



مؤسسه آموزش عالی غیر دولتی غیر انتفاعی انرژی

بررسی سنجش تاثیر افزودن نانوذرات CuO و Al_2O_3 بر خواص مواد تغییر فازدهنده

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

نام دانشجو

مهدی فلاح

۹۶۱۳۵۲۸۰۱۸

استاد راهنما:

دکتر حیدر مداح

دکتر یوسف یاسی

شهریورماه ۱۳۹۸

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به:

خدایی که آفرید

جهان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق را

و به کسانی که عشقشان را در وجودم دمید.

گاهی بیاییم و احوالشان را بپرسیم

سپاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به
همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت.

سپاس خدای را که هر چه دارم از اوست

به امید آنکه توفیق یابم جز خدمت به خلق او نکوشم.

تشکر و قدردانی:

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و دورد بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز... بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می‌کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده‌اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب "من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عزّ و جلّ": از پدر و مادر عزیزم... این دو معلم بزرگوارم... که همواره بر کوتاهی و درستی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند و در تمام عرصه‌های زندگی یار و یآوری بی چشم داشت برای من بوده‌اند؛ از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر حیدر مداح که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛ از استاد صبور و با تقوا، جناب آقای دکتر یوسف یاسی، مدیریت محترم گروه، که زحمت مشاوره این رساله را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی‌رسید؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم. باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

چکیده :

افزایش انتقال حرارت و همچنین افزایش راندمان سیستم های ذخیره کننده انرژی با توجه به محدودیت منابع طبیعی و با هدف کاهش هزینه ها همواره یکی از اساسی ترین دغدغه های مهندسين و محققين بوده است. این امر به خصوص در سیالات به دلیل کوچکی ضریب رسانش حرارتی از اهمیت بیشتری برخوردار است. یکی از مهم ترین راه های دستیابی به این امر، که در سال های اخیر به آن توجه زیادی شده، افزودن ذرات جامد با رسانش حرارتی بالا در ابعاد نانو می باشد. انتقال حرارت به همراه تغییر فاز در بسیاری از کاربردها به ویژه در سیستم های ذخیره انرژی حرارتی از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است. در این واحد- های ذخیره انرژی، هدف استفاده از گرمای نهان ذوب در طول فرایند تغییر فاز است. هدف از این تحقیق بررسی اثر افزودن نانوذرات AL_2O_3 و CUO به سیال تراکم ناپذیر پایه در انتقال حرارت و تغییر فاز ماده می باشد. در این پژوهش از هیدروکربن ان- اکتادکان¹ به عنوان ماده تغییر فاز دهنده پایه که در دماهای متوسط کاربرد دارد، استفاده شده است.

پارافین ان اکتادکان، یک ماده تغییر فاز دهنده آلی است که دارای فرمول شیمیایی $C_{18}H_{38}$ است و در فاز جامد به صورت کریستال های جامد است. ان اکتادکان در فاز مایع شفاف است و به همین دلیل در آزمایش- های انتقال گرمای مربوطه، مرز بین جامد و مایع در آن براحتی قابل تشخیص است. این ماده از لحاظ شیمیایی پایدار، غیر خورنده و غیر سمی است. در این پژوهش از مواد نانو ساختار اکسید مس و آلومینا (آلومینیوم دی اکسید) استفاده شده است.

واژه های کلیدی: انتقال حرارت (Heat Transfer)، نانوسیال (Nanofluid)، تراکم ناپذیر (Incompressible)، آلومینیوم دی اکسید (AL_2O_3)، اکسید مس (CUO)، پارافین ان اکتادکان ($C_{18}H_{38}$)

¹ n-octadecane

فصل ۱: کلیات تحقیق

| | | |
|---------|--|----|
| ۱-۱ | مقدمه | ۱ |
| ۲-۱ | نانو | ۳ |
| ۳-۱ | نانو تکنولوژی | ۳ |
| ۱-۳-۱ | چرا «نانو» تکنولوژی؟ | ۴ |
| ۴-۱ | تاریخچه نانو فناوری | ۴ |
| ۵-۱ | کاربرد نانو سیالات | ۵ |
| ۶-۱ | معرفی مواد تغییر فاز (PCM) | ۶ |
| ۷-۱ | دسته بندی مواد تغییر فاز دهنده | ۷ |
| ۱-۷-۱ | مواد تغییر فاز دهنده آلی | ۷ |
| ۱-۱-۷-۱ | پارافینها | ۸ |
| ۲-۱-۷-۱ | غیر پارافینها | ۹ |
| ۲-۷-۱ | مواد تغییر فاز دهنده غیر آلی | ۱۰ |
| ۱-۲-۷-۱ | هیدراتهای نمک | ۱۰ |
| ۲-۲-۷-۱ | فلزات | ۱۱ |
| ۳-۷-۱ | اوتکتیکها | ۱۲ |
| ۸-۱ | کپسوله کردن مواد تغییر فاز دهنده | ۱۳ |
| ۹-۱ | کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در دیگر زمینه ها | ۱۳ |
| ۱۰-۱ | تکنیکهای افزایش کارایی سیستم ذخیره ساز انرژی | ۱۴ |
| ۱-۱۰-۱ | افزایش هدایت حرارتی PCM | ۱۴ |
| ۲-۱۰-۱ | میکروکپسوله کردن PCM | ۱۶ |

فصل ۲: مروری بر کارهای گذشته

| | | |
|-------|---------------------------------------|----|
| ۱-۲ | مقدمه | ۱۹ |
| ۲-۲ | روشهای مدلسازی جریان نانوسیال | ۱۹ |
| ۳-۲ | منطق وجودی نانو سیالات | ۲۲ |
| ۴-۲ | پارامترهای انتقال حرارت در نانوسیالات | ۲۵ |
| ۱-۴-۲ | انباشتگی ذرات | ۲۵ |
| ۲-۴-۲ | نسبت حجمی ذرات نانو | ۲۶ |

| | |
|----|---|
| ۲۷ | ۳-۴-۲ حرکت براونی |
| ۲۷ | ۴-۴-۲ ترموفورسیس |
| ۲۸ | ۵-۴-۲ اندازه نانوذرات |
| ۲۸ | ۶-۴-۲ شکل نانوذرات |
| ۲۹ | ۷-۴-۲ ضخامت لایه سیال بین ذرات نانو |
| ۳۰ | ۸-۴-۲ دما |
| ۳۰ | ۵-۲ انواع نانو ذرات |
| ۳۰ | ۱-۵-۲ نانو سیالات سرامیکی |
| ۳۱ | ۲-۵-۲ نانو سیالات فلزی |
| ۳۲ | ۳-۵-۲ نانو سیالات، حاوی نانو لوله های کربنی و پلیمری |
| ۳۲ | ۶-۲ نظریه هایی بر نانو سیالات |
| ۳۲ | ۱-۶-۲ کارهای تجربی انجام شده در زمینه ضریب رسانش حرارتی موثر نانوسیال |
| ۳۳ | ۲-۶-۲ کارهای تجربی انجام شده در زمینه ویسکوزیته موثر نانوسیال |
| ۳۳ | ۳-۶-۲ کارهای تجربی انجام شده در زمینه انتقال حرارت در نانوسیال |
| ۳۴ | ۴-۶-۲ کارهای عددی انجام شده در زمینه انتقال حرارت در نانوسیال |
| ۳۴ | ۵-۶-۲ کارهای انجام شده در زمینه تغییر فاز ماده |

فصل ۳: مواد و روشها

| | |
|----|---|
| ۳۸ | ۱-۳ مواد به کار رفته در پژوهش |
| ۳۸ | ۱-۱-۳ مواد تغییر فاز دهنده |
| ۴۰ | ۲-۱-۳ مواد نانو ساختار |
| ۴۰ | ۲-۳ روشهای توصیف ویژگیهای مواد نانو ساختار |
| ۴۰ | ۱-۲-۳ میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) |
| ۴۰ | ۲-۲-۳ میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) |
| ۴۱ | ۳-۲-۳ روش پراکندگی نور دینامیکی (DLS) |
| ۴۱ | ۴-۲-۳ طیف سنجی تبدیل فوری مادون قرمز (FTIR) |
| ۴۲ | ۳-۳ آماده سازی مواد تغییر فاز دهنده حاوی مواد نانو ساختار |
| ۴۲ | ۱-۳-۳ آماده سازی PCM |
| ۴۳ | ۲-۳-۳ آماده سازی PCM / nanostructured materials |
| ۴۵ | ۴-۳ اندازه گیری ضریب هدایت گرمایی |
| ۴۶ | ۱-۴-۳ دستگاه اندازه گیری ضریب هدایت گرمایی و تکنیک TPS |
| ۵۱ | ۲-۴-۳ مراحل اندازه گیری ضریب هدایت گرمایی |

فصل ۴: نتایج و تفسیر آن ها

| | |
|----|---|
| ۵۶ | ۱-۴ ضریب هدایت گرمایی و لزجت PCM پایه (ان - اکتادکان) |
|----|---|

- ۲-۴ ویژگیهای ان - کتادکان حاوی نانوذرات آلومینا ۵۸
- ۱-۲-۴ توصیف ویژگیهای نانوذرات مزوپروس آلومینا ۵۸
- ۲-۲-۴ ضریب هدایت گرمایی ان اکتادکان حاوی نانوذرات آلومینا ۶۰
- ۳-۲-۴ لزجت و ویژگیهای رئولوژیکی ان اکتادکان حاوی نانوذرات آلومینا ۶۳
- ۳-۴ ویژگیهای ان - اکتادکان حاوی نانوذرات اکسید مس ۶۶
- ۱-۳-۴ ویژگیهای نانوذرات اکسید مس ۶۶
- ۲-۳-۴ ضریب هدایت گرمایی ان اکتادکان حاوی نانوذرات اکسید مس ۶۸
- ۳-۳-۴ لزجت و ویژگیهای رئولوژیکی ان اکتادکان حاوی نانوذرات اکسید مس ۷۳

فصل ۵: جمع بندی و پیشنهاد ها

- ۱-۵ - پیشنهادهایی برای پژوهشهای آینده ۸۱

مراجع

- مراجع ۸۴

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ دسته‌بندی مواد تغییر فاز دهنده ۷
- شکل ۱-۲ ساختارهای فلزی مورد استفاده در سیستم ذخیره‌سازی انرژی ۱۶
- شکل ۱-۳: نمونه‌ای از میکروکپسوله PCM، (A) روش اسپری خشک، (B) روش توده‌ای ۱۷
- شکل ۲-۲ رژیم‌های جریان گاز بر پایه‌ی عدد ناسن ۲۲
- شکل ۲-۳ نمودار تغییرات ضریب رسانش حرارتی نسبت به زمان برای مخلوط آب اکسید مس ۲۶
- شکل ۲-۴ افزایش انباشتگی نانوذرات باافزایش زمان برای مخلوط آب اکسیدمس ($\phi=0/1$) (الف) ۲۰ دقیقه (ب) ۶۰ دقیقه (ج) ۷۰ دقیقه ۲۶
- شکل ۲-۵ نمودار تغییرات ضریب رسانش حرارتی نسبت به نسبت حجمی ذرات نانو ۲۷
- شکل ۲-۶ نمودار تغییرات ضریب رسانش حرارتی موثر نسبت به نسبت حجمی و اشکال متفاوت نانوذرات برای مخلوط آب - اکسید آلومینم ۲۸
- شکل ۲-۷ نمودار تغییرات ضریب رسانش حرارتی موثر نسبت به ضخامت لایه سیال پیرامون نانوذرات ۲۹
- شکل ۲-۸ نمودار تغییرات ضریب رسانش حرارتی موثر نسبت به دما برای مخلوط آلومینیوم-آب ۳۰
- شکل ۳-۱ حمام التراسونیک ۴۴
- شکل ۳-۲ - TPS۲۵۰۰ S و سنسور مربوطه ۴۷
- شکل ۳-۳ (A) سنسور TPS (B) نوک مار پیچ سنسور ۴۸
- شکل ۳-۴ افزایش دما بر حسب تابع بدون بعد زمان ۵۰
- شکل ۳-۵ اختلاف دما بر حسب توان یا زمان ۵۰
- شکل ۳-۶ نگهدارنده نمونه ۵۳
- شکل ۳-۷ وسایل اندازه گیری ضریب هدایت گرمایی ۵۴
- شکل ۴-۱ ضریب هدایت گرمایی آن - اکتادکان در دماهای مختلف ۵۶
- شکل ۴-۲ تصاویر SEM مربوط به آلومینا ۵۸
- شکل ۴-۳ نمودار FTIR ذرات آلومینا ۵۹
- شکل ۴-۴ نمودار توزیع اندازه ذرات آلومینا در محیط آب ۶۰
- شکل ۴-۵ ضریب هدایت گرمایی آن - اکتادکان حاوی نانو ذرات آلومینا (A) فاز جامد (B) فاز مایع ۶۱
- شکل ۴-۶ درصد افزایش ضریب هدایت گرمایی آن - اکتادکان حاوی نانو آلومینا ۶۳
- شکل ۴-۷ لزجت PCM / Al_2O_3 بر حسب نرخ برش (A) $T = 35^\circ C$ (B) $T = 45^\circ C$ (C) $T = 55^\circ C$ ۶۵
- شکل ۴-۸ ریزنگار SEM نانو ذرات اکسید مس ۶۷
- شکل ۴-۹ توزیع اندازه نانوذرات اکسید مس در محیط (A) آب، (B) EG ۶۸
- شکل ۴-۱۰ ضریب هدایت گرمایی PCM در دمای متفاوت ۶۹
- شکل ۴-۱۱ درصد افزایش متوسط ضریب هدایت گرمایی PCM به PCM/ CUO ۷۰
- شکل ۴-۱۲ نسبت ضریب هدایت گرمایی PCM به PCM / CUO (A) فاز جامد (B) فاز مایع ۷۱

- شکل ۴-۱۳- نمودار دو تایگی ضریب هدایت گرمایی از رابطه ۶-۱ (A) فاز جامد (B) فاز مایع ۷۳
- شکل ۴-۱۴- (A, B) و (C) منحنی جریان PCM و PCM / CUO در کسر جرمی متفاوت و دمای به ترتیب $^{\circ}\text{C}$ ۴۵، $^{\circ}\text{C}$ ۳۵ و 55°C (D, E) و (F) لزجت مؤثر بر حسب نرخ برش PCM و PCM / CUO در کسر جرمی متفاوت و دمای به ترتیب $^{\circ}\text{C}$ ۴۵، $^{\circ}\text{C}$ ۳۵ و 55°C ۷۷
- شکل ۴-۱۵- لزجت پلاستیک بینگهام در کسر جرمی و دماهای مختلف ۷۸
- شکل ۴-۱۶- تنش تسلیم بینگهام در کسر جرمی و دماهای مختلف ۷۹

فهرست جداول

- جدول ۱-۱ نقطه ذوب و گرمای نهان پارافین‌ها ۹
- جدول ۱-۲- نقطه ذوب و گرمای نهان غیر پارافین‌ها ۱۰
- جدول ۱-۳- نقطه ذوب و گرمای نهان هیدراتهای نمک ۱۱
- جدول ۱-۴- نقطه ذوب و گرمای نهان فلزات ۱۲
- جدول ۱-۵- نقطه ذوب و گرمای نهان اوتکتیکها ۱۲
- جدول ۳-۱- ویژگیهای ترموفیزیکی ان- اکتادکان ۳۹
- جدول ۱-۴- ضریب هدایت گرمایی اندازه گیری شده برای ان - اکتادکان در دماهای مختلف ۵۷
- جدول ۲-۴- ضریب پایداری و شاخص رفتار ان - اکتادکان حاوی نانوذرات آلومینا در دماهای مختلف ۶۶
- جدول ۳-۴- ضرایب رگرسیون رابطه ۱-۴ ۷۲
- جدول ۴-۴- ضرایب مدل بینگهام برای سیال غیر نیوتنی ۷۴

فهرست علائم اختصاری

| | |
|----------|--|
| T | دما |
| V | حجم |
| S | سطح |
| K | ضریب هدایت حرارتی |
| k_s | ضریب هدایت حرارتی ذره نانو |
| k_l | ضریب هدایت حرارتی ماده تغییر فاز دهنده |
| L | طول حفره |
| c_p | ظرفیت گرمایی ویژه |
| P | فشار |
| d_p | قطر ذرات نانو |
| SEM | میکروسوپ الکترونی روبشی |
| TEM | میکروسکوپ الکترونی عبوری |
| DLS | روش پراکندگی نور دینامیکی |
| FTIR | طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز |
| Gr | عدد گراشف |
| Kn | عدد نادسن |
| Nu | عدد ناسلت |
| L | گرمای نهان |
| U | مولفه سرعت افقی در راستای X |
| V | مولفه سرعت عمودی در راستای Y |
| VF | نسبت حجمی ذرات نانو به سیال |
| AR | نسبت منظری (L/H) |
| ρ | چگالی |
| β | نسبت انبساط حجمی |
| ϕ | نسبت حجمی ذرات نانو به سیال |
| α | نفوذ حرارتی |
| ν | ویسکوزیته سینماتیکی |
| μ | ویسکوزیته دینامیکی مولکولی |
| S | جامد |
| L | سیال |

فصل ۱:

کلیات تحقیق

۱-۱ مقدمه

انتقال حرارت به همراه تغییر فاز در بسیاری از پدیده‌های فیزیکی در کاربردهای مختلف صنعتی و غیرصنعتی اتفاق می‌افتد و برخی از پدیده‌های طبیعی در این زمینه عبارتند از: فرایند ذوب شدن برف، یخ زدن آب دریاچه‌ها و سوختن شمع. بعضی از پروسه‌های صنعتی که همراه با تغییر فاز هستند عبارتند از: جوشکاری و ریخته‌گری.

فرآیند انتقال حرارت به همراه تغییر فاز به خاطر کارهای انجام شده توسط استفان (Stefan) در سال ۱۸۸۹ به مسأله استفان معروف است.

در میان کاربردهای مربوط به فرآیند تغییر فاز، واحدهای ذخیره‌کننده انرژی حرارتی دارای اهمیت فراوان می‌باشند چرا که در اکثر پدیده‌های فیزیکی که به همراه تغییر فاز هستند، این فرآیند به صورت ناخواسته انجام می‌گیرد. مثلاً در صنعت ریخته‌گری اگر گرمای نهان آلیاژ کمتر باشد طبیعتاً انرژی، هزینه و زمان کمتری برای تولید نیاز خواهیم داشت ولی در واحدهای ذخیره‌کننده انرژی هدف استفاده از گرمای نهان ذوب در طول تغییر فاز می‌باشد به همین جهت در سال‌های اخیر واحدهای ذخیره‌کننده انرژی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. ظرفیت بالای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی باعث می‌شود تا امکان ساخت ذخیره‌کننده‌های کوچک فراهم گردد و بتوان آن‌ها را به صورت فشرده تولید کرد این ویژگی باعث می‌شود تا استفاده از واحدهای ذخیره‌کننده انرژی در کاربردهای تجاری که معمولاً با محدودیت ابعادی مواجهه هستند، استفاده فراوانی داشته باشد.

دانستن عوامل و پارامترهای موثر بر کارایی ذخیره‌کننده و توانایی تعیین میزان تاثیر این عوامل بر کارایی سیستم باعث می‌شود تا بتوان عمل ذخیره‌سازی و تخلیه انرژی را بهینه سازی نمود.

امروزه با توجه به کمبود و رو به پایان بودن منابع انرژی فسیلی و مسئله آلودگی هوای ناشی از مصرف این مواد برای تامین انرژی، موضوع استفاده از انرژی‌های جایگزین اهمیت بیشتری یافته است. در حال حاضر نفت، گاز و زغال سنگ ۸۰ درصد از انرژی مصرفی جهان را تامین می‌کنند. مصرف انرژی در پانجاه سال

گذشته بیشتر از مصرف انرژی در دو قرن پیش از آن بوده است. به پیش بینی سازمان اطلاعات انرژی آمریکا، مصرف انرژی جهان تا سال ۲۰۳۰ میلادی افزایش حدودی ۵۷ درصدی خواهد داشت. با توجه به مشکلات سوختهای فسیلی (آلودگی محیط زیست، منابع محدود و پایان پذیر، تجدید ناپذیری و ...) تمایل دنیا به انرژی‌های نو از قبیل خورشید، باد (برای ماشینهای بادی امروزی)، بیو انرژی، زمین گرمایی، هیدروژن، انرژی هسته‌ای و ... بیشتر شده است.

یکی از انرژی‌های نو انرژی خورشیدی می باشد که مهم ترین موضوع در انرژی خورشیدی، جذب و ذخیره آن است. جذب انرژی خورشیدی توسط کلکتورهای مختلف برای اهداف متفاوتی از جمله: تولید برق، گرمایش آب، گرمایش فضا و ... صورت می‌گیرد. فراوانی و ارزان بودن انرژی در بعضی از ساعات شبانه روز از دلایل مهم ذخیره انرژی است. انرژی خورشیدی در روز به وفور یافت می‌شود ولی یکی از اشکالات مهم این انرژی عدم دسترسی به آن در شب می‌باشد که به کمک ذخیره انرژی می‌توان از این انرژی در ساعات نبود خورشید نیز بهره برد. در بعضی کشورها مثل چین که بیشتر از انرژی الکتریکی برای گرمایش منازل استفاده می‌شود، با توجه به ارزان بودن انرژی الکتریکی در روز و گران بودن تعرفه در شب حدود ۱/۵ برابر (به دلیل ساعات اوج مصرف)، ذخیره انرژی از راهکارهای مهم به شمار می‌آید.

ذخیره انرژی به شکل های مکانیکی، الکتریکی و حرارتی صورت می‌گیرد. ذخیره انرژی حرارتی به شکل محسوس (از طریق گرمای ویژه موادی مانند آب، زمین و ...) و نهان (از طریق تغییر فاز موادی مانند پارافین، هیدراتهای نمک و ...) انجام می‌گیرد.

استفاده از ذرات نانو (با قطر کمتر از ۵۰ nm) و تأثیر ذرات نانو در مواد تغییر فاز دهنده (NEPCM)^۱ دریچه ای جدید برای پیشرفت تکنولوژی نوین در ترکیب مواد، بیو تکنولوژی، طراحی ابزار میکرو فلویدیک و ... پیش روی محققین گشوده است.

^۱ Nano-Enhanced Phase Change Material

سیالات معمول مورد استفاده برای انتقال حرارت و ذخیره انرژی دارای ضریب رسانش حرارتی پایین می-باشند، در حالی که فلزات دارای رسانش حرارتی بالاتر از سه برابر اینگونه سیالات می-باشند. بنابراین استفاده از ذرات جامد فلزی در ابعاد نانو و ترکیب آن‌ها با اینگونه سیالات برای افزایش ضریب رسانش حرارتی و در نتیجه افزایش راندمان حرارتی بسیار مطلوب به نظر می‌رسد.

۲-۱ نانو

پیشوند نانو در اصل یک کلمه یونانی است معادل لاتین این کلمه Dwarf است که به معنی کوتوله و قد کوتاه است این پیشوند در علم مقیاس‌ها به معنی یک میلیاردیوم است بنابراین یک نانومتر، 10^{-9} m است این مقیاس را با ذکر مثال‌هایی عینی، بهتر می‌توان حس کرد. یک تارموی انسان به طور متوسط قطری حدود ۵۰۰۰۰ نانو متر دارد. یک سلول باکتری، قطری معادل چند صد نانومتر دارد. کوچکترین اشیای قابل دید توسط چشم غیرمسلح اندازه‌ای حدود ۱۰۰۰۰ نانومتر دارند و فقط حدود ۱۰ اتم هیدروژن در یک خط، یک نانومتر را می‌سازد.

در این بخش ضمن بررسی تعاریف مختلفی که از فناوری نانو وجود دارد به بیان مبانی، ساختار و اهمیت فناوری نانو و کاربرد‌های آن می‌پردازیم.

۳-۱ نانو تکنولوژی

به بیان ساده علم نانو اصول اولیه مولکول‌ها و ساختارهای با ابعاد بین ۱ تا ۱۰۰۰ نانومتر است این ساختارها را نانو ساختار می‌نامیم. نانو تکنولوژی، کاربرد این ساختارها در دستگاه‌های با اندازه نانومتری است.

نانو تکنولوژی تولید کارآمد مواد و دستگاه‌ها و سیستم‌ها با کنترل ماده در مقیاس طولی نانومتر و بهره‌برداری از خواص و پدیده‌های نو ظهوری است که در مقیاس نانو توسعه یافته‌اند.

فناوری نانو یکی از مدرن‌ترین فناوری‌های روز دنیاست که دارای خصوصیتی منحصر به فرد با کاربردهایی در تمام زمینه‌های علمی و فناوری است همین کاربردها وسیع فناوری نانو که از آن به عنوان ویژگی بین رشته‌ای بودن فناوری نانو یاد می‌شود عامل مهمی در فراگیر شدن این پدیده جدید است.

از طرفی توجه روزافزون بشر به این فناوری فقط ناشی از تازگی آن و کنجکاوی بشر برای دانستن آنچه نمی داند نیست بلکه دلیل قابلیت های ویژه ای است که این فناوری پیش روی انسان قرار می دهد و دست یابی به آنها جز از این راه ممکن نیست.

بیشتر محصولات نانو تکنولوژی در معرض آنالیز انتقال حرارت قرار می گیرند زیرا ملاحظات گرمایی همیشه قسمت مهمی از هر فرایند طراحی می باشد.

۱-۳-۱ چرا «نانو» تکنولوژی؟

شاید این سؤال در ذهن پدید آید که چه چیزی در مقیاس نانومتری وجود دارد که یک تکنولوژی بر پایه آن بنا نهاده شده است. آنچه باعث ظهور نانو تکنولوژی شده، نسبت سطح به حجم بالای نانو مواد است. این موضوع یکی از مهم ترین خصوصیات مواد تولید شده در مقیاس نانو (نانو مواد) است. در مقیاس نانو، اشیاء شروع به تغییر رفتار می کنند و رفتار سطوح بر رفتار توده ای ماده غلبه می کند در این مقیاس برخی روابط فیزیکی که برای مواد معمولی کاربرد دارند، نقض می شوند. برای مثال، یک سیم با اجزای یک مدار در مقیاس نانو لزوماً از قانون اهم پیروی نمی کنند. قانون اهم، به جریان، ولتاژ و مقاومت بستگی دارد اما در مقیاس نانو وقتی عرض سیم فقط به اندازه یک یا چند اتم باشد، الکترونها لزوماً باید در صف و به ترتیب و یک به یک از سیم رد شوند. بنابراین ممکن است قانون اهم در این مقیاس تا حدودی نقض شود.

۱-۴ تاریخچه نانو فناوری

۵۰ سال پیش ریچارد فانیمن متخصص کوانتوم نظری و دارنده جایزه نوبل، در سخنرانی معروف خود در سال ۱۹۵۹ با عنوان «آن پایین فضای بسیاری هست» به بررسی بعد رشد نیافته علم مواد پرداخت او فرض کرد که اگر دانشمندان فرا گرفته اند که چگونه ترانزیستورها و دیگر سازه ها را با مقیاس های کوچک بسازند، پس ما خواهیم توانست که آزاد در مقابل یکدیگر به گونه ای قرار دهیم که بتوانیم کوچکترین محصول مصنوعی ممکن را ایجاد کنیم پس از بازگو شدن نظرات فانیمن جهان روندی به سوی کوچک شدن در پیش گرفت. در اواسط دهه ۷۰، درکسلر که یک دانشجوی فارغ التحصیل و به نظریات فانیمن علاقه مند بود در

سال ۱۹۸۰ میلادی درجه استادی خود را در رشته ی علوم کامپیوتر دریافت نمود و با جمعی از دانشجویان خود به پایه گذاری رشته جدید از مهندسی مولکولی اقدام کرد و این دفتر را «نانو فناوری» نامید.

۱-۵ کاربرد نانو سیالات

نانو تکنولوژی تقریباً تمام جنبه های زندگی بشر را تحت تأثیر قرار خواهد داد، از دارویی که مصرف می شود تا توان و سرعت رایانه ها، منابع انرژی مورد نیاز، غذایی که خورده می شود، ماشینی که رانده می شود، خانه ای که در آن زندگی می شود و لباسی که بر تن می شود و...

