(Nu_{nf}-Nu_w)/Nu_w$ در لوله متخلخل با تخلخل ۵۰ و ۶۳٪ بر حسب عدد رینولدز است. همانطور که اشاره شد افزودن اندکی نانوپودر موجب تغییر خواص حرارتی سیال می‌شود. میتوان گفت افزایش عدد ناسلت تابعی از غلظت حجمی بوده و با تغییرات عدد رینولدز تغییر چشمگیری نمی‌کند.



شکل ۴-۵ درصد افزایش عدد ناست نانوسیال آلومینا، تابعی از عدد رینولدز در لوله با تخلخل ۵۰٪ با دمای ثابت



شکل ۵-۵ درصد افزایش عدد ناست نانوسیال آلومینا، تابعی از عدد رینولدز در لوله با تخلخل ۶۳٪ با دمای ثابت

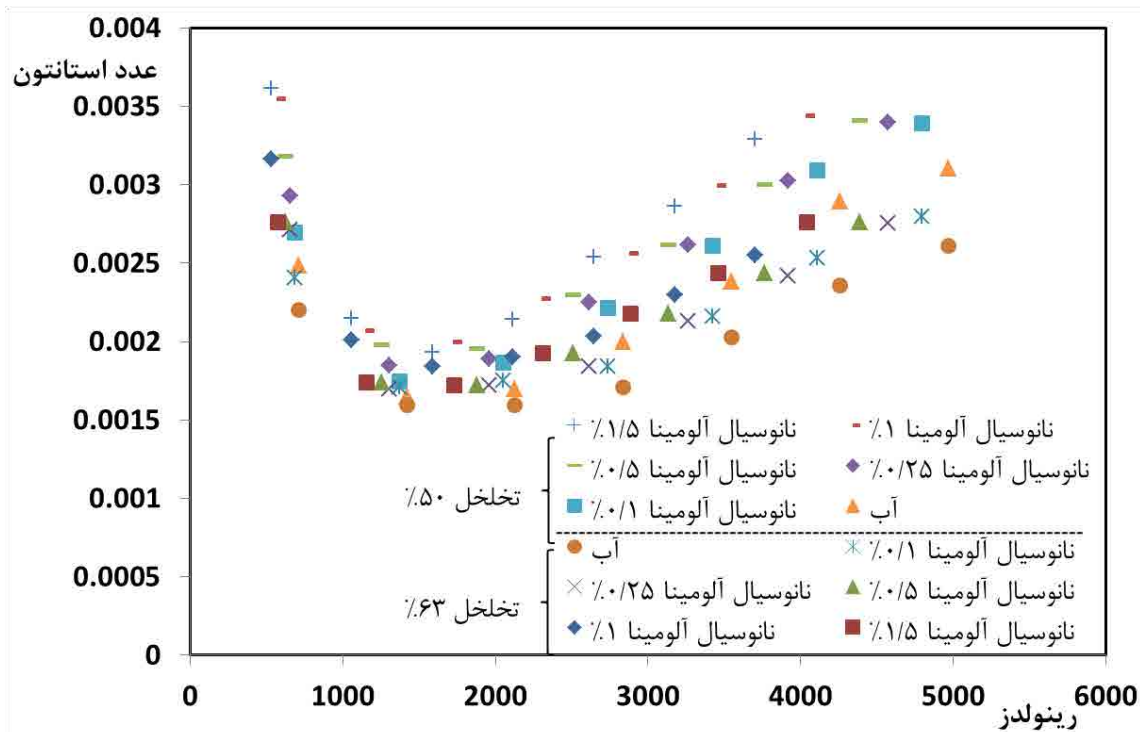
بیشترین افزایش عدد ناست برای نانوسیال آلومینا با غلظت حجمی ۱/۵٪ در رینولدز ۳۷۰۴ به میزان ۵۷٪ و بیشترین مقدار عدد ناست برای تخلخل ۶۳٪ نیز برای نانوسیال آلومینا با غلظت حجمی ۱/۵٪ در رینولدز ۳۱۷۵ و به میزان ۴۵٪ گزارش شده است. همانطور که مشخص است انتقال حرارت در لوله متخلخل با تخلخل کمتر بیشتر است که می‌تواند در اثر افزایش سطح حرارتی و آشفتگی بیشتر جریان باشد.

عدد استانتون^۱ هم به عنوان پارامتر مهمی از غلبه عدد ناسلت بر عدد رینولدز معرفی می شود. معیار

عدد استانتون را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$St = \frac{Nu}{RePr} \quad \text{معادله ۱-۵}$$

شکل ۵-۶ عدد استانتون جریان در لوله متخلخل با دمای دیواره ثابت بر حسب عدد رینولدز نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود رفتار این پارامتر از عدد رینولدز ۱۵۰۰ دچار تغییر می شود، بعبارت دیگر میزان افزایش عدد ناسلت بر عدد رینولدز غلبه یافته و موجب افزایش عدد استانتون می شود. از نکات قابل توجه دیگر بالاتر بودن عدد استانتون لوله متخلخل با تخلخل ۵۰٪ نسبت به تخلخل بالاتر است که مشابه رفتار عدد ناسلت است.



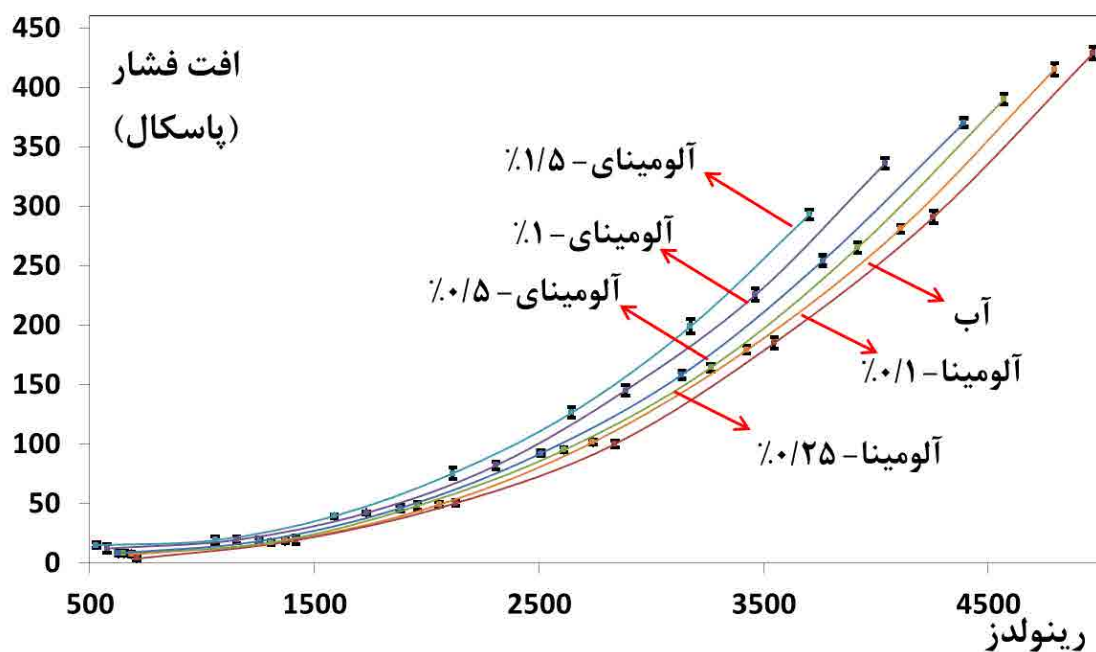
شکل ۵-۶ عدد استانتون بر حسب عدد رینولدز در لوله متخلخل با دمای دیواره ثابت

¹ Stanton

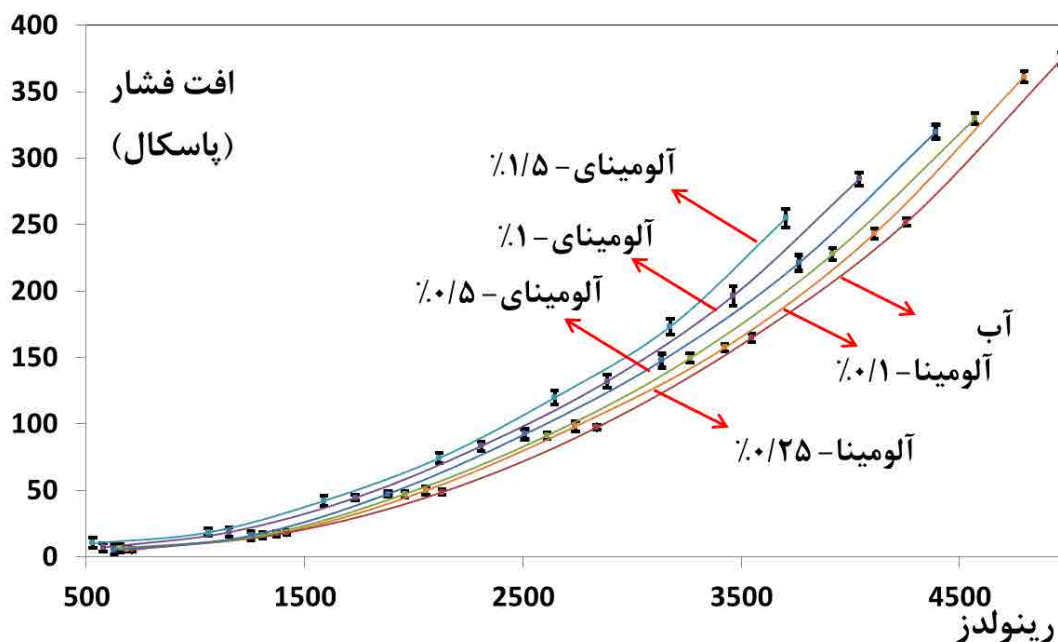
۵-۱-۲- افت فشار

با توجه به مطالبی که قبلا به آن اشاره شد بررسی افت فشار یکی از پارامترهایی است که در صنعت به آن توجه ویژه‌ای می‌شود. شکل ۵-۷ و شکل ۵-۸ به ترتیب افت فشار ایجاد شده در لوله با تخلخل ۵۰٪ و ۶۳٪ را بر حسب تابعی از عدد رینولدز نشان می‌دهد.

مشاهدات تجربی نشان می‌دهد افزایش غلظت نانوسیال آلومینا موجب افزایش افت فشار سیستم می‌شود، همانطور که ملاحظه می‌شود این افزایش با افزایش غلظت حجمی نانوسیال بصورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. البته همانطور که انتظار می‌شد افت فشار لوله با تخلخل ۵۰٪ بالاتر از تخلخل ۶۳٪ بود.



شکل ۵-۷ افت فشار لوله با تخلخل ۵۰٪ با دمای دیواره ثابت



شکل ۵-۸ افت فشار لوله با تخلخل ۶۳٪ با دمای دیواره ثابت

۵-۲- نتایج شرط مرزی شار ثابت در دیواره لوله

شمانتیک سیستم آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش در ۱-۲-۳- بصورت کامل توضیح داده شده است. برای محاسبه عدد ناسلت جریان در هر دبی حجمی محاسبه عدد رینولدز از روابط زیر استفاده کرده‌ایم:

ضریب انتقال حرارت جابجایی جریان سیال در یک لوله را میتوان به صورت زیر نوشت:

$$h = \frac{q''}{T_w - T_b} \quad \text{معادله ۲-۵}$$

که در این رابطه q'' شار حرارتی اعمال شده به سطح لوله و T_w و T_b دمای میانگین اندازه گیری شده توسط سنسور در دیواره و دمای متوسط (بالک) سیال در مرکز لوله است.

مقدار حرارت دریافت شده توسط سیال در لوله نیز می‌تواند توجه به ولتاژ و جریان عبوری از المنت

محاسبه شود:

$$q = VI \quad \text{معادله ۳-۵}$$

البته بقای انرژی نیز با مقایسه رابطه حرارت دریافتی سیال در لوله و رابطه جریان الکتریکی بررسی شده است، حرارت دریافتی سیال در لوله متخلخل را می توان بصورت زیر نوشت:

$$q = \dot{m} c_{p,eff} (T_{out} - T_{in}) \quad \text{معادله ۴-۵}$$

نتایج این مقایسه حاکی از عایق بندی مناسب و اتلاف انرژی کم به محیط است.

از آنجایی که با توجه به پیچیده بودن هندسه محیط متخلخل مورد استفاده امکان دسترسی به دمای بالک آن به سادگی وجود ندارد از دمای میانگین سیال برای دمای بالک استفاده شده است:

$$T_b = \left(\frac{T_{in} + T_{out}}{2} \right) \quad \text{معادله ۵-۵}$$

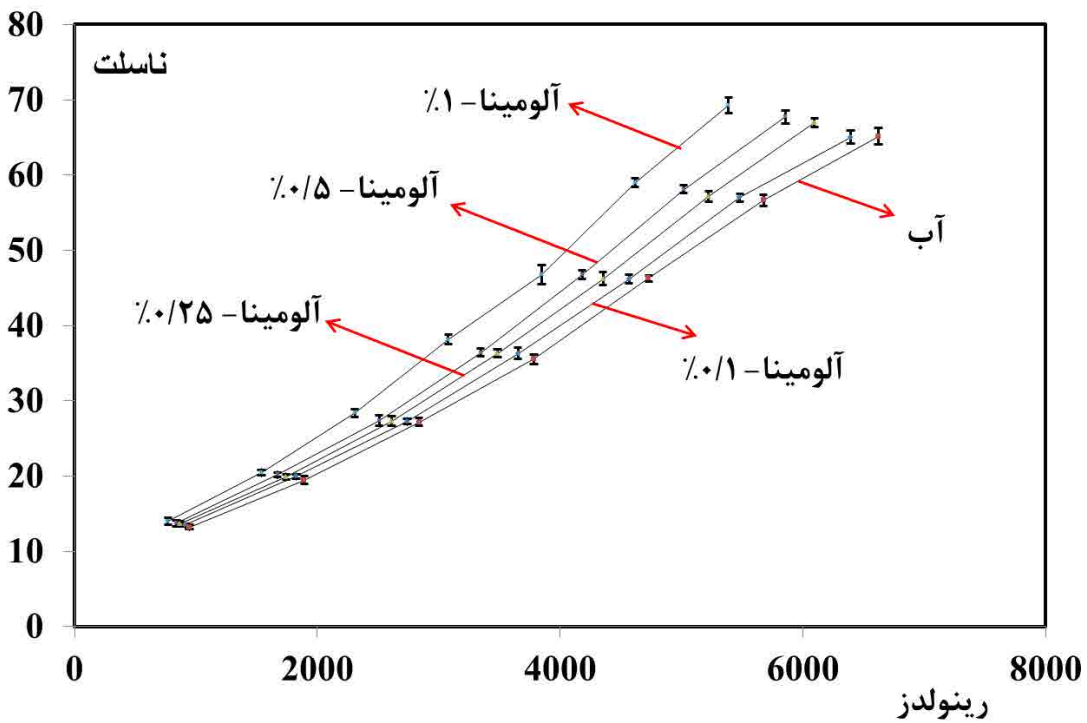
همچنین برای اندازه گیری دمای سطح نیز از سه سنسور مجزا در فواصل مساوی استفاده و از مقادیر آنها میانگین گرفته شده است:

$$T_w = \frac{(T_1 + T_2 + T_3)}{3} \quad \text{معادله ۶-۵}$$

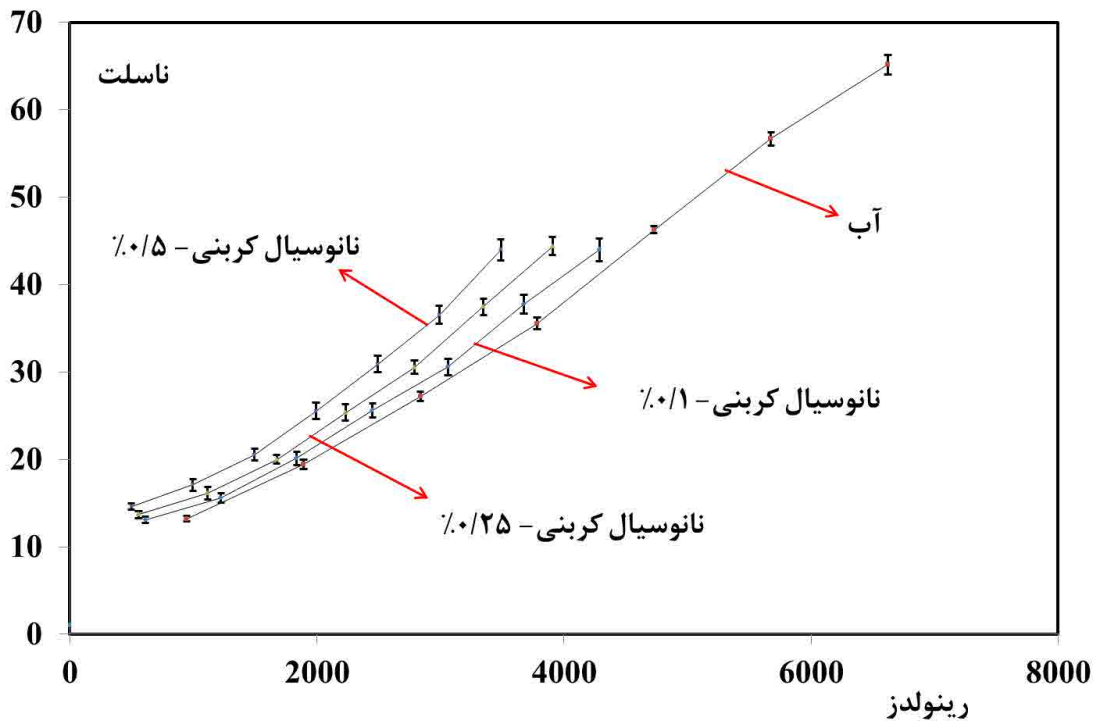
حال با توجه به مشخص شدن تمامی پارامترهای ضریب انتقال حرارت جابجایی، عدد ناسلت را به

صورت معادله ۴-۷ تعریف میشود. همچنین عدد رینولدز نیز با توجه به خواص فیزیکی سیال و جریان سیال بوسیله معادله ۴-۸ استفاده شده است.