پرداختن به توضیح تمام این کاربردها کاری بسیار دشوار خواهد بود بنابراین مروری مختصر به برخی کاربردهای ویژه نانو مواد در دنیای نانو تکنولوژی می پردازیم:

□ نانو سیالات می توانند برای محدوده گسترده ای از کاربردهای صنعتی استفاده شوند، از انتقال گرما تا تولید انرژی و صنایع الکترونیک (خنک کاری چیپ های کامپیوتری).

□ در صنایع خودروسازی

- صنایع حمل و نقل تمایل زیادی برای کاهش اندازه و وزن سیستم انتقال گرمای وسیله نقلیه دارند.

- نانو سیالات می توانند انتقال گرمای خنک کننده ها (سیستم های خنک کاری و رادیاتورها) و روانکارها را افزایش دهند.

- استفاده از نانو سیالات باعث می شود تا ۱۰٪ کاهش در مساحت سطح رادیاتور و در نتیجه ۵٪ کاهش مصرف سوخت داشته باشیم.

- کاهش در اصطکاک و خوردگی باعث کاهش در اتلاف و در نتیجه کاهش مصرف سوخت می شود.

- در مبدل های گرما که از سیالات معمولی استفاده می کنند، قدرت پمپ باید تا ۱۰ برابر شود تا اینکه رسانایی گرمایی تا ۲ برابر زیاد شود ولی اگر از نانو سیالات (با فرض رسانایی گرمایی تا ۳ برابر سیال معمولی) استفاده شود نرخ رسانایی گرمایی بدون افزایش توان پمپ ۲ برابر می شود.

□ خنک کاری ابزارآلات دارای شار گرمایی بالا مانند لوله های میکروویوی با توان بالا.

□ کاربردهای پزشکی

- به منظور روش جدیدی در درمان سرطان، نانو ذرات مغناطیسی در بیو سیالات می توانند بعنوان حامل های دارو یا تشعشع باشند.

- نانو ذرات مغناطیسی توان بیشتری را نسبت میکرو ذرات از میدان مغناطیسی AC پایدار در بدن انسان جذب می کند

- نانو ذرات چسبندگی بهتری به سلولهای سرطانی دارند تا سلولهای سالم. و...

□ مولدهای برق

□ نیروهای با توان بالا

□ نانو سرامیک ها: سرامیک های نانو، سرامیک هایی هستند که اندازه دانه یا اجزای سازنده آنها در حد نانومتر است. سرامیک های نانو ساختار مستحکم تر و انعطاف پذیرتر از سرامیک های میکرو ساختار هستند.

این سرامیک ها به دلیل برخورداری از ویژگی های منحصر به فرد، در بسیاری از صنایع به عنوان مثال صنایع شیمیایی، صنایع الکترونیک و مخابرات از اجزای مهم محسوب می شوند.

□ در سیستم های نانو الکترومکانیکی (MEMS): ابعاد نانومتری این سیستم ها باعث می شود که همه جا قابل استفاده بوده و به راحتی جایگزین شوند و به همین دلیل انرژی مصرفی فوق العاده کمی دارند و دقت بسیار زیادی نسبت به سیستم های معمول دارند.

۱-۶ معرفی مواد تغییر فاز (PCM)

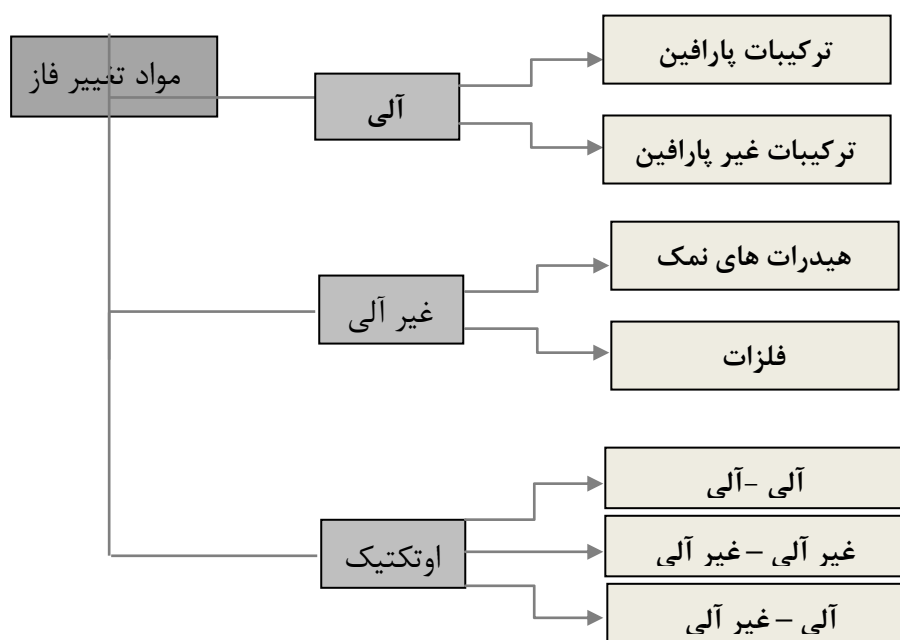
PCM ها حالت خاصی از جامد - مایع ها نامیده می شوند و محلول هایی می باشند که برای کنترل حرارت به کار می روند. این مواد به دلیل اینکه گرمای نهان در حالت انتقال جامد به جامد و یا مایع به مایع خیلی کمتر از گرمای نهان در حالت جامد به مایع (ذوب) می باشند، در سال های اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته اند.

۷-۱ دسته‌بندی مواد تغییر فاز دهنده

مواد تغییر فاز دهنده به سه دسته آلی^۱، غیر آلی^۲ و اوتکتیک^۳ تقسیم‌بندی می‌شوند (شکل ۱-۲).

۱-۷-۱ مواد تغییر فاز دهنده آلی

مواد آلی به دو دسته پارافین ها و غیرپارافین ها تقسیم بندی شده‌اند. مواد آلی دارای ذوب متجانس (همگون)، تشکیل دهنده هسته و همچنین برای موادی که به عنوان پوشش آنها به کار می‌روند خورنده نیستند. مواد تغییر فاز دهنده آلی که برای گرمایش و سرمایش ساختمانها به کار می‌روند دارای نقطه ذوب ۲۰-۳۲ درجه سانتی‌گراد هستند.



شکل ۱-۱ دسته‌بندی مواد تغییر فاز دهنده

¹ Organic

² Inorganic

³ Eutectic

۱-۷-۱ پارافین‌ها

پارافین شامل ترکیبی از زنجیره مستقیم $CH_3 - (CH_2) - CH_3$ است. کریستالیزه شدن این زنجیره باعث آزاد شدن مقدار زیادی گرمای نهان می‌شود. با افزایش طول زنجیره، نقطه ذوب و گرمای نهان افزایش می‌یابد. پارافین به دلیل قابل دسترس بودن در محدوده وسیعی از دمای ذوب، یکی از بهترین انتخابها به عنوان مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره انرژی است. به علت ملاحظات اقتصادی، فقط پارافین‌های با خلوص صنعتی، قابلیت استفاده به عنوان مواد تغییر فاز دهنده در سیستم های ذخیره گرمایی نهان را دارند. پارافین ایمن، قابل اطمینان، قابل پیش‌بینی، غیر خورنده و دارای هزینه کمتری می‌باشد. پارافین در دمای کمتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، از نظر شیمیایی خنثی و پایدار است، تغییرات حجم کمی در ذوب و فشار بخار پایینی در حالت ذوب دارد. پارافین‌ها به دلیل خواصی که در بالا گفته شد، معمولاً دارای سیکل انجماد - ذوب طولانی هستند. علاوه بر خواص فوق، ذوب متجانس و تشکیل دهنده هسته، دو ویژگی مهم پارافین‌ها می‌باشد. از اشکالات پارافین می‌توان به ضریب رسانش پایین، کمی اشتعال‌پذیر و ناسازگاری با محفظه پلاستیکی اشاره کرد، این اشکالات با کمی تغییر در واکس پارافین و واحد ذخیره برطرف می‌شود. در جدول (۱-۱) لیستی از پارافین های منتخب با نقطه ذوب و گرمای نهان ارائه شده است. پارافین‌ها از نظر پیشنهاد برای طرحها به سه دسته (I) خوب، (II) متوسط، (III) ضعیف دسته‌بندی شده‌اند.

جدول ۱-۱ نقطه ذوب و گرمای نهان پارافین‌ها

| No. of carbon atoms | Melting point (°C) | Latent heat of fusion (kJ/kg) | Group |
|---------------------|--------------------|-------------------------------|-------|
| 14 | 5.5 | 228 | I |
| 15 | 10 | 205 | II |
| 16 | 16.7 | 237.1 | I |
| 17 | 21.7 | 213 | II |
| 18 | 28.0 | 244 | I |
| 19 | 32.0 | 222 | II |
| 20 | 36.7 | 246 | I |
| 21 | 40.2 | 200 | II |
| 22 | 44.0 | 249 | II |
| 23 | 47.5 | 232 | II |
| 24 | 50.6 | 255 | II |
| 25 | 49.4 | 238 | II |
| 26 | 56.3 | 256 | II |
| 27 | 58.8 | 236 | II |
| 28 | 61.6 | 253 | II |
| 29 | 63.4 | 240 | II |
| 30 | 65.4 | 251 | II |
| 31 | 68.0 | 242 | II |
| 32 | 69.5 | 170 | II |
| 33 | 73.9 | 268 | II |
| 34 | 75.9 | 269 | II |

۱-۷-۲ غیر پارافین‌ها

غیرپارافین‌های آلی شامل تعداد بیشماری مواد با خواص متغیر هستند. برخی محققین، تحقیق وسیعی بر روی مواد آلی انجام داده‌اند و سرانجام تعدادی از استرها^۱، اسیدهای چرب^۲، الکل^۳ و گلیکول^۴ را برای ذخیره انرژی مناسب دانستند. برخی خصوصیات این مواد عبارتند از: گرمای نهان بالا، اشتعال‌پذیر، ضریب رسانش پایین، نقطه اشتعال پایین، مقدار سمی بودن مختلف و ناسازگاری در دماهای بالا. جدول (۱-۲) برخی از غیرپارافین‌های آلی را ارائه کرده است.

¹ Esters² Fatty acids³ Alcohol⁴ Golycol

جدول ۱-۲- نقطه ذوب و گرمای نهان غیر پارافین‌ها

| Material | Melting point (°C) | Latent heat (kJ/kg) | Group |
|------------------------|--------------------|---------------------|-------|
| Formic acid | 7.8 | 247 | III |
| Caprilic acid | 16.3 | 149 | — |
| Glycerin | 17.9 | 198.7 | III |
| D-Lactic acid | 26 | 184 | I |
| Methyl palmitate | 29 | 205 | II |
| Camphenilone | 39 | 205 | II |
| Docosyl bromide | 40 | 201 | II |
| Caprylone | 40 | 259 | II |
| Phenol | 41 | 120 | III |
| Heptadecanone | 41 | 201 | II |
| 1-Cyclohexyloctadecane | 41 | 218 | II |
| 4-Heptadecanone | 41 | 197 | II |
| p-Joluidine | 43.3 | 167 | — |
| Cyanamide | 44 | 209 | II |
| Methyl eicosanate | 45 | 230 | II |
| 3-Heptadecanone | 48 | 218 | II |
| 2-Heptadecanone | 48 | 218 | II |
| Hydrocinnamic acid | 48.0 | 118 | — |
| Cetyl alcohol | 49.3 | 141 | — |
| α-Nephthylamine | 50.0 | 93 | — |
| Camphene | 50 | 238 | III |
| O-Nitroaniline | 50.0 | 93 | — |
| 9-Heptadecanone | 51 | 213 | II |
| Thymol | 51.5 | 115 | — |
| Methyl behenate | 52 | 234 | II |
| Diphenyl amine | 52.9 | 107 | — |
| p-Dichlorobenzene | 53.1 | 121 | — |

۱-۷-۲ مواد تغییر فاز دهنده غیر آلی

مواد مواد غیر آلی به هیدراتهای نمک و فلزات تقسیم بندی می‌شوند. ترکیبات غیر آلی گرمای نهان بالایی در واحد جرم و حجم دارند، از نظر هزینه، ارزان قیمت هستند و در مقایسه با ترکیبات آلی اشتعال ناپذیرند. به هر حال این مواد دارای مشکلات تجزیه و فوق تبرید (که بر روی خواص تغییر فاز تأثیر دارند) می‌باشند.

۱-۷-۲-۱ هیدراتهای نمک

فرمول عمومی هیدراتهای نمک به صورت $AB \cdot nH_2O$ می‌باشد. انتقال فاز جامد- مایع هیدراتهای نمک، در واقع آب زدایی از این ماده است. هیدراتهای نمک گروه بسیار مهمی از مواد تغییر فاز دهنده هستند که دارای خصوصیات زیر می‌باشند: گرمای نهان بالا در واحد حجم، رسانش حرارتی نسبتاً بالا، تغییرات کم حجم

در هنگام ذوب، کمی سمی، ذوب متجانس، اختلاف چگالی آب و ماده ترکیبی با آن (که باعث ته نشین شدن در انتهای محفظه می شود) و تشکیل هسته ضعیف که باعث فوق تبرید می شود. جدول (۳-۱) لیستی از هیدراتهای نمک را ارائه می کند.

جدول ۳-۱ - نقطه ذوب و گرمای نهان هیدراتهای نمک

| Material | Melting point (°C) | Latent heat (kJ/kg) | Group |
|-----------------------------|--------------------|---------------------|-------|
| $K_2HPO_4 \cdot 6H_2O$ | 14.0 | 109 | II |
| $FeBr_3 \cdot 6H_2O$ | 21.0 | 105 | II |
| $Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ | 25.5 | 148 | II |
| $FeBr_3 \cdot 6H_2O$ | 27.0 | 105 | II |
| $CaCl_2 \cdot 12H_2O$ | 29.8 | 174 | I |
| $LiNO_3 \cdot 2H_2O$ | 30.0 | 296 | I |
| $LiNO_3 \cdot 3H_2O$ | 30 | 189 | I |
| $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$ | 32.0 | 267 | II |
| $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ | 32.4 | 241 | II |
| $KFe(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ | 33 | 173 | I |
| $CaBr_2 \cdot 6H_2O$ | 34 | 138 | II |
| $LiBr_2 \cdot 2H_2O$ | 34 | 124 | I |
| $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ | 36.1 | 134 | III |
| $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ | 37.0 | 223 | I |
| $Mn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ | 37.1 | 115 | II |
| $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ | 40.0 | 279 | II |
| $CoSO_4 \cdot 7H_2O$ | 40.7 | 170 | I |
| $KF \cdot 2H_2O$ | 42 | 162 | III |
| $MgI_2 \cdot 8H_2O$ | 42 | 133 | III |
| $CaI_2 \cdot 6H_2O$ | 42 | 162 | III |
| $K_2HPO_4 \cdot 7H_2O$ | 45.0 | 145 | II |
| $Zn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ | 45 | 110 | III |
| $Mg(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ | 47.0 | 142 | II |
| $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ | 47.0 | 153 | I |
| $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ | 47 | 155 | I |
| $Na_2SiO_3 \cdot 4H_2O$ | 48 | 168 | II |
| $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$ | 48 | 99 | II |
| $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ | 48.5 | 210 | II |
| $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ | 48.5 | 202 | II |
| $Ca(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ | 51 | 104 | I |
| $Zn(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$ | 55 | 68 | III |
| $FeCl_3 \cdot 2H_2O$ | 56 | 90 | I |
| $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ | 57.0 | 169 | II |
| $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ | 58.0 | 151 | II |
| $MgCl_2 \cdot 4H_2O$ | 58.0 | 178 | II |
| $CH_3COONa \cdot 3H_2O$ | 58.0 | 265 | II |
| $Fe(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ | 60.5 | 126 | - |
| $NaAl(SO_4)_2 \cdot 10H_2O$ | 61.0 | 181 | I |
| $NaOH \cdot H_2O$ | 64.3 | 273 | I |
| $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$ | 65.0 | 190 | - |
| $LiCH_3COO \cdot 2H_2O$ | 70 | 150 | II |
| $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ | 72 | 155 | I |
| $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$ | 78 | 265 | II |
| $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ | 89.9 | 167 | II |
| $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ | 91 | 184 | II |
| $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ | 117 | 167 | I |

۱-۷-۲-۲ فلزات

این دسته از مواد شامل فلزات با ذوب پایین و فلزات اوتکتیک می شود. این فلزات به دلیل مشکل وزن، در تکنولوژی مواد تغییر فاز دهنده چندان جدی گرفته نشده اند. گرمای نهان بالا در واحد حجم و رسانش حرارتی بالا از خصوصیات این مواد است. در جدول (۴-۱) لیستی از این مواد ارائه شده است.

جدول ۱-۴- نقطه ذوب و گرمای نهان فلزات

| Material | Melting point (°C) | Latent heat (kJ/kg) | Group |
|-----------------------------------|--------------------|---------------------|-------|
| Gallium-gallium antimony eutectic | 29.8 | — | — |
| Gallium | 30.0 | 80.3 | I |
| Cerrolow eutectic | 58 | 90.9 | — |
| Bi-Cd-In eutectic | 61 | 25 | — |
| Cerrobend eutectic | 70 | 32.6 | I |
| Bi-Pb-In eutectic | 70 | 29 | — |
| Bi-In eutectic | 72 | 25 | — |
| Bi-Pb-tin eutectic | 96 | — | — |
| Bi-Pb eutectic | 125 | — | — |

۱-۷-۳ اوتکتیک‌ها

اوتکتیک ترکیبی از دو یا چند عنصر با حداقل ذوب می‌باشد. اوتکتیک‌ها تقریباً همیشه بدون آنکه تجزیه شوند فرآیند ذوب و انجماد را طی می‌کنند. جدول (۱-۵) لیستی از اوتکتیک‌ها را ارائه می‌کند.

جدول ۱-۵- نقطه ذوب و گرمای نهان اوتکتیک‌ها

| Material | Composition (wt.%) | Melting point (°C) | Latent heat (kJ/kg) | Group |
|---|--------------------|--------------------|---------------------|-------|
| CaCl ₂ ·6H ₂ O + CaBr ₂ ·6H ₂ O | 45 + 55 | 14.7 | 140 | — |
| Triethylolethane + water + urea | 38.5 + 31.5 + 30 | 13.4 | 160 | I |
| C ₁₄ H ₂₈ O ₂ + C ₁₀ H ₂₀ O ₂ | 34 + 66 | 24 | 147.7 | — |
| CaCl ₂ + MgCl ₂ ·6H ₂ O | 50 + 50 | 25 | 95 | II |
| CH ₃ CONH ₂ + NH ₂ CONH ₂ | 50 + 50 | 27 | 163 | II |
| Triethylolethane + urea | 62.5 + 37.5 | 29.8 | 218 | I |
| Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O + Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O | 47 + 53 | 30 | 136 | — |
| CH ₃ COONa·3H ₂ O + NH ₂ CONH ₂ | 40 + 60 | 30 | 200.5 | I |
| NH ₂ CONH ₂ + NH ₄ NO ₃ | 53 + 47 | 46 | 95 | II |
| Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + NH ₄ NO ₃ | 61.5 + 38.5 | 52 | 125.5 | I |
| Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + MgCl ₂ ·6H ₂ O | 58.7 + 41.3 | 59 | 132.2 | I |
| Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + MgCl ₂ ·6H ₂ O | 50 + 50 | 59.1 | 144 | — |
| Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + Al(NO ₃) ₃ ·9H ₂ O | 53 + 47 | 61 | 148 | — |
| CH ₃ CONH ₂ + C ₁₇ H ₃₅ COOH | 50 + 50 | 65 | 218 | — |
| Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + MgBr ₂ ·6H ₂ O | 59 + 41 | 66 | 168 | I |
| Napthalene + benzoic acid | 67.1 + 32.9 | 67 | 123.4 | — |
| NH ₂ CONH ₂ + NH ₄ Br | 66.6 + 33.4 | 76 | 151 | II |
| LiNO ₃ + NH ₄ NO ₃ + NaNO ₃ | 25 + 65 + 10 | 80.5 | 113 | — |
| LiNO ₃ + NH ₄ NO ₃ + KNO ₃ | 26.4 + 58.7 + 14.9 | 81.5 | 116 | — |
| LiNO ₃ + NH ₄ NO ₃ + NH ₄ Cl | 27 + 68 + 5 | 81.6 | 108 | — |

۸-۱ کپسوله کردن مواد تغییر فاز دهنده

مواد تغییر فاز دهنده به دو روش کپسوله می‌شوند: ماکرو کپسوله^۱ و میکرو کپسوله^۲. در روش اول مواد تغییر فاز دهنده در لوله، کیسه، کره، صفحات و یا اجزای ساختمان بسته‌بندی می‌شود. ماکرو کپسوله‌ها دارای معایب، خرابی، نیاز به محافظت، ضریب انتقال حرارت ضعیف در حالت جامد و هزینه بالا می‌باشند. در روش دوم ذرات ریز مواد تغییر فاز دهنده با فیلم پلیمری با وزن مولکولی بالا (که بایستی سازگار با ساختار ماده و مواد تغییر فاز دهنده باشد) مخلوط می‌شود. میکرو کپسوله‌ها معایب ماکرو کپسوله‌ها را تا حد زیادی بر طرف کرده‌اند.

۹-۱ کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در دیگر زمینه‌ها

□ کاربرد در زمینه مواد غذایی

حفظ دمای غذا در فاصله بین تولید و سرو کردن، از مشکلات عمده تولیدکنندگان مواد غذایی است که کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در این زمینه مشکلات عمده حفظ دمای غذا را تا لحظه تحویل حل می‌نماید.

□ کاربرد در زمینه پزشکی - دارویی

در روزهای گرم تابستانی، هنگامی که ذخیره خون در بیمارستان به شدت کاهش می‌یابد، خیلی از بیمارستانها نیاز به تهیه خون از بانکهای خون دوردست دارند. در حال حاضر انتقال خونهای مورد نیاز توسط سیستمهای بسیار مجهز و پیچیده‌ای که باعث ایجاد حفظ دمای خون در محدوده خاصی می‌شوند، حمل‌ونقل می‌شوند. قیمت تمام شده این سیستم بسیار بالا می‌باشد و در صورت یخ زدگی یا گرمایش بیش از حد، خون فاسد و غیرقابل استفاده می‌شود. با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده با محدود کردن دمای خون در محدوده مجاز، می‌توان با هزینه کم عمل انتقال خون از بانک به بیمارستان را صورت داد.

□ خنک‌سازی کامپیوترهای لپ‌تاپ

¹ Macro-encapsulation

² Micro-encapsulatio

□ خنک‌سازی فضای داخلی کلاه کاسکت

□ کاربردهای فضایی در خارج جو زمین

۱۰-۱ تکنیک‌های افزایش کارایی سیستم ذخیره‌ساز انرژی

بمنظور ارتقای کیفیت یک سیستم ذخیره انرژی، تکنیک‌های متنوع و گوناگونی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تکنیک‌ها عبارتند از:

□ افزایش هدایت حرارتی PCM

□ میکروکپسوله کردن PCM

۱-۱۰-۱ افزایش هدایت حرارتی PCM

اگرچه Pcm‌های مرسوم معمولاً دارای دانسیته بالایی هستند، اما نرخ پایین ذوب و انجماد، پتانسیل سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی را در کاربردهای خاص کاهش می‌دهد. علت این امر آنست که تقریباً همه PCM‌های مرسوم و متداول دارای هدایت حرارتی پایین می‌باشند. اساساً هدایت حرارتی PCM‌ها می‌تواند با بکارگیری مواد با ضریب هدایت بالا، افزایش یابد. این افزایش ضریب هدایت حرارتی با افزودن مواد با هدایت بالا به روش‌های مختلفی می‌تواند صورت پذیرد. این روش‌ها عبارتند از:

□ اشباع سازی مواد متخلخل با هدایت حرارتی بالا در PCM

□ پخش نمودن ذرات با هدایت حرارتی بالا در PCM

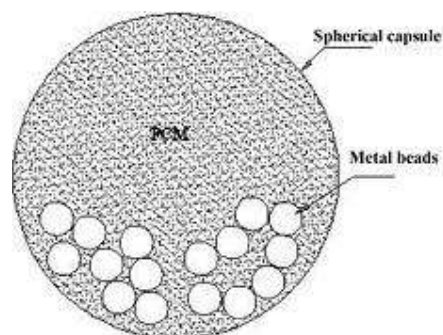
□ جاسازی ترکیبات و ساختارهای فلزی در PCM

□ استفاده از مواد با ضریب هدایت بالا و دانسیته پایین

استفاده از کامپوزیت گرافیتی در PCM اگرچه منجر به افزایش کارایی سیستم می‌شود ولی به نوبه خود دارای محدودیت‌هایی است که پژوهشگران را بر آن داشت که بدنبال راه حل‌های دیگری نیز باشد. این

محدودیت‌ها مربوط به پروسه تولید این کامپوزیت‌های گرافیتی است که زمان بر و نیز هزینه‌بر می‌باشد. از این‌رو بعضی از محققین در چند سال اخیر به دنبال راه حلی برای این مشکل بوده‌اند. آنها دریافتند که با افزودن ذرات با هدایت حرارتی بالا در مقیاس میکرو و نانو در PCM، خواص ترمودینامیکی PCM ارتقا یافته و منجر به افزایش راندمان سیستم می‌شود. که در این پژوهش به بررسی این اثر پرداخته شده است. جاسازی ساختار فلزی در محفظه PCM بعنوان تکنیکی برای افزایش هدایت حرارتی ماده تغییر فاز دهنده مطرح می‌باشد. در این تکنیک از یک کره فلزی و یا لوله استوانه‌ای (و یا سایر اشکال) استفاده شده و با قرار دادن آن در محفظه PCM مشاهده می‌گردد که زمان تغییر فاز به طرز چشمگیری کاهش می‌یابد و در نتیجه بازده سیستم افزایش قابل توجهی خواهد یافت (شکل ۱-۲). ذرات و ترکیبات فلزی به علت دانسیته بالا ممکن است به پایین سیستم ته‌نشین شده و نیز موجب افزایش قابل توجه وزن سیستم می‌شود. علاوه بر آن، تحقیقات محققین نشان داده است که همه فلزات با کلیه PCM‌ها سازگار نیستند. بعنوان مثال، ذرات آلومینیوم با پارافین سازگار بوده، در حالی که نیکل با پارافین سازگاری ندارد. همین مسائل موجب گردید که محققان بدنبال موادی با دانسیته پایین و هدایت حرارتی بالا باشند که با همه PCM‌ها سازگار باشد.

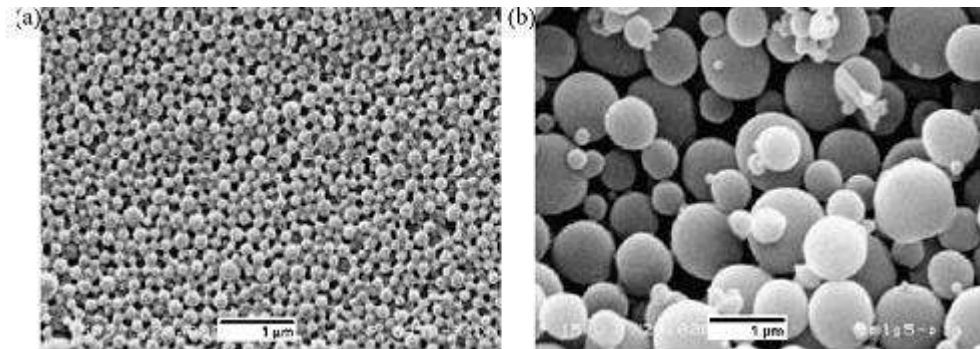
از آنجایی که دانسیته فیبرهای کربنی از فلزات کمتر بوده و هدایت حرارتی آن تقریباً معادل هدایت حرارتی مس و آلومینیوم است، استفاده از آن بعنوان راه‌حلی جالب توجه برای افزایش کارایی سیستم ذخیره‌کننده انرژی پیشنهاد می‌گردد. علاوه بر آن فیبرهای کربنی دارای مقاومت به خوردگی بوده و در نتیجه قابلیت سازگاری با اکثر PCM‌ها را دارا می‌باشد. نکته حائز اهمیت در استفاده از فیبرهای کربنی در سیستم توزیع یکنواخت ذرات فیبرکربن می‌باشد. مطالعات نشان می‌دهد سیستم‌هایی که در آن ذرات فیبر کربن به صورت یکنواخت در PCM توزیع شده، کارایی به مراتب بیشتری نسبت به حالتی که توزیع، تصادفی و غیریکنواخت باشد از خود نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲- ساختارهای فلزی مورد استفاده در سیستم ذخیره‌سازی انرژی

۱-۱۰-۲ میکروکپسوله کردن PCM

یکی از راهها برای افزایش نرخ انتقال حرارت بین PCM و چشمه یا چاه حرارتی، استفاده از PCM های کپسوله شده می‌باشد. همانگونه که از اسم این مواد پیداست، PCM های میکروکپسوله در واقع PCM هایی هستند که به حالت مایع یا جامد و در ابعاد میکرو توسط پوسته و غشای نازکی محصور گشته است. این پوسته‌ها می‌تواند از جنس بسیاری از مواد از جمله پلیمرهای طبیعی و مصنوعی باشد. میکروکپسوله کردن PCM ها می‌تواند از دو طریق شیمیایی مانند روش توده‌ای، و فیزیکی مانند روش اسپری خشک انجام پذیرد. (شکل ۱-۳) میکروکپسوله‌های بدست آمده از روش‌های حرارتی کارایی و عملکرد بهتری نسبت به PCM های رایج از خود نشان می‌دهند. علت این امر آنست که ذرات کوچک PCM در این حالت سطح انتقال حرارت بیشتری در واحد حجم و در نتیجه نرخ انتقال حرارت بیشتری دارند. علاوه بر این، PCM های میکروکپسوله شده خواص ممتاز دیگری را نیز دارا می‌باشند که آن، واکنش‌پذیری بسیار پایین PCM با مواد جداره محفظه و توانایی تحمل تغییر حجم در خلال تغییر فاز می‌باشد



شکل ۱-۳: نمونه‌ای از میکروکپسوله PCM، (a) روش اسپری خشک، (b) روش توده‌ای

فصل ۲:

مروری بر کارهای گذشته

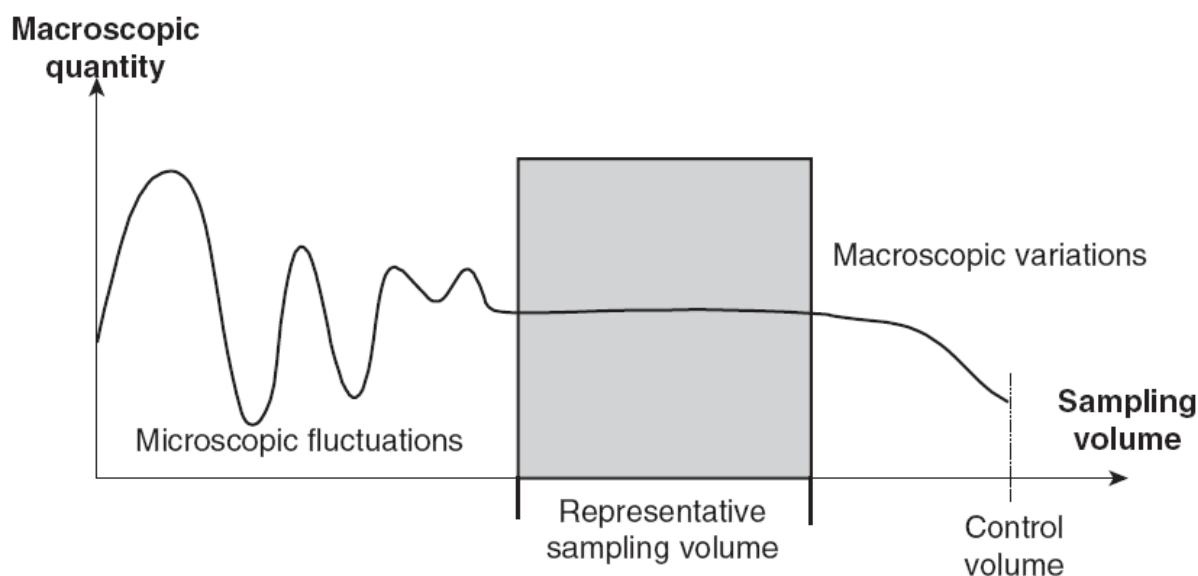
۲-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا به معرفی روش‌های حل جریان نانوسیال و معرفی عدد نادسن به عنوان معیاری برای تشخیص پیوسته و یا ناپیوسته بودن نانوسیال معرفی می‌گردد. سپس به بررسی پارامترهای مختلف بر انتقال حرارت در نانوسیالات و معرفی انواع نانو ذرات می‌پردازیم. در ادامه به معرفی روش‌های عددی مدلسازی جریان نانوسیال همراه با مروری بر تحقیقات تجربی و عددی انجام شده در این زمینه پرداخته خواهد شد.

۲-۲- روش‌های مدلسازی جریان نانوسیال

بطور کل جریان سیالات را به دو صورت لاگرانژی و اویلری می‌توان حل نمود. در حل اویلری سیال پیوسته در نظر گرفته شده و در نتیجه معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس^۱ در آن حاکم می‌باشد. در این حالت می‌توان محیط را به حجم‌های کنترل ماکروسکوپی فرضی تقسیم نمود که خواص مکانیکی و ترمودینامیکی سیال در هر حجم کنترل ثابت فرض شده و از هر حجم کنترل به حجم کنترل دیگر تغییر می‌کند. بنابراین معادلات پیوستگی و ممنتوم ناویراستوکس در هر حجم کنترل صادق می‌باشد. در این حالت به دلیل نوسانات کم ملکولی خواص مکانیکی و ترمودینامیکی سیال در هر حجم کنترل به صورت میانگین خواص ملکول‌های آن حجم کنترل تعریف می‌شود. به عبارت دیگر برای برقراری فرض پیوستگی نوسانات میکروسکوپی یا ملکولی سیال نباید مهم‌تر از مقادیر متوسط‌گیری شده باشند. بنابراین حجم کنترل فرضی باید به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد تا بتوان نوسانات میکروسکوپی را نادیده گرفت و از طرفی باید به اندازه‌ی کافی کوچک باشد تا از تغییرات ماکروسکوپی خارج نشود (شکل ۲-۱). در شکل (۲-۱) در حجم کنترل مشخص شده بدلیل محدود بودن نوسانات مولکولی در حجم کنترل، می‌توان سیال را پیوسته در نظر گرفت.

¹ Navier - Stokes



شکل ۲-۱- نمونه‌ای از حجم کنترل (ناحیه سایه‌دار) که در آن فرض پیوستگی برقرار است

در حل لاگرانژی به دلیل نوسانات زیاد ملکولی سیال نمی‌توان محیط را پیوسته در نظر گرفت در این حالت نمی‌توان یک حجم کنترل فرضی که متشکل از هزاران ملکول سیال است در نظر گرفت بلکه هر ملکول خواص مکانیکی و ترمودینامیکی جداگانه‌ای دارد و در نتیجه معادلات باید برای هر ملکول بطور جداگانه نوشته شود. به عبارتی هر ملکول یک حجم کنترل بوده و بنابراین باید معادلات را برای هر ملکول حل نمود. بدیهی است که حل معادلات پیوستگی (حل اویلری) بسیار ساده‌تر از حل ملکولی (حل لاگرانژی) است. به عنوان مثال برای جریان هوا درون یک کانال در مقیاس ماکروسکوپی برای حالتی که سرعت ماکروسکوپی از ۰ تا ۱ m/s تغییر می‌کند، می‌توان جریان را موازی با محور کانال فرض کرد اما در این حالت سرعت ملکول-های سیال از مرتبه‌ی ۱ km/s است که در هر جهتی ممکن است باشد.

هر حجم کنترل در حالت ماکروسکوپی شامل هزاران ملکول سیال است. در این حالت برای هر حجم کنترل فقط یک دسته معادله پیوستگی، ممنتوم و انرژی استفاده خواهد شد اما در حالت میکروسکوپی برای حل جریان به تعداد ملکول‌های سیال معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی نیاز است. با افزایش تعداد معادلات قدرت رایانه مورد نیاز برای حل و همین‌طور زمان محاسبه بالا می‌رود بطوریکه حل میکروسکوپی با استفاده

از روش‌های Cfd^1 هزینه و تکنولوژی بالایی نیاز دارد و نیازمند ابر رایانه‌های بسیار پرقدرتی می‌باشد. هر چند روش‌های جدیدی مانند Lbm^2 بوجود آمدند که قادر به حل میکروسکوپی جریان می‌باشند اما این روش‌ها هنوز دارای نواقص زیادی هستند و توانایی حل بسیاری از جریان‌ها را ندارند. برای تشخیص پیوسته یا ناپیوسته بودن جریان معیاری به نام عدد نادسن³ وجود دارد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K_n = \frac{\eta}{L} \quad (۱-۲)$$

در عبارت فوق، η متوسط فاصله بین ملکول‌های سیال و L طول مشخصه‌ی هندسه مورد تحلیل است. رژیم جریان بر اساس عدد نادسن به چهار دسته تقسیم خواهد شد. این چهار دسته عبارتند از:

۱- برای $K_n < 10^{-3}$ ، در این حالت جریان پیوسته بوده و شرط مرزی عدم لغزش⁴ برقرار می‌باشد. در

این حالت استفاده از معادلات ناویراستوکس قابل قبول می‌باشد

۲- برای $10^{-3} < K_n < 10^{-1}$ ، در این حالت نیز جریان پیوسته بوده اما شرط مرزی عدم لغزش برقرار

نیست و جریان از نوع جریان لغزشی می‌باشد. در این حالت نیز استفاده از معادلات ناویراستوکس قابل قبول می‌باشد.

۳- برای $10^{-1} < K_n < 10$ ، در این حالت جریان از نوع جریان انتقالی می‌باشد. در این نوع از جریان‌ها

استفاده از معادلات ناویراستوکس چندان قابل قبول نبوده و دارای خطا می‌باشد. هر چند برخوردهای بین مولکولی سیال هنوز چندان قابل اغماض نبوده و باید به حساب آید.

۴- برای $K_n > 10$ ، در این حالت جریان یک جریان مولکولی است. در این حالت برخوردهای بین

مولکولی سیال در مقایسه با برخوردهای بین ملکول‌های سیال و دیواره ناچیز است.

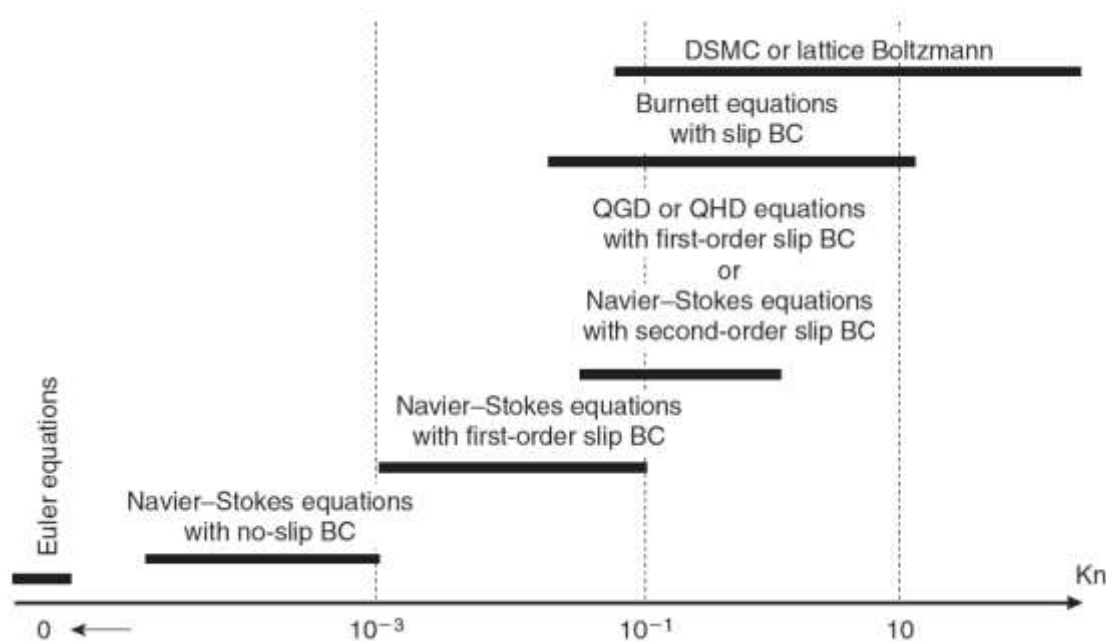
¹ Computational Fluid Dynamic

² Lattice Boltzmann Method

³ Knudsen Number

⁴ No-slip Condition

در شکل (۲-۲) مدل‌های جریان مربوط به عدد نادسن بطور خلاصه ارائه گردیده است.



شکل ۲-۲- رژیم‌های جریان گاز بر پایه‌ی عدد نادسن.

۲-۳- منطق وجودی نانو سیالات

بررسی دقیق خصوصیات گرمایی همه مایعات خنک کننده ای که امروزه به عنوان سیال انتقال گرما استفاده می شوند، رسانایی گرمایی ضعیفی را نشان می دهند (بجز فلزات مایع که در اکثر محدوده های دمایی قابل استفاده نیستند). برای مثال آب در هدایت گرمایی ۳ بار ضعیفتر از مس است مشخص است که همه تلاشها برای افزایش انتقال گرما بوسیله آشفته سازی، افزایش سطح و...، بوسیله محدودیت های ذاتی رسانایی گرمایی محدود می شود.

بنابراین می تواند منطقی باشد که تلاشهایی برای افزایش رفتار رسانایی گرمایی سیالات خنک کننده انجام شود. استفاده از مخلوطهایی معلق از جامدها یکی از راههایی است که بیش از یک قرن گذشته به ذهن آمده است. ماکسول (۱) پایه گذار این زمینه بود که تئوری پایه را برای محاسبه رسانایی گرمایی موثر مخلوط های معلق ارائه داد. تلاشهای او بوسیله مطالعات تجربی و تئوری زیادی مانند کارهای همپلتون و کراسر (۲) و واسپ (۳)، پیکری شد. این مدلها برای پیش بینی رسانایی گرمایی تعلیق ها بسیار خوب کار می کنند. با این

حال، همه این مطالعات به تعلیق ذرات در ابعاد میکرو و میلی محدود می شوند و یک چنین تعلیق هایی نارسایی های زیر را بدنبال دارند:

۱- ذرات به سرعت نشست می کنند، تشکیل لایه ای بر روی سطح می دهند و ظرفیت انتقال حرارت سیال را کاهش می دهند.

۲- اگر نرخ چرخش سیال افزایش یابد، ته نشین شدن کاهش می یابد ولی خوردگی ابزارهای انتقال گرما، لوله ها و... به سرعت افزایش می یابد.

۳- با اندازه بزرگ ذرات تمایل به گرفتگی در مسیر جریان کانال افزایش می یابد.

۴- افت فشار در سیال بطور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد.

بنابراین مسیر بوجود آمدن ذرات معلق درون سیال به خوبی مشخص شد ولی در کل گزینه قابل قبولی برای کاربردهای انتقال گرما نمی باشد. تکنولوژی مواد جدید فرصتی را فراهم کرده است تا ذراتی در ابعاد نانومتری را تولید کنیم که کاملاً در خصوصیات اپتیکی، الکتریکی، گرمایی و مکانیکی با مواد اولیه متفاوت هستند.

تا اینکه ابتدا ماسودا و همکاران (۴) و سپس چویی و همکارانش (۵) ایده نانوسیال^۱ را برای اولین بار مطرح نمودند و انقلاب بزرگی در زمینه انتقال حرارت در سیالات پدید آوردند. به منظور افزایش انتقال گرمای جابجایی، محققان ذرات در ابعاد نانو (ذرات جامد کوچکتر از ۱۰۰nm) را به سیال اضافه کردند.

این تکنیک افزایش قبلاً با میکروذرات معلق در سیال برای افزایش انتقال گرما در میکرو و میلی کانالها استفاده شده است. نانو ذرات نسبت سطح به حجم ۱۰۰۰ برابر بزرگتر از میکرو ذرات دارند و گرما را بسیار مؤثرتر می توانند انتقال دهند. چویی و همکارانش (۵) نشان دادند که اضافه کردن نانو ذرات، به سیال پایه می تواند نرخ انتقال گرمای سیال را ۲ برابر کند، زیرا این ذرات رسانایی گرمایی بیشتری نسبت به سیال پایه دارند. چیزی که باعث جذابیت نانو ذرات به عنوان کاندید احتمالی برای درست کردن مخلوطی از ذره ها با

¹ Nano Fluid

سیالات می شود، این است که آنها مساحت سطح زیادی دارند، مومنتم ذرات کم است، و قابلیت حرکت بالایی دارند.

وقتی ذرات بطور مناسب پخش شده باشند، این خصوصیات نانو سیالات انتظار می رود که برتری های زیر را داشته باشد:

(۱) رسانایی گرمایی بالاتر: مساحت سطح بیشتر نانو ذرات اجازه انتقال گرمای بیشتری را می دهد. ذرات ریزتر از 20 nm ، 20% اتم های خود را بر روی سطح خود دارند، که آنها را هر لحظه برای تبادل حرارت در دسترس دارند. مزیت دیگر در حرکت بودن ذرات است که می تواند مربوط به اندازه ریز آنها باشد، که می تواند میکرو جابجایی هایی را بوجود آورند و در نتیجه انتقال گرما افزایش یابد (۶).

(۲) پایداری: از آنجائیکه ذرات ریز هستند وزن کمتری دارند و احتمال ته نشین شدن کمتر می شود. همین کاهش ته نشینی باعث غلبه بر یکی از ضعفهای اصلی مخلوط های معلق می شود (رسوب کردن ذرات) و نانو سیالات را پایدارتر می کند.

(۳) خنک کاری میکرو کانالها بدون گرفتگی: نانو سیالات تنها یک محیط بهتر برای انتقال گرمای معمول نیستند، آنها همچنین برای کاربردهای میکرو کانال در جایی که با بارهای گرمایی بالایی مواجه هستند، مناسب هستند. ترکیب میکرو کانالها و نانو سیالات هم سیالی بار رسانایی بالا و هم سطح انتقال گرمای بزرگتری را فراهم می کند. نانو ذرات، که فقط چند صد یا چند هزار اتم هستند، بسیار کوچکتر از میکرو کانالها بوده و باعث گرفتگی نمی شوند.

(۴) کاهش احتمال خوردگی: نانو ذرات بسیار ریز هستند و ممنتومی که می توانند به یک دیوار صلب وارد کنند بسیار کمتر است. این ممنتوم کاهش یافته شانس خوردگی اجزا را کاهش می دهد مانند مبدل های حرارتی و خطوط لوله ها و پمپ ها.

نانو ذرات مورد استفاده به سه دسته تقسیم می شوند، ذرات سرامیکی، ذرات فلزی خالص و نانو لوله های کربنی، که در ادامه در مورد آن بحث می کنیم.

ترکیبات مختلف این نانو ذرات و سیال هایی شامل آب، اتیلن گلیکول، روغن ها و تولوئن نانو سیالات مختلفی را به ما می دهد.

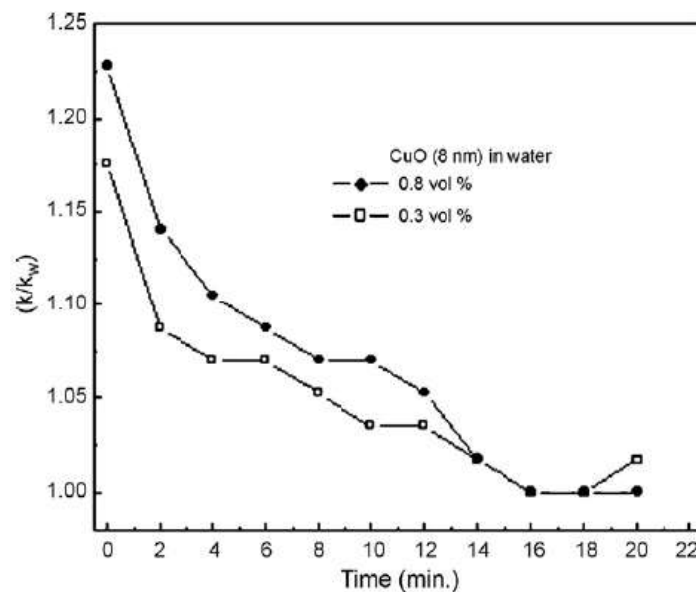
۲-۴- پارامترهای انتقال حرارت در نانوسیالات

افزایش انتقال حرارت در نانوسیالات به پارامترهای زیادی بستگی دارد که در این بخش هرکدام از آنها بطور مختصر توضیح داده خواهد شد .

۲-۴-۱- انباشتگی ذرات

نانوذرات در اثر نیروهای بین ملکولی مانند نیروی واندروالس تمایل به انباشتگی^۱ دارند (۷). کارتیکین و همکاران (۸) آزمایش های تجربی روی مخلوط اکسید مس-آب انجام دادند و نشان دادند که اندازه و خوشه شدن نانوذرات اثر مهمی روی رسانش حرارتی نانوسیال دارند. همچنین آنها نشان دادند که انباشتگی نانوذرات به زمان بستگی دارد و با گذشت زمان انباشتگی آنها افزایش می یابد در نتیجه رسانش حرارتی در نانوسیال کاهش می یابد. شکل (۲-۳) نشان می دهد که رسانش حرارتی در نانوسیال با افزایش زمان شدیداً کاهش می یابد و همچنین در شکل (۲-۴) انباشتگی نانوسیال با گذشت زمان به صورت میکروسکوپی نشان داده شده است. آنها نشان دادند که در این فاصله زمانی هیچگونه ته نشینی در نانوسیال اتفاق نیفتاده است. گروهی دیگر از دانشمندان نشان دادند که با افزایش مقدار نانوذرات جامد میزان انباشتگی به دلیل بزرگ شدن توده های نانوذرات و در نتیجه افزایش نیروهای واندروالس، افزایش می یابد. وانگ و همکاران (۹) ویسکوزیته ی مخلوط آلومینیوم - آب را اندازه گیری کرده و نشان داده اند که با افزایش انباشتگی نانوذرات ویسکوزیته نانوسیال نیز افزایش می یابد.

¹ Agglomeration



شکل ۳-۲- نمودار تغییرات ضریب رسانش حرارتی نسبت به زمان برای مخلوط آب اکسید مس [۸].

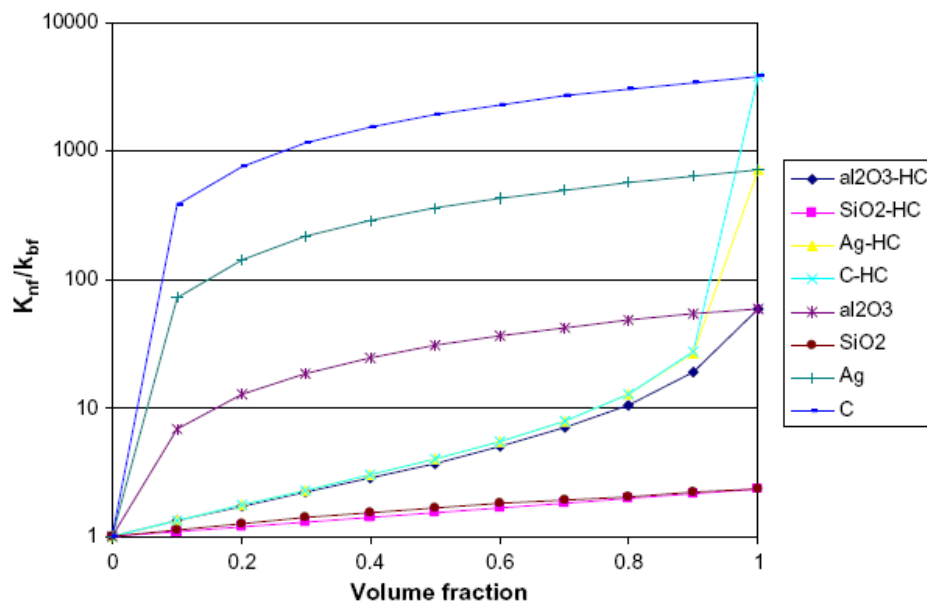


شکل ۴-۲- افزایش انباشتگی نانوذرات با افزایش زمان برای مخلوط آب اکسید مس ($\phi=0/1$) (الف) ۲۰ دقیقه (ب) ۶۰ دقیقه (ج) ۷۰ دقیقه [۸]

۲-۴-۲- نسبت حجمی ذرات نانو

ضریب رسانش حرارتی نانوسیال با افزایش نسبت حجمی^۱ نانوذرات افزایش می‌یابد (۸) شکل (۲-۵). اما افزایش زیاد ذرات نانو به سیال باعث ته‌نشینی ذرات نانو می‌شود. به همین دلیل هر چه نسبت ذرات نانو به سیال کمتر باشد، نانوسیال مطلوب‌تر خواهد بود (۱۰).

^۱-Volume Fraction



شکل ۲-۵- نمودار تغییرات ضریب رسانش حرارتی نسبت به نسبت حجمی ذرات نانو (۱۰)

۲-۴-۳- حرکت براونی

حرکت براونی^۱ (حرکت تصادفی ذرات نانو در سیال) نیز یکی دیگر از عوامل موثر بر افزایش ضریب رسانش حرارتی موثر در نانوسیال است (۱۱ و ۱۲). هر چه اندازه‌ی نانوذرات کوچکتر باشد حرکت براونی آن‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه ضریب رسانش حرارتی نیز افزایش می‌یابد و همین‌طور با افزایش اندازه نانوذرات حرکت براونی کاهش می‌یابد (۱۳).

۲-۴-۴- ترموفورسیس

مولکول‌هایی که در محیط گرم‌تر قرار دارند بدلیل بالا بودن انرژی مومنتوم بالاتر، با مولکول‌های مجاور برخورد می‌کنند. این امر موجب حرکت مولکول‌ها از محیط گرم‌تر به محیط سردتر و در نتیجه افزایش انتقال حرارت می‌شود. به این پدیده ترموفورسیس^۲ می‌گویند.

^۱ Brownian Motion

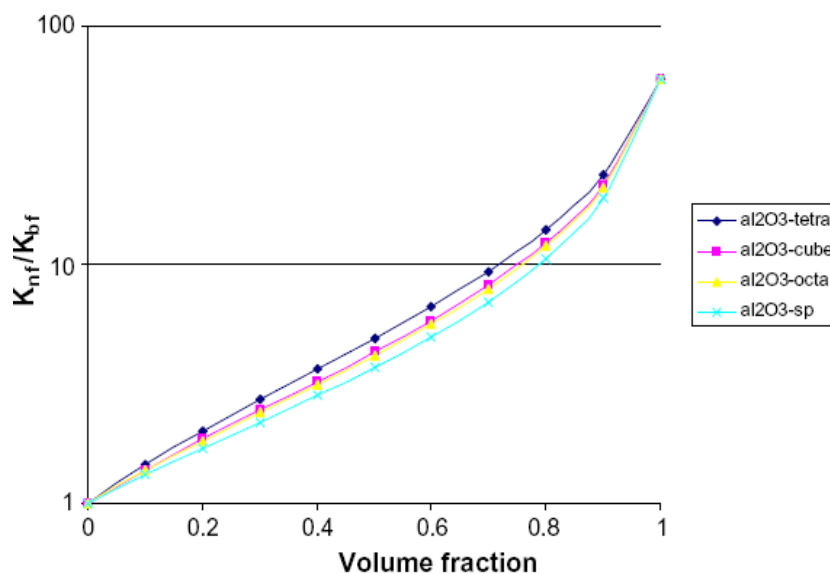
^۲ Thermophoresis

۲-۴-۵- اندازه نانوذرات

تحقیقات نشان داده‌اند که با کاهش اندازه نانوذرات ضریب رسانش حرارتی موثر نانوسیال افزایش می‌یابد (۱۲). این افزایش ضریب رسانش حرارتی به دلیل افزایش حرکت براونی نانوذرات و همچنین کاهش رسوب آن‌ها می‌باشد (۱۳).