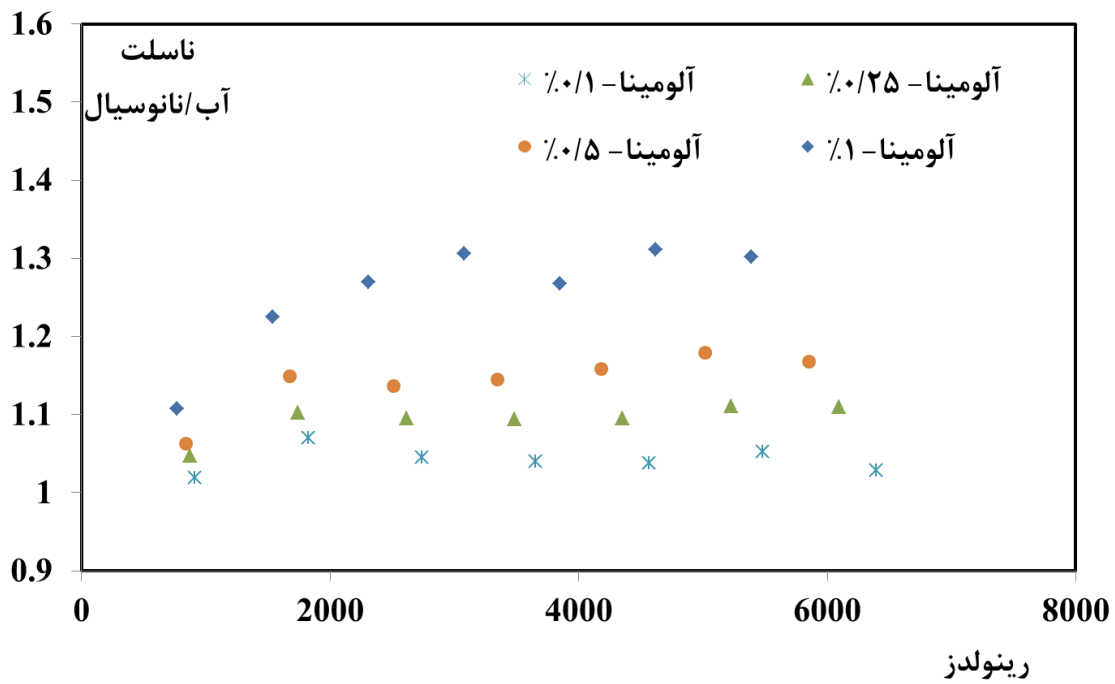
شکل ۵-۹ و شکل ۵-۱۰ به ترتیب عدد ناسلت جریان برای دو نانوسیال آلومینا و کربنی را بر حسب تابعی از رینولدز در لوله متخلخل با شار ثابت در نسبت حجمی‌های متفاوت نشان می‌دهند. تمامی نتایج در بازه اطمینان اندازه گیری شده، نمایش داده شده‌اند. خطای قابل قبول این آزمایشات در این بازه نمایش داده شده است. در این قسمت نیز افزایش قابل توجه عدد ناسلت نسبت به سیال پایه قابل مشاهده است البته رفتار نانوسیال کربنی میزان افزایش بیشتری را از خود نشان می‌دهد. شکل ۵-۱۱ و شکل ۵-۱۲ نیز نمایانگر میزان افزایش عدد ناسلت در برابر سیال پایه به ترتیب برای نانوسیال آلومینا و کربنی در لوله متخلخل با شار ثابت می‌باشد. در این قسمت نیز به وضوح تاثیر افزودن نانوپودر به سیال پایه و افزایش غلظت آن بر افزایش انتقال حرارت نانوسیال مشاهده می‌شود. البته شدت تغییرات در نانوسیال کربنی بیشتر است، عبارتی افزایش عدد ناسلت در نانوسیال کربنی با غلظت حجمی کمتر از نانوسیال آلومینا بیشتر می‌باشد. حداکثر افزایش عدد ناسلت برای نانوسیال آلومینا به میزان ۳۱ درصد با غلظت حجمی ۱٪ و در رینولدز ۵۳۸۸ اتفاق می‌افتد این درحالی است که حداکثر افزایش نانوسیال کربنی به میزان ۳۳ درصد در غلظت حجمی ۵/۰٪ و رینولدز ۳۴۸۹ اتفاق افتاده است. بنا بر این جدا از برخی خواص نانوسیال کربنی مانند چسبندگی و اثر لایه‌ای بر روی سیستم این نانوسیال به مراتب عملکرد حرارتی بهتری نسبت به نانوسیال آلومینا از خود نشان می‌دهد.



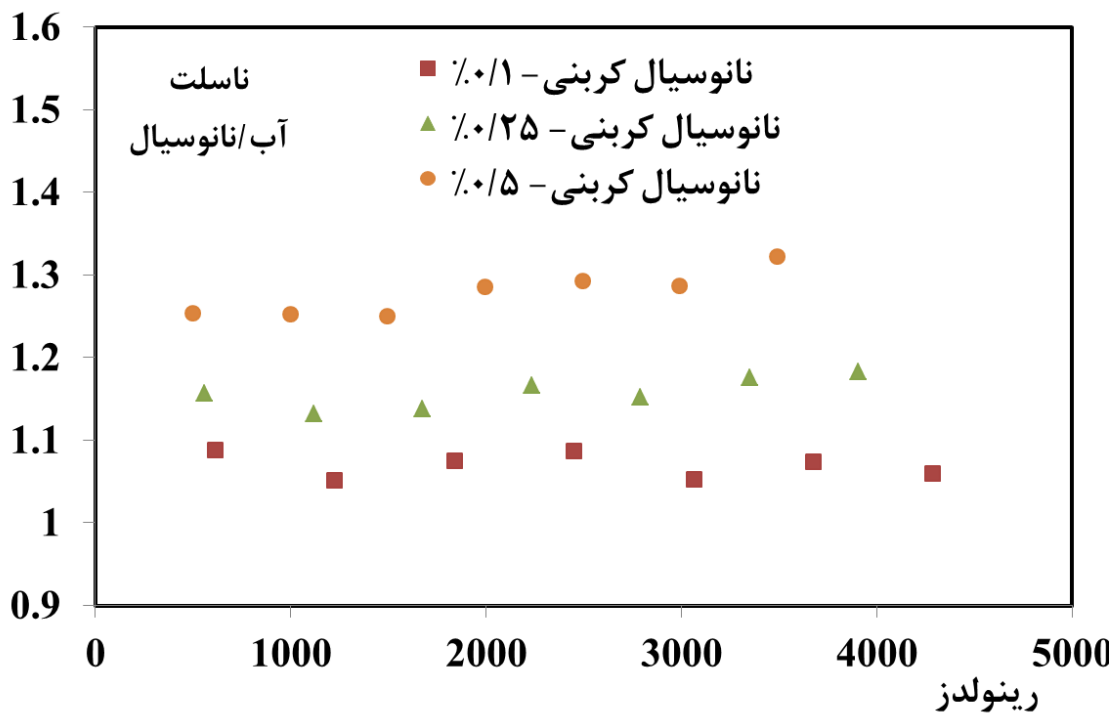
شکل ۵-۹ عدد ناست نانوسیال آلومینا، تابعی از عدد رینولدز در لوله متخلخل با شار ثابت



شکل ۵-۱۰ عدد ناست نانوسیال کربنی، تابعی از عدد رینولدز در لوله متخلخل با شار ثابت

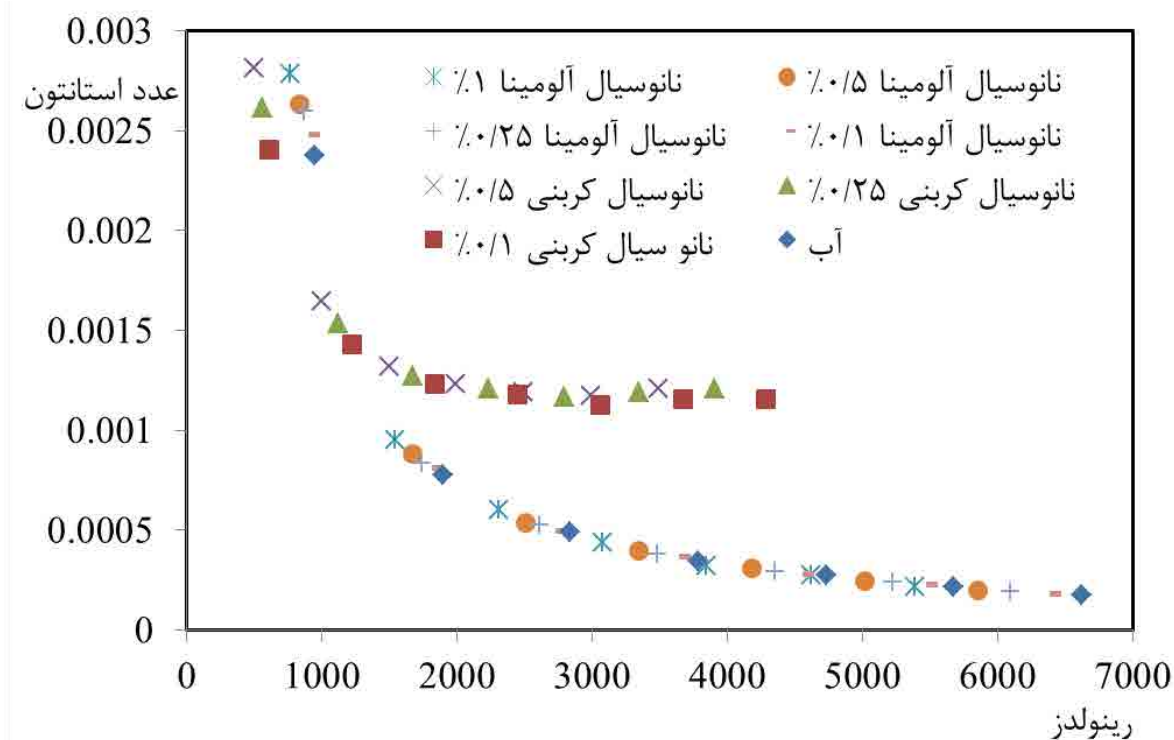


شکل ۵-۱۱ درصد افزایش عدد ناست نانوسیال آلومینا، تابعی از عدد رینولدز در لوله متخلخل با شار ثابت



شکل ۵-۱۲ درصد افزایش عدد ناست نانوسیال کربنی، تابعی از عدد رینولدز در لوله متخلخل با شار ثابت

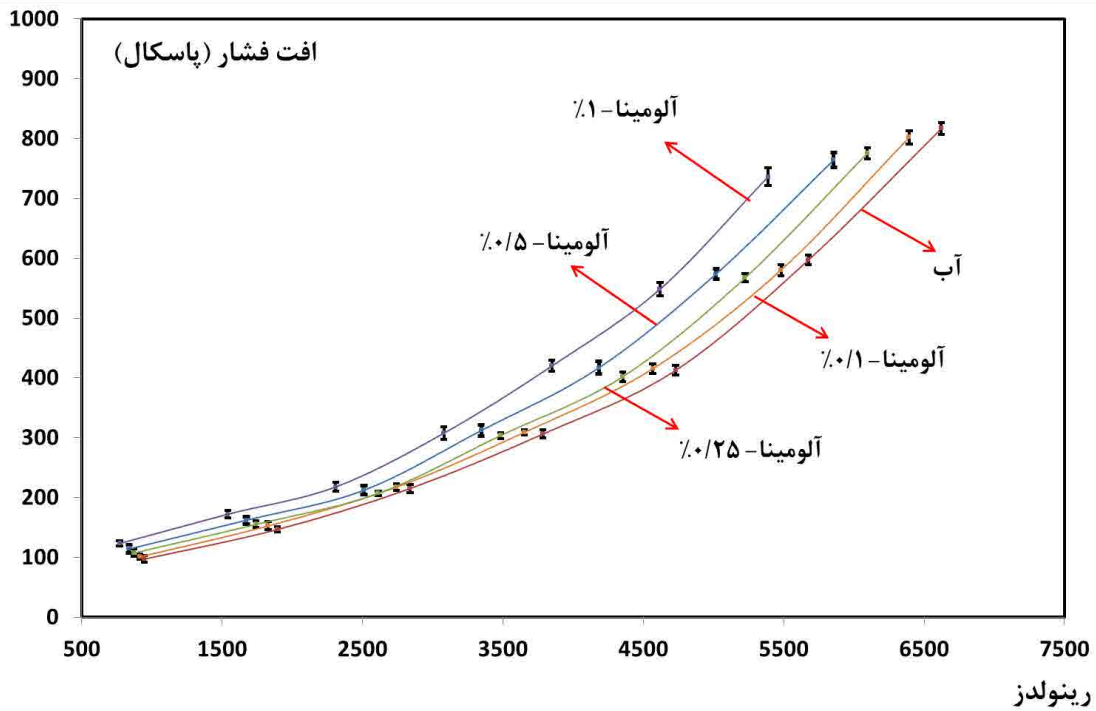
عدد استانتون لوله متخلخل در حالت شار ثابت در دیواره در شکل ۵-۱۳ نشان داده شده است. بالاتر بودن عدد استانتون نانوسیال کربنی نسبت به نانوسیال آلومینا در این شکل مشهود است. بر خلاف حالت دما ثابت افزایش عدد رینولدز بر عدد ناسلت همواره غلبه دارد اما میزان این غلبه در رینولدزهای بالاتر کمتر می‌شود.



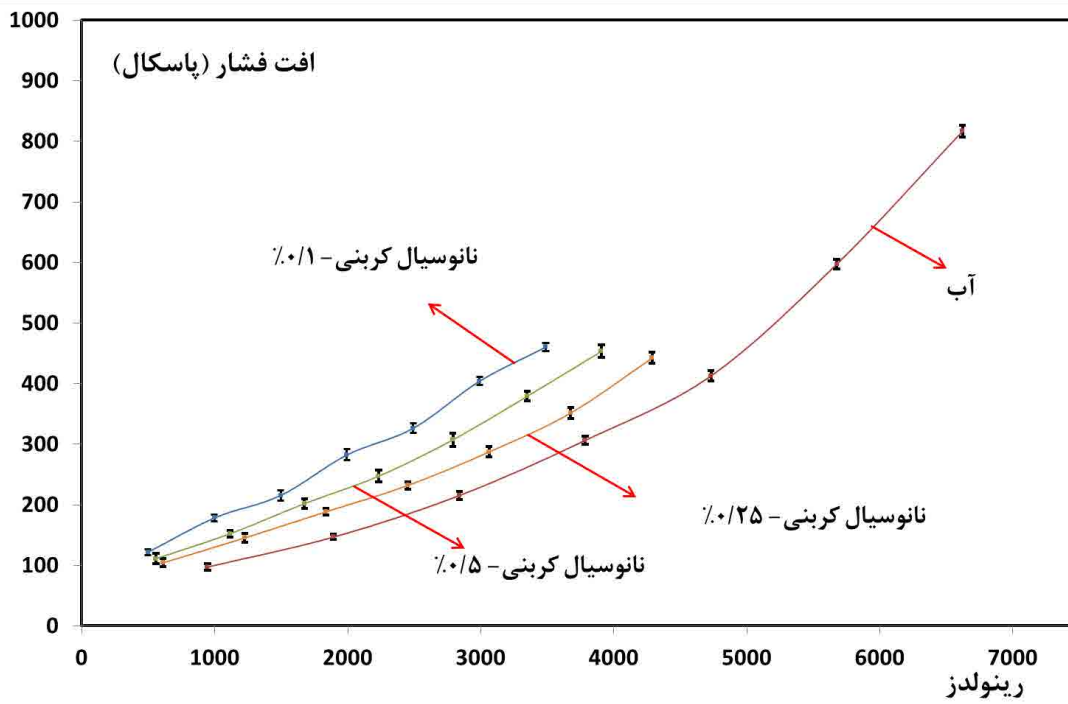
شکل ۵-۱۳ عدد استانتون بر حسب عدد رینولدز در لوله متخلخل با شار ثابت

۵-۲-۲- افت فشار

افت فشار اندازه گیری شده دو سر لوله برای نانوسیال آلومینا و کربنی در شکل ۵-۱۴ و شکل ۵-۱۵ نشان داده شده است. افت فشار نانوسیال در هر دو حالت نسبت به سیال پایه افزایش محسوسی را از خود نشان می‌دهد هرچند افت فشار نانوسیال کربنی به مراتب بیشتر از آلومینا است که می‌تواند معلول پارامترهایی همچون افزایش ویسکوزیته و چسبندگی نانوسیال کربنی باشد.