۲-۴-۶- شکل نانوذرات

تحقیقات نشان داده‌اند که هر چه شکل نانوذرات ۱ چند وجهی تر باشد، ضریب رسانش حرارتی آن بیشتر است (۱۴). دلیل این امر افزایش نسبت سطح به حجم نانوذرات می‌باشد. هر چه این نسبت بزرگتر باشد ضریب رسانش حرارتی موثر بیشتر می‌باشد. شکل (۲-۵) نشان می‌دهد که ضریب رسانش حرارتی موثر مخلوط آب-اکسید آلومینیم با افزایش وجه‌های نانوذرات از کروی به شش وجهی، افزایش می‌یابد.

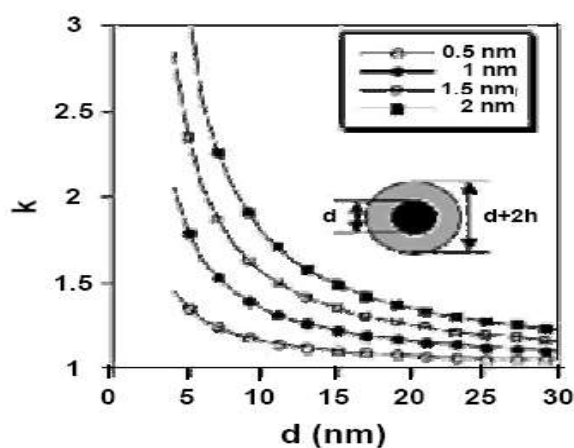


شکل ۲-۶- نمودار تغییرات ضریب رسانش حرارتی موثر نسبت به نسبت حجمی و اشکال متفاوت نانوذرات برای مخلوط آب - اکسید آلومینیم (۱۴).

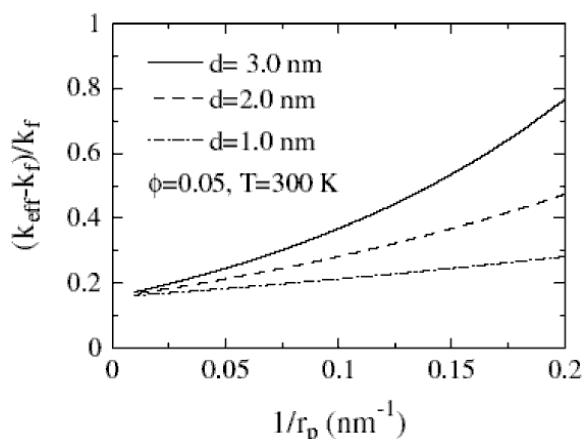
¹ Particle Shape

۲-۴-۷- ضخامت لایه سیال بین ذرات نانو

لایه سیال ۱ پیرامون ذرات نانو در نانوسیال نیز به افزایش انتقال حرارت کمک می‌کند. هر چند ضخامت و رسانش حرارتی این لایه ملکولی سیال هنوز مشخص نیست اما شکل لایه‌های ملکولی سیال محصور بین نانوذرات جامد توسط یو و همکاران (۱۵) مشخص شده است. رن و همکاران (۱۶) یک مدل تئوری برای مطالعه تغییرات رسانش حرارتی موثر نسبت به ملکول‌های سیال پیرامون ذرات نانو ارائه کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش ضخامت لایه سیال ضریب رسانش حرارتی نیز افزایش می‌یابد (شکل ۲-۷-الف). کبلینسکی و همکاران (۱۷) نیز روی اثر لایه سیال پیرامون نانوذرات بر ضریب رسانش حرارتی موثر نانوسیال تحقیقاتی انجام دادند. آن‌ها نیز نشان دادند که با افزایش لایه سیال پیرامون نانوذرات ضریب رسانش حرارتی موثر افزایش می‌یابد (شکل ۲-۷-ب). در این اشکال، d بیان کننده ضخامت لایه سیال و r_p بیان کننده شعاع نانوذرات است. شکل نشان می‌دهند که با افزایش سیال اطراف نانوذرات و یا کاهش شعاع ذرات نانو ضریب رسانش حرارتی افزایش می‌یابد.



(ب)



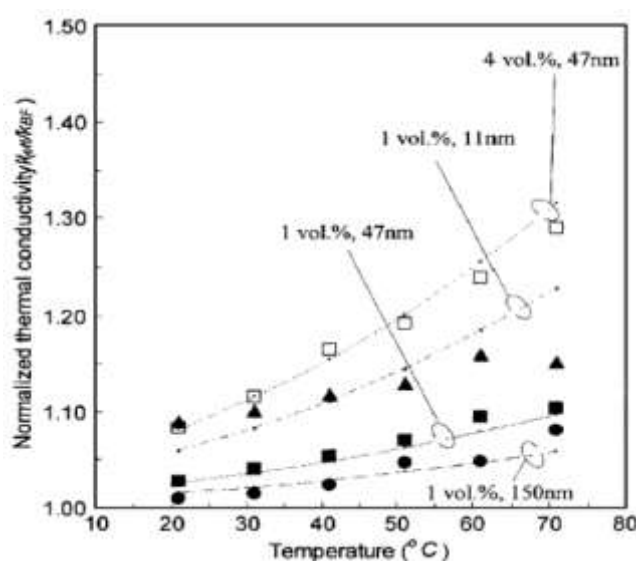
(الف)

شکل ۲-۷- نمودار تغییرات ضریب رسانش حرارتی موثر نسبت به ضخامت لایه سیال پیرامون نانوذرات (۱۶ و ۱۷).

¹ Liquid Layer

۲-۴-۸- دما

ضریب رسانش حرارتی موثر و حرکت براونی نانوسیال با دما افزایش می‌یابد. چوی و همکاران (۱۲) با انجام آزمایش تجربی روی مخلوط آلومینیوم-آب چگونگی تغییرات ضریب رسانش حرارتی با دما را نشان دادند. شکل (۲-۸) نشان می‌دهد که با افزایش دمای نانوسیال ضریب رسانش حرارتی نانوسیال نسبت به سیال پایه افزایش می‌یابد.



شکل ۲-۸- نمودار تغییرات ضریب رسانش حرارتی موثر نسبت به دما برای مخلوط آلومینیوم-آب (۱۲)

۲-۵- انواع نانو ذرات

نانو ذرات به سه دسته نانو سیالات سرامیکی، نانو سیالات فلزی و نانو سیالات حاوی نانو لوله های کربنی و پلیمری تقسیم می شود که به اختصار به معرفی آنها پرداخته می شود.

۲-۵-۱- نانو سیالات سرامیکی

نانو سیالات سرامیکی اولین نوعی بود که توسط گروه ¹ANL ساخته شد. اولین تحقیق در این زمینه اندازه گیری رسانایی سیالاتی بود که شامل ذرات Al_2O_3 و CuO در آب و اتیلن گلیکول بودند (۱۸). آنها از درصد حجمی ۱-۵٪ استفاده کردند و مشاهد شد وقتی اتیلن گلیکول استفاده می شود یک افزایش ۲۰٪ با

¹ -Argonne National Laboratory

نسبت حجمی ۴٪ CuO بدست می آید، افزایش رسانایی وقتی از آب استفاده شد کمتر بود یک افزایش ۱۲٪ با نسبت حجمی ۳/۵٪ CuO.

مدل ماکسول اصلی به صورت زیر است (۱):

$$\frac{K_{eff}}{K_f} = 1 + \frac{3 \left(\frac{K_p}{K_f} - 1 \right) \phi}{\left(\frac{K_p}{K_f} + 2 \right) - \left(\frac{K_p}{K_f} - 1 \right) \phi} \quad (2-2)$$

در هر دو مدل، K_{eff} : رسانایی گرمایی مؤثر، K_f : رسانایی گرمایی سیال، K_s : رسانایی گرمایی ذرات جامد، n : فاکتور ضریب شکل (برای کره ۳ و برای سیلندر ۶) و نسبت حجمی f نانو ذرات.

ژی و همکارانش (۱۹) رسانایی گرمایی نانو سیال شامل Al_2O_3 با ذرات ریزتر از (۳/۲ - ۱/۲) nm را اندازه گیری کردند. آنها علاوه بر اثر سیال پایه اثر اندازه ذره را نیز دیدند. بنابراین مشخص شد که ذرات اکسید سرامیکی که خود رسانایی گرمایی بالایی ندارند، می توانند باعث افزایش رسانایی گرمایی نانو سیالات شوند. دلیل اصلی که باعث شده تحقیقات زیادی درباره نانوسیالات با ذرات اکسیدی انجام شود در دسترس بودن آن ها است.

۲-۵-۲- نانو سیالات فلزی

با اینکه پتانسیل نانو سیالات در افزایش انتقال حرارت از همان نانو سیالات همراه با ذرات سرامیکی مشخص بود، ولی با این حال نانو سیالات با پایه ذرات فلزی قدم بزرگی روبه جلو بود.

ایستمن و همکارانش (۲۰) یک افزایش ۴۰٪ رسانایی با نسبت حجمی ۳/۰٪ با ذرات ۱۰ nm مس معلق در اتیلن گلیکول را گزارش داد این گزارش به روشنی اثر ذرات را نشان می دهد و پتانسیل نانو ذرات با ذرات کوچکتر را نشان می داد.

¹ -Effective Thermal Conductivity

پاتل و همکارانش (۲۱) برای اولین بار از طلا و نقره برای ساختن نانو سیال در سیال پایه آب استفاده کردند. آنها همچنین از یک شیوه سیم داغ برای اندازه گیری رسانایی گرمایی استفاده کردند. مهمترین مشاهده آنها در این مطالعه افزایش قابل توجه رسانایی گرمایی برای مقادیر ناچیز غلظت ذرات بود.

۲-۵-۳- نانو سیالات، حاوی نانو لوله های کربنی و پلیمری

بزرگترین افزایش در رسانایی گرمایی توسط چوی و همکارانش (۲۲) ارائه گردید، که یک افزایش ۵۰٪ در رسانایی گرمایی با ۱٪ نسبت حجمی نانو لوله ها را نشان می دهد. دو عامل در افزایش غیرعادی رسانایی گرمایی مهمتر به نظر می آید. اول، رسانایی گرمایی نانو لوله های کربنی بسیار بالا است (3000 W/m.k). دوم، نانو لوله ها نسبت طول به عرض (30 mm) بسیار زیادی دارند. ژی و همکارانش (۲۳) رسانایی گرمایی MWCNT^1 با قطر متوسط 15 nm در اتیلن گلیکول اندازه گرفتند، مشاهده شد که افزایش بیشتری برای نسبت حجمی مشابه در سیال که رسانایی گرمایی کمتری دارد بوجود می آید.

۲-۶- نظریه هایی بر نانو سیالات

۲-۶-۱- کارهای تجربی انجام شده در زمینه ضریب رسانش حرارتی موثر نانوسیال

از کارهای تجربی انجام شده در زمینه ضریب رسانش حرارتی موثر نانوسیال، ایستمن و همکارانش (۲۴) تغییرات ضریب رسانش حرارتی موثر مخلوط مس- اتیلن گلیکول را با قطر ذرات نانو کمتر از 10 nm را مورد بررسی قرار داده اند. آن ها افزایش ۴۰ درصد در ضریب رسانش حرارتی موثر را برای نسبت حجمی ۰/۳ درصد گزارش کردند. آن ها نشان دادند که افزایش در نسبت سطح به حجم ذرات نانو موجب افزایش بیشتر ضریب رسانش حرارتی خواهد شد. همچنین نتایج بیانگر آن است که افزایش اسید به نانوسیال باعث پایداری نانوسیال و افزایش ضریب رسانش حرارتی آن می شود. لی و پترسون (۲۵)، اثر دما و نسبت حجمی نانوذرات را بر روی ضریب رسانش حرارتی موثر نانوسیال با نانوذرات CuO با قطر 29 nm و Al_2O_3 با قطر 36 nm معلق در آب به عنوان سیال پایه مورد بررسی قرار دادند. یافته ها بیانگر آن است که نسبت حجمی ذرات نانو،

¹ -Multi-Wall Carbon Nano Tube

قطر ذرات نانو، نوع ماده و دمای نانوسیال در اندازه‌ی ضریب رسانش حرارتی موثرند. به عنوان مثال آن‌ها نشان دادند که افزایش دما از ۲۷ تا ۳۴/۷ درجه‌ی سلسیوس باعث افزایش ضریب رسانش حرارتی موثر تا سه برابر شده است.

۲-۶-۲- کارهای تجربی انجام شده در زمینه ویسکوزیته موثر نانوسیال

اولین بار آلبرت انیشتین (۲۶)، رابطه‌ای برای ویسکوزیته موثر نانوسیال با نانو ذرات کروی ارائه کرده است. در این رابطه تنها اثر نسبت حجمی ذرات نانو در نظر گرفته شده است. سیمها (۲۷)، رابطه‌ای برای ویسکوزیته موثر نانوسیال ارائه کرد که علاوه بر نسبت حجمی نانوذرات اثر شکل آن‌ها نیز در این رابطه در نظر گرفته شده است. کو و کلینستر (۲۸)، رابطه‌ای برای ویسکوزیته موثر نانوسیال ارائه کردند که در آن علاوه بر نسبت حجمی نانوذرات اثر حرکت براونی نانوذرات و دمای نانوسیال نیز در نظر گرفته شده است.

۲-۶-۳ کارهای تجربی انجام شده در زمینه‌ی انتقال حرارت در نانوسیال

از کارهای تجربی انجام شده در زمینه‌ی انتقال حرارت در نانوسیال ها، ماسودا و همکاران (۴) اولین کسانی بود که به بررسی انتقال حرارت در جریان نانوسیال پرداخت آن‌ها مخلوط آب-SiO₂ را مورد آزمایش قرار داد و ۲۰ درصد افزایش را در انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال گزارش کرد. ژان و لی (۲۹) به بررسی تجربی جریان و انتقال حرارت جابجایی مخلوط آب - Cu در یک لوله با یک شار حرارتی ثابت از دیواره پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش ذرات نانو به سیال انتقال حرارت افزایش می‌یابد. همچنین در این کار ادعا شده است که در نسبت‌های حجمی کوچک ذرات نانو اصطکاک در نانوسیال افزایش نمی‌یابد و در قدرت پمپ کردن نانوسیال تغییری حاصل نمی‌شود. دینگ و همکاران (۳۰) به بررسی تاثیر نانوسیال CNT^۱ بر انتقال حرارت در یک لوله با قطر داخلی ۴/۵ mm پرداختند. در این تحقیق نیز افزایش انتقال حرارت در نانوسیال گزارش شده است.

¹ Carbon Nano Tube

۲-۶-۴ کارهای عددی انجام شده در زمینه انتقال حرارت در نانوسیال

بخش بعدی مطالعات مطرح شده در زمینه نانوسیال مختص روش‌های عددی است. این روش‌ها از نظر هزینه و زمان محاسبات نسبت به روش‌های تجربی بسیار مقرون به صرفه است و جزئیات بیشتری از جریان جابجایی طبیعی درون حفره را آشکار می‌سازد. اما صحت‌سنجی آن‌ها حتماً باید توسط داده‌های تجربی تایید گردد. هرچند بطور کل تحقیقات انجام شده روی نانوسیال بسیار محدود می‌باشد اما در سال‌های اخیر رشد قابل توجهی در تحلیل عددی در این زمینه صورت گرفته است. خانافر و همکاران (۳۱) اولین کسانی بودند که جریان نانوسیال را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. آن‌ها جریان جابجایی طبیعی مخلوط آب-Cu را در یک حفره‌ی مربعی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داده است که انتقال حرارت و سرعت جریان نانوسیال نسبت به سیال خالص به دلیل افزایش ضریب رسانش حرارتی و حرکت رندومی نانوذرات، افزایش می‌یابد. هو و همکاران (۳۲) اثر معادلات مختلف ارائه شده برای ضریب رسانش حرارتی و ویسکوزیته‌ی مؤثر نانوسیال بر روی میزان انتقال حرارت جریان نانوسیال آب- Al_2O_3 را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که معادلات مختلف خواص نانوسیال بر میزان انتقال حرارت تاثیرگذار است. ابونادا و همکاران (۳۳) نیز جریان نانوسیال را درون یک حفره‌ی حلقوی بررسی کردند. در این کار نیز افزایش انتقال حرارت در جریان نانوسیال گزارش شده است. خدادادی و حسینی‌زاده (۳۴) نیز برای اولین بار اثر ذرات نانو را در داخل آب به عنوان یک سیال تغییر فاز دهنده بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که افزایش ذرات نانو باعث افزایش ذخیره‌ی انرژی در مواد تغییر فاز دهنده خواهد شد. همچنین علی پناه و همکارانش (۳۵) رفتار انواع نانو سیال در حفره‌های بلند را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که افزایش ذرات نانو باعث افزایش انتقال حرارت خواهد شد.

۲-۶-۵ کارهای انجام شده در زمینه تغییر فاز ماده

سلمون و همکارانش (۳۶) یک ذخیره‌کننده انرژی حرارتی را به شیوه عددی مورد بررسی قرار دادند و انرژی داخلی، دما و موقعیت مرز تغییر فاز را برای سیستم مورد نظر بررسی کردند. ذخیره‌کننده مورد بررسی آن‌ها

از دو پوسته فلزی هم مرکز که فضای بین دو پوسته PCM وجود داشت تشکیل یافته بود سیال کامل نیز از داخل پوسته داخلی عبور می کرد و توسط آن انرژی حرارتی به داخل PCM منتقل می شد. استونال و آریمیلی و همکارانش (۳۷) یک سیال ذخیره کننده انرژی حرارتی شامل استوانه پر شده از PCM که در اطراف آن سیال عامل جریان داشت را مورد بررسی قرار دادند.

کائو و فقری (۳۸) به بررسی یک ذخیره کننده انرژی حرارتی مشابه تحقیق سلمون پرداختند که تنها تفاوت کار آن ها با کارهای قبل این بود که کائو و فقری ضریب انتقال حرارت بین سیال عامل و PCM را نیز از طریق حل همزمان معادل انرژی و مومنتوم به دست آوردند و در تحقیق مذکور فقط حالت شارژ ذخیره کننده مورد بررسی و بحث قرار گرفته بود.

بلکسی و کنتی (۳۹) به مطالعه یک دریافت کننده و ذخیره کننده خورشیدی که در حالت تناوبی کار می کرد پرداختند، شیوه کار این دریافت کننده و ذخیره کننده خورشیدی به این صورت بود که سیالی با شرایط ورودی همواره ثابت در درون لوله جریان داشت و دیواره خارجی استوانه شامل جمع کننده های انرژی خورشیدی بود در طول روز این جمع کننده ها مقداری از انرژی خورشیدی را در PCM ذخیره کرده و مقداری را نیز به سیال عامل انتقال رسانده و باعث گرم کردن آن می شود و در هنگام نبودن خورشید PCM با تغییر فاز از مایع به جامد باعث گرم کردن سیال عامل می شود و این تحقیق آن ها به بررسی پارامترهای مختلف هندسی و میزان تأثیر آن ها روی کارایی سیستم پرداختند و پیشنهادهایی برای تعیین اندازه بهینه دریافت کننده و ذخیره کننده خورشیدی ارائه کردند.

بلکسی و کنتی (۴۰) یک ذخیره کننده انرژی حرارتی نهان را به صورت محوری بررسی کردند ذخیره کننده مورد بررسی آن ها دقیقاً مانند ذخیره کننده ای بود که کائو و فقری انجام داده بودند با این تفاوت که مسئله آن ها به صورت متناوب بود یعنی علاوه بر فرآیند شارژ فرایند تخلیه انرژی را نیز مورد بررسی قرار دارند که رفتار تناوبی مورد مطالعه آن ها به صورت حالت پایدار بود یعنی بعد از یک دوره تناوب سیستم به حالت ابتدایی خود باز می گشت. آنها اشاره کردند ذخیره سازی بدون در نظر گرفتن فرآیند تخلیه باعث به وجود

آمدن اشتباهات بزرگی در تعیین میزان کارایی سیستم می گردد برای بهینه سازی هر دو فرآیند را باید با هم بررسی کرد.

ماویتی و رازانی (۴۱) به بررسی یک ذخیره کننده انرژی نهان پرداختند که سیال عامل از اطراف آن حرکت می کرد روش بررسی آنها روش تحلیل بود و توسط تکنیک انتگرالی و با استفاده از قانون دوم ترمودینامیک زمان بهینه تخلیه را برای این ذخیره کننده محاسبه می کردند.

از دیگر تحقیقاتی که در این زمینه صورت گرفته، می توان به کار انجام شده توسط کوتی و همکاران (۴۲) اشاره کرد آنها به بررسی یک ذخیره کننده انرژی حرارتی پرداختند که از فرایند تغییر فاز برای ذخیره سازی استفاده می کرد فرض مهمی که در این تحقیق در نظر گرفته شده این است که ذخیره کننده توانایی این را داشته باشد تا باعث شود سیال گرم آنتروپی محیط را کمتر افزایش دهد یا به عبارتی دیگر سیال گرم در موقع خروج از ذخیره کننده می توانست آنتروپی محیط را افزایش دهد.

گنگ و موجودمدار (۴۳) اثرات تعبیه PCM را از لحاظ انرژی مورد مطالعه قرار دادند و پیشنهادهایی را برای افزایش تعداد PCM ها در هنگام شارژ باعث افزایش بازدهی قانون دوم ترمودینامیک خواهد شد. از آخرین تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده می توان به تحقیقات کورین و رشف (۴۴) اشاره کرد آنها تحقیقاتی را در زمینه کاهش آلودگی کارهای اگزاست اتومبیل توسط کاتالیست ها انجام دادند، کاتالیست ها بایستی گرم باشند تا بتوانند آلاینده های هوا را جذب کنند جهت تامین گرمای اولیه کاتالیست ها می توان از انرژی ذخیره شده در داخل PCM استفاده کرد یعنی در طول مدتی که اتومبیل روشن است گرمای مورد نیاز توسط آب رادیاتور یا هوای گرم خروجی از موتور به PCM منتقل می گردد و از این گرمای ذخیره شده در روز بعد جهت گرم کردن اولیه کاتالیست ها استفاده می شود. در تحلیل عددی که توسط ویشاک و جیلانی (۴۵) بر روی سیستم ذخیره انرژی نهان در سه هندسه مستطیلی، استوانه ای و پوسته لوله ای انجام شد، فرایند انتقال گرما در مواد تغییر فاز دهنده با فرض رسانش مورد بررسی قرار گرفت.

فصل ۳:

مواد و روش‌ها

در این فصل، ابتدا به معرفی مواد تغییر فاز دهنده و مواد نانو ساختار به کار رفته در این پژوهش پرداخته شده و روشهای توصیف ویژگی‌های^۱ مواد نانو ساختار بیان می شود. سپس، روش آماده سازی مواد تغییر فاز دهنده حاوی مواد نانو ساختار و روش‌های اندازه گیری ویژگی‌های گرمایی مانند ضریب هدایت گرمایی در فاز جامد و مایع و همچنین لزجت دینامیکی فاز مایع در دماهای مختلف مخلوط و کسر جرمی‌های متفاوت مواد نانو ساختار توضیح داده خواهد شد.

۳-۱ مواد به کار رفته در پژوهش

۳-۱-۱ مواد تغییر فاز دهنده

انتخاب مواد تغییر فاز دهنده معمولاً بر اساس دمای ذوب / انجماد آنها، که به گستره دمایی طراحی مورد نظر بستگی دارد، صورت می‌پذیرد. به عنوان مثال، از آلکانها (پارافینها) با زنجیره های بلند هیدروکربنی برای دماهای متوسط (۰ - ۱۰۰°C) و یا نمک‌های مذاب برای دماهای بزرگتر از ۳۰۰°C استفاده می شود.

در این پژوهش از هیدروکربن ان- اکتادکان^۲ به عنوان ماده تغییر فاز دهنده پایه که در دماهای متوسط کاربرد دارد، استفاده شده است.

پارافین ان اکادکان، یک ماده تغییر فاز دهنده آلی است که دارای فرمول شیمیایی $C_{18}H_{38}$ است و در فاز جامد به صورت کریستال‌های جامد است. ان اکتادکان در فاز مایع شفاف است و به همین دلیل در آزمایش‌های انتقال گرمای مربوطه، مرز بین جامد و مایع در آن براحتی قابل تشخیص است. این ماده از لحاظ شیمیایی پایدار، غیر خورنده و غیر سمی است. خواص ترموفیزیکی ان اکتادکان در جدول ۳-۱ آورده شده است. در این پژوهش از آن اکتادکان با درجه خلوص ۹۹٪ ساخت شرکت **Alfa Aesar** استفاده شده است.

^۱ characterization

^۲ n-octadecane

جدول ۳-۱- ویژگیهای ترموفیزیکی ان-اکتا دکان

| مقدار | خاصیت |
|------------------------|---|
| ۲۵۴/۵ | جرم مولی |
| ۲۸ | دمای ذوب ($^{\circ}\text{C}$) |
| ۲۴۳/۵ | گرمای نهان ذوب (kJ/kg) |
| ۰/۰۰۰۹ | ضریب انبساط گرمایی مایع (K^{-1}) |
| $4/013 \times 10^{-6}$ | لزجت سینماتیکی (m^2/s) |
| ۷۷۰ | دانسیته مایع (kg/m^3) |
| ۸۰۰ | دانسیته جامد (kg/m^3) |
| ۲۱۶۰ | گرمای ویژه مایع (J/kg.k) |
| ۱۹۱۲ | گرمای ویژه جامد (J/kg.k) |
| ۰/۱۴۸ | ضریب هدایت گرمایی مایع (W/m.k) |
| ۰/۳۵۸ | ضریب هدایت گرمایی جامد (W/m.k) |
| $8/64 \times 10^{-8}$ | ضریب انتشار گرمایی مایع (m^2/s) |
| $2/14 \times 10^{-6}$ | ضریب انتشار گرمایی جامد (m^2/s) |

۳-۱-۲ مواد نانو ساختار

در این پژوهش از مواد نانو ساختار اکسید مس و آلومینا (آلومینیوم دی اکسید) استفاده شده است. در زیر برخی از ویژگیهای این مواد به طور اجمالی بیان می شوند.

نانوذرات آلومینا و اکسید مس استفاده شده در این پژوهش ساخت شرکت **Sigma Aldrich®** است.

۳-۲ روشهای توصیف ویژگیهای مواد نانو ساختار

برای توصیف ویژگیهای مواد مختلف در ابعاد نانو روشهای مختلفی وجود دارد. در زیر روشهایی که در این پژوهش از آنها استفاده شده اند بررسی می شود.

۳-۲-۱ میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ (SEM)

میکروسکوپ الکترونی روبشی یکی از ابزارهای مورد استفاده در فناوری نانو است که با کمک بمباران الکترونی، تصاویر اجسامی به کوچکی ۱۰ nm را برای مطالعه تهیه می کند. SEM، اطلاعات زیر را در خصوص نمونه در اختیار می گذارد:

توپوگرافی نمونه: خصوصیات سطوح

مورفولوژی: شکل، اندازه و نحوه قرار گیری ذرات در سطح جسم

ترکیب: اجزایی که نمونه را می سازند.

در این پژوهش آنالیز SEM توسط (Zeiss - Ultra55) FEG - HR SEM انجام شده است.

۳-۲-۲ میکروسکوپ الکترونی عبوری^۲ (TEM)

اساس عملکرد میکروسکوپ الکترونی عبوری مشابه میکروسکوپهای نوری است با این تفاوت که به جای پرتو نور در آن از پرتو الکترون استفاده می شود. آنچه که می توان با کمک میکروسکوپ نوری مشاهده کرد،

^۱ Scanning Electron Microscope (SEM)

^۲ Transmission Electron Microscope (TEM)

بسیار محدود است در حالی که با استفاده از الکترونها بجای نور، این محدودیت از بین می رود. وضوح تصویر در TEM هزار برابر بیشتر از یک میکروسکوپ نوری است. با استفاده از TEM می توان جسمی به اندازه چند آنگستروم (10^{-10} m) را مشاهده کرد. در این پژوهش از میکروسکوپ JEOL ۲۱۰۰ با ولتاژ شتاب دهنده ۲۰۰ kV برای آنالیز TEM استفاده شده است.

۳-۲-۳ روش پراکندگی نور دینامیکی^۱ (DLS)

پراکندگی نور دینامیکی روشی فیزیکی است که از آن برای تعیین توزیع ذرات موجود در محلولها و سوسپانسیونها استفاده می شود. این روش غیر مخرب و سریع برای تعیین اندازه ذرات در محدوده چند نانومتر تا میکرون به کار می رود. در فناوریهای اخیر، ذراتی با قطر کمتر از نانومتر نیز با این روش قابل اندازه گیری هستند. این روش به برهمکنش نور با ذره بستگی دارد. نور پراکنده شده بوسیله نانو ذرات موجود در سوسپانسیون با زمان تغییر می کند که می تواند به قطر ذره ارتباط داده شود.

و در پژوهش حاضر، از Beckman Coulter Delsa Nano C system برای آنالیز DLS استفاده شده است.

۳-۲-۴ طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز^۲ (FTIR)

طیف سنجی مادون قرمز بر اساس جذب تابش و بررسی جهش های ارتعاشی مولکولها و یونهای چند اتمی صورت می گیرد. این روش به عنوان روشی پر قدرت و توسعه یافته برای تعیین ساختار و اندازه گیری گونه های شیمیایی به کار می رود. همچنین این روش عمدتاً برای شناسایی ترکیبات آلی به کار می رود، زیرا طیفهای این ترکیبات معمولاً پیچیده هستند و تعداد زیادی پیکهای بیشینه و کمینه دارند که می توانند برای اهداف مقایسه ای به کار گرفته شوند.

¹ Dynamic Light Scattering (DLS)


² Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

۳-۳ آماده سازی مواد تغییر فاز دهنده حاوی مواد نانوساختار

برای تهیه PCM حاوی مواد نانو ساختار از پراکنش مواد نانو ساختار در فاز مایع PCM استفاده می شود. روش تهیه، مبتنی بر روش تهیه یک نانوسیال است. اگرچه برای تهیه یک نانوسیال روش استاندارد ذکر نشده است؛ اما بیشتر روش های آماده سازی بر پایه روش زیر است:

روش دو مرحله ای، که در این روش ابتدا یک پودر خشک از نانو ذره تهیه شده و سپس در سیال پایه پراکنده می شود. برای جلوگیری از تجمع نانو ذرات و پراکنش یکنواخت آنها از یک همزن مکانیکی و یا آلتراسونیک استفاده می شود. با توجه به خواص سطحی بین نانوذره و سیال پایه در این روش می توان یک عامل سطحی نیز به سیال اضافه کرد. محدودیت این روش دسترسی محدود به نانوذرات است.

۳-۳-۱ آماده سازی PCM

به طور کلی پارافین مایع دارای مقادیر زیادی از گازهای حل شده است، به همین دلیل قبل از پراکنش مواد نانو ساختار در PCM مورد نظر و قبل از انجام هر نوع اندازه گیری، PCM و یا PCM حاوی مواد نانوساختار گاززدایی می شوند. فرایند گاززدایی^۱ به این صورت انجام می شود که PCM مذاب را در یک بطری شیشه ای غیر قابل نفوذ ریخته شده و خنک می شود تا به جامد تبدیل شود. سپس توسط والو استیلی غیرقابل نفوذ و لوله این بطری به یک پمپ خلأ متصل شده و پس از ۳۰ دقیقه که پمپ خلایی معادل حدود ۲۰ Pa ایجاد کرد از آن جدا می شود. در این مرحله بطری که در آن PCM جامد تحت خلأ وجود دارد در یک اتاقک تست اقلیمی^۲ که دمای آن با توجه به نوع PCM تنظیم می شود به مدت حداقل ۳ ساعت نگهداری می شود تا تمام PCM ذوب گردد. توضیح اینکه برای آن اکتاد کان دمای اتاقک روی  تنظیم می شود. پس از ذوب PCM، والو استیلی باز شده و گازهای موجود در PCM تخلیه می شوند.

¹ degasification

² Climatic test chamber

فرایند گاززدایی توسط ذوب در خلأ بر پایه قانون هنری^۱ است. بدین ترتیب که در یک دمای ثابت، مقدار گازهای حل شده در یک مایع با نوع و حجم مشخص، مستقیماً با فشار جزئی آن گاز با مایع متناسب است (۱۹). بنابراین وقتی فشار روی PCM کاهش می یابد، میزان انحلال گازها در آن کاهش یافته و از آن خارج می شوند.

۳-۲-۳ آماده سازی PCM / nanostructured materials

مواد تغییر فاز دهنده و مواد نانوساختار مورد نظر با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۱ mg وزن می شوند. توزین و افزودن نانوذرات به PCM زیر هود آزمایشگاهی و در شرایط کنترل شده از لحاظ ایمنی انجام می شود. برای پراکنش مواد نانوساختار در PCM از روش مخلوط کردن مکانیکی و آلتراسونیک استفاده می شود. بدین منظور از یک حمام آلتراسونیک^۲ (VWR, USC 2100D, Germany) و یکی همزن مکانیکی با دور ۱۰۰۰ rpm استفاده می شود. ابتدا دمای حمام آلتراسونیک (شکل ۱-۳) روی 50°C تنظیم شده و بطری محتوی PCM هوازدایی شده در آن قرار داده می شود. سپس مقدار مورد نظر نانوذرات به آن اضافه شده و به مدت ۵ دقیقه با همزن مکانیکی نانوذرات و پارافین مخلوط می شوند. پس از آن، از آلتراسونیک با فرکانس ۴۵ کیلوهرتز به مدت ۲۰ دقیقه استفاده شده و پس از آن بلافاصله از همزن مکانیکی به مدت ۵ دقیقه دیگر استفاده می شود.

^۱ Henry's law

^۲ Ultrasonic bath



شکل ۳-۱- حمام التراسونیک

برای آماده سازی مواد تغییر فاز دهنده حاوی نانولوله های کربنی و نانو فیبرهای کربنی، به توصیه شرکت سازنده این مواد، از ۲۰ دقیقه آلتراسونیک استفاده می شود تا احتمال خرد شدن این مواد با همزدن کاهش یابد.

در آماده سازی PCM / nanostructured materials از هیچ فعال کننده سطحی و یا ماده دیگر استفاده نشده است. موادی که به روش فوق تهیه شدند در طول انجام آزمایشها پایدار می باشند و ته نشینی مواد نانو ساختار در آنها لااقل به طور چشمی رخ نداده است.

۳-۴ اندازه گیری ضریب هدایت گرمایی

برای اندازه گیری ضریب هدایت گرمایی روشهای مختلفی ذکر شده است که استفاده از آنها به مواد، ویژگیهای آنها و دمای اندازه گیری بستگی دارد. این روشها به طور کلی به دو دسته پایا^۱ و گذرا^۲ دسته بندی می شوند. اساس روشهای پایا، معادله انتقال گرمای هدایت یک بعدی، یعنی معادله ۳-۱، می باشد.

$$k = \frac{g^nl}{T_2 - T_1} \quad 1 - 3$$

در روشهای پایا نمونه بین دو صفحه با دمای معلوم قرار گرفته و یک شار گرمایی ثابت در آن جریان می یابد، پس از گذشت زمان مشخص، ضریب هدایت گرمایی محاسبه می شود. معمولاً در روشهای پایا، از تکنیک صفحه داغ محافظت شده^۳ یا اندازه گیر شار گرما^۴ استفاده می شود.

در روشهای گذرا، اندازه گیری در حین گرم کردن نمونه انجام می پذیرد و از این رو، سریعتر می توان ضریب هدایت گرمایی را اندازه گیری کرد. عیب این روش استفاده از معادلات پیچیده ای است که باید برای به دست آوردن ضریب هدایت آنها را ساده نمود.

در روش گذرا معمولاً با استفاده از تکنیکهای سیم داغ (THW)، صفحه داغ (TPS)، فلش لیزر، ۳۰ و دیگر تکنیکها ضریب هدایت گرمایی را اندازه گیری می کنند. روشهای گذرا معمولاً برای اندازه گیری ضریب هدایت مایعات نیز مناسبند، چراکه با انتخاب یک مقدار کم از نمونه و کوتاه بودن زمان اندازه گیری می توان از آثار جابجایی طبیعی در مایع جلوگیری کرده و اندازه گیری دقیق تری انجام داد. ضریب هدایت گرمایی نانوسیالات و مواد تغییر فاز دهنده حاوی مواد نانوساختار معمولاً با تکنیکهای THW و TPS اندازه گیری شده اند.

¹ Steady-state method

² Transient methods

³ Guarded hot plate

⁴ Heat flow meter

۳-۴-۱ دستگاه اندازه گیری ضریب هدایت گرمایی و تکنیک TPS

در این پژوهش برای اندازه گیری ضریب هدایت گرمایی مواد تغییر فاز دهنده حاوی مواد نانو ساختار از دستگاه Hot Disk TPS ۲۵۰۰ S ساخت شرکت **Hot Disk® AB, Sweden** استفاده شد. از این دستگاه برای اندازه گیری همزمان ویژگیهای گرمایی مواد مانند ضریب هدایت گرما، ضریب انتشار گرما و ظرفیت گرمایی ویژه استفاده می شود. این دستگاه ویژگیهای گرمایی مواد را در یک گستره وسیع از مواد، هندسه ها و ابعاد بر طبق استاندارد ISO ۲۲۰۰۷-۲: ۲۰۰۸ اندازه گیری می کند .

دستگاه S ۲۵۰۰ TPS بر اساس تئوری TPS که توسط گوستاوسون (۱۳) ارائه شده است، کار می کند. در این روش، المان منبع صفحه ای (TPS element) از یک فلز رسانای الکتریسته ساخته شده که هم به جای منبع گرمایی و هم سنسور دما به کار می رود. در شکل ۲-۴ دستگاه S ۲۵۰۰ TPS به همراه سنسور مربوطه نشان داده شده است. المان استفاده شده در این دستگاه، همانطور که در شکل ۳-۴ آورده شده است، به شکل یک دیسک با مارپیچ دوپل است که از فویل نیکلی به ضخامت ۱۰ pm ساخته شده است. نیکل به این دلیل انتخاب شده است که دارای ضریب دمایی مقاومت^۱ (TCR با واحد K^{-1}) بالایی است و مقادیر آن در دسترس است. از طرفی المان TPS، به عنوان یک ترمومتر مقاومتی برای ثبت افزایش دمای گذرای نمونه به کار می رود. دو طرف المان، یک لایه پلامید کیتون^۲ به ضخامت $12/7 \mu m$ یا $25 \mu m$ کشیده شده است تا سنسور در محیطهای شیمیایی بتواند مقاومت کند. برای اندازه گیری

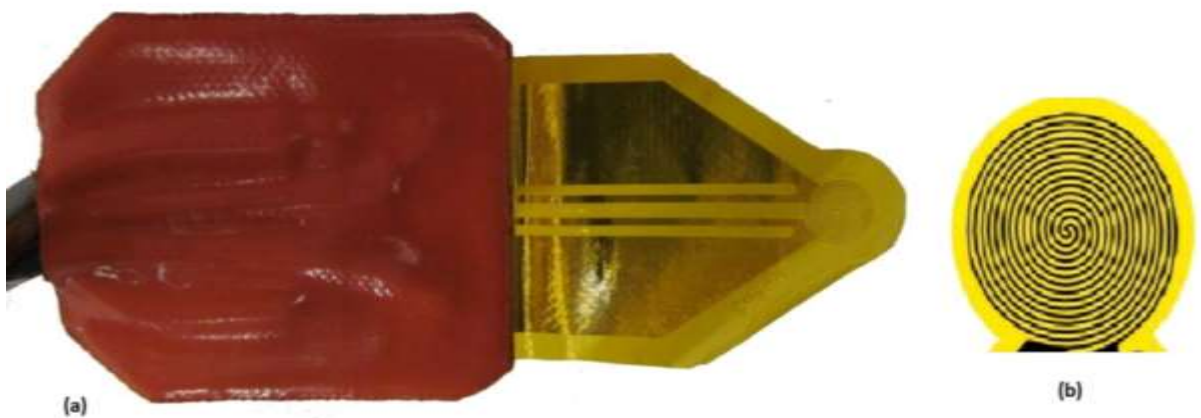
ویژگیها، المان TPS باید بین سطوح جامد فشرده شده و در مایع غوطه ور شود.

^۱ Temperature coefficient of resistivity (TCR)

^۲ kapton



شکل ۳-۲ - TPS2500 S و سنسور مربوطه



شکل ۳-۳- (a) سنسور TPS (b) نوک مارپیچ سنسور

در تئوری TPS فرض شده است که منبع مارپیچ دابل یک سری حلقه های هم مرکز به فاصله مساوی از هم هستند و در یک محیط بینهایت قرار گرفته اند. بنابراین، عمق نفوذ گرمایی^۱ موج گرمایی تولید شده در حلقه ها نباید با مرزهای فیزیکی نمونه در طول اندازه گیری برخورد کند. عمق نفوذ گرمایی از رابطه ۳-۳ به دست می آید

$$\Delta_p = 2\sqrt{t} \quad (2-3)$$

که α ضریب انتشار گرمایی نمونه و t زمان اندازه گیری است.

زمانی که با عبور جریان الکتریسته سنسور گرم می شود، گرما از لایه کیتون عبور کرده و به محیط نمونه می رسد و دمای سنسور و نمونه بالا می رود. با افزایش دما مقاومت سنسور با زمان تغییر می کند و در نتیجه افزایش دما به صورت زیر خواهد بود:

¹ Thermal penetration depth

$$\Delta T = 1 \left(\frac{R(t)}{R_0} \right) \quad (3-3)$$

که در آن R_0 مقاومت الکتریکی دیسک در شروع آزمایش، K برابر TCR که مقدار آن معلوم و از جدول ۳-۵ به دست می آید و پارامتر ، مطابق معادله ۳-۴ می باشد.

$$= \left(\frac{t}{-} \right)^{\frac{1}{2}}, \left(\frac{r^2}{-} \right) \quad 4-3$$

پارامتر θ معرف زمان ویژه بوده که با شعاع سنسور (r) و ضریب انتشار نمونه (α) رابطه دارد.

برای هندسه دیسکی با m حلقه در سنسور TPS می توان افزایش دما را به صورت زیر به دست آورد:

$$\Delta T() = \frac{P_0}{3/2 r_k} \quad 5-3$$

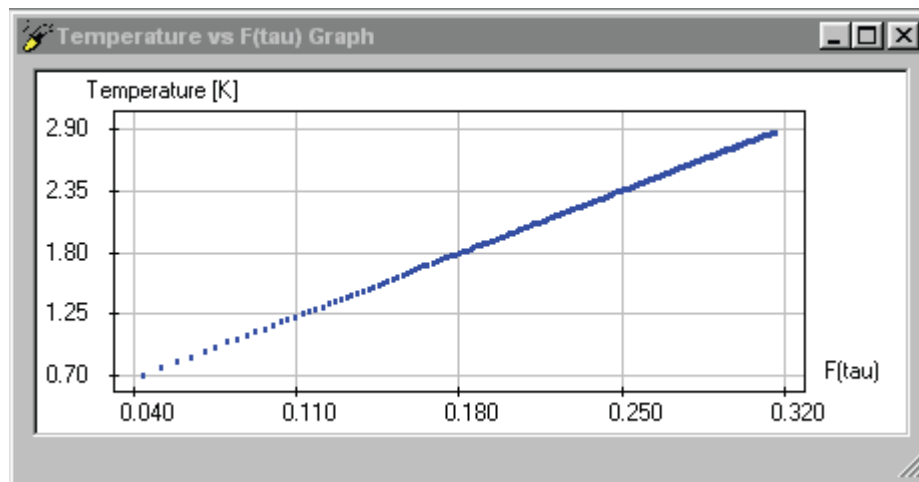
که در آن P_0 می توان خروجی سنسور و $F(r)$ تابع بلون بعد زمان است و از رابطه ۴-۶ به دست می آید

$$F() = [m(m+1)]^{-2} \int_0^{-2} \left[\sum_{i=1}^m i \sum_{j=1}^m j \exp \left(-\frac{i^2 + j^2}{4m^2} \right) j_0 \left(\frac{ij}{2m^2} \right) \right] d \quad 6-3$$

که j_0 تابع اصلاح شده بسل است.

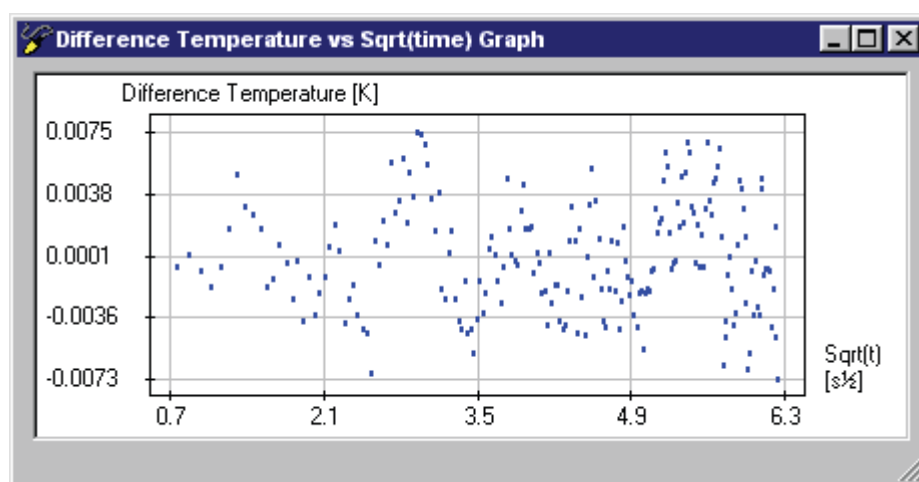
توان خروجی از دیسک، زمان اندازه گیری که باید یکی از زمانهای تعریف شده یعنی ۲/۵، ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۸۰، ۱۶۰، ۳۲۰ و ۶۴۰ ثانیه باشد) TCR (از جدول ۴-۵) و شعاع دیسکی از پارامترهای ورودی روش TPS هستند. شعاع دیسک با توجه به کد درج شده روی سنسور مشخص می شود. اگر افزایش شما بر حسب تابع

بدلون بعد زمان برای یک نمونه رسم شود، شکلی مانند شکل ۳-۴ به دست خواهد آمد که خطی است با شیب $k/(3/2 r p_0)$ می توان ضریب هدایت را از روی آن به دست آورد.



شکل ۳-۴- افزایش دما بر حسب تابع بدون بعد زمان

توزیع تصادفی نقاط حول این خط با اختلاف دما بر حسب توان زمان در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. پس از وارد نمودن پارامترهای ورودی به دستگاه و شروع اندازه گیری، دستگاه ۲۰۰ نقطه - داده، را ثبت می کند. یک دسته از نقطه - داده اندازه گیری شده توسط کاربر برای تحلیل انتخاب می شوند. اگر توزیع اختلاف دما تصادفی نبود، یعنی الگویی مانند شکل ۳-۵ نداشت، باید یک دسته دیگر از نقاط به دست آمده را برای تحلیل انتخاب کرد.



شکل ۳-۵- اختلاف دما بر حسب توان یا زمان

بین دو اندازه گیری متوالی از یک نمونه بدون تعویض سنسور، باید حداقل ۳۶ برابر زمان اندازه گیری فاصله وجود داشته باشد، مثلاً اگر زمان ۵ ثلثیه لدابه شده، باید لااقل ۳ دقیقه فاصله تا اندازه گیری بعدی باشد. همچنین، لازم به ذکر است که ضریب انتشار گرمایی، خروجی جنبی دستگاه است.

۳-۴-۲ مراحل اندازه گیری ضریب هدایت گرمایی

بک سیلندر آلومینیومی به قطر ۷۰ mm و ارتفاع ۱۲۰ mm که روی وجه بالای آن حفره ای به قطر ۲۵ mm و ارتفاع ۱۵ mm ایجاد شده است به عنوان نگهدارنده نمونه در طول اندازه گیریها ساخته شده است (شکل ۴-۶). آلومینیوم به این دلیل انتخاب شد که دارای ضریب انتشار گرمایی بالایی است ($\alpha = 84.18 \text{ mm}^2/\text{s}$) و سریعاً با نمونه همه ما می شود. سنسور TPS توسط دو پیچ و مهره خروسی به سیار محکم می شود تا در طول آزمایش حرکتی نداشته باشد.

برای کنترل دمای نمونه در طول آزمایش، سیلندر آلومینیومی حاوی

PCM/ nanostructured material در یک حمام دما ثابت^۱ (Haake, Germany) C50P , Thermo) با دقت کنترل دمای $0/01^\circ\text{C}$ قرار داده می شود. سیال عامل در این حمام آب و اتیلن گلیکول به نسبت وزنی ۵۰٪ : ۵۰٪ می باشد که دمای انجماد آن رانا حدود -30°C پایین می آورد.

سنسور TPS به کار رفته در این آزمایش سنسور شماره ۵۴۶۵ است که دارای شعاع ماریچ $3/189 \text{ mm}$ است. این سنسور به طور عمودی مطابق شکل ۴-۶ در نگهدارنده نمونه قرار گرفته و کل ماریچ در نمونه قرار می گیرد. حجم مورد نیاز برای اندازه گیری ضریب هدایت گرمایی حدود ۷ mL است. این حجم کم بخصوص در مورد اندازه گیری ضریب هدایت مایعات مؤثر است، چرا که آثار جابجایی طبیعی در آن ناچیز

¹ Constant temperature thermal bath/circulator

است. برای جلوگیری از تغییرات دمایی بالای نمونه، پس از قرار دادن نگهدارنده در حمام دما ثابت، از یک عایق پلی استایرن ضخیم به عنوان در پوش استفاده می شود.

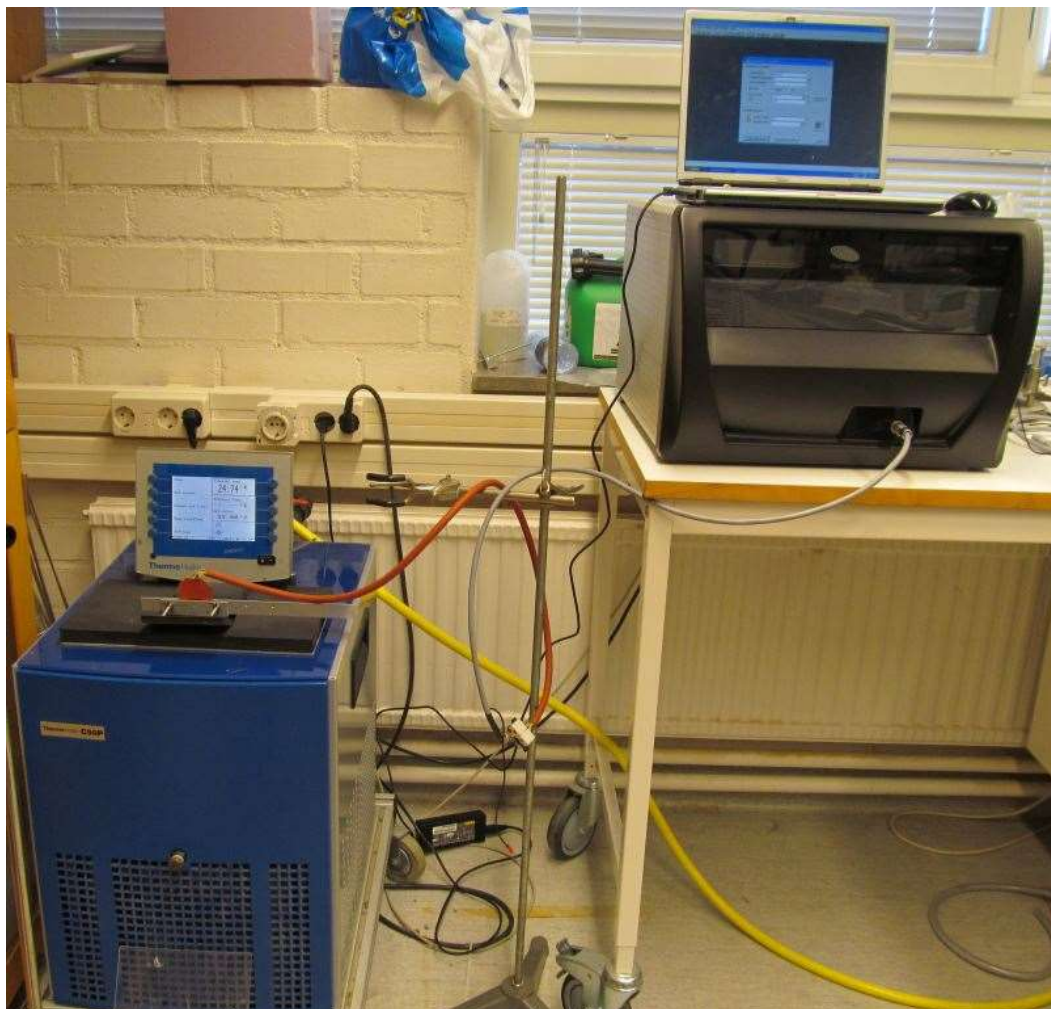
برای اندازه گیری ضریب هدایت گرمایی نمونه در فاز جامد، ابتدا حمام دما ثابت روی 0°C تنظیم شده و سیلندر آلومینیومی در آن قرار داده می شود. سپس نمونه تازه¹ در چند مرحله در نگهدارنده ریخته می شود. با این روش، PCM به صورت لایه لایه و به سرعت منجمد شده و از تشکیل حبابهای هوا و حفرات خالی در اطراف سنسور جلوگیری می شود.

¹ Fresh sample



شکل ۳-۶- نگهدارنده نمونه

در شکل ۳-۷ وسایل اندازه گیری ضریب هدایت گرمایی یعنی، $TPS2500S$ ، حمام دما ثابت و سنسور مربوطه نشان داده شده است. با توجه به نوع PCM، اندازه گیریها در گستره دمایی $55^{\circ}C - 5^{\circ}C$ انجام شده است. در هر بار تغییر دمای حمام، حدود ۳۰ دقیقه زمان برای هم دما شدن نمونه در نظر گرفته شده است. برای اندازه گیری ضریب هدایت فاز جامد دمای شروع از کمترین دما ($5^{\circ}C$) و برای فاز مایع دمای شروع اندازه گیری از بیشترین دما ($55^{\circ}C$) می باشد. تمام اندازه گیریها در فشار اتمسفر و در سطح دریا انجام شده است.