شکل ۵-۱۴ افت فشار نانوسیال آلومینا در لوله متخلخل با شار ثابت



شکل ۵-۱۵ افت فشار نانوسیال کربنی در لوله متخلخل با شار ثابت

مقایسه نتایج افت فشار لوله‌های متخلخل استفاده شده با نتایج لوله خالی همانطور که انتظار می‌رفت از افزایش چندین برابری افت فشار نسبت به لوله خالی حکایت دارد. این افزایش به عوامل زیادی مانند هندسه محیط‌های متخلخل، تخلخل، نوع ساخت و ... وابسته است، برای مثال لوله متخلخل استفاده شده در حالت شار ثابت با وجود داشتن تخلخل بیشتر نسبت به نمونه‌های دیگر افت فشار بیشتری را سبب می‌شود که می‌تواند در اثر هندسه در هم پیچیده محیط متخلخل جایگذاری شده در لوله باشد.

نتایج بالا نمایانگر انتقال حرارت بهتر لوله متخلخل نسبت به لوله خالی و همچنین انتقال حرارت بهتر نانوسیال نسبت به سیال پایه است. این در حالی است که افت فشار نیز به عنوان پارامتری موثر باید در نظر گرفته شود که با توجه به کاربرد و حیطة کاری مورد استفاده می‌بایست تعادلی بین انتقال حرارت و افت فشار در نظر گرفته شود. مطالعات بیشتری در مورد تاثیر پارامترهای مختلف محیط‌های متخلخل و نانوسیالات بر انتقال حرارت و افت فشار باید انجام شود.

۶- فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه گیری

در این تحقیق، انتقال حرارت نانوسیال در لوله متخلخل مورد بررسی قرار گرفته است. لوله آزمایش تحت دو شرط مرزی شار ثابت و دماتابت بصورت جداگانه مورد مطالعه قرار گرفته است. نانوسیال مورد استفاده نانوسیال آلومینا در ۵ درصد حجمی (۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد) برای حالت دماتابت و ۴ درصد حجمی آلومینا و سه درصد حجمی نانوسیال کربنی برای حالت شار ثابت در بازه اطمینان اماری آزمایش شده است. همچنین تست لوله خالی و مقایسه نتایج آن با روابط تک فاز موجود در حالت دماتابت برای صحت سنجی نتایج استفاده شده است. افت فشار در طول لوله آزمایش نیز در هر حالت ثبت و گزارش شده است. مقایسه میان داده‌های تجربی با روابط موجود برای ضرایب انتقال حرارت جابجایی و افت فشار در لوله خالی حاکی از نتایج قابل قبول تجربی در آزمایشات است، به طور کلی اگر وابستگی دمایی و غلظتی و خصوصیات نانوسیال مورد توجه قرار گیرد، نانوسیالات رفتاری مشابه سیالات تک‌فاز در لوله خالی خواهند داشت. در کلیه آزمایشات تاثیر افزودن ناپودر به سیال پایه بر عملکرد سیستم مشهود است. نتایج بدست آمده از آزمایشات را در چند دسته میتوان تقسیم بندی نمود:

- افزایش انتقال حرارت نانوسیال در لوله خالی با دمای دیواره ثابت با افزایش غلظت حجمی نانوسیال (حداکثر افزایش ۳۴ درصدی نانوسیال در رینولدز ۴۵۰۰ نسبت به سیال پایه).
- افزایش افت فشار نانوسیال نسبت به سیال پایه در لوله خالی.
- افزایش شدید انتقال حرارت و افت فشار در لوله متخلخل نسبت به لوله خالی در همه حالات.
- بالاتر بودن انتقال حرارت لوله با تخلخل ۵۰٪ از لوله با تخلخل ۶۳٪ که می‌تواند معلول افزایش سطح تماس سیال و آشفستگی بیشتر جریان باشد.

- افزایش انتقال حرارت نانوسیال الومینیا (حداکثر ۵۷ درصد در رینولدز ۳۷۰۴ برای تخلخل ۰.۵٪ و حداکثر ۴۵٪ درصد در رینولدز ۳۱۷۵ برای تخلخل ۰.۶۳٪) نسبت به سیال پایه در حالت دمابایت در لوله متخلخل.
- افزایش انتقال حرارت نانوسیال (حداکثر ۳۱ درصد در رینولدز ۵۳۸۸ برای نانوسیال آلومینا ۰.۱/۵٪ و حداکثر ۳۳ درصد در رینولدز ۳۴۸۹ برای نانوسیال کربنی ۰.۰/۵٪) نسبت به سیال پایه در حالت شارتابت در لوله متخلخل.
- افزایش افت فشار نانوسیال نسبت به سیال پایه با افزایش غلظت حجمی نانوپودر در لوله متخلخل برای تمامی حالات.

افزایش انتقال حرارت مشاهده شده را باید مرهون عوامل مختلفی از جمله عواملی که بر انتقال حرارت نانوسیال و محیط متخلخل تاثیر می‌گذارند جست. در مورد نانوسیالات باید به این نکته توجه داشت که افزایش انتقال حرارت جابجایی نانوسیال، تنها به دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال نسبت به سیال مبنا نبوده، بلکه عوامل دیگری همچون مهاجرت ذرات، حرکات براونی و بی‌نظم نانوذرات، برخورد ذرات با یکدیگر و لایه‌ای شدن مولکول‌های سطح سیال در سطح مشترک سیال و ذره، طبیعت انتقال حرارت در نانوذرات و اثرات خوشه‌ای شدن نانوذرات 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.

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.

در مورد محیط‌های متخلخل نیز عوامل مختلفی موجب افزایش انتقال حرارت جابجایی میشوند از این عوامل میتوان به اختصار به افزایش هدایت حرارتی لوله متخلخل، افزایش سطح در تماس با سیال در لوله متخلخل به نسبت تخلخل، روش ساخت و سایز حفره‌ها و همچنین اشفته تر شدن جریان نسبت به لوله خالی می‌باشد.

عوامل گفته شده در مورد پارامترهای موثر در هر دو ایده از عواملی هستند که می‌توان از آنها به عنوان عوامل افزایش انتقال حرارت نام برد.

جهت مد نظر قرار دادن عواملی نظیر نوع، ابعاد، غلظت و شکل ذرات نانو و نیز تأثیر جابجایی، نفوذ، پراکندگی و برخورد نانوذرات در نانوسیالات و تأثیر تخلخل، سایز حفره‌ها، روش ساخت فوم فلزی، جنس فوم فلزی، دانسیته حفره‌ها در محیط‌های متخلخل بر انتقال حرارت، نیاز به مطالعه بیشتری در زمینه ساختار جریان و انتقال حرارت جابجایی نانوسیال در محیط‌های متخلخل می‌باشد.

۶-۲- پیشنهادات

با توجه به مطالب ارائه شده در این پایان‌نامه، مواردی برای بهبود و ادامه این تحقیق به شرح ذیل

پیشنهاد می‌شوند:

- ❖ انجام آزمایشات با نانو ذرات دیگر؛
- ❖ انجام آزمایشات با تغییرات بر روی شرایط مرزی؛
- ❖ مطالعه تاثیر پارامترهای موثر بر نانوسیالات از جمله اندازه، شکل و ... بر انتقال حرارت؛
- ❖ بررسی تاثیر سیال پایه بر نحوه انتقال حرارت؛
- ❖ انجام آزمایشات با لوله متخلخل با تخلخل‌ها و سایز حفره‌های متفاوت؛
- ❖ انجام آزمایشات با لوله‌های متخلخل با جنس‌های متفاوت؛
- ❖ مطالعه تاثیر روش ساخت بر انتقال حرارت؛
- ❖ مطالعه تاثیر طول لوله متخلخل بر انتقال حرارت؛
- ❖ تغییر شکل هندسی قسمت آزمایش به شکل‌های دیگر از جمله مکعبی.

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

۷- پیوست الف: فوم‌های فلزی

در دهه اخیر، یک دسته از فلزات سلولی، به نام فوم فلزی با خواص مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و صوتی جدید مانند چگالی کم و در عین حال سفتی بالا و عایق بودن صوتی و حرارتی در عین نفوذپذیری گاز بالا، مطرح شده‌اند و جذابیت بسیاری یافته‌اند. این مواد برای ساختارهای سبک، برای جذب انرژی و برای مدیریت حرارتی و یا حداقل برای بعضی از آنها پیشنهاد می‌شود. از جمله کاربردهای عمده فوم‌های فلزی در صنایع خودرو و هوافضا می‌باشد که علت اصلی آن خاصیت جذب انرژی بسیار بالا در تنش‌های فشاری در این گروه مواد است [۲۱].

توجه به فوم‌های فلزی به دهه ۱۹۴۰، هنگامی که سوسنیک^۱ اختراعی را در زمینه ساخت فوم‌های فلزی ثبت کرد، بازمی‌گردد. او در روش ابداعی خود عناصری را با هم مخلوط کرد که اختلاف دمای ذوب و جوش بسیار زیادی داشتند. در نتیجه در دمای ذوب یکی از آنها، دیگری بخار می‌شد (برای مثال آلومینیوم و جیوه). با این روش او توانست فلز متخلخل تولید کند [۷۵]. پس از آن در خلال سالهای متمادی روش‌های متنوع دیگری نیز برای ساخت این چنین ساختارهایی، ابداع گردید که البته تمامی آنها در مقیاس آزمایشگاهی بودند. این تحقیقات ادامه داشت تا اینکه در دهه ۱۹۹۰، این محصولات مورد توجه ویژه قرار گرفتند و استفاده از آنها در مقیاس‌های صنعتی آغاز گردید. از آن به بعد اصلاح خواص آنها نیز مورد بررسی قرار گرفت و ساخت انواع فوم‌های فلزی با توجه به خواص مورد نظر، گسترش یافت [۲].

فوم‌های فلزی در رقابت با فوم‌های پلیمری و سرامیکی دارای مزایا و معایبی بودند. مزیت عمده آنها نسبت به فوم‌های پلیمری استحکام بالاتر، تحمل دمای بیشتر و همچنین مقاومت در برابر برخی محلولهای آلی بود. از طرفی قابلیت ارتجاع پذیری آنها، مزیت اصلی در برابر فوم‌های سرامیکی بود. همچنین قابلیت انتقال حرارت و الکتریسیته نیز خاصیتی بود که تنها در فوم‌های فلزی یافت می‌شد [۲].

^۱ Sosnick

عیب عمده فوم‌های فلزی، قیمت بالای روش تولید و عدم مقرون به صرفه بودن از لحاظ اقتصادی بود. این موضوع نیز با استفاده از ابداع روش‌های جدید تولید و همچنین بدست آوردن خواص منحصر به فرد از فوم‌های فلزی با توجه به نیاز و شرایط دهه‌های اخیر توجیه گردید. برای مثال استفاده از فوم‌های فلزی آلومینیوم در وسایل حمل و نقل، علاوه بر کاهش وزن خودرو و کم کردن مصرف سوخت منجر به افزایش ایمنی به علت داشتن خواص جذب ضربه نیز می‌شود که این مسئله با توجه به وجود بحران انرژی در دهه های اخیر، عیب بالای روش تولید فومهای فلزی را توجیه می‌کند.

در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای بر روی این محصول صورت می‌گیرد و شرکت‌های زیادی در این زمینه فعالیت می‌کنند و اطلاعات مربوط به روش‌های جدید تولید و همچنین کاربردهای تازه در مقالات علمی و وب سایت‌های آنها منعکس می‌شود.

۷-۱- کاربرد های مواد متخلخل

فوم‌های فلزی دارای کاربردهای بسیار وسیع و متنوعی بوده و بسته به خصوصیات و ویژگی‌های مختلف آنها و نیز شرایط کاری متفاوت، که در ادامه به آن اشاره می‌شود، از آنها می‌توان در کاربردهای مختلف استفاده نمود:

۱. شکل هندسی: نوع باز یا بسته و مقدار تخلخل مورد نیاز، اندازه مطلوب حفرات و سطح داخلی مورد نیاز؛
۲. متالورژی: فلز یا آلیاژ و حالت ساختاری مورد نیاز؛
۳. فرآیند تولید: امکان شکل دادن فوم یا جامد حفره دار یا امکان ساخت کامپوزیت‌هایی بین فوم و ورقه‌ها یا پروفیل‌های متداول؛

۴. اقتصاد: هزینه تمام شده و امکان تولید انبوه.

در اینجا فهرست وار خلاصه ای از کاربردهای بالقوه فومهای فلزی را ذکر میکنیم [۱]:

- ورقه های خود پشتیبان محکم و بسیار سبک برای ساخت و ساز و حمل و نقل؛
- جذب انرژی ذره ای در ماشینها، آسانسورها و سیستمهای جابجایی؛
- ورقه های سقفی و دیوارهای ضد حریق با عایق گرمایی و صوتی؛
- جدارهای کمپرسور؛
- تبادلهای گرمایی، فیلترها و کاتالیزورها؛
- مبدلهای صوتی؛
- محفظه گیربکس؛
- بخشهای ساختاری فضاپیما؛
- جاذب صوتی برای شرایط سخت؛
- افزایش انتقال حرارت در سیستمهای مختلف.

در ادامه بصورت خلاصه برخی از کاربردهای فومهای فلزی را تشریح می کنیم [۱]:

۷-۱-۱- صنعت حمل و نقل

بصورت تیتروار فواید استفاده از فومهای فلزی در صنعت حمل و نقل را می توان به این صورت خلاصه کرد: کاهش وزن، کاهش مصرف سوخت، افزایش ایمنی، کاهش آلودگی های محیطی و کاهش هزینه تولید. استفاده از فوم های آلومینیمی، به علت سهولت در ساخت و نصب، باعث شده که ساخت بدنه خودروها و قطارها ساده و آسان شده و هزینه تولید به میزان چشمگیری کاهش یابد. فومهای فلزی به کار رفته در بدنه وسایل حمل و نقل زمینی نسبت به قطعات تولید شده فولادی مشابه، نسبت استحکام

به وزن بیشتری داشته و از طرفی به اندازه ۵۰٪ نیز سبک تر می باشد. امروزه می توان ۲۰٪ بدنه خودرو را با استفاده از فوم‌های آلومینیمی تولید کرد. به این ترتیب بر طبق آمارهای شرکت BMW آلمان، در حدود ۶۰ کیلوگرم از وزن خودرو کاهش یافته و در نتیجه میزان مصرف سوخت نیز کاهش می‌یابد، به طوریکه می‌توان گفت به ازای هر گالن بنزین حدوداً ۲/۶ مایل بیشتر مسافت پیموده می‌شود.

۷-۱-۲- جذب کننده ضربه

این خاصیت کارآیی فوم را به عنوان ماده ای سبک، ارزان، جاذب تکانهای ناگهانی در بدنه جلویی اتومبیل ها یا قطارها برای محافظت از سرنشینان در هنگام تصادفات افزایش میدهد. این ویژگی سبب شده است تا فوم‌های فلزی به صورت تجاری استفاده شوند و میتوانند در دربه‌های ضد ضربه نیز به کار روند. در اصل فوم‌های فلزی به خاطر مقدار دگردیسی پلاستیکی که می‌تواند در واحد حجم خود تحمل کند مورد توجه می‌باشد. به خاطر اینکه دیواره سلولی آن طبیعتاً از شکست ساختاری پیش از موقع به عنوان واحدهای جاذب انرژی جلوگیری می‌کنند و از سرنشینان اتومبیل در هنگام مواجه با مواد سوختنی و انفجاری و تصادفات محافظت و یا به عبارتی دیگر مقاوم در برابر دما و حرارت می‌باشد.

۷-۱-۳- سطح وسیع

ترکیب رسانایی الکتریکی بالا و سطح وسیع فوم‌های سلول باز آن‌ها را برای استفاده به جای الکتروود مناسب ممکن ساخته است. به عنوان مثال: در باتریهای اسید - سرب ساختارهای سلول باز میتوانند حامی‌های کاتالیزوری بسیار خوبی باشند.

۷-۱-۴- ذخیره و انتقال مایعات

یکی از قدیمی‌ترین کاربردهای مواد متخلخل متالورژی پودر، خود روانسازها می‌باشند. روغن در روزنه‌های بین ذرات ذخیره شده و کم کم خارج می‌شود، که این مورد جایگزین استفاده از روغن شده

است. این کاربرد محدود به روغن نمی شود مثلاً آب می تواند ذخیره شده و کم کم برای کنترل رطوبت بصورت اتوماتیک آزاد شود یا عطر می تواند ذخیره شده و کم کم بخار شود و یا می توان از غلطک‌های متخلخل استفاده کرد تا آب یا چسب بر روی سطحشان پخش شود. انتقال مایع می تواند بوسیله واکنش موئینگی به تنهایی و یا با فشار اضافی مثلاً در غلطک‌ها صورت گیرد. در نهایت، ساختارهای فلزی خیلی باز می توانند برای ذخیره مایعات در دمای ثابت و در شرایطی که نیاز به سرمازایی است، استفاده شوند. علاوه بر این، فوم می تواند حرکات ناخواسته مایع درون تانکر یا ظرف را کاهش دهد (ضد تلاطم).

۷-۱-۵- مبدل‌های حرارتی و سردکن‌ها

بسیاری از فوم‌های رسانای مسی یا آلومینیومی می توانند بعنوان مبادله کننده‌های حرارتی استفاده شوند. در این مورد، ساختارهای با تخلخل باز نیاز می‌باشند. حرارت می تواند در فوم جابه‌جا شده و به گازها یا مایع‌هایی اضافه شود و فوم را همزمان گرم یا سرد کند. در تخلخل‌های باز، فشار درون حفره‌ها کمترین می شود. یک مثال از چنین کاربردهایی سینک‌های حرارتی فشرده برای سرد کردن ابزارآلات میکروالکترونیک مثل چیپ‌های کامپیوتری یا Power وسایل الکترونیکی می‌باشد.

فوم‌های فلزی در صورتی که طوری انتخاب شوند که هدایت حرارتیشان تا حد ممکن بالا باشد و مقاومت حرارتی بدست آمده آنها تا حد ممکن کم باشد، می‌توانند در این مورد بهتر عمل نمایند. این دو نیاز دارای تناقض می‌باشند، بنابراین باید یک حد تعادل برای آنها در نظر گرفت.

زمینه کاربردی دیگر برای مواد با تخلخل باز نشر سرمایی می باشد. مساحت سطح زیاد، مقاومت حرارتی کم و هدایت حرارتی خوب موجب ایجاد شرایط ایده‌آل برای رسیدن به چنین اهدافی می شود.

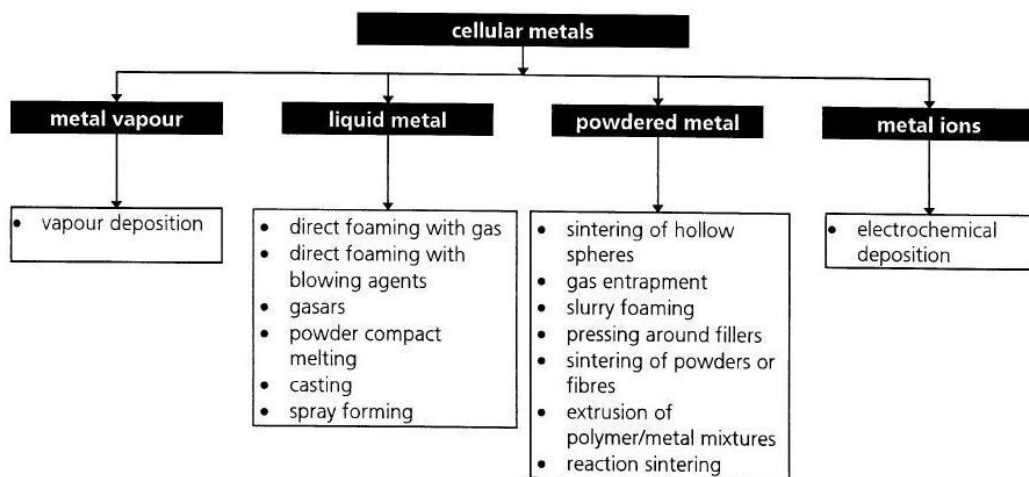
مباحث کاملتر در مورد انتقال حرارت هدایت و جابجایی این نوع مواد در انتهای همین فصل و

فصل ۴ بحث خواهد شد.

۲-۷ - روش‌های تولید فوم‌های فلزی

روش‌های زیادی برای تولید فوم‌های فلزی سلول باز وجود دارد. بعضی روش‌ها به تکنیک‌هایی که در آنها به صورت مایع یا با مذاب پلیمرها عمل فوم سازی صورت می‌گیرد، شبیه هستند در حالی که بعضی روش‌های دیگر به صورت مخصوص و ویژه طراحی شده‌اند، که در این روشها از مزایا و برتری خواص فلزات مانند فعالیت زینتر شدن یا این که توانایی رسوب‌دهی توسط جریان برق، استفاده شده است [۱].

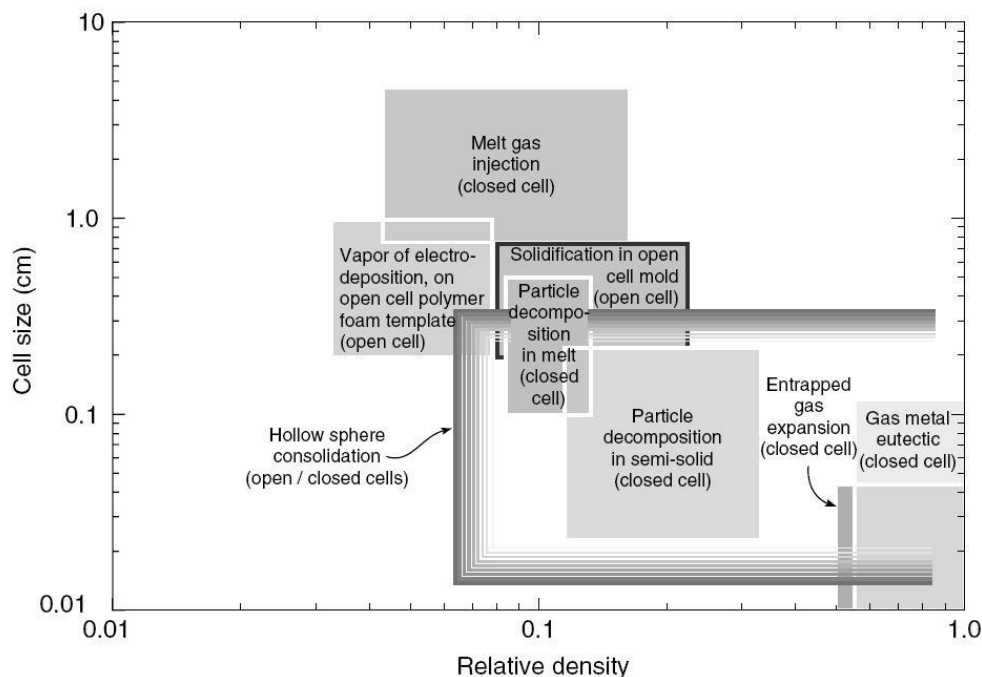
در حالت کلی این روشها به سه صورت مذاب و جامد و رسوب گذاری تقسیم بندی می‌شوند که خلاصه این روشها در شکل ۷-۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۷-۱ نمودار درختی روش‌های تولید فوم‌های فلزی [۱]

بیان مختصری از ویژگی‌های فوم تولیدی با روشهای مختلف از جمله باز بودن حفره‌ها و اندازه

حفره‌ها در شکل ۲-۷ مشاهده می‌شود.

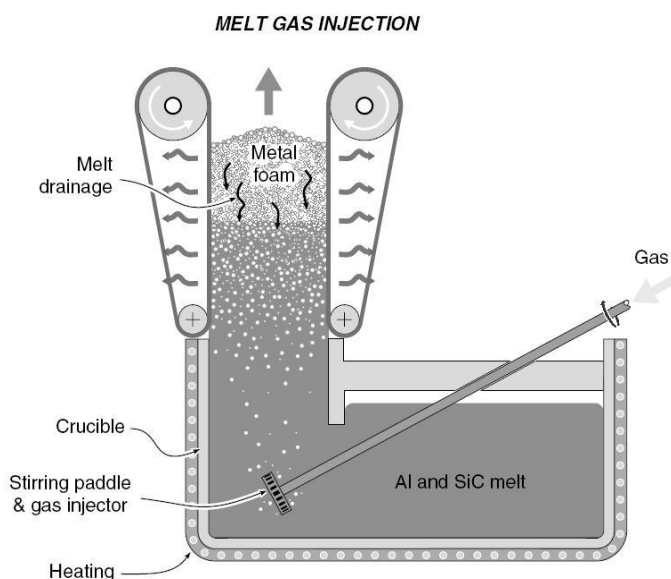


شکل ۷-۲ ویژگی‌های کلی فوم‌های فلزی تولید شده با روش‌های مختلف [۳]

در ادامه به اختصار برخی از مهمترین و کاربردی‌ترین این روش‌ها معرفی میشوند.

۷-۲-۱- فوم سازی از طریق تزریق گاز

این روش یکی از روش‌های تولید در حالت مذاب شناخته می‌شود، این فرایندها یکی از آسان‌ترین روش‌ها برای بکارگیری در مورد آلیاژهای آلومینیوم است زیرا این آلیاژها چگالی کمی دارند و هنگامی که مذاب این آلیاژها در معرض هوا یا دیگر گازهای حاوی اکسیژن قرار می‌گیرند، بیش از حد اکسید نمی‌شوند. روش‌های مختلفی برای این آلیاژها وجود دارد که یکی از بهترین آن‌ها در شکل ۷-۳ نشان داده شده است. ابتدا آلومینیوم خالص یا آلیاژی از آلومینیوم ذوب می‌شود و ۵ تا ۱۵ درصد وزنی ذرات پایدار کننده‌ی سرامیکی به مذاب مذکور اضافه می‌شود. این ذرات، با قطر ۰٫۵ تا ۲۵ میکرون، را می‌توان از آلومینا، زیرکونیا یا کاربید سیلیسیم انتخاب کرد.



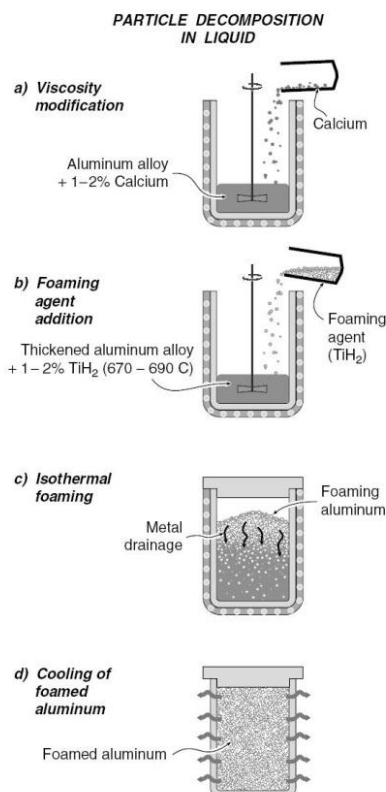
شکل ۷-۳ شماتیک تولید فوم فلزی با روش تزریق گاز [۳]

با استفاده از نازل‌های ارتعاشی مخصوص به داخل مذاب، گاز تزریق می‌شود و فوم‌سازی صورت می‌گیرد. کاربرد و کارکرد نازل‌ها، تولید ذرات و حباب‌های گازی ریز در مذاب و توزیع یکنواخت آن‌ها می‌باشد. برای تولید حباب‌ها داخل مذاب آلومینیوم، می‌توان از گازهای مختلفی استفاده کرد. در اکثر موارد از هوا استفاده می‌شود اما دی‌اکسید کربن، اکسیژن، گازهای خنثی و حتی می‌توان آب هم برای تولید حباب، داخل مذاب آلومینیوم تزریق نمود. حباب‌هایی که با این فرایند تولید می‌شوند، روی سطح مذاب شناور می‌شوند و سپس شروع به انجماد می‌کنند [۳].

۷-۲-۲- روش عامل فوم ساز

این روش نیز یکی از روش‌های حالت جامد است. اساس این روش بر مبنای، افزودن یک عامل فوم‌ساز به داخل مذاب به جای دمیدن گاز است. عامل فوم ساز تحت تاثیر حرارت تجزیه می‌شود و گاز آزاد می‌کند که موجب ادامه یافتن فرایند فوم‌سازی می‌شود. مراحل این روش (مراحل آلپوراس) که توسط شرکت Shinko wire ژاپن تولید میشود در شکل ۷-۴ آمده است.

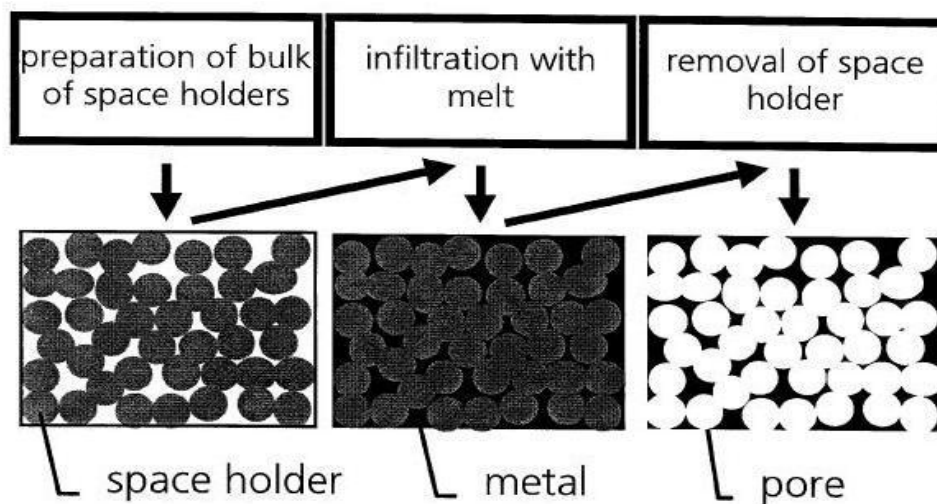
در این تکنیک، برای تولید فوم آلومینیومی ابتدا فلز کلسیم به مذاب آلومینیوم در دمای ۹۸۰ درجه سانتی‌گراد افزوده شده سپس برای چند دقیقه مذاب بهم زده می‌شود. زمانی که ویسکوزیته‌ی مذاب به صورت پیوسته زیاد می‌شود، به علت تشکیل اکسید کلسیم (CaO)، اکسید کلسیم - آلومینیوم (CaAl_2O_4) و یا شاید حتی ترکیب بین فلزی Al_4Ca ، مذاب غلیظ می‌شود. سپس مذاب شدیداً بهم زده می‌شود، بعد از این که ویسکوزیته مذاب به مقدار مطلوب رسید، هیدرید تیتانیوم (TiH_2) افزوده می‌شود (تقریباً ۱/۶ درصد وزنی). هیدرید تیتانیوم، بعنوان یک عامل فوم ساز عمل می‌کند و گاز هیدروژن در مذاب ویسکوز داغ، آزاد می‌شود. بلافاصله مذاب شروع به انبساط می‌کند و به تدریج مخزن و ظرف فوم سازی را پر می‌کند. پس از خنک کاری فوم فلزی مورد نظر تولید می‌شود [۳].



شکل ۴-۷ تولید فوم فلزی با روش عامل فوم ساز توسط شرکت Shinko wire [۳]

۷-۲-۳- روش عامل فضا ساز (ریخته گری)

می توان فلزات متخلخل سبک را با ریختن مذاب فلز در اطراف ذرات ریز معدنی گرانولی یا کره های توخالی با چگالی پایین تولید کرد. این ذرات ریز گرانولی درون محصول فلزی بعد از ریخته گری باقی می ماند (محصول حاصل را فوم ترکیبی می نامند) یا این ذرات گرانول را می توان با لیچ کردن در یک حلال مناسب، اسید و یا حتی با عملیات حرارتی از ساختار حاصل خارج کرد (شکل ۷-۵) [۱].