شکل ۳-۷- وسایل اندازه گیری ضریب هدایت گرمایی

فصل ۴:

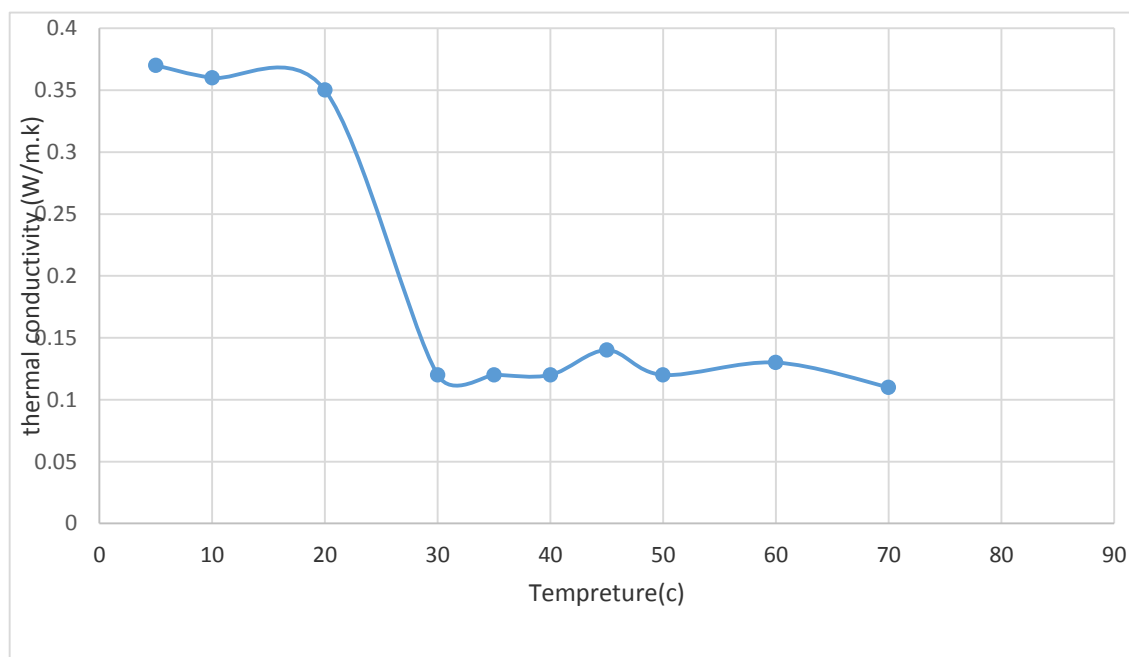
نتایج و تفسیر آن ها

در این فصل، نتایج پژوهش حاضر به همراه تحلیل‌های مربوطه ارائه می‌شود. ابتدا، به منظور درک اندازه و مورفولوژی نانوساختار مواد استفاده شده از روش‌های توصیف ویژگی‌ها مانند SEM و DLS استفاده شد. سپس، نتایج حاصل از اندازه‌گیری ویژگی‌های ترموفیزیکی مانند ضریب هدایت گرمایی و لزجت مواد تغییر فاز دهنده حاوی مواد نانوساختار بیان و بررسی می‌شوند. به منظور بررسی تأثیر پراکنش مواد نانوساختار در مواد تغییر فاز دهنده روی فرایند ذوب آنها، نتایج انتقال گرما حین فرایند ذوب ارائه می‌شود.

۴-۱ ضریب هدایت گرمایی و لزجت PCM پایه (ان - اکتادکان)

ضریب هدایت گرمایی و لزجت آن - اکتادکان به عنوان PCM پایه در دماهای مختلف به ندرت در متون علمی آورده شده است و مواردی هم که گزارش شده اند اکثراً قدیمی هستند. همچنین، برای اینکه مرجع خطاهای سیستماتیک برای تمام اندازه گیریها یکسان باشد ضریب هدایت گرمایی و لزجت آن - اکتادکان اندازه گیری و با داده های موجود مقایسه شده اند.

شکل ۴-۱ ضریب هدایت گرمایی آن - اکتادکان در فاز جامد و فاز مایع در دماهای متفاوت را نشان می‌دهد. بازه دمایی که ضریب هدایت در آن اندازه گیری شده است، 5°C تا 25°C برای فاز جامد و 30°C تا 55°C برای فاز مایع است.



شکل ۴-۱- ضریب هدایت گرمایی آن - اکتادکان در دماهای مختلف

نتایج حاصل از اندازه گیری ضریب هدایت گرمایی ان -اكتادكان در یک گستره دمایی وسیع در جدول ۴-۱ آورده شده است. به دلیل تغییرات زیاد ضریب هدایت گرمایی در اطراف نقطه ذوب PCM بازه دمای 25°C تا 30°C به ازای هر 1°C افزایش دما، ضریب هدایت اندازه گیری شده است. همانطور که از اعداد جدول ۴-۱ مشخص است، ضریب هدایت گرمایی جامد نسبت به مایع به دلیل آرایش فشرده مولکولهای جامد بیشتر است. همچنین در حوالی دمای ذوب، ان -اكتادكان دارای یک افزایش نسبتاً زیاد در ضریب هدایت است که دلیل آن می تواند شرایط غیر تعادلی ناشی از برهم خوردن ساختار کریستالی جامد و افزایش ارتعاشات مولکولی باشد.

جدول ۴-۱- ضریب هدایت گرمایی اندازه گیری شده برای ان -اكتادكان در دماهای مختلف

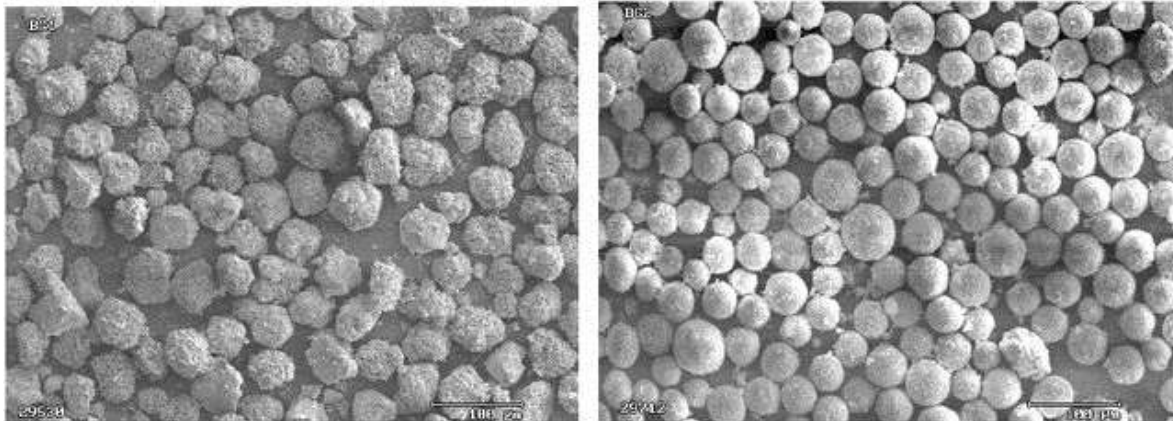
| $T(^{\circ}\text{C})$ | $k(\text{W/m}\cdot\text{K})$ |
|-----------------------|------------------------------|
| 5 | 0.375 |
| 10 | 0.374 |
| 15 | 0.369 |
| 20 | 0.365 |
| 25 | 0.371 |
| 26 | 0.395 |
| 27 | 0.422 |
| 28 | 0.465 |
| 29 | 0.185 |
| 30 | 0.165 |
| 35 | 0.156 |
| 40 | 0.151 |
| 45 | 0.150 |
| 50 | 0.147 |
| 55 | 0.144 |

گزارشهای در دسترس برای اندازه گیری لزجت ان -اكتادكان (و به طور کلی مواد تغییر فاز دهنده) در فاز مایع در متون علمی بسیار اندک است. در این پژوهش، بنا به آثار متفاوتی که افزودن نانو ذرات بر خواص رئولوژیکی مواد تغییر فاز دهنده می گذارند، لزجت به طور گسترده ای بررسی شده است؛ اما ابتدا لزجت ان -اكتادكان در دماهای مختلف اندازه گیری و با منابع موجود مقایسه شده است.

۲-۴ ویژگیهای آن - کتادکان حاوی نانوذرات آلومینا

۱-۲-۴ توصیف ویژگیهای نانوذرات مزوپروس آلومینا

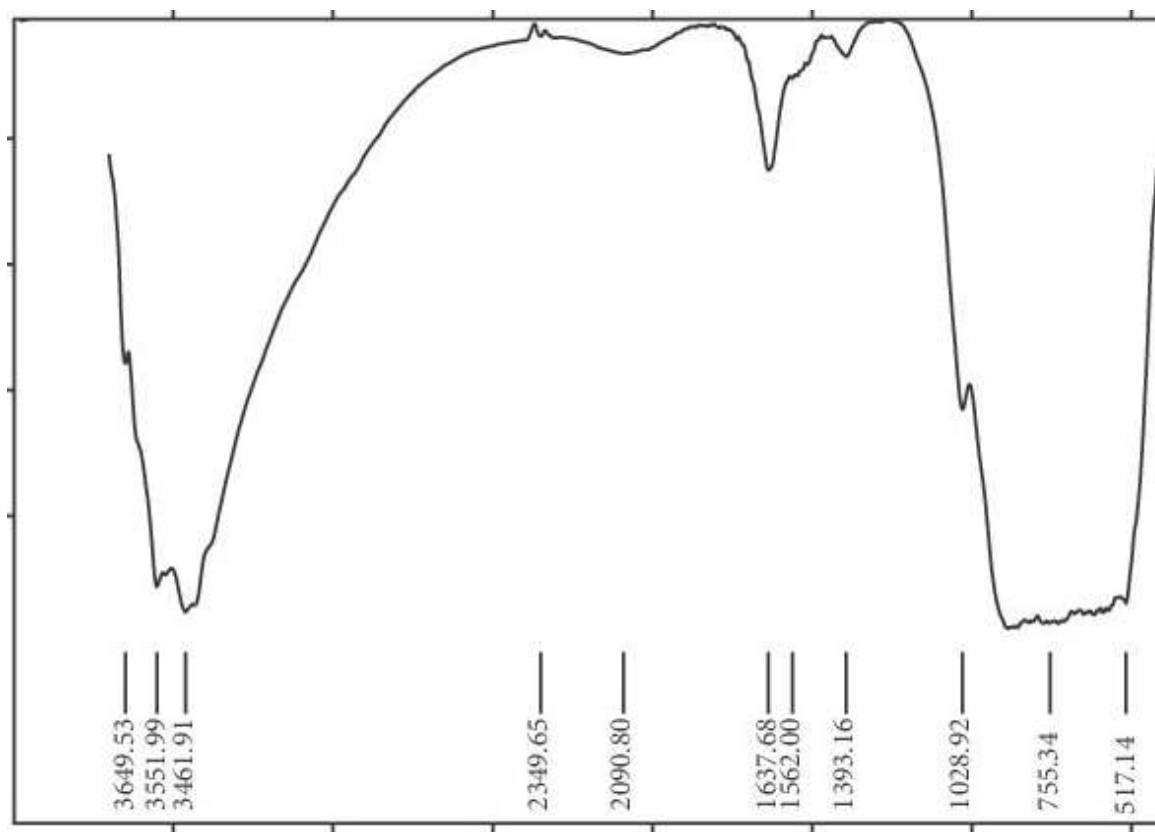
مورفولوژی و میکروساختار نانوذرات آلومینا توسط SEM بررسی شد. ریزنگار مربوط به تصاویر SEM مربوط در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۴ تصاویر SEM مربوط به آلومینا

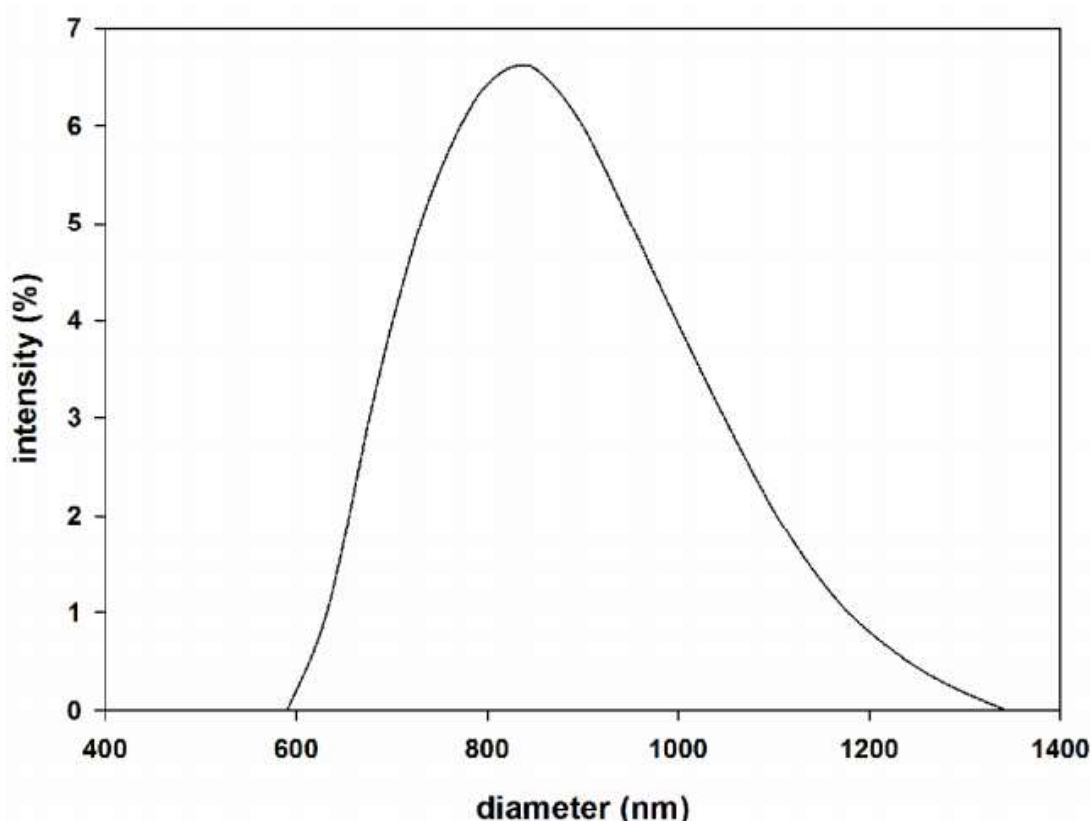
ریزنگار SEM در شکل ۲-۴ نشان می دهد که نانو ذرات آلومینا دارای مورفولوژی کروی با قطر تقریبی 350 ± 100 nm می باشند. ساختار متخلخل ذرات آلومینا به خوبی از روی شکل مشخص است. به علاوه، قطر تقریبی حفره ها حدود ۵mm تشخیص داده شد.

برای مطالعه عوامل سطحی ذرات آلومینا از طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز استفاده شد که طیف آن در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. با بررسی این طیف مشخص می شود که سطح نانوذرات آلومینا توسط گروه (-O) عامل دار شده اند. قله مربوط به عدد موج حدود ۳۴۶۱ نشان دهنده پیوند Al - O - Al را نشان می دهد.



شکل ۴-۳- نمودار FTIR ذرات آلومینا

برای به دست آوردن یک برآورد از اندازه ذرات وقتی در محیط سیال قرار می گیرند از آنالیز DLS استفاده می شود. بدین منظور، ۲٪ وزنی از نانو ذرات آلومینا در آب مقطر پراکنده شده و به مدت ۲۰ دقیقه تحت اولتراسونیک در دمای 25°C قرار می گیرند. شکل ۴-۴ توزیع اندازه ذرات پراکنده شده در محیط آب را نشان می دهد. با توجه به این شکل، قطر هیدرودینامیکی متوسط ذرات آلومینا حدود ۸۷۷ nm به دست می آید که این اندازه با قطر به دست آمده توسط SEM متفاوت است که دلیل آن می تواند تجمع ذرات در محیط سیال باشد.



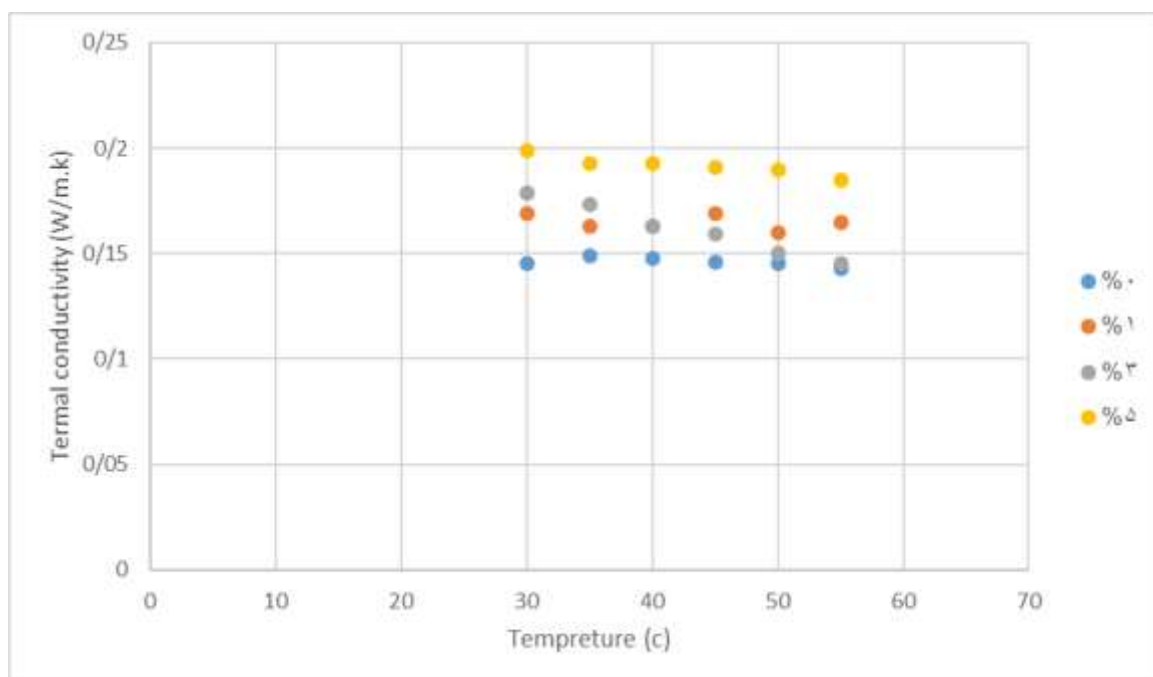
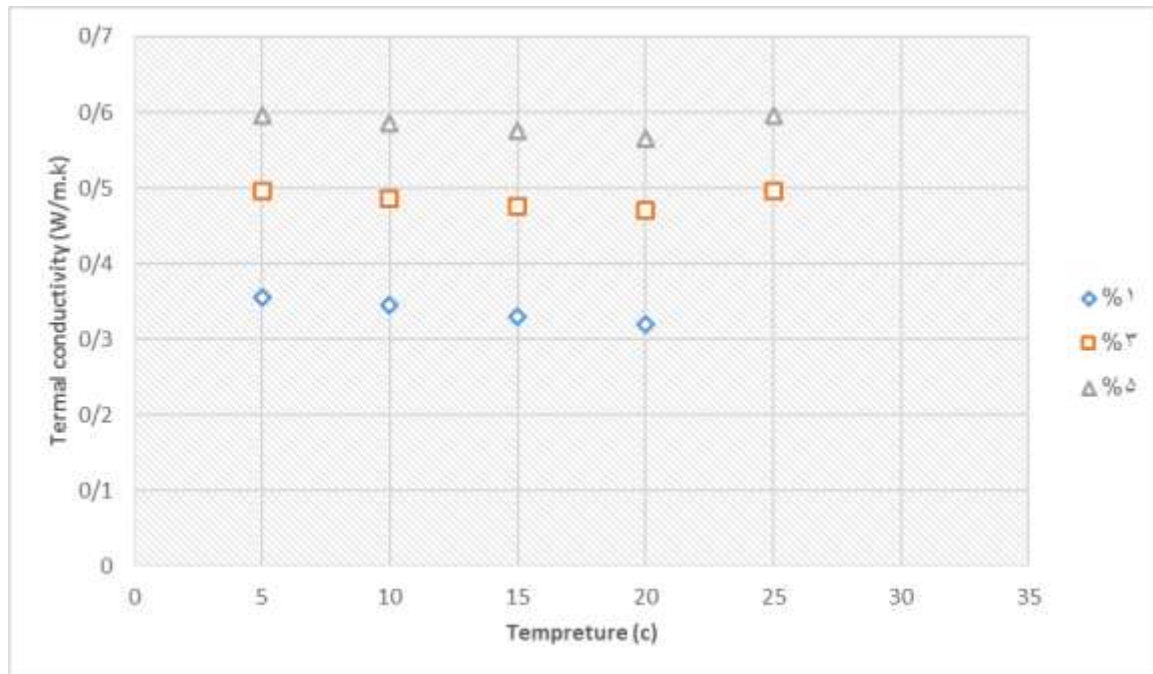
شکل ۴-۴- نمودار توزیع اندازه ذرات آلومینا در محیط آب

۴-۲-۲- ضریب هدایت گرمایی ان اکتادکان حاوی نانوذرات آلومینا

ضریب هدایت گرمایی ان - اکتادکان حاوی ۱٪، ۳٪، ۵٪ وزنی نانوذرات آلومینا در بازه دمایی $^{\circ}\text{C}$ ۲۵-۵ و $^{\circ}\text{C}$ ۵۵-۳۰ در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. ضریب هدایت گرمایی نشان داده شده میانگین پنج اندازه گیری با بیشترین انحراف معیار برابر ۲٪ است. با توجه به شکل ۴-۵(a)، در بازه دمایی $^{\circ}\text{C}$ ۲۰-۵ به طور کلی ضریب هدایت گرمایی کاهش داشته است. به طور کلی آنچه که (۱۲) و (۱۳) برای ان - اکتادکان خالص هم بیان شده کاهش ضریب هدایت گرمایی با افزایش دماست. برای ان - آیکوسین و ان - آیکوسین حاوی نانوذرات CuO، ضریب هدایت گرمایی با افزایش دما بین $^{\circ}\text{C}$ ۳۳-۱۰ تغییر زیادی نداشته است. با رسیدن دما به $^{\circ}\text{C}$ ۲۵ و نزدیک شدن به دمای ذوب، ساختار کریستالی به سمت ناپایداری رفته و ضریب هدایت بیشتر می شود.

در شکل ۴-۵(b)، ضریب هدایت گرمایی ان - اکتادکان حاوی نانو ذرات آلومینا در فاز مایع (بازه دمایی $^{\circ}\text{C}$ ۳۰ - ۵۵) نسبت به فاز جامد به طور کلی کاهش داشته است.

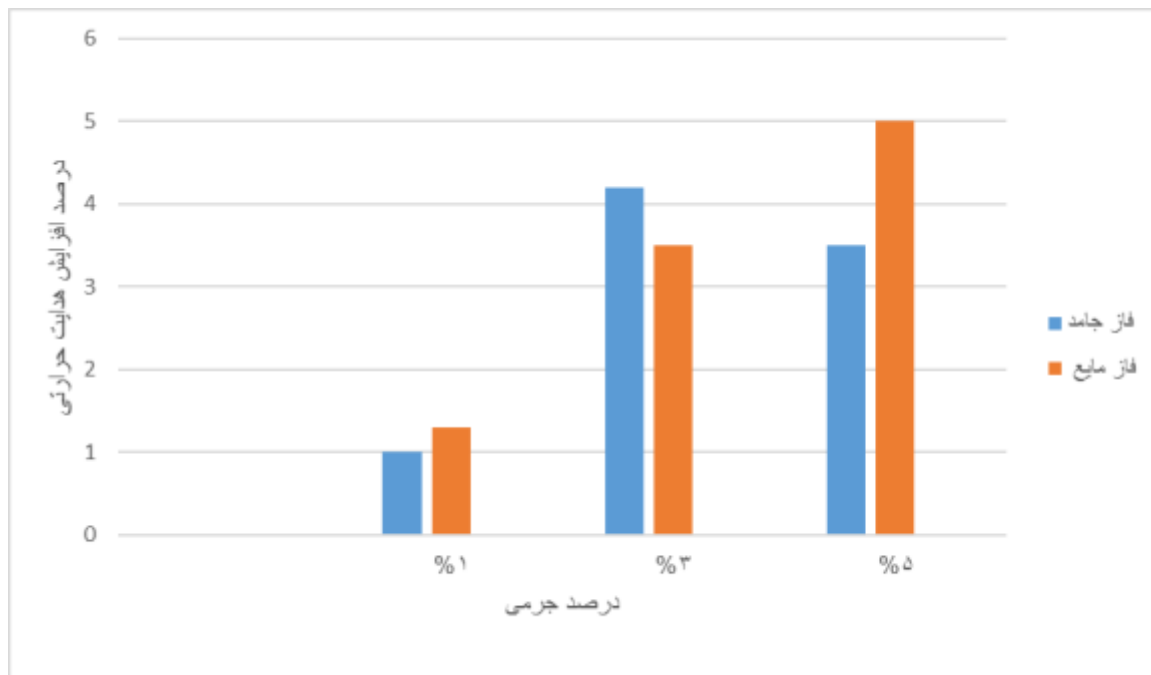
به جز آب و چند مولکول قطبی دیگر، ضریب هدایت گرمایی بسیاری مایعات در دماهای پایینتر از نقطه جوش با افزایش دما کاهش می یابد که این کاهش می تواند به صورت خطی باشد.



شکل ۴-۵- ضریب هدایت گرمایی ان - اکتاد کان حاوی نانو ذرات آلومینا (a) فاز جامد (b) فاز مایع

افزایش غیرعادی ضریب هدایت گرما در نزدیکی نقطه ذوب کاملاً مشخص است. پس از تغییر فاز، ضریب هدایت گرمایی دارای یک کاهش ناگهانی است (کاهش حدود ۵۰ درصدی فاز مایع نسبت به جامد). مکانیزم فیزیکی انتقال گرما در مایعات بر پایه انتقال انرژی و مومنتوم توسط نوسان مولکولهایی است که در میدان نیروی مشترک مولکولهای مجاور قرار دارند، در صورتی که در جامدات مکانیسم انتقال گرما توسط ارتعاشات شبکه ای (انتقال فوتون) و انتقال الکترونهاست که در فلزات انتقال الکترون غالب است و در غیر فلزات انتقال فوتون افزایش ضریب هدایت گرمایی در فاز جامد به صورت غیر یکنواخت است و بیشترین افزایش در ۵٪ وزنی اتفاق افتاده است و در ۳٪ وزنی ضریب هدایت فاز جامد کاهش داشته است. بیشترین افزایش ضریب هدایت گرمایی فاز جامد در دمای 5°C و کسر جرمی ۳٪ بوده است. همانطور که از شکل پیداست، ضریب هدایت گرمایی افزایش و کاهش داشته است. دلیل این امر می تواند پیدا شدن حفره های هوایی و انحرافات شبکه کریستالی جامد باشد.

در شکل ۴-۶ یک مقایسه بین درصد افزایش متوسط ضریب هدایت گرمایی در فاز مایع (دمای $35-55^{\circ}\text{C}$) و فاز جامد (دمای $20-5^{\circ}\text{C}$) صورت گرفته است. بیشترین افزایش متوسط ضریب هدایت گرمایی در فاز جامد حدود ۴/۵٪ مربوط به کسر جرمی ۳٪ است. در فاز مایع PCM حاوی نانودرات آلومینا بیشترین افزایش حدود ۵٪ در کسر جرمی ۵٪ می باشد.