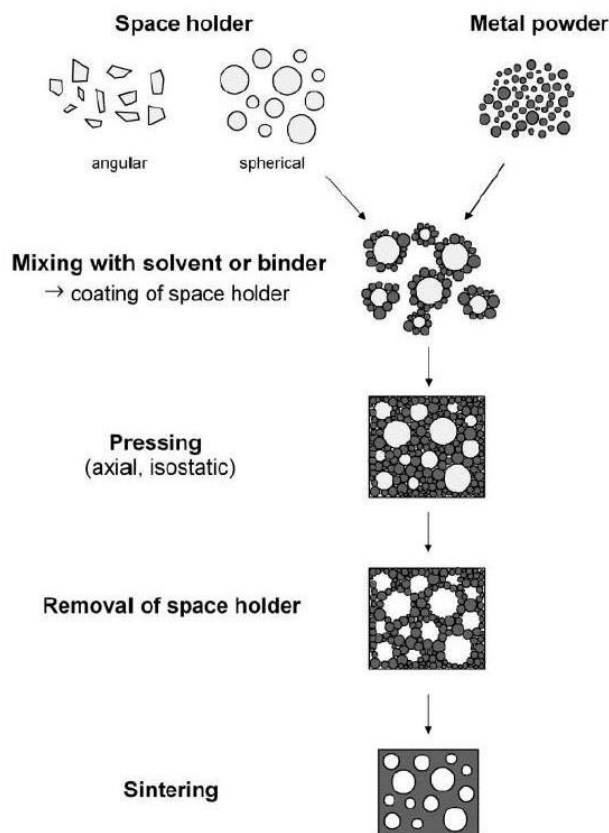


شکل ۷-۵ روش تولید فوم فلزی با عامل فوم ساز [۱]

۷-۲-۴- روش عامل خارج شونده (متالورژی پودر)

در این روش فوم فلزی با استفاده از مواد پرکننده و پودرهای فلزی تولید می شوند. از ذرات یا کره های تو خالی سرامیکی و یا پلیمری، نمک ها و یا حتی فلزات را می توان بعنوان پرکننده استفاده کرد. مخلوط خارج شونده (نمک یا کربومید) به همراه پور فلزی پایه با نسبت حجمی مشخص با یکدیگر مخلوط می شوند. معمولاً برای بهتر مخلوط شدن پودر پایه با خارج شونده، خارج شونده اغشته به ماده ای نظیر اتانول اغشته می شود. سپس مخلوط آماده شده تحت فشار مشخص قرار گرفته و فشرده می شود. میزان فشار وارد شده یکی از عوامل مهم در استهکام و میزان سلول باز بودن فوم است. اگر درصد فلز

محتوی به میزان کافی کم باشد، این امکان وجود دارد که تقریباً تمام مواد پرکننده در مرحله بعدی از بین بروند، چرا که مواد پرکننده که با هم در تماس هستند، شبکه‌ای مرتبط را تشکیل می‌دهند. این کار را می‌توان با عملیات حرارتی، شستشو و یا با استفاده از یک حلال آبی انجام داد. در نهایت برای استحکام بیشتر فوم تا دمای بالا (قبل از نقطه جوش پودر فلزی) برای چند ساعت تفجوشی می‌شود (شکل ۶-۷) [۱].

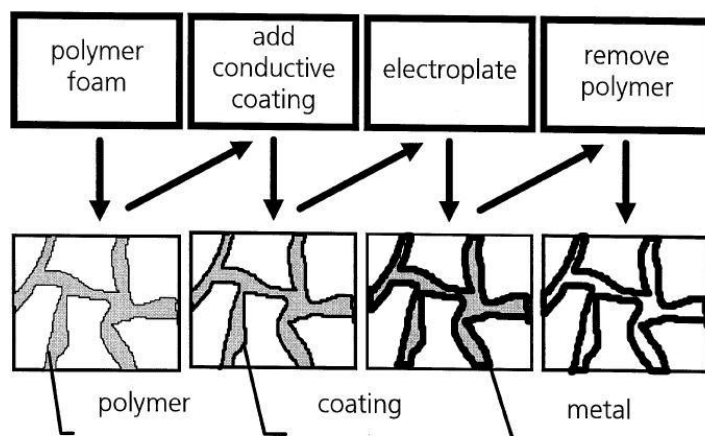


شکل ۶-۷ روش متالوژی پودر برای ساخت فوم فلزی [۱]

۷-۲-۵- روش رسوب‌گذاری الکتریکی

تکنیک رسوب‌گذاری از حالت یونی فلزات آغاز می‌شود، یعنی محلولی از یونها در یک الکترولیت. به صورت الکتریکی فلز روی یک فوم پلیمری با تخلخل‌های باز رسوب داده می‌شود که این فوم پلیمری

بعداً از بین می‌رود (شکل ۷-۷). این فرایند و فرایند ریخته‌گری دقیق که در بخش‌های قبلی توضیح داده شده است، این موضوع را بیان می‌کنند که، فوم سازی واقعی در حالت فلزی صورت نمی‌گیرد. در حین فرایند یک فوم پلیمری انتخاب می‌شود که در این فرایند فلز جای فوم پلیمری را می‌گیرد. برای رسوب-گذاری الکتریکی روی یک فوم پلیمری، در ابتدا لازم است که فوم پلیمری هدایت الکتریکی داشته باشد. برای این کار می‌توان فوم پلیمری را درون یک دوغاب رسانای الکتریکی فرو برده که این دوغاب بر پایه گرافیت یا کربن می‌باشد. بنابراین رسانا کردن پلیمر با غوطه‌وری فوم در یک محلول آبکاری الکترولس و یا ایجاد یک لایه نازک رسانا روی پلیمر به کمک کاتد Cathode sputtering صورت می‌گیرد. در نتیجه مشکل نارسا بودن پلیمر را در ابتدای کار به این صورت می‌توان برطرف کرد. بعد از اینکه آبکاری الکتریکی تمام شد، پلیمر ذکر شده را می‌توان با عملیات حرارتی، از کامپوزیت پلیمر/ فلز از بین برد [۱].



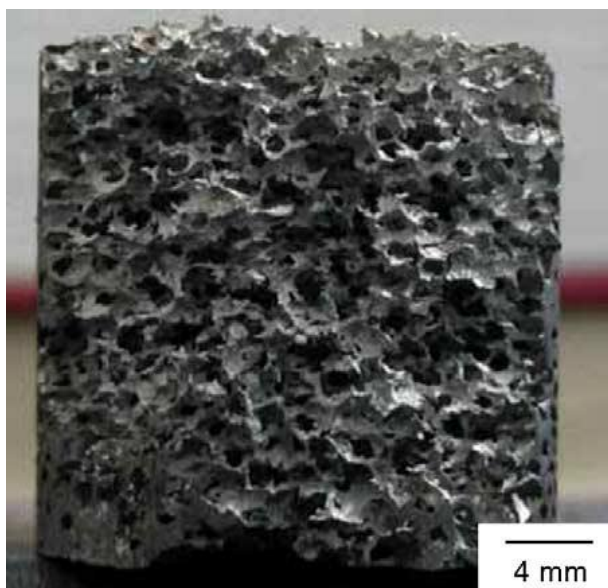
شکل ۷-۷ تکنیک رسوب گذاری الکتریکی برای ساخت فوم فلزی سلول باز [۱]

۷-۳- نمونه‌هایی از کارهای تجربی انجام شده در زمینه ساخت فوم فلزی

جیانگ^۱ [۷۶] با استفاده از عامل خارج شونده کربومیاد فوم‌های فلزی با تخلخلی بین ۵۰ تا ۸۰

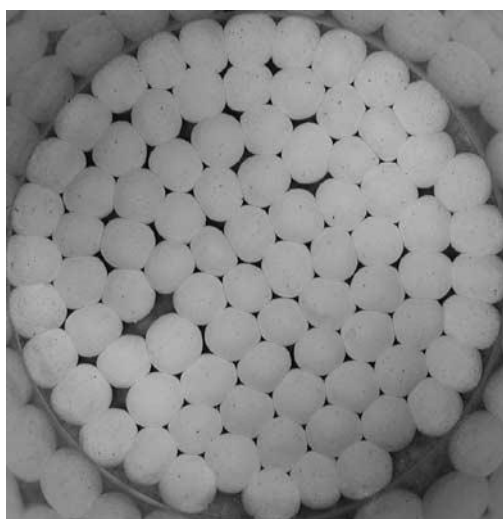
درصد را تولید کرد. نمونه‌ای از فوم ساخته شده به روش وی در شکل ۷-۸ دیده می‌شود.

^۱ Jiang



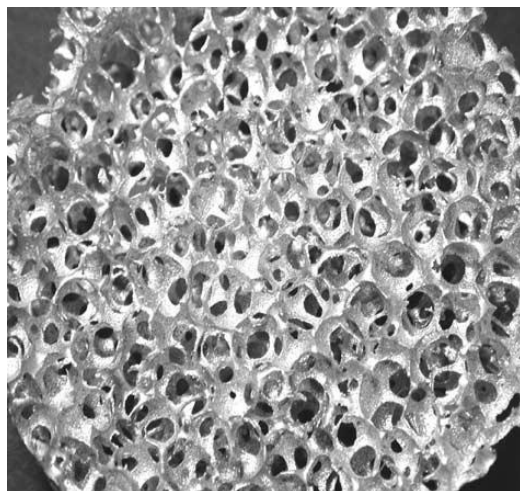
شکل ۷-۸ فوم فلزی ساخته شده توسط جیانگ [۷۶]

چو^۱ [۷۷] نیز فوم آلومینیومی را با روش متالوژی پودر و با خارج‌کننده‌های سرامیکی ساخت. فوم فلزی وی با تخلخل بالای ۹۰ درصد و بصورت سلول باز ساخته شد. نمونه دانه‌های سرامیکی در شکل ۷-۹ و فوم ساخته شده در شکل ۷-۱۰ دیده می‌شود.



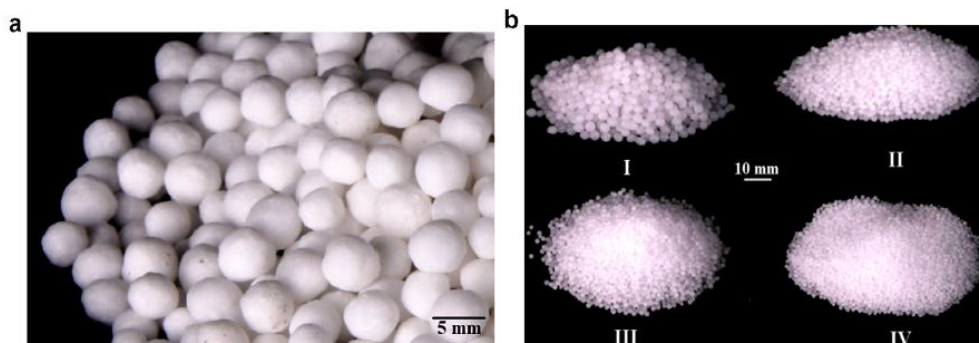
شکل ۷-۹ دانه‌های سرامیکی به عنوان خارج‌شونده استفاده شده توسط چو [۷۷]

¹ Chou



شکل ۷-۱۰ فوم سلول باز ساخته شده توسط چو [۷۷]

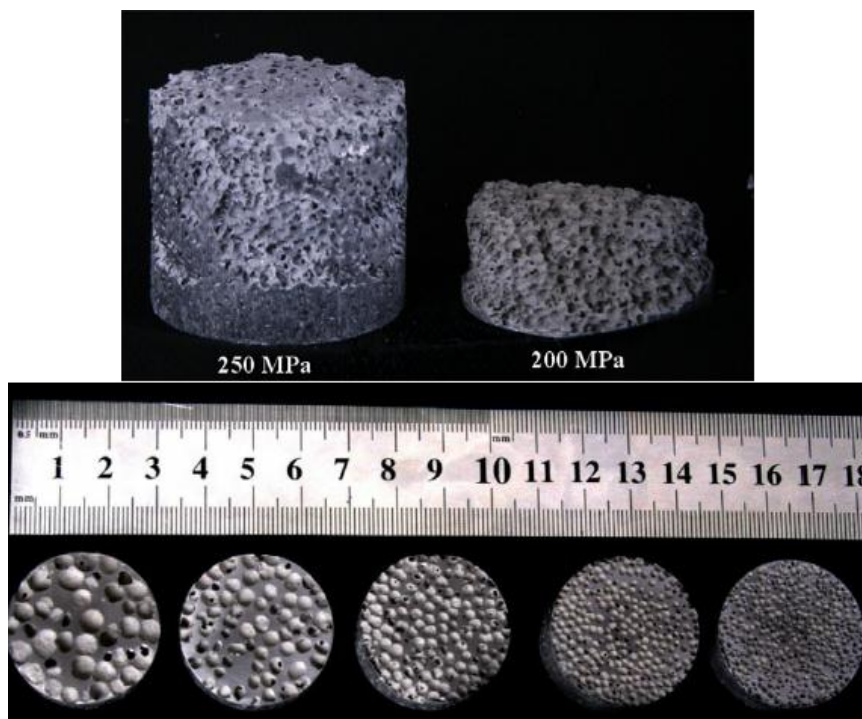
بافتی^۱ [۷۸] نیز تحقیق جامعی بر روی تاثیر اندازه خارج شونده بر مشخصات فوم فلزی سلول باز را انجام داد. وی از روش متالوژی پودر استفاده و از کربوماید در اندازه‌های مختلف (شکل ۷-۱۱) به عنوان جایگزارنده بهره برد. کربوماید اغشته با اتانول را با پودر فلزی بصورت کامل مخلوط و زیر فشار ۲۰۰ تا ۴۰۰ مگاپاسکال بصورت محوری قرار گرفته، و پس از فشرده شدن از قالب خارج می‌شوند. خارج شونده‌ها در نمونه آماده شده بوسیله قرار دادن نمونه در آب در حال جوش خارج می‌شوند. در نهایت برای بالا بردن استحکام، نمونه در کوره با دمای ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شود.



شکل ۷-۱۱ تصویر خارج شونده (کربوماید) استفاده شده [۷۸]

^۱ Bafti

تخلخل بدست آمده در این روش بسته به اندازه جایگذارنده و فشار اعمالی بین ۴۰ تا ۸۵ درصد حجمی متفاوت است. شکل ۷-۱۲ فوم ساخته شده توسط این روش را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۱۲ تاثیر فشار اعمالی و اندازه خارج شونده بر شکل محیط متخلخل [۷۸]

تحقیقات زیادی از جمله [۷۹-۸۲] نیز بر روی روش‌های متفاوت ساخت فوم‌های فلزی انجام گرفته است.

۷-۴- خواص مواد متخلخل

فوم‌ها محدوده خواص فلزات را توسعه می‌بخشند. این خواص مکانیکی، فیزیکی و حرارتی معمولاً با همان روش‌هایی اندازه‌گیری می‌شوند، که برای مواد جامد متراکم به کار می‌رود. مشخص است که تمام خواص به یک میزان تغییر نمی‌کنند. به عنوان مثال خواصی مانند ساختار کریستالی، ضریب انبساط حرارتی و دمای ذوب برای هر فلز در حالت فوم و جامد متراکم یکسان است.

سایر خواص فیزیکی مانند ظرفیت حرارتی معمولاً تابعی خطی از دانسیته هستند. به طور دقیق تر ظرفیت حرارتی هر ماده مجموع ظرفیت حرارتی فازهای مختلف آن ماده است و برای بدست آوردن ظرفیت حرارتی هر فاز، میزان آن در درصد وزنی آن فاز ضرب می‌شود. در فوم‌های فلزی با دانسیته پایین درصد وزنی فاز گازی کم است، بنابراین ظرفیت حرارتی کل ساختار سلولی تقریباً برابر با ظرفیت حرارتی فلز پایه است. در نهایت بسیاری از خواص به دانسیته (میزان تخلخل) بستگی دارند به عنوان مثال صلبیت، استحکام مکانیکی، هدایت حرارتی و الکتریکی و خواص صوتی.