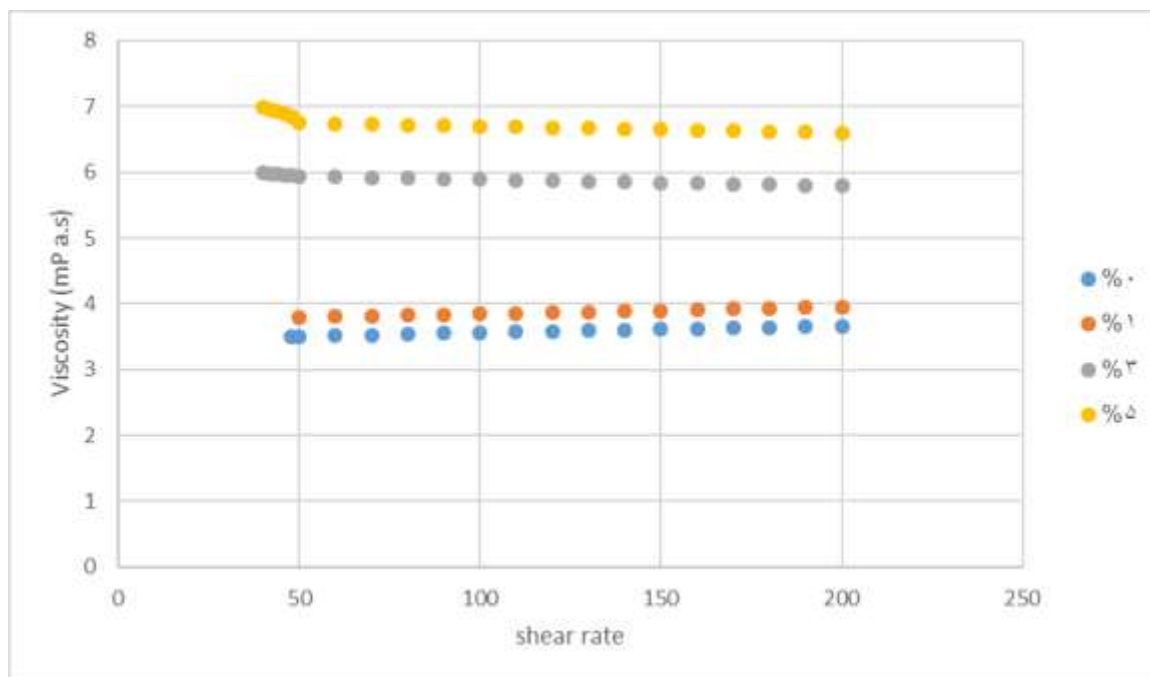


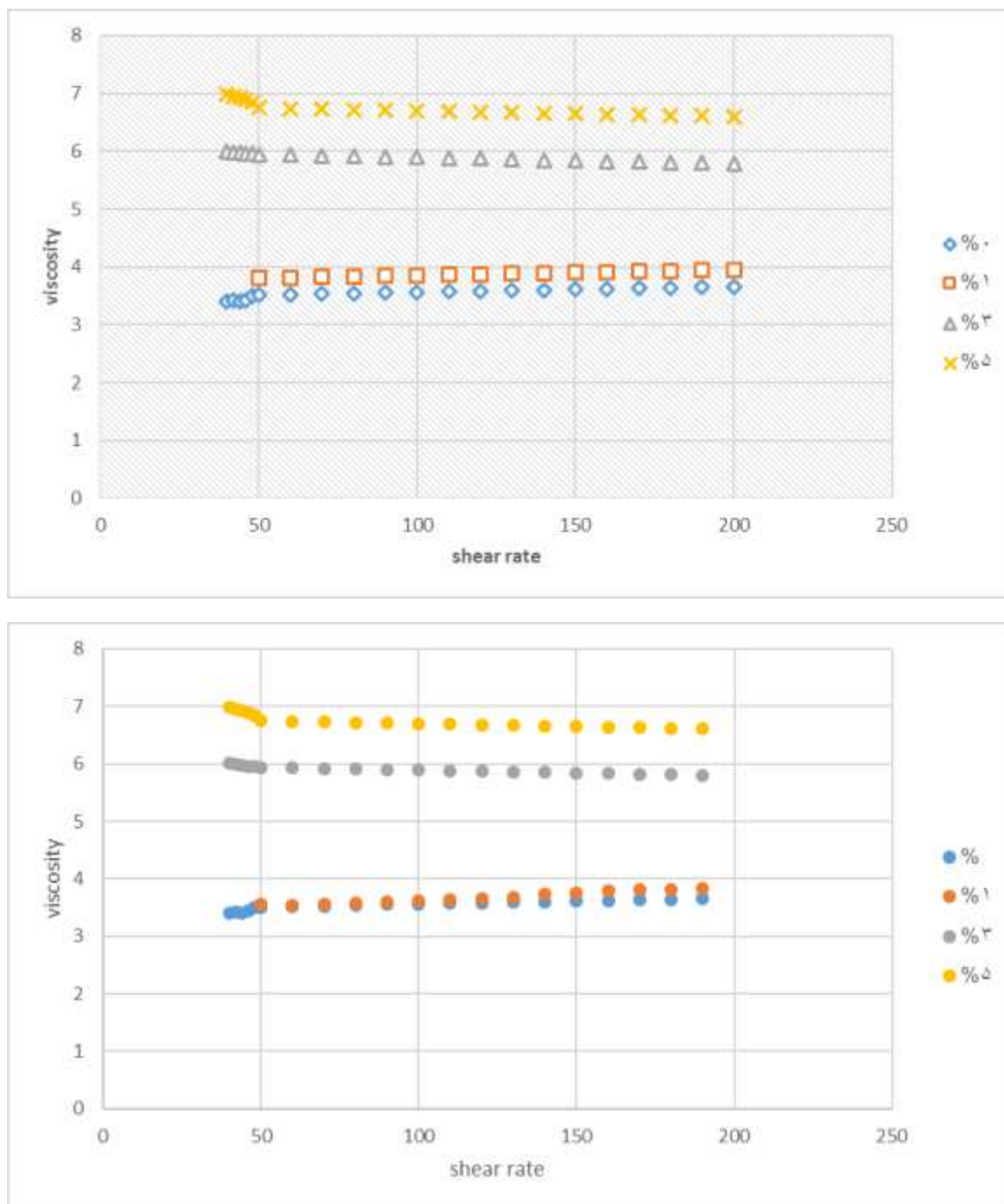
شکل ۴-۶ درصد افزایش ضریب هدایت گرمایی ان - اکتا دکان حاوی نانو آلومینا

۴-۲-۳ لزجت و ویژگیهای رئولوژیکی ان اکتاد کان حاوی نانوذرات آلومینا

به دلیل وجود جابجایی طبیعی در سیستمهای ذخیره انرژی با PCM و وابستگی آن به لزجت PCM مایع، لزجت و رفتار رئولوژیکی PCM و PCM حاوی نانوذرات بررسی می شود. ابتدا باید مشخص شود که آیا و ان - اکتا دکان حاوی نانو ذرات آلومینا در فاز مایع رفتار نیوتنی دارند و یا غیر نیوتنی. بر این اساس، نمودار لزجت بر حسب نرخ برش در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. برای کسر جرمی $\phi_m \leq 0.01$ ، تغییرات لزجت مستقل از نرخ برش در بازه 10^{-2} - 10^{-5} s⁻¹ است و بنابر این رفتار PCM حاوی نانوذرات آلومینا در این شرایط نیوتنی است. برای کسر جرمی های بالاتر از این مقدار، PCM حاوی نانو آلومینا رفتار برشی - نازک شونده از خود نشان می دهد. در مطالعاتی که روی نانوسیالات صورت گرفته است، بعضا رفتار غیر نیوتنی مشاهده شده است؛ چنانچه، برای نانوسیال برای کسر حجمی بزرگتر از ۰/۰۲ رفتار غیر نیوتنی مشاهده می شود که دلیل آن هم کسر حجمی مؤثر تجمع ذرات نسبت به کسر حجمی واقعی آن ها است.

با افزایش دما حرکت مولکولهای مایع روی هم آسانتر شده و در نتیجه لزجت که به انتقال ممانتم بین مولکولها مرتبط است کاهش می یابد. با توجه به آنچه در شکل ۴-۷ نشان داده شده است افزایش دما سبب کاهش لزجت (ظاهری) شده است به طوریکه به عنوان مثال در کسر جرمی ۱٪، با افزایش دما از 35°C به 55°C مقدار لزجت ۳۳٪ کاهش یافته است. و یا در نرخ برش $98/74\text{ s}^{-1}$ و در کسر جرمی ۳٪ و ۵٪، با افزایش دما از 35°C به 55°C مقدار لزجت به ترتیب حدود ۲۹٪ و ۱۲٪ کاهش داشته است. همچنین افزودن نانو ذرات به آن اکتادکان، لزجت آن را به طور قابل ملاحظه ای افزایش داده است به طوریکه با افزودن تنها ۱٪ وزنی نانوذرات آلومینا به PCM، مقدار لزجت ظاهری به ترتیب ۱۰٪، ۱۳٪ و ۱۰٪ برای دمای 35°C ، 45°C ، 55°C افزایش داشته است. در کسر جرمیهای بزرگتر این افزایش بیشتر است، چنانچه در نرخ برش $36/7\text{ s}^{-1}$ و دمای 35°C ، با افزودن ۵٪ وزنی نانوذرات لزجت حدود ۶۰٪ افزایش داشته است.





شکل ۴-۷- لزجت PCM / Al₂ O₃ بر حسب نرخ برش (a) T = 35°C (b) T = 45°C (c) T = 55°C

در کسر جرمی بزرگتر از ۳٪، PCM حاوی نانوذرات می تواند به صورت یک سیال غیر نیوتنی که قانون توان بر آن حاکم است در نظر گرفته شود. ضریب پایداری سیال (K) و شاخص رفتار جریان (n) در دمای مختلف در جدول ۴-۲ نشان داده شده است. در ستون آخر جدول هم R² به عنوان معیاری از کیفیت برازش داده ها

روی رابطه توانی آورده شده است. با توجه به مقادیر جدول، در کسر جرمیهای بزرگ و دماهای پایین رفتار برشی - نازک شونده برجسته تر است. همچنین، ضریب پایداری با کسر جرمی و دمای سیال تغییر می کند. تغییر ضریب پایداری با دما و کسر جرمی مانند تغییرات لزجت است. شاخص رفتار جریان با افزایش کسر جرمی نانو ذرات کاهش و با افزایش دما افزایش می یابد چراکه این شاخص نشان دهنده انحراف رفتار سیال از سیال غیر نیوتنی است.

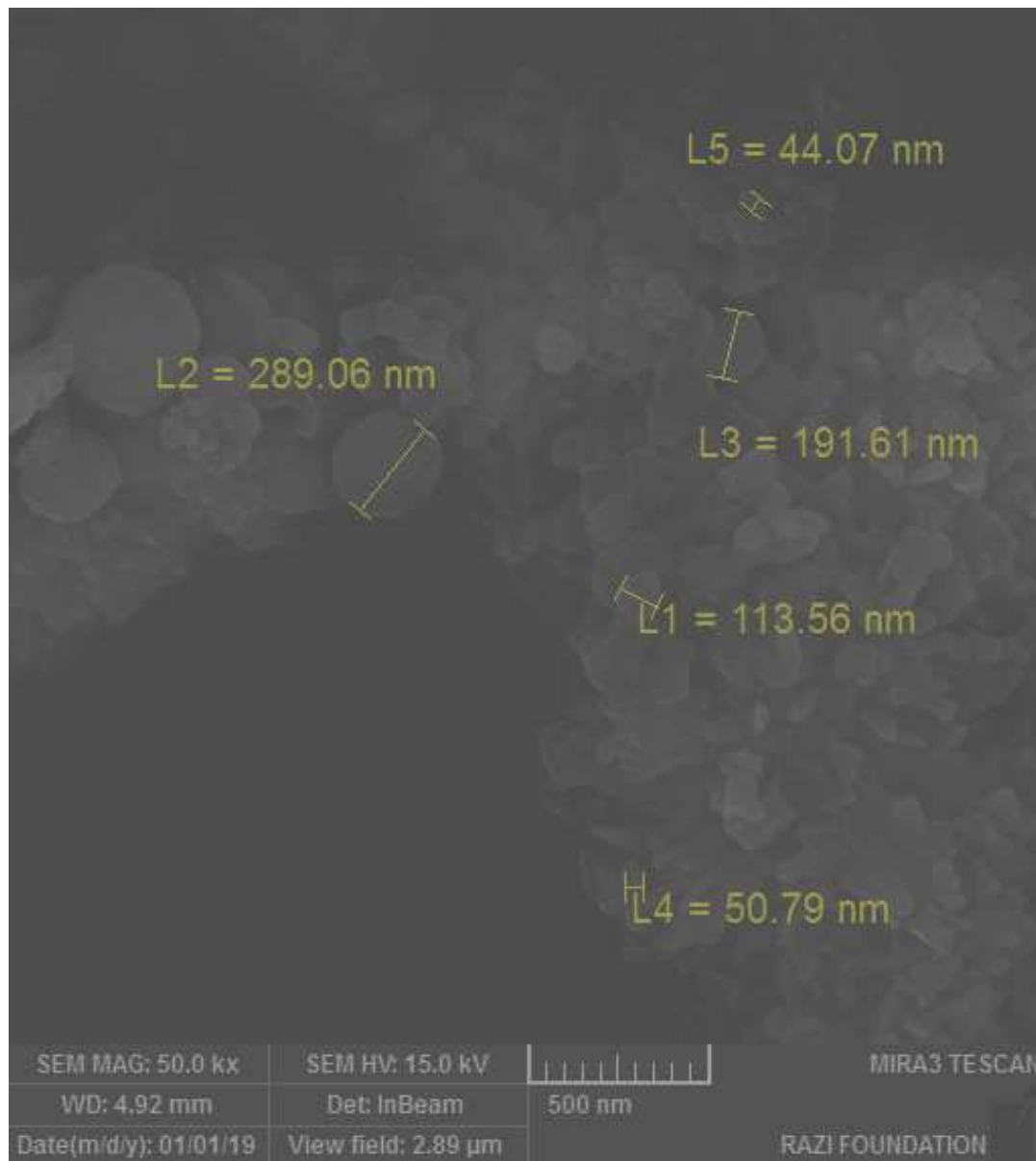
جدول ۴-۲- ضریب پایداری و شاخص رفتار آن -اکتاد کان حاوی نانوذرات آلومینا در دماهای مختلف

| T(°C) | $\phi_m(\%)$ | K(mPa.s ⁿ) | N | R ² |
|-------|--------------|------------------------|-------|----------------|
| 35 | 0 | 3.63 | 1.000 | 0.999 |
| | 1 | 3.987 | 1.000 | 0.996 |
| | 3 | 7.91 | 0.897 | 0.997 |
| | 5 | 11.021 | 0.822 | 0.998 |
| 45 | 0 | 2.93 | 1.000 | 0.999 |
| | 1 | 3.325 | 1.000 | 0.998 |
| | 3 | 6.689 | 0.890 | 0.997 |
| | 5 | 9.897 | 0.851 | 0.994 |
| 55 | 0 | 2.44 | 1.000 | 0.998 |
| | 1 | 2.685 | 1.000 | 0.995 |
| | 3 | 4.854 | 0.912 | 0.997 |
| | 5 | 7.480 | 0.878 | 0.992 |

۴-۳ ویژگیهای آن - اکتاد کان حاوی نانوذرات اکسید مس

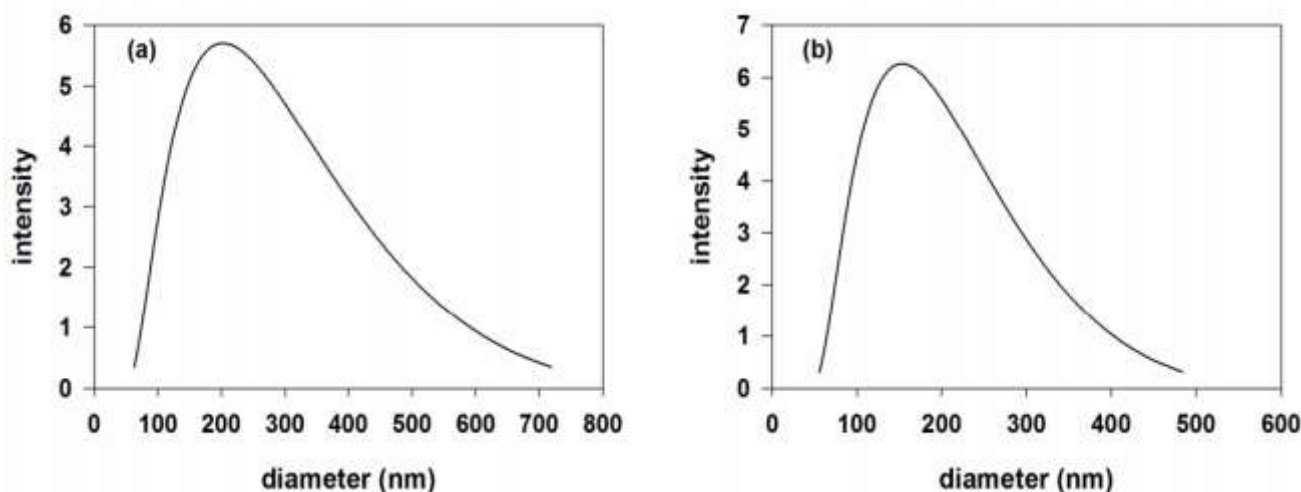
۴-۳-۱ ویژگیهای نانوذرات اکسید مس

به منظور بررسی هر چه دقیقتر نانوذرات، آنالیز SEM برای مطالعه مورفولوژی و اندازه نانو ذرات اکسید مس به کار گرفته شد. ریزنگار SEM در شکل ۴-۸ نشان داده شده است. با توجه به، ریزنگار SEM ذرات دارای شکل کروی بوده و قطر تقریبی آنها 30 ± 5 nm می باشد. این قطر تقریبی با شمارش بیش از ۵۰ نانو ذره در ریزنگار به دست آمده است.



شکل ۴-۸- ریزنگار SEM نانو ذرات اکسید مس

از آنجا که نانو ذرات در محیطهای سیال جدید اندازه متفاوتی نسبت به قبل از پراکنش دارند، بنابراین برآورد اندازه مؤثر نانوذرات در محیط PCM مهم است. از آنجا که این - اکتادکان در دمای اتاق جامد است، آنالیز DLS توسط یک محیط با دانسیته پایین (آب) و یک محیط با دانسیته بالا (اتیلن گلیکول) انجام می شود. شکل ۴-۹ نتایج آنالیز DLS را نشان می دهد.

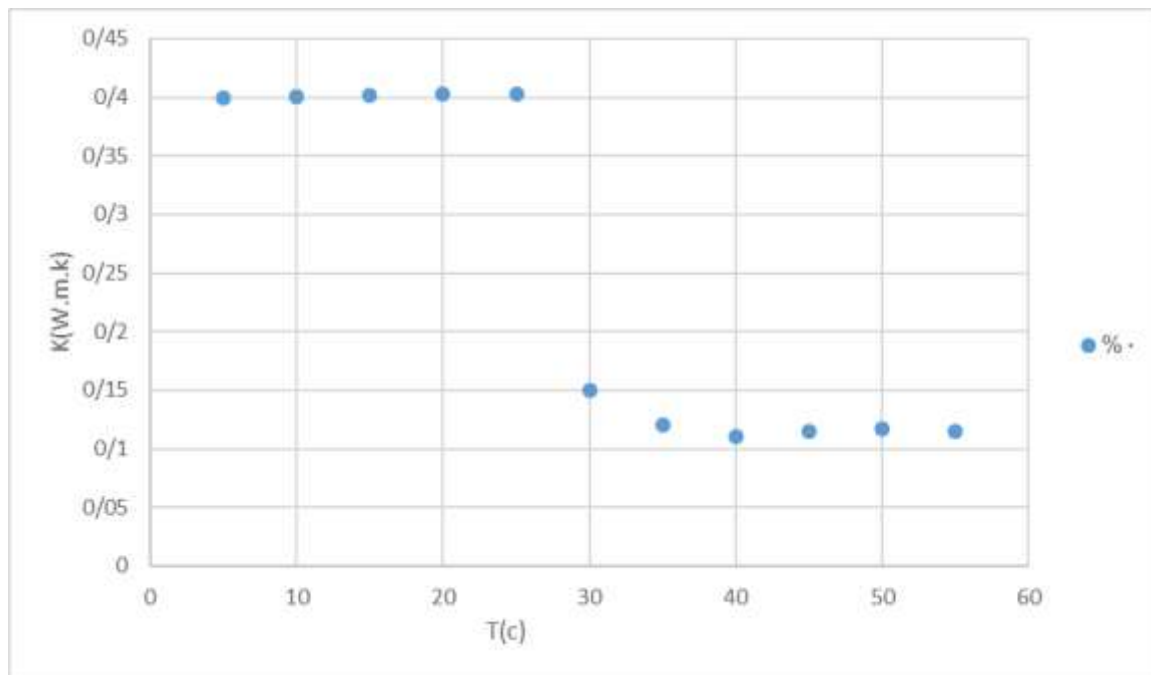


شکل ۹-۴ توزیع اندازه نانوذرات اکسید مس در محیط (a) آب، (b) EG

با توجه به شکل ۹-۴ (a)، اندازه ذرات در بازه ۶۰-۷۲۰ nm قرار می گیرد که متوسط قطر ۲۷۵ nm برای نانو ذرات پراکنده شده در آب به دست می آیند. برای محیط EG با توجه به شکل ۹-۴ (b)، یک بازه باریکتر با متوسط قطر ۲۰۰ nm وجود دارد. با توجه به لزجت بالای EG می توان نتیجه گرفت که نانوذرات اکسیدمس در آن محیط دارای تجمع کمتر بوده اند که با توجه به اینکه محیط آن - کتادکان نیز دارای لزجت بالایی است (حدود سه برابر آب) این اتفاق در محیط آن - کتادکان نیز خواهد افتاد. مقایسه اندازه به دست آمده از ریزنگار SEM که مستقل از لزجت محیط است و آنالیز DLS حاکی از بزرگتر بودن ابعاد ذرات به دلیل تجمع آن هاست.

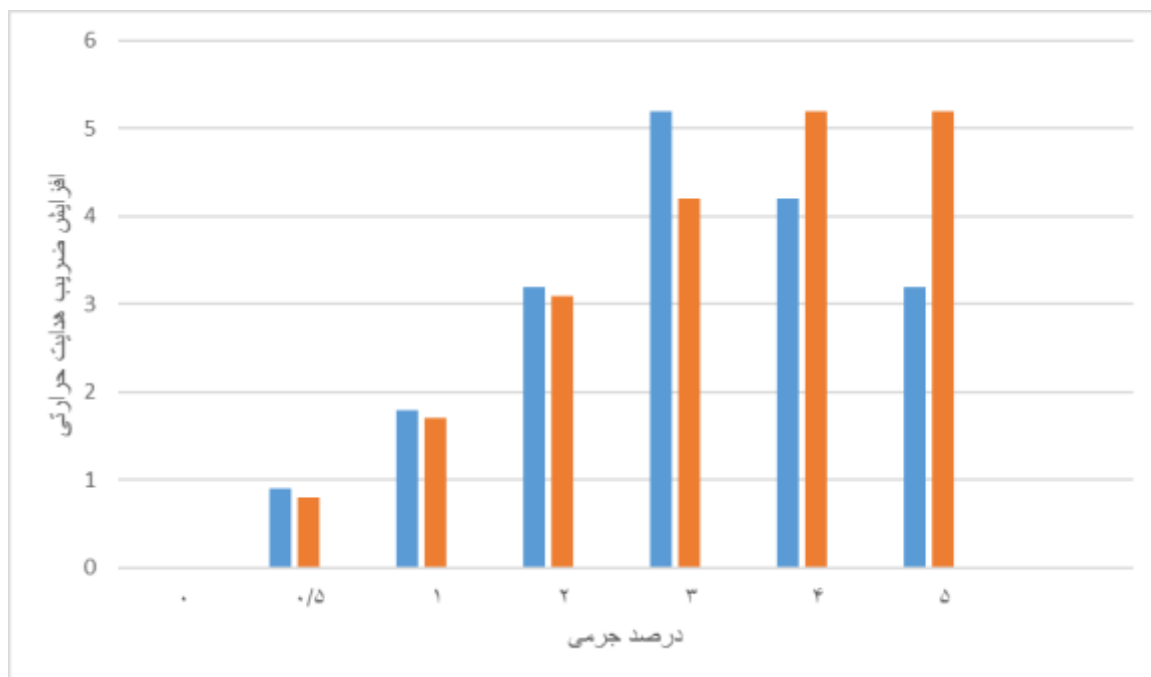
۴-۳-۲ ضریب هدایت گرمایی آن اکتادکان حاوی نانوذرات اکسید مس

تغییرات ضریب هدایت گرمایی آن - اکتادکان حاوی نانوذرات اکتادکان با کسر جرمی و دما در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است. سه ناحیه مجزا روی شکل ۴-۱۰ مشخص شده است؛ ناحیه فاز جامد (25°C - 5°C)، ناحیه تغییر فاز (30°C - 25°C) و ناحیه فاز مایع (55°C - 30°C). ضریب هدایت گرمایی Pcm حاوی نانو ذرات اکسید مس به دما بستگی دارد، در ناحیه تغییر فاز (30°C - 25°C) این وابستگی شدیدتر می شود. در فاز جامد به طور کلی ضریب هدایت گرمایی با افزایش دما کاهش می یابد، بجز در 25°C . همچنین ضریب هدایت گرمایی با افزایش دما در فاز مایع کاهش می یابد.



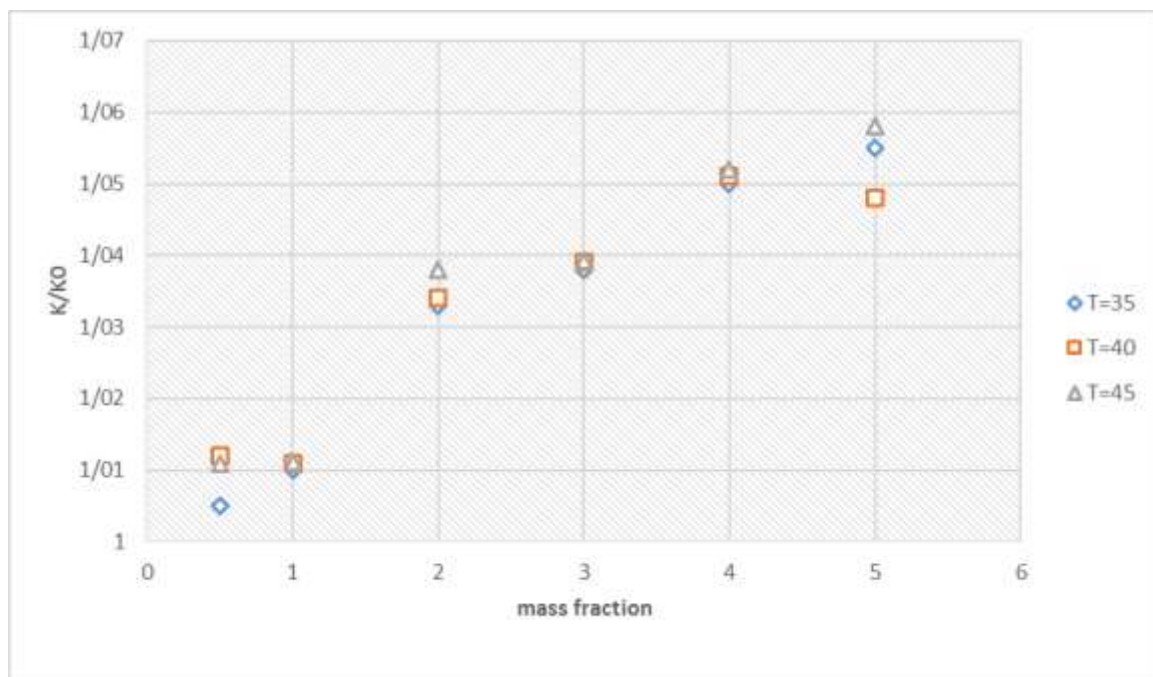
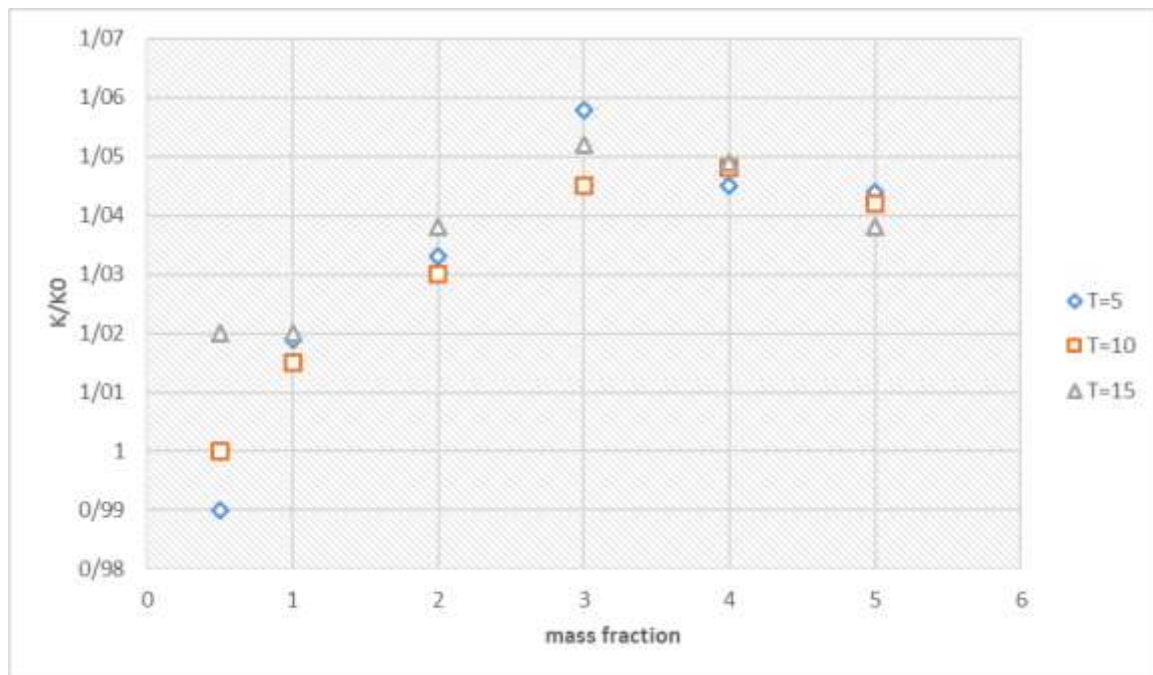
شکل ۴-۱۰ - ضریب هدایت گرمایی PCM در دمای متفاوت

در نزدیکی نقطه ذوب، با افزایش دما ساختار کریستالی PCM ناپایدار می شود. با افزایش دما ارتعاشات شبکه مولکولی افزایش می یابد در نتیجه انتقال انرژی توسط فوتونها بیشتر شده و ضریب هدایت گرمایی به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. پس از گذار از ناحیه تغییر فاز، ضریب هدایت به طور ناگهانی سقوط می کند که دلیل آن تبدیل ساختار منسجم و به هم پیوسته جامد به ساختار نامنظم مایع است. بیشتر بودن ضریب هدایت در نزدیکی نقطه ذوب یک پدیده مطلوب در سیستمهای ذخیره انرژی است. با میانگین گیری از ضریب هدایت گرمایی در ناحیه فاز جامد (25°C - 5°C) و ناحیه فاز مایع (55°C - 30°C) در کسر جرمی های مختلف نمودار مقایسه ای شکل ۴-۱۱ حاصل می شود. بیشینه درصد افزایش ضریب هدایت گرمایی در هر دو فاز حدود ۵٪ است. بیشترین افزایش در فاز جامد در کسر جرمی ۳٪ و در فاز مایع در کسر جرمی ۴٪ اتفاق می افتد.