پارامترهایی که خواص وابسته به ساختار مواد فومی را تحت تاثیر قرار می‌دهند، به ترتیب اهمیت

عبارتند از:

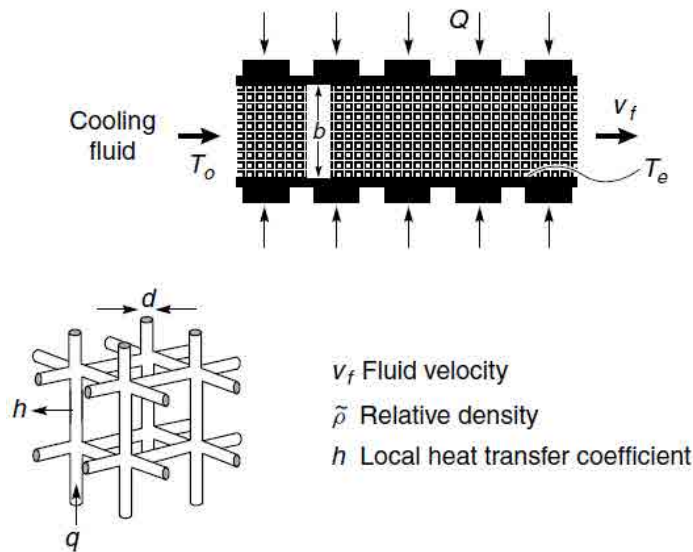
- خواص ذاتی ماده تشکیل دهنده
- دانسیته نسبی
- نوع ساختار فوم (سلول‌های باز یا بسته)
- در فوم با سلول‌های بسته، میزان جامدی که در گوشه‌ها، یال‌ها و دیواره‌ها قرار می‌گیرد
- ناهمگنی یا شیب در توزیع جرم
- اندازه سلول‌ها و توزیع اندازه آنها
- شکل سلول‌ها و انیزوتروپی سلول‌ها
- نحوه اتصال یال‌های سلول
- عیوب مانند شکستن دیواره سلول‌ها.

بدلیل اینکه ذکر تمامی خواص فوم‌های فلزی در حوصله این بحث نمی‌گنجد در ادامه فقط به

خواص حرارتی این مواد اشاره می‌شود:

۷-۵- خواص حرارتی فوم‌های فلزی

شکل ۷-۱۳ انتقال حرارت یک فوم فلزی با حفرات باز را بررسی می‌کند. در شکل فوم با حفرات باز بین دو صفحه رسانای حرارتی قرار گرفته است که در آن ضخامت لایه فومی b و طول آن l است. سیالی با سرعت V_f و دمای اولیه T_0 وارد فوم شده و با دمای T_e از آن خارج می‌شود. در حین عبور سیال از داخل فوم حرارت از فوم به سیال منتقل می‌شود. تصور شماتیک ساختار فوم در شکل ۳-۲۲ آورده شده است، که در آن قطر یال سلول‌ها، h ضریب انتقال حرارت موضعی در سطح یال سلول‌ها و q فلاکس حرارتی در واحد سطح می‌باشد [۳].



شکل ۷-۱۳. فوم فلزی با حفرات باز که بین دو صفحه رسانای حرارتی قرار گرفته است. در اثر عبور سیال از داخل فوم به علت نسبت سطح به حجم زیاد آن، انتقال حرارت از صفحه رسانا به سیال به خوبی صورت می‌گیرد [۳].

سه اصل مهم را در طراحی برای افزایش سرعت انتقال حرارت از فوم به سیال باید در نظر گرفت:

۱. پیوندهای حرارتی زیادی برای انتقال حرارت به سیال نیاز است. در نتیجه فلزاتی مانند

آلومینیوم و مس ترجیح داده می‌شوند؛

۲. به وجود آمدن جریان آشفته در سیال مناسب است به این دلیل که انتقال حرارت از سطح جامد به سیال را سرعت می‌بخشد؛

۳. وجود افت فشار کم بین ورود و خروج سیال، تا با استفاده از پمپ کردن سیال با یک سیستم مناسب بتوان آن را از درون فوم عبور داد.

انتقال حرارت به سیال با کاهش d و یا افزایش دانسیته نسبی افزایش می‌یابد به این دلیل که مساحت سطح داخلی نسبت عکس با d دارد، و با کاهش قطر یال سلول‌ها (d) مساحت سطحی که در انتقال حرارت نقش دارد افزایش می‌یابد و هم‌چنین با افزایش دانسیته نسبی سطح مقطع هدایت حرارتی افزایش می‌یابد که این عامل نیز موجب افزایش انتقال حرارت می‌شود. در حالت کلی با افزایش نسبت سطح به حجم در فوم فلزی، سطح تماس فوم با سیال افزایش می‌یابد و باعث افزایش انتقال حرارت بین این دو می‌شود [۳].

۷-۵-۱- دمای ذوب

دمای ذوب فوم‌های فلزی دقیقاً مشابه با ماده‌ای است که از آن ساخته می‌شوند. در صورتی که سطح با یک لایه اکسید پیوسته پوشانده شده باشد، دمای ذوب افزایش کمی خواهد داشت به عنوان مثال در مورد فوم‌های آلومینیومی، ناحیه‌ای از سطح که با لایه‌ای از اکسید پوشانده شده است، با افزایش تخلخل و کاهش اندازه حفرات، افزایش می‌یابد. هنگامی که لایه اکسید به اندازه کافی ضخیم باشد می‌تواند از ساختار متخلخل در بالاتر از دمای ذوب آلیاژ نیز محافظت کند.

۷-۵-۲- گرمای ویژه

انرژی مورد نیاز برای افزایش دمای ساختارهای سلولی به میزان واحد درجه حرارت اغلب اوقات مشابه مقدار آن برای مواد جامد است، هنگامی که جرم مساوی از دو ماده در نظر گرفته می‌شود. در

صورت وجود اکسید های نازک سطحی و هوای محبوس شده در حفرات تفاوت خیلی کمی بین مقدار این انرژی بین دو ماده وجود خواهد داشت. در هر صورت در حالت کلی، گرمای ویژه بر واحد حجم (Cv) ساختارهای سلولی کمتر است و این امر آنها را برای کاربردهایی که ظرفیت حرارتی کم مورد نیاز است، مانند سیستم هایی که سریعاً سرد و گرم می شوند، مناسب می سازد .

۷-۵-۳- ضریب انبساط حرارتی

ضریب انبساط حرارتی (α) فوم های فلزی نیز تفاوت چندانی با توده فلز ندارد، در حالیکه هدایت حرارتی فوم های فلزی λ بسیار کمتر است. در حقیقت اعوجاج حرارتی بیشتری از فوم های فلزی انتظار می رود که با افزایش نسبت α/λ افزایش می یابد. برای جلوگیری از این پدیده، تغییرات دمایی در ساختارهای سلولی باید به حداقل میزان خود برسد.

۸- پیوست ب: نانوسیالات

نانوسیالات نوع جدیدی از مواد مرکب کاربردی در صنعت نانوتکنولوژی هستند که در یک دهه اخیر گسترش قابل توجهی یافته و کمک بزرگی به افزایش هدایت حرارتی سیالات انتقال دهنده حرارت نموده اند [۳۷]. نانوسیالات برای خود یک نوع کاربرد ویژه در سطح بالا؛ متفاوت از مخلوط های معمول ارائه داده اند. در مقایسه با مخلوط های مایع - جامد مرسوم برای افزایش انتقال حرارت، به طور حتم نانوسیالات حرارتی مهندسی دارای فواید زیر می باشند [۸۳]:

- سطح مخصوص بالا و در نتیجه سطح انتقال حرارت بیشتر بین ذرات و سیال
- پایداری پراکندگی بالا با حرکت بروانی برتر ذرات .
- کاهش قدرت پمپاژ در مقایسه با محلول های خاص برای دسترسی به تعادل در افزایش انتقال حرارت.
- کاهش رسوب ذرات در مقایسه با محلول های مرسوم که در نتیجه بر توان کوچک سازی سیستم کمک می کنند .
- ذرات قابل تنظیم، شامل هدایت حرارتی و سطح تر کننده، با تغییر غلظت ذرات برای کاربردهای مختلف مناسب .

به هر حال مشکلات بزرگی چون رسوب گذاری، فرسایش و افت فشار بالا با استفاده از مخلوط هایی با میکرو ذرات معمول، دور از انتظار نیست. درحالیکه نانوسیالات بسیار پایدارتر و بدون چنین مشکلاتی نمود پیدا می کنند. بنابراین شیوه تهیه و فرآوری نانوسیال یا به عبارت دیگر نحوه معلق سازی ذرات جامد در سیال پایه و افزودن نانوذره به سیال پایه یکی از حوزه های تحقیقاتی مهم در زمینه نانوسیالات می باشد.

۸-۱- 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، توده‌ای شدن^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.

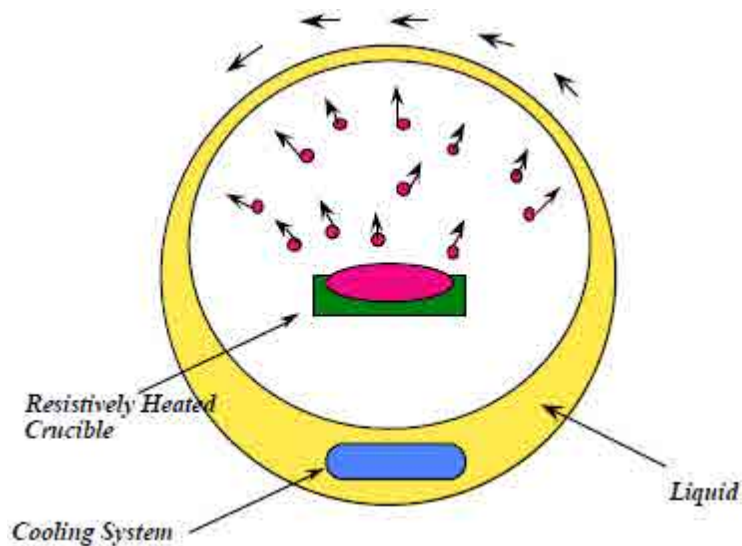
۸-۱-۱- روش تهیه یک مرحله‌ای

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 ۸-۱ فرآیند آن نشان داده شده است، روش مناسبی برای تولید نانوسیالات فلزی می‌باشد.

¹ Stability

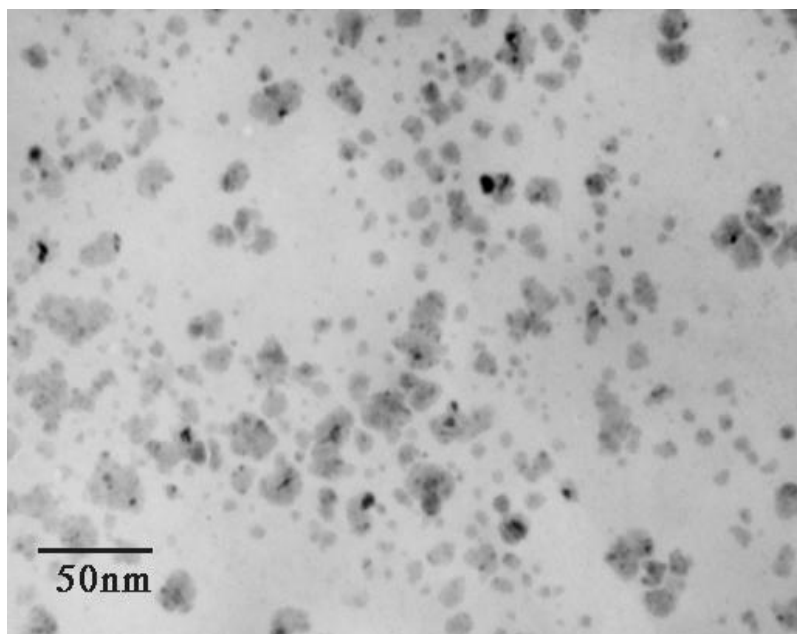
² Agglomeration

³ Settling



شکل ۸-۱ روش تک مرحله‌ای تهیه نانوسیال [۱۸]

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 ۸-۲ نشان‌دهنده نانوسیال حاوی نانوذرات مس می‌باشد که به طریق یک مرحله‌ای تهیه گردیده است.



شکل ۸-۲ تصویر TEM نانوسیال حاوی نانوذرات مس که به طریق یک مرحله^۱ی تهیه شده است [۸۴]

واگنر^۱ و همکاران [۸۵] شکل اصلاح شده ای از تکنیک VEROS را معرفی کردند. آنها از شلیک پرفشار مگنترون برای تهیه سوسپانسیون با نانوذرات فلزی مثل نقره و آهن استفاده کردند. ایستمن^۲ و همکاران [۸۶] شکل اصلاح شده ی دیگری از VEROS را ابداع کردند که در آن بخار مس در تماس مستقیم با جریان یک سیال با فشار بخار پایین (اتیلن گلیکول) مستقیماً به شکل نانوذره میعان می شود. ژو^۳ و همکاران [۸۷] یک روش جدید تک مرحله ای ابداع کردند که در آن با احیای $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ، $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ در اتیلن گلیکول و تحت امواج مایکرو، می توان نانوسیالات مس تولید کرد. نتایج نشان داد که اضافه کردن $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ و تابش امواج مایکرو دو پارامتر مهم بوده که سرعت واکنش و خصوصیات نانوسیال مس را تحت تاثیر خود قرار می دهند.

لو^۴ و همکاران [۸۸] برای تهیه نانوسیال های مس، روش جدید خلا^۱ SANSS را معرفی کردند

¹ Wagener

² Eastman

³ Zhou

⁴ Lo

که نانوسیال را با سیال های مختلف شامل آب و اتیلن گلیکول تولید می کرد. آنها دریافتند که ساختارها و شکل های^۲ مختلفی که در این روش به دست می آید تحت تاثیر هدایت حرارتی سیال های دی الکتریک هستند. با این روش می توان نانوسیال اکسید مس، را با بازده بالا تولید کرد. اخیراً یک سیال نیکل – نانومغناطیس و نانوسیال نقره نیز توسط لو و همکاران [۸۹] با روش تک مرحله ای SANS ساخته شده است. این محققان ذرات کروی نقره با اندازه متوسط ۱۲/۵ نانومتر را در اتیلن گلیکول تولید کردند .

روش یک مرحله ای تهیه نانوسیال به دلایل فنی اغلب کمتر مورد استفاده محققین قرار گرفته است. در عوض در اغلب کارهای تحقیقاتی محققین در گزارش های خود به استفاده از روش دو مرحله ای جهت تهیه نانوسیال اشاره کرده اند. علت این مسئله نیز آسان تر بودن تولید نانوسیال با نانوپودرهای آماده و خریداری شده است.

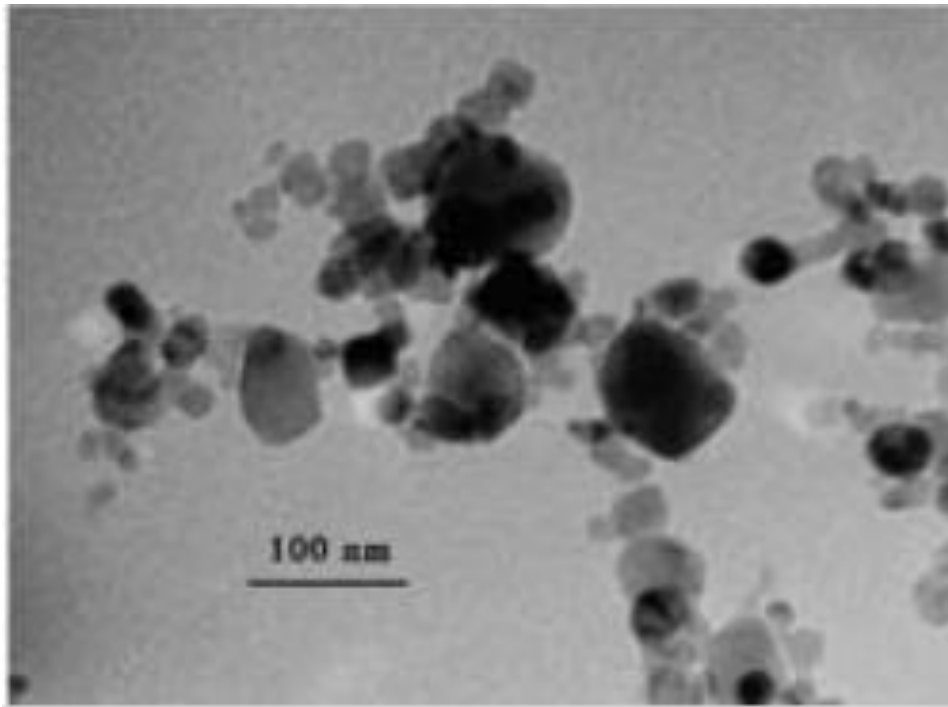
۸-۱-۲- روش تهیه دو مرحله ای

متداول ترین روش تهیه نانو سیالات، روش دو مرحله ای است. در روش دو مرحله ای برای تهیه نانوسیال، می توان از انواع پودرها با اندازه های مختلف به راحتی استفاده کرد، مسئله ای که در روش یک مرحله ای 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 می شود، در مرحله بعد نانو ذره یا نانو لوله در داخل سیال پراکنده می شود. به عبارت دیگر، ابتدا نانوذره مورد نظر یا نانولوله مورد نظر تهیه گردیده و سپس به سیال پایه افزوده می گردد. برای پایداری نانوسیال در این حالت، از روش هایی مانند لرزاننده آلتراسونیک و یا سورفکتانت ها استفاده می شود تا توده نانو ذره ای به حداقل برسد و باعث بهبود رفتار پراکندگی شود. به نظر می رسد که این روش با توجه به این که می توان نانوذرات و نانولوله ها را بیشتر و

¹ vacuum – submerged arc nanoparticle synthesis system

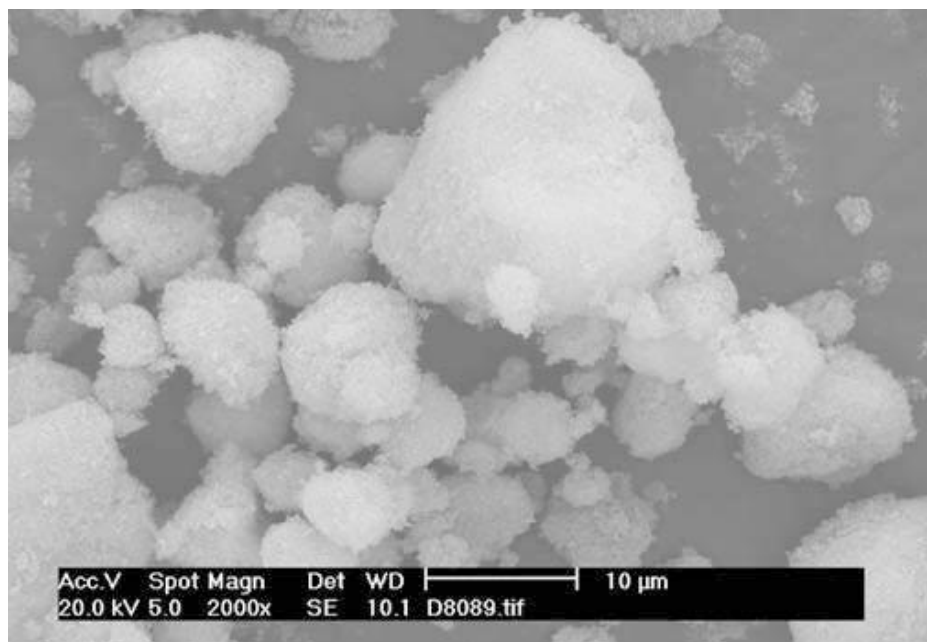
² morphology

اغلب آسان‌تر از روش تک مرحله‌ای تهیه کرد، اقتصادی بوده و برای کاربردهای صنعتی بهتر باشد. شکل ۳-۸ نشان‌دهنده نانوسیال تهیه شده با استفاده از نانوذرات اکسید مس به طریق دومرحله‌ای می‌باشد.



شکل ۳-۸ نانوسیال تهیه شده با استفاده از نانوذرات اکسید مس به طریق دو مرحله‌ای [۸۴]

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 ۴-۸ 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.



(a) Al_2O_3



(b) CuO

شکل ۸-۴ تصویر TEM از توده‌ای شدن نانوذرات [۹۰]

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.

ایستمن و همکاران [۸۶]، لی^۱ و همکاران [۲۱] و وانگ^۲ و همکاران [۹۱] از جمله کسانی بودند که از این روش برای تولید نانوسیال آلومینا استفاده کردند. همچنین مرشد^۳ و همکاران [۹۲] سوسپانسیون TiO₂ در آب را با استفاده از همین روش تهیه کردند. نانوذرات دیگری که در بررسی‌های انجام شده با این روش توزیع شده اند شامل طلا، نقره، نانولوله‌های کربنی و سیلیکا هستند. لی^۴ و همکاران [۹۳] نانوسیال آب - مس را با ذرات ۱ تا ۱۰۰ نانومتری به روش دو مرحله‌ای ساختند. تصاویر ته نشینی و توزیع اندازه ذرات نشان داد که با افزودن توزیع کننده مناسب، نانوذرات به شکل بهتری در سیال پخش می‌شوند.

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.

۸-۲- 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

¹ Lee

² Wang

³ Murshed

⁴ Lee

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.

۸-۲-۱- 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.

۸-۲-۲- 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 تی‌آل‌ها، اولئیک اسید و نمک‌های لورات اشاره کرد. انتخاب پایدارکننده مناسب نیز اغلب بستگی به خواص ذرات و سیال مورد نظر دارد.

۸-۲-۳- 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.

۸-۳- 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 همیلتون-کراسر^۱ [۲۲] و ماکسول^۲ [۲۰] 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 گمراه‌کننده باشد و اگر تغییر غیر عادی در خواص دیده شود قابلیت توجیه با این روش را خواهد داشت. از طرفی اگر محقق 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

¹ Hamilton & Crosser

² Maxwell

نانوسیال می تواند با گرم شدن سیستم کاهش یابد. این اثر دمایی باید برای محققى که می خواهد از مدل های حجمی متوسط برای پیش بینی هدایت حرارتی استفاده کند به حساب آورده شود.

۸-۳-۱- چگالی و ظرفیت حرارتی

محاسبه چگالی و ظرفیت حرارتی نانوسیال به سادگی امکان پذیر است. این کمیت ها بر اساس اصول فیزیکی قانون اختلاط به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$\rho_{\text{eff}} = (1 - \phi_p) \rho_f + \phi_p \rho_p \quad \text{معادله ۱-۸}$$

$$c_{\text{eff}} = \frac{(1 - \phi_p)(\rho c)_f + \phi_p (\rho c)_p}{(1 - \phi_p) \rho_f + \phi_p \rho_p} \quad \text{معادله ۲-۸}$$

۸-۳-۲- گرانیروی:

اینشتن^۱ نخستین کسی بود که گرانیروی موثر سوسپانسیون های حاوی ذرات جامد کروی را با استفاده از روابط اساسی هیدرودینامیکی محاسبه کرد. او با این فرض که آشفتگی ایجاد شده در الگوی جریان سیال پایه که توسط یک ذره ایجاد شده با آشفتگی ناشی از یک ذره دیگر دچار تداخل نمی شود رابطه زیر را پیشنهاد داد [۹۴]:

$$\mu_{\text{eff}} = (1 + 2.5\phi_p) \mu_f \quad \text{معادله ۳-۸}$$

داده های تجربی برای گرانیروی موثر نانوسیالات به برخی نانوسیالات خاص محدود می شوند. محدوده پارامترها (غلظت حجمی نانوذره، دما و ...) نیز محدود هستند. داده های تجربی نانوسیالات نشان

¹ Enistain

می دهد که این مقادیر کماکان بیشتر از پیشگویی های روابط موجود است. برای اصلاح این مشکل، محققان روابطی را برای نانوسیالات خاص مثل آب/آلومینا، اتیلن گلیکول/آلومینا [۵۱]، تیتانیا/آب [۹۵] و اکسید مس/آب [۹۶] با تغییرات دما ارایه کرده اند. مشکل این روابط این است که در غلظت های بسیار پایین به شکل رابطه اینشتن در نمی آیند.

جدول ۸-۱ مدل های موجود برای گرانروی در نانوسیالات

مدل پیشنهادی	محقق
$\mu_{\text{eff}} = 13.47 \exp(35.98\phi_p) \mu_b$	[۹۷]
$\mu_{\text{eff}} = (1 + 4.3\phi_p + 123\phi_p^2) \mu_b$	[۵۱]
$\mu_{\text{eff}} = (1 + 0.19\phi_p + 3063\phi_p^2) \mu_b$	
$\mu_{\text{eff}} = (2.8751 + 53.54\phi_p - 107.12\phi_p^2) + (1078.3 + 15857\phi_p + 20587\phi_p^2) \left(\frac{1}{T}\right)$	[۹۶]

در مقایسه با ضریب هدایت حرارتی و انتقال حرارت جابجایی، آزمایش های تجربی انجام شده روی گرانروی نانوسیالات بسیار کمتر بوده است. لی^۱ و همکاران [۹۸] به اندازه گیری ویسکوزیته آب و نانوذرات اکسید مس با یک ویسکومتر موئین پرداختند. نتایج نشان داد که ویسکوزیته ظاهری نانوسیالات با افزایش دما کاهش می یابد. با این حال، همانطور که آنها اشاره کردند، قطر لوله موئین ممکن است در حالتی که غلظت نانوذرات بالا باشد روی گرانروی ظاهری به خصوص در دماهای پایین تاثیر بگذارد. ویسکوزیته نانوسیالات آب/نانولوله های کربنی به عنوان تابعی از نرخ برشی، توسط دینگ^۲ و همکاران [۴۱] اندازه گیری شد. آنها مشاهده کردند که ویسکوزیته نانوسیالات با افزایش غلظت نانولوله های کربنی و کاهش دما افزایش

¹ Li
² Ding

می‌یابد. همچنین دریافتند که با بالا بردن نرخ برش در دیواره و در نتیجه کاهش گرانیوی در این ناحیه، می‌توان عملکرد حرارتی نانوسیال را تقویت کرد.

۸-۳-۳- بررسی تجربی انتقال حرارت هدایت نانوسیالات

قابلیت انتقال حرارت یک سیال جاری اغلب با عدد ناسلت بیان می‌شود که هدایت حرارتی سیال را مستقیماً و معمولاً به طور غیر مستقیم هم از طریق عدد پرانتل^۱ 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.

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.

هشت پارامتر در افزایش هدایت حرارتی نانوسیالات مؤثر است که 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 در مقاله یو و همکاران [۱۹] به تفصیل بررسی شده است.

¹ Prandtl Number

مراجع

- [1] Banhart, J.,(2001), “*Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams*” **Progress in materials Science** **46**, **6**, 559-632
- [0] Degischer, H.-P. and B. Kriszt, 2002,“*Handbook of cellular metals: production, processing, applications*“. Wiley-vch Weinheim.
- [0] Ashby, M.F., A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, and H.N.G. Wadley, 2000, *Chapter 2 - Making metal foams*, in *Metal Foams*, M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, and H.N.G. Wadley, Editors., Butterworth-Heinemann: Burlington. p. 6-23.
- [4] Boomsma, K. and D. Poulikakos,(2001), “*On the effective thermal conductivity of a three-dimensionally structured fluid-saturated metal foam*” **International Journal of Heat and Mass Transfer** **44**706-708 ,4 ,
- [5] Yablecki, J., J. Hinebaugh, and A. Bazylak,(2012), “*Effect of Liquid Water Presence on PEMFC GDL Effective Thermal Conductivity*” **Journal of The Electrochemical Society** **159**, **12**, F805-F809
- [6] Mancin, S., C. Zilio, A. Diani, and L. Rossetto“ ,)0210(,“*Experimental air heat transfer and pressure drop through copper foams*” **Experimental Thermal and Fluid Science** **36**, **0**, 224-232
- [8] Azzi, W., W.L. Roberts, and A. Rabiei,(2007), “*A study on pressure drop and heat transfer in open cell metal foams for jet engine applications*” **Materials & Design** **28**, **2**, 569-574
- [7] Pavel, B.I. and A.A. Mohamad,(2004), “*An experimental and numerical study on heat transfer enhancement for gas heat exchangers fitted with porous media*” **International Journal of Heat and Mass Transfer** **47**, **23**, 4939-4952
- [9] Hsieh, W.H., J.Y. Wu, W.H. Shih, and W.C. Chiu,(2004), “*Experimental investigation of heat-transfer characteristics of aluminum-foam heat sinks*” **International Journal of Heat and Mass Transfer** **47**, **23**, 5149-5157
- [12] Kurtbas, I. and N. Celik,(2009), “*Experimental investigation of forced and mixed convection heat transfer in a foam-filled horizontal rectangular channel*” **International Journal of Heat and Mass Transfer** **52**, **5–6**, 1313-1325
- [11] Hung, Y.-M. and C.P. Tso,(200“ ,)9“*Effects of viscous dissipation on fully developed forced convection in porous media*” **International Communications in Heat and Mass Transfer** **36**, **6**, 597-603
- [10] Albanakis, C., D. Missirlis, N. Michailidis, K. Yakinthos, A. Goulas, H. Omar, D. Tsipas ,and B. Granier,(2009), “*Experimental analysis of the pressure drop and heat transfer through metal foams used as volumetric receivers under concentrated solar radiation*” **Experimental Thermal and Fluid Science** **33**, **2**, 246-252
- [10] Kamath, P.M., C. Balaji ,and S.P. Venkateshan,(2013), “*Convection heat transfer from aluminium and copper foams in a vertical channel – An experimental study*” **International Journal of Thermal Sciences** **64**, **0**, 1-10
- [14] Odabae, M., S. Mancin, and K. Hooman,(“*Metal foam heat exchangers for thermal management of fuel cell systems – An experimental study*” **Experimental Thermal and Fluid Science** **0** ,

-]15[Jiang, P.-X. and X.-C. Lu,(2006), “Numerical simulation of fluid flow and convection heat transfer in sintered porous plate channels” **International Journal of Heat and Mass Transfer** **49**, 9–10, 1685-1695
-]16[Jiang, P.-X., M. Li, T.-J. Lu, L. Yu, and Z.-P. Ren,(2004), “Experimental research on convection heat transfer in sintered porous plate channels” **International Journal of Heat and Mass Transfer** **47**, 10–11, 2085-2096
-]18[Maxwell, J.,1873, *A treatise on electricity and magnetism: Oxford University Press, Inc.*
-]17[Choi, S.U.,2001, *Two are better than one in nanofluids.*
-]19[Yu, W., D.M. France, J.L. Routbort, and S.U. Choi,(2008“ ,)Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements” **Heat Transfer Engineering** **29**, 5, 432-460
-]02[Garnett, J.M.,(1906), “Colours in metal glasses, in metallic films, and in metallic solutions. II” **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character** 237-288
-]01[Lee, S., S.U. Choi, S. Li, and, and J. Eastman,(1999), “Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles” **Journal of Heat Transfer** **121**, 2 ,
-]00[Hamilton, R. and O. Crosser,(1962), “Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems” **Industrial & Engineering chemistry fundamentals** **1**, 3, 187-191
-]00[Xuan, Y. and Q. Li,(2000), “Heat transfer enhancement of nanofluids” **International Journal of Heat and Fluid Flow** **21**, 1, 58-64
-]04[Wang, B.-X., L.-P. Zhou, and X.-F. Peng,(2003), “A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles” **International Journal of Heat and Mass Transfer** **46**, 14, 2665-2672
-]05[Xue, Q.-Z.,(2003), “Model for effective thermal conductivity of nanofluids” **Physics letters A** **307**, 5, 313-317
-]06[Eastman, J., S. Choi, S. Li, W. Yu, and L. Thompson,(2001), “Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles” **Applied Physics Letters** **78**, 6, 718-720
-]08[Xie, H., J. Wang, T. Xi, Y. Liu, F. Ai, and Q. Wu,(2002), “Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles” **Journal of Applied Physics** **91**, 7, 4568-4572
-]07[Yu, W. and S. Choi,(2003), “The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model” **Journal of Nanoparticle Research** **5**, 1-2, 167-171
-]09[Dittus, F. and L. Boelter,(1930), “Heat transfer in automobile radiator of the tube type” **Publication in Engineering, University of California, Berkley** **2**, 250
-]02[Gnielinski, V.,(1975), “New equations for heat and mass transfer in the turbulent flow in pipes and channels” **NASA STI/Recon Technical Report A** **752**, 22028
-]01[Pak, B.C. and Y.I. Cho,(1998), “HYDRODYNAMIC AND HEAT TRANSFER STUDY OF DISPERSED FLUIDS WITH SUBMICRON METALLIC OXIDE PARTICLES” **Experimental Heat Transfer**182-151 ,0 ,11
-]00[Das, S.K., N. Putra, and W. Roetzel,(2003), “Pool boiling characteristics of nano-

- fluids*” **International Journal of Heat and Mass Transfer** **46, 5**, 851-862
-]00[Li, Q., Y. Xuan, and J. Wang,(2003), “*Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids*” **Journal of Heat transfer** **125**, 151-155
-]04[Yang, Y., Z.G. Zhang, E.A. Grulke, W.B. Anderson, and G. Wu,(2005), “*Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow*” **International Journal of Heat and Mass Transfer** **48, 6**, 1107-1116
-]05[Buongiorno, J.,(2006), “*Convective transport in nanofluids*” **Journal of Heat Transfer** **128, 3**, 240-250
-]06[Polidori, G., S. Fohanno, and C. Nguyen,(2007), “*A note on heat transfer modelling of Newtonian nanofluids in laminar free convection*” **International Journal of Thermal Sciences** **46, 8**, 739-744
-]08[Choi, S.U. and J. Eastman,1995, *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles*, Argonne National Lab., IL (United States.)
-]07[Zeinali Heris, S., M. Nasr Esfahany, and S.G. Etemad,(2007), “*Experimental investigation of convective heat transfer of Al₂O₃/water nanofluid in circular tube*” **International Journal of Heat and Fluid Flow** **28, 2**, 203-210
-]09[Kayhani, M.H., H. Soltanzadeh, M.M. Heyhat, M. Nazari, and F. Kowsary,(2012), “*Experimental study of convective heat transfer and pressure drop of TiO₂/water nanofluid*” **International Communications in Heat and Mass Transfer** **39, 3**, 456-462
-]42[Kayhani, M., M. Nazari, H. Soltanzadeh, M. Heyhat, and F. Kowsary,(2012), “*Experimental analysis of turbulent convective heat transfer and pressure drop of Al₂O₃/water nanofluid in horizontal tube*” **Micro & Nano Letters, IET** **7, 3**, 223-227
-]41[Ding, Y., H. Alias, D. Wen ,and R.A. Williams,(2006), “*Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids)*” **International Journal of Heat and Mass Transfer** **49, 1**, 240-250
-]40[Lee, C.H., S.-W. Kang, and S.H. Kim,(2005), “*Effects of nano-sized ag particles on heat transfer of nanofluids*” **Journal of Industrial and Engineering Chemistry** **11, 1**, 152-158
-]40[Wen, D. and Y. Ding,(2004), “*Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions*” **International Journal of Heat and Mass Transfer** **47, 24**, 5181-5188
-]44[Amrollahi, A., A.M. Rashidi, R. Lotfi, M. Emami Meibodi, and K. Kashefi,(2010), “*Convection heat transfer of functionalized MWNT in aqueous fluids in laminar and turbulent flow at the entrance region*” **International Communications in Heat and Mass Transfer** **37, 6**, 717-723
-]45[Kim, D., Y. Kwon, Y. Cho, C. Li, S. Cheong, Y. Hwang, J. Lee, D. Hong, and S. Moon,(2009), “*Convective heat transfer characteristics of nanofluids under laminar and turbulent flow conditions*” **Current Applied Physics** **9, 2, Supplement**, e119-e123
-]46[Heyhat, M.M., F. Kowsary, A.M. Rashidi, M.H. Momenpour, and A. Amrollahi,(2013), “*Experimental investigation of laminar convective heat transfer and pressure drop of water-based Al₂O₃ nanofluids in fully developed flow regime*” **Experimental Thermal and Fluid Science** **44, 0**, 483-489

- [48] Heyhat, M.M., F. Kowsary, A.M. Rashidi, S. Alem Varzane Esfehiani, and A. Amrollahi,(2012), “*Experimental investigation of turbulent flow and convective heat transfer characteristics of alumina water nanofluids in fully developed flow regime*” **International Communications in Heat and Mass Transfer** **39**, **8**, 1272-1278
- [47] Chandrasekar, M. and S. Suresh,(2011), “*Experiments to Explore the Mechanisms of Heat Transfer in Nanocrystalline Alumina/Water Nanofluid under Laminar and Turbulent Flow Conditions*” **Experimental Heat Transfer** **24**, **3**, 234-256
- [49] Kakaç, S. and A. Pramuanjaroenkij,(2009), “*Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids*” **International Journal of Heat and Mass Transfer** **52**, **13–14**, 3187-3196
- [52] Zeinali Heris, S., S.G. Etemad, and M. Nasr Esfahany,(2006), “*Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer*” **International Communications in Heat and Mass Transfer** **33**, **4**, 529-535
- [51] , . .B ., . . uye , . l is, . y ,(2004), “*Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube*” **Superlattices and Microstructures** **35**, **3–6**, 543-557
- [50] Maiga, S.E.B .,S.J. Palm, C.T. Nguyen, G. Roy, and N. Galanis,(2005), “*Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows*” **International Journal of Heat and Fluid Flow** **26**, **4**, 530-546
- [50] Maïga, S.E.B., C.T. Nguyen, N. Galanis, G. Roy, T. Maré, and M. Coqueux,(2006), “*Heat transfer enhancement in turbulent tube flow using Al_2O_3 nanoparticle suspension*” **International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow** **16**, **3**, 275-292
- [54] Fotukian, S.M. and M. Nasr Esfahany,(2012), “*Experimental study of turbulent convective heat transfer and pressure drop of dilute CuO/water nanofluid inside a circular tube*” **International Communications in Heat and Mass Transfer** **37**, **2**, 214-219
- [55] Ben Mansour, R., N. Galanis, and C.T. Nguyen,(2011), “*Experimental study of mixed convection with water– Al_2O_3 nanofluid in inclined tube with uniform wall heat flux*” **International Journal of Thermal Sciences** **50**, **3**, 403-410
- [56] Azmi, W.H., K.V. Sharma, P.K. Sarma, R. Mamat, S. Anuar, and V. Dharma Rao,(2013), “*Experimental determination of turbulent forced convection heat transfer and friction factor with SiO_2 nanofluid*” **Experimental Thermal and Fluid Science** **51**, **0**, 103-111
- [58] Naik, M.T., G.R. Janardana, and L.S. Sundar,(2013), “*Experimental investigation of heat transfer and friction factor with water–propylene glycol based CuO nanofluid in a tube with twisted tape inserts*” **International Communications in Heat and Mass Transfer** **46**, **0**, 13-21
- [57] Sundar, L.S., M.K. Singh, I. Bidkin, and A.C.M .Sousa,(2014), “*Experimental investigations in heat transfer and friction factor of magnetic Ni nanofluid flowing in a tube*” **International Journal of Heat and Mass Transfer** **70**, **0**, 224-234
- [59] Chandrasekar, M., S. Suresh, and A. Chandra Bose,(2010), “*Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of Al_2O_3 /water nanofluid in a circular pipe under laminar flow with wire coil inserts*” **Experimental Thermal**

- and Fluid Science 34, 2**, 122-130
- [62] Chandra Sekhara Reddy, M. and V. Vasudeva Rao,(2014), “*Experimental investigation of heat transfer coefficient and friction factor of ethylene glycol water based TiO₂ nanofluid in double pipe heat exchanger with and without helical coil inserts*” **International Communications in Heat and Mass Transfer 50, 0**, 68-76
- [61] Hajipour, M. and A. Molaei Dehkordi,(2012), “*Analysis of nanofluid heat transfer in parallel-plate vertical channels partially filled with porous medium*” **International Journal of Thermal Sciences 55, 0**, 103-113
- [60] Tham, L., R. Nazar, and I. Pop,(2013), “*Mixed convection flow over a solid sphere embedded in a porous medium filled by a nanofluid containing gyrotactic microorganisms*” **International Journal of Heat and Mass Transfer 62, 0**, 647-660
- [60] Matin, M.H. and I. Pop,(2012), “*Forced convection heat and mass transfer flow of a nanofluid through a porous channel with a first order chemical reaction on the wall*” **International Communications in Heat and Mass Transfer 46, 0**, 134-141
- [64] Maghrebi, M.J., M. Nazari, and T. Armaghani,(2012), “*Forced Convection Heat Transfer of Nanofluids in a Porous Channel*” **Transport in porous media 93, 3**, 401-413
- [65] Nield, D.A. and A.V. Kuznetsov,(2014), “*Forced convection in a parallel-plate channel occupied by a nanofluid or a porous medium saturated by a nanofluid*” **International Journal of Heat and Mass Transfer 70, 0**, 430-433
- [66] Amiri, A., H.Z. Zardini, M. Shanbedi, M. Maghrebi, M. Baniadam, and B. Tolueinia,(2012), “*Efficient method for functionalization of carbon nanotubes by lysine and improved antimicrobial activity and water-dispersion*” **Materials Letters 72, 0**, 153-156
- [68] Zhou, S.-Q. and R. Ni,(2008), “*Measurement of the specific heat capacity of water-based Al_2O_3 nanofluid*” **Applied Physics Letters 92, 9**, 093123-093123-3
- [67] Kayhani, M.H., M. Nazari, H. Soltanzadeh, M.M. Heyhat, and F. Kowsary,(2012), “*Experimental analysis of turbulent convective heat transfer and pressure drop of Al_2O_3 /water nanofluid in horizontal tube*” **Micro & Nano Letters, IET 7, 3**, 223-227
- [69] Rafati, M., A. Hamidi, and M. Shariati Niaser,(2012), “*Application of nanofluids in computer cooling systems (heat transfer performance of nanofluids)*” **Applied Thermal Engineering**
- [82] Incropera, F.P. and D.P. Dewitt,2002, *Fundamentals of Mass and Heat Transfer*, Chapter.
- [81] Akhavan-Behabadi, M.A., M.F. Pakdaman, and M. Ghazvini,(2012), “*Experimental investigation on the convective heat transfer of nanofluid flow inside vertical helically coiled tubes under uniform wall temperature condition*” **International Communications in Heat and Mass Transfer 39, 4**, 556-564
- [80] White, F. ., 2003, “*Fluid Mechanics*“. c r w-Hill.
- [80] Sajadi ,A.R. and M.H. Kazemi,(2011), “*Investigation of turbulent convective heat transfer and pressure drop of TiO₂/water nanofluid in circular tube*” **International**

- Communications in Heat and Mass Transfer** **38, 10**, 1474-1478
-]84[Peng, H., G. Ding, W. Jiang, H. Hu, and Y. Gao,(2009), “*Measurement and correlation of frictional pressure drop of refrigerant-based nanofluid flow boiling inside a horizontal smooth tube*” **International Journal of Refrigeration** **32, 7**, 1756-1764
-]85[Sosnick, B.,1948, *PROCESS*, Google Patents.
-]86[Jiang, B., N.Q. Zhao, C.S. Shi, X.W. Du, J.J. Li, and H.C. Man,(2005), “*A novel method for making open cell aluminum foams by powder sintering process*” **Materials Letters** **59, 26**, 3333-3336
-]88[Chou, K.-S. and M.-A. Song,(2002), “*A novel method for making open-cell aluminum foams with soft ceramic balls*” **Scripta Materialia** **46, 5**, 379-382
-]87[Bafti, H. and A. Habibolahzadeh,(2010), “*Production of aluminum foam by spherical carbamide space holder technique-processing parameters*” **Materials & Design** **31, 9**, 4122-4129
-]89[Hassani, A., A. Habibolahzadeh, and H. Bafti,(2012), “*Production of graded aluminum foams via powder space holder technique*” **Materials & Design** **40, 0**, 510-515
-]72[Vaidyanathan, R., M. Patterson, T. Phillips, R. Cipriani, K. Dannemann, and A. Nicholls,2004, *Aluminum foams processed by rapid prototyping for lightweight structures*, DTIC Document.
-]71[Proa-Flores, P.M. and R.A. Drew,(2008), “*Production of Aluminum Foams with Ni-coated TiH₂ Powder*” **Advanced Engineering Materials**704-702 ,9 ,12
-]70[Jamshidi-Alashti, R. and G. Roudini,(2012), “*Producing replicated open-cell aluminum foams by a novel method of melt squeezing procedure*” **Materials Letters** **76**, 233-236
-]70[Das, S.K., N. Putra, P. Thiesen, and W. Roetzel,(2003), “*Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids*” **Journal of Heat Transfer** **125**, 567
-]74[Eastman, J.A., S. Phillpot, S. Choi, and P. Keblinski,(2004), “*Thermal transport in nanofluids I*” **Annu. Rev. Mater. Res.** **34**, 219-246
-]75[Wagener, M., B. Murty, and B. Günther. *Preparation of metal nanosuspensions by high-pressure DC-sputtering on running liquids*. in *MRS Proceedings*. 1996. Cambridge Univ Press.
-]76[Eastman, J., U. Choi, S. Li, L. Thompson, and S. Lee. *Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids*. in *Materials Research Society Symposium Proceedings*. 1997. Cambridge Univ Press.
-]78[Zhou, D.,(2004), “*Heat transfer enhancement of copper nanofluid with acoustic cavitation*” **International Journal of Heat and Mass Transfer** **47, 14**, 3109-3117
-]77[Lo, C.-H., T.-T. Tsung, and L.-C. Chen,(2005), “*Shape-controlled synthesis of Cu-based nanofluid using submerged arc nanoparticle synthesis system (SANSS)*” **Journal of Crystal Growth** **277, 1**, 636-642
-]79[Lo, C.-H., T.-T. Tsung, and L.-C. Chen,(2005), “*Ni nano-magnetic fluid prepared by submerged arc nano synthesis system (SANSS)*” **JSME International Journal Series B** **48, 4**, 750-755
-]92[Putra, N., W. Roetzel, and S.K. Das,(2003), “*Natural convection of nano-fluids*”

- Heat and Mass Transfer** **39**, 8-9, 775-784
- [91] Choi, S.U., X. Xu, and X. Wang,(2012), “*Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture*” **Journal of thermophysics and heat transfer** **13**, 4 ,
- [90] Murshed, S., K. Leong, and C. Yang,(2005), “*Enhanced thermal conductivity of TiO_2 —water based nanofluids*” **International Journal of Thermal Sciences** **44**, 4, 367-373
- [90] Lee, J. and I. Mudawar,(2007), “*Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels*” **International Journal of Heat and Mass Transfer** **50**, 3, 452-463
- [94] Karami, M., (2013), . c. thesis, “*CPU Cooling*”. Department of Mechanical Engineering, Kuala Lumpur, MALAYSIA
- [95] Tseng, W.J. and K.-C. Lin,(2003), “*Rheology and colloidal structure of aqueous TiO_2 nanoparticle suspensions*” **Materials Science and Engineering: A** **355**, 1, 186-192
- [96] Kulkarni, D.P., D.K. Das, and G.A. Chukwu,(2006), “*Temperature dependent rheological property of copper oxide nanoparticles suspension (nanofluid)*” **Journal of nanoscience and nanotechnology** **6**, 4, 1150-1154
- [98] Tseng, W.J. and C.-L. Lin,(2003), “*Effect of dispersants on rheological behavior of $BaTiO_3$ powders in ethanol–isopropanol mixtures*” **Materials chemistry and physics** **80**007-000 ,1 ,
- [97] Li, J., Z. Li, and B. Wang,(2002), “*Experimental viscosity measurements for copper oxide nanoparticle suspensions*” **Tsinghua Science and Technology** **7**, 2, 198-201

Abstract

Performance of heat transfer systems has been considered in past recent years. This attention guided investigations to using of new methods and mediums. New studies were started at applications of nanofluids and porous media. Experimental investigation of forced convective heat transfer of nanofluids in a porous pipe has not been considered in the literature and this challenge is considered to be an open research topic that may require more study. This thesis is the first work which focuses on nanofluids flow and heat transfer in the porous media experimentally. Forced convective heat transfers of nanofluid were done in a porous pipe with constant wall temperature and uniform heat flux boundary condition. Alumina nanofluids in 5 volume fractions of 0.1, 0.25, 0.5, 1, 1.5% for uniform wall temperature condition and alumina nanofluids in 4 volume fractions of 0.1, 0.25, 0.5, 1% and CNT nanofluid in 3 volume fractions of 0.1, 0.25, 0.5% for constant heat generation condition that made by two step method is used for this experiment. Measurement of temperature and pressure drop of nanofluids along with the test section is done at each test. Results along with statistical method, the confidence intervals, with 95% accuracy were reported. Also for validate the test data an empty tube with the same properties of porous pipe with uniform wall temperature was used. The result of empty tube data was compared with one phase flow correlations in the literature as well as the physical properties of nanofluid such as viscosity and density has been considered in relations. The result of this comparison was shown an expectable error from correlations.

The porous result in the constant wall temperature conditions shows maximum Nusselt increase of 57% at $Re=3704$ for 1.5% alumina nanofluid in 50% pipe porosity and maximum Nusselt increase of 45% at $Re=3175$ for 1.5% alumina nanofluids in 63% pipe porosity also result shows a significant increase of Nusselt number in compare with empty tube. The result also shows maximum Nusselt increase of 31% at $Re=5388$ for 1% alumina nanofluid and maximum Nusselt increase of 33% at $Re=3489$ for 0.5% CNT nanofluids in uniform heat flux condition. The measured pressure drop also shows significant increase in compare with empty tube.

Key words: Nanofluid - Experimental Investigation – Porous media - Pressure Drop
- Nanoparticle



Shahrood University of Technology

Department of Mechanical Engineering

**Experimental study of heat transfer of Nanofluids in
porous media**

Mojtaba Ashouri

Supervisor:

Dr. Mohammad Hasan Kayhani

Co-Supervisors:

Dr. Mohsen Nazari

December 2013