شکل ۴-۱۱ درصد افزایش متوسط ضریب هدایت گرمایی PCM به PCM/ CuO

نسبت ضریب هدایت گرمایی PCM حاوی نانو ذرات CuO (k) به ضریب هدایت گرمایی PCM (k_0) در کسر جرمیهای مختلف نانوذرات در شکل ۴-۱۲ برای فاز مایع و جامد نشان داده شده است. در تمام کسر جرمیها، k/k_0 همواره بزرگتر از یک است. در فاز جامد (شکل ۴-۱۲ (a)) ضریب هدایت گرمایی ابتدا با افزایش کسر جرمی افزایش می یابد و پس از کسر جرمی ۳٪ ضریب هدایت روند کاهش می گیرد. این افزایش نایکخواخت ضریب هدایت قبلا هم برای آن - کتاد کان حاوی نانوذرات آلومینا به دست آمد. در فاز مایع (شکل ۴-۱۲ (b)) غیریکخواختی افزایش ضریب هدایت گرمایی در ۴٪ وزنی اتفاق می افتد که پس از آن ضریب هدایت با افزایش کسر جرمی کمتر می شود. دلیل این امر می تواند تشکیل تجمع نانو ذرات در کسر جرمی های بالا و حتی روش اندازه گیری ضریب هدایت باشد.



شکل ۴-۱۲ نسبت ضریب هدایت گرمایی PCM به PCM / CuO (a) فاز جامد (b) فاز مایع

به منظور پیش بینی ضریب هدایت گرمایی آن - اکتاد کان حاوی نانو ذرات اکسید مس، از روش رگرسیون غیر خطی برای برازش داده ها روی رابطه زیر استفاده شده است:

$$k = (1 + a_1 \phi_m + a_2 \phi_m^2)(a_3 + a_4 T + a_5 T^{\frac{1}{3}} + a_6 T^{\frac{2}{3}}) \quad (1-4)$$

که در آن k ضریب هدایت در فاز جامد یا مایع، و کسر جرمی نانو ذرات، T دما بر حسب $^{\circ}C$ و a_1 تا a_6 ضرایب رگرسیون هستند که در جدول ۳-۴ آورده شده اند.

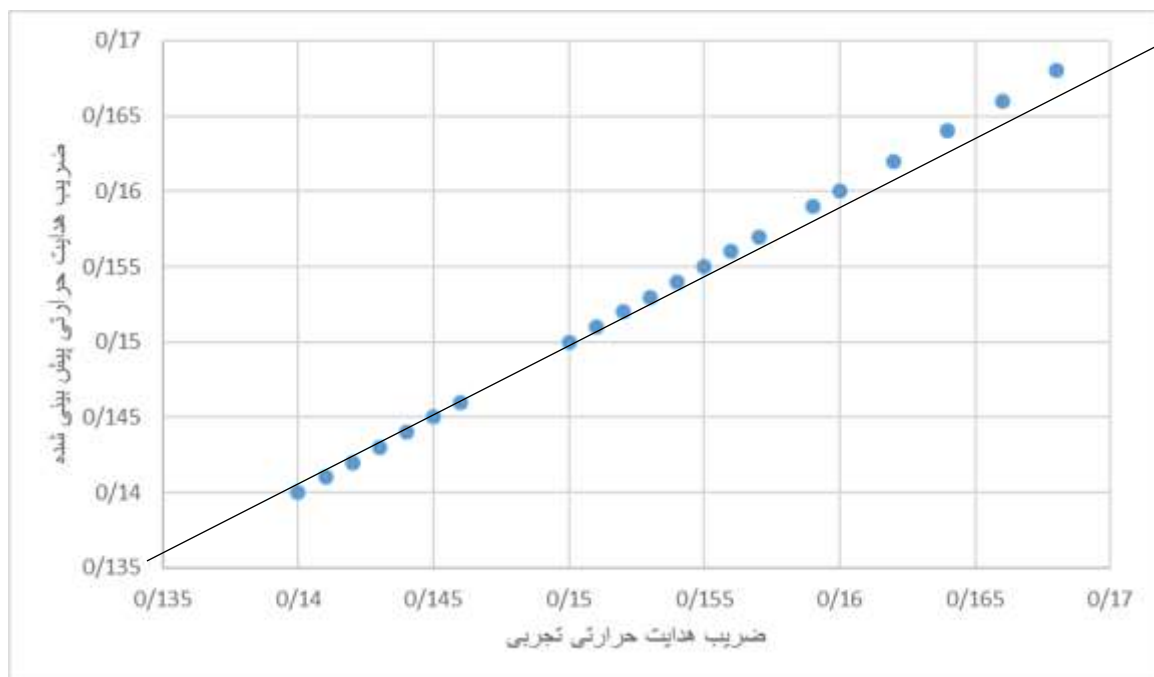
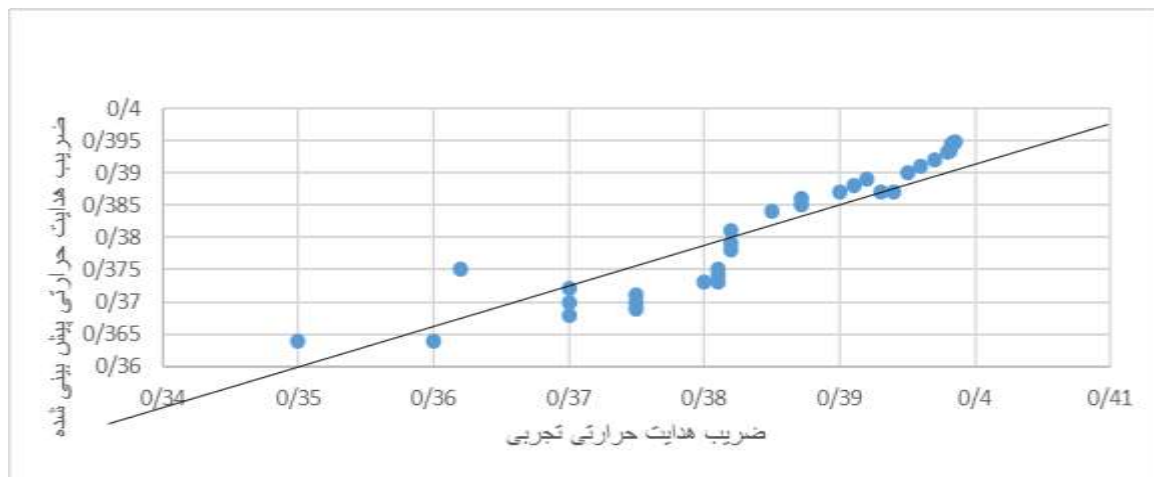
آنالیز رگرسیون فوق الذکر با روش حداقل مربعات انجام شده است. ضریب تعیین (R) برای برازش فوق دارای مقادیری نزدیک به یک است ($R^2=0.9530$ برای $5^{\circ}C \leq T \leq 25^{\circ}C$ و $R^2=0.9938$ برای $30^{\circ}C \leq T \leq 55^{\circ}C$) که نشان دهنده کیفیت خوب برازش است.

جدول ۳-۴- ضرایب رگرسیون رابطه ۱-۴

| <i>Coefficients of Eq. (1-6)</i> | $5^{\circ}C \leq T \leq 25^{\circ}C$ ($R^2=0.9530$) | $30^{\circ}C \leq T \leq 55^{\circ}C$ ($R^2=0.9938$) |
|--------------------------------------|--|---|
| a_1 | 2.8204 | 2.0396 |
| a_2 | -39.1211 | -18.8401 |
| a_3 | -0.1098 | 5.0831 |
| a_4 | 0.0442 | -0.1094 |
| a_5 | 0.6708 | -4.1458 |
| a_6 | -0.3027 | 1.1650 |

برای مشاهده کیفیت آنالیز رگرسیون، مقادیر ضریب هدایت گرمایی که توسط رابطه ۱-۴ پیش بینی شده اند بر حسب مقادیر به دست آمده از آزمایش روی یک نمودار دوتاییگی^۱ در شکل ۱۳-۴ نشان داده شده اند. نمودار دوتاییگی، همبستگی قابل قبول ضریب هدایت پیش بینی شده از رابطه ۱-۴ و مقادیر حاصل از اندازه گیری تجربی را نشان می دهد که با نزدیکی نقاط پراکنده به خط $y = X$ اثبات می شود. همچنین انحراف بین مقادیر تجربی و مقادیر پیش بینی شده کمتر از 0.0821% برای فاز جامد و 0.924% برای فاز مایع است.

¹ Parity plot



شکل ۴-۱۳- نمودار دو تایگی ضریب هدایت گرمایی از رابطه ۶-۱ (a) فاز جامد (b) فاز مایع

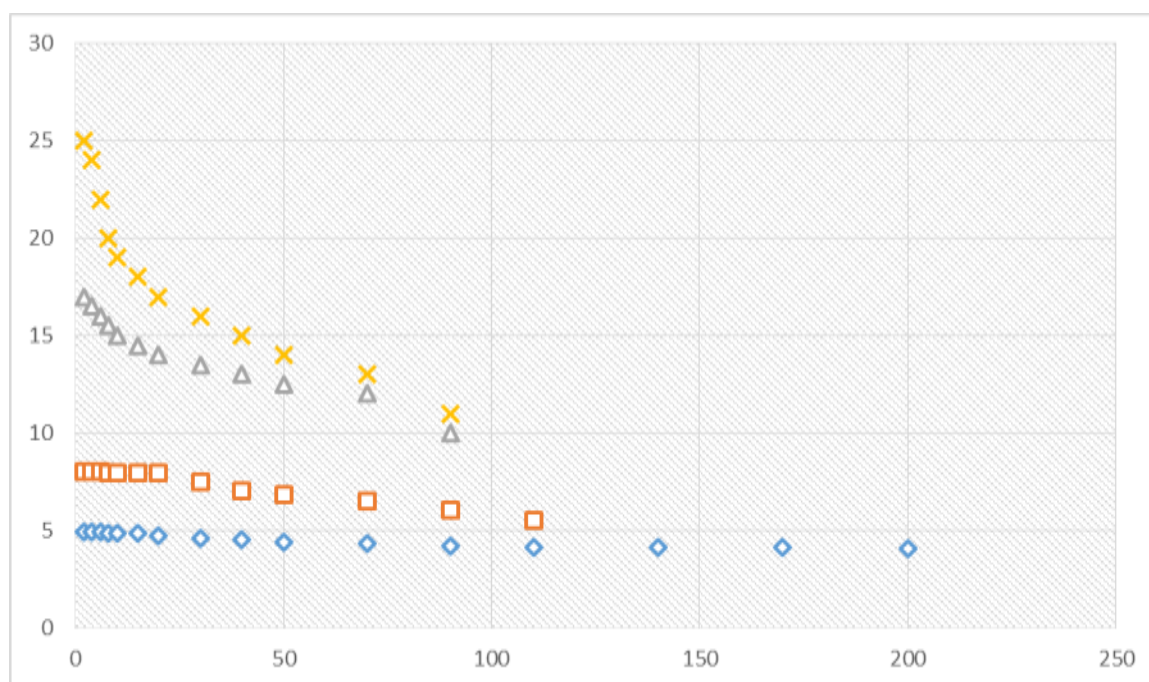
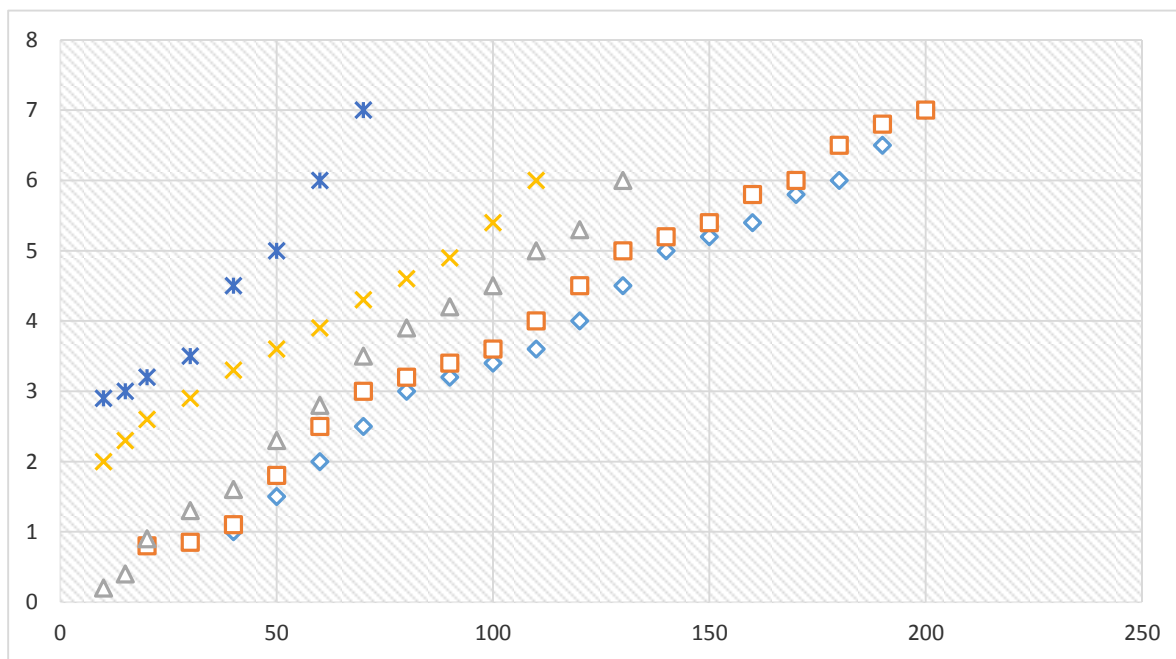
۴-۳-۳ لزجت و ویژگیهای رئولوژیکی ان اکتاد کان حاوی نانوذرات اکسید مس

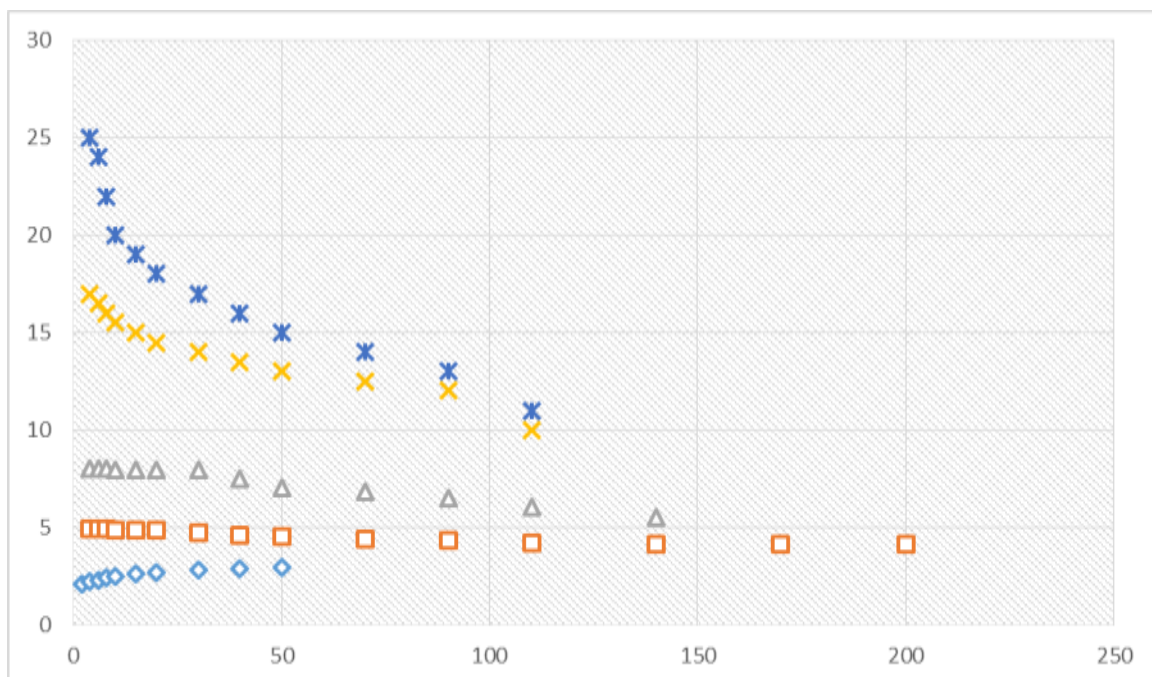
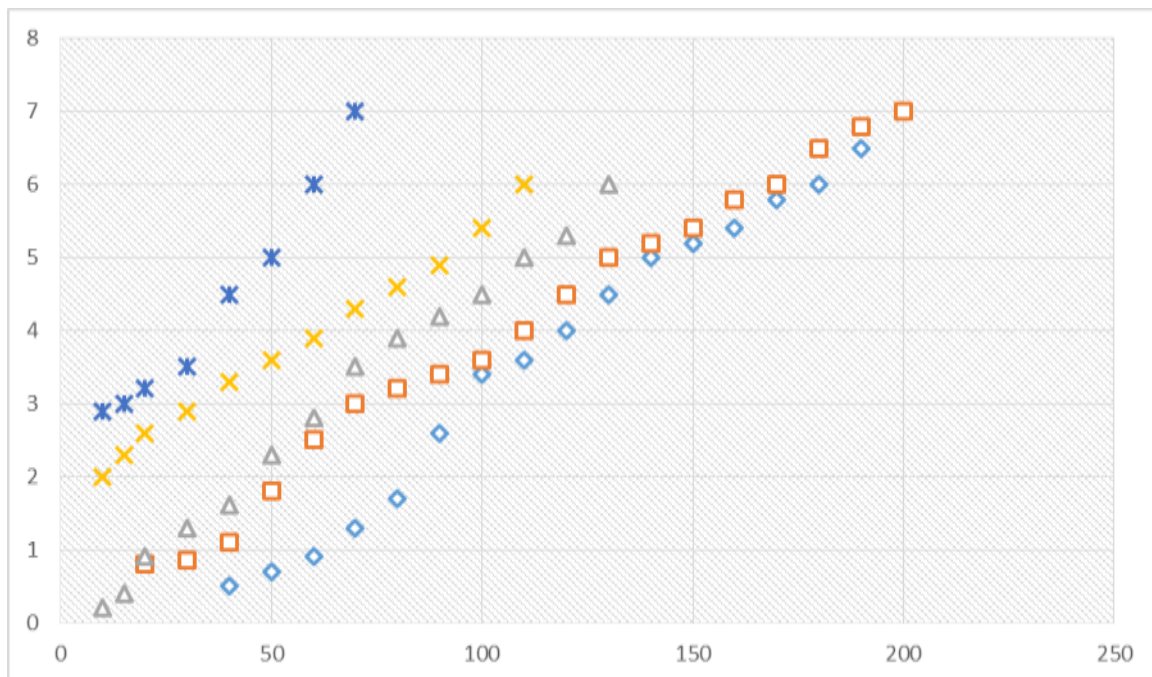
ویژگیهای رئولوژیکی ان - اکتادکان و ان - اکتادکان حاوی نانو ذرات اکسید مس در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۴-۱۴ (b) ، (a) و (c) پیداست تنش برشی به طور خطی با افزایش نرخ برش افزایش پیدا می کند. برای تمام کسر جرمی $0 \leq \phi_m \leq 0.05$ و دمای $35^\circ C \leq T \leq 55^\circ C$ همچنین $\dot{\gamma} \leq 200 s^{-1}$ کلا این رابطه صدق می کند. برای ان - اکتاد کان حاوی نانو ذرات اکسید مس در

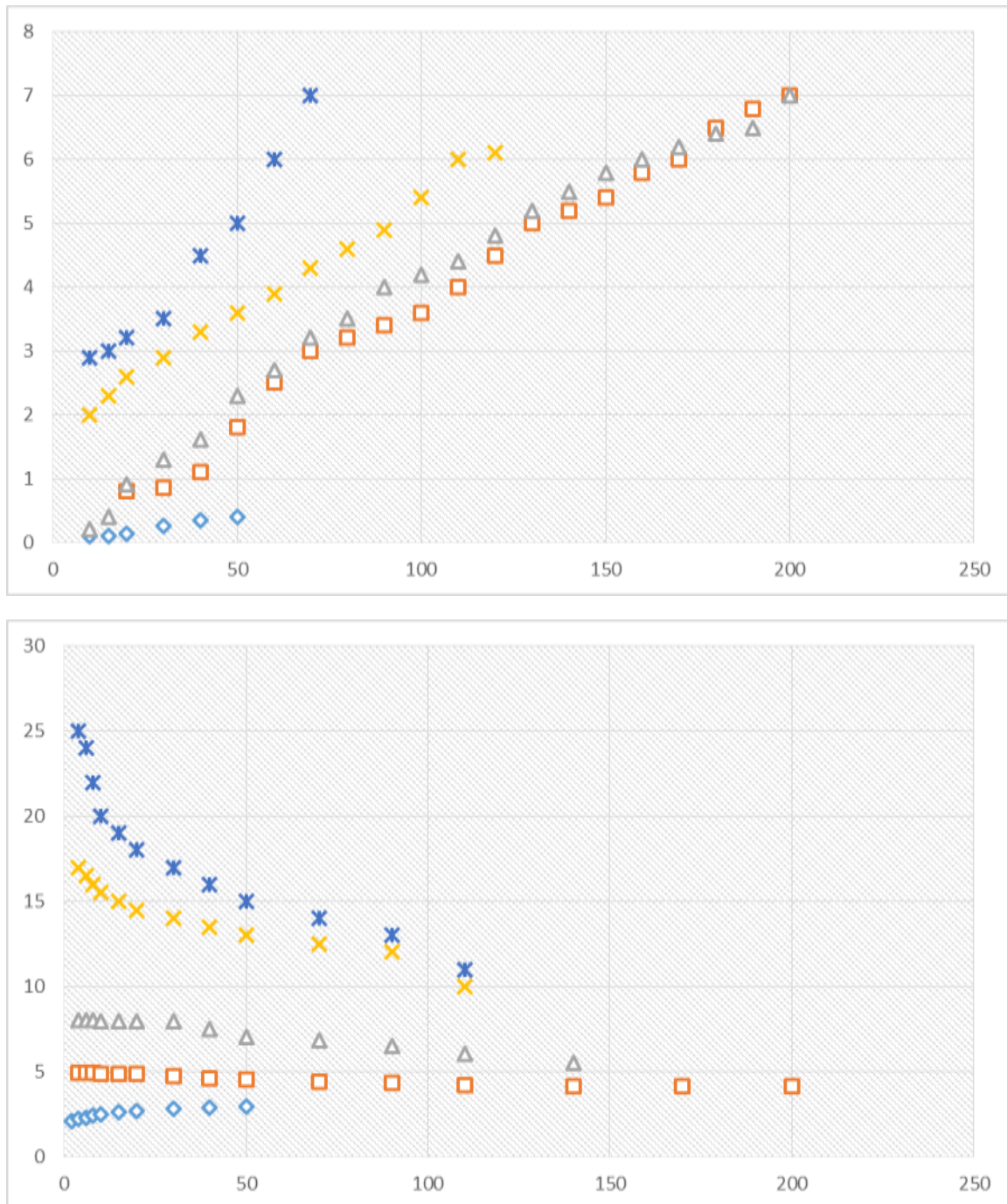
$\phi_m \leq 0.01$ رابطه $\tau/\dot{\gamma}$ مقدار ثابتی است و بنابراین در این حالت PCM و PCM / CuO در فاز مایع یک سیال نیوتنی است. مقدار لزجت دینامیکی با افزودن ۱٪ وزنی نانوذرات اکسید مس افزایش یافته است به طوریکه در دمای 45°C ، 35°C و 55°C به ترتیب ۱۰٪، ۱۱٪ و ۶٪ افزایش در لزجت مشاهده می شود. همچنین با افزایش دما لزجت کاهش یافته است که همانطور که قبلاً ذکر شد دلیل آن کاهش نیروهای چسبندگی بین مولکولی است. به عنوان نمونه، در ۱٪ وزنی، با افزایش دما از 35°C به 55°C لزجت حدود ۸۶٪ کاهش یافته است. با افزایش کسر جرمی نانو ذرات اکسید مس داده های رئولوژیکی، گذار از سیال نیوتنی به غیر نیوتنی را نشان می دهند. با برازش داده ها مشاهده می شود که PCM حاوی نانوذرات اکسید مس برای $\phi_m \leq 0.02$ بخوبی با مدل بینگهام (رابطه ۴-۲) تطابق می کند. مقادیر لزجت پلاستیک، تنش تسلیم و R در جدول ۴-۴ آورده شده اند. تمام مقادیر R^2 نزدیک به یک بوده و نشان دهنده کیفیت بالای برازش هستند. در شکل ۴-۱۴ (e)، (d) و (f) لزجت مؤثر ($\mu_{eff} = \tau_Y/\dot{\gamma} + \mu_p$) نشان داده شده است که با افزایش نرخ برش کاهش می یابد. در نرخ برشهای پایین لزجت مؤثر به بینهایت میل می کند یعنی سیال هنوز تسلیم نشده و جریان پیدا نکرده است. همچنین لزجت مؤثر برای $\phi_m \leq 0.02$ افزایش قابل ملاحظه ای دارد.

جدول ۴-۴- ضرایب مدل بینگهام برای سیال غیر نیوتنی

| T(°C) | $\phi_m(\%)$ | $\mu_p(Pa.s)$ | $\tau_Y(dyne/cm^2)$ | R^2 |
|-------|--------------|---------------|---------------------|--------|
| 35 | 0 | 0.0362 | 0 | 0.9999 |
| | 1 | 0.0388 | 0 | 0.9984 |
| | 2 | 0.0445 | 0.5496 | 0.9995 |
| | 3 | 0.0636 | 1.6043 | 0.9950 |
| | 4 | 0.0641 | 2.4014 | 0.9956 |
| 45 | 0 | 0.0292 | 0 | 0.9999 |
| | 1 | 0.0316 | 0 | 0.9984 |
| | 2 | 0.0344 | 0.3995 | 0.9997 |
| | 3 | 0.0497 | 1.5458 | 0.9992 |
| | 4 | 0.0556 | 1.9083 | 0.986 |
| 55 | 0 | 0.0243 | 0 | 0.9995 |
| | 1 | 0.0246 | 0 | 0.9995 |
| | 2 | 0.0254 | 0.3949 | 0.9974 |
| | 3 | 0.0403 | 1.4071 | 0.9984 |
| | 4 | 0.0433 | 1.8322 | 0.9991 |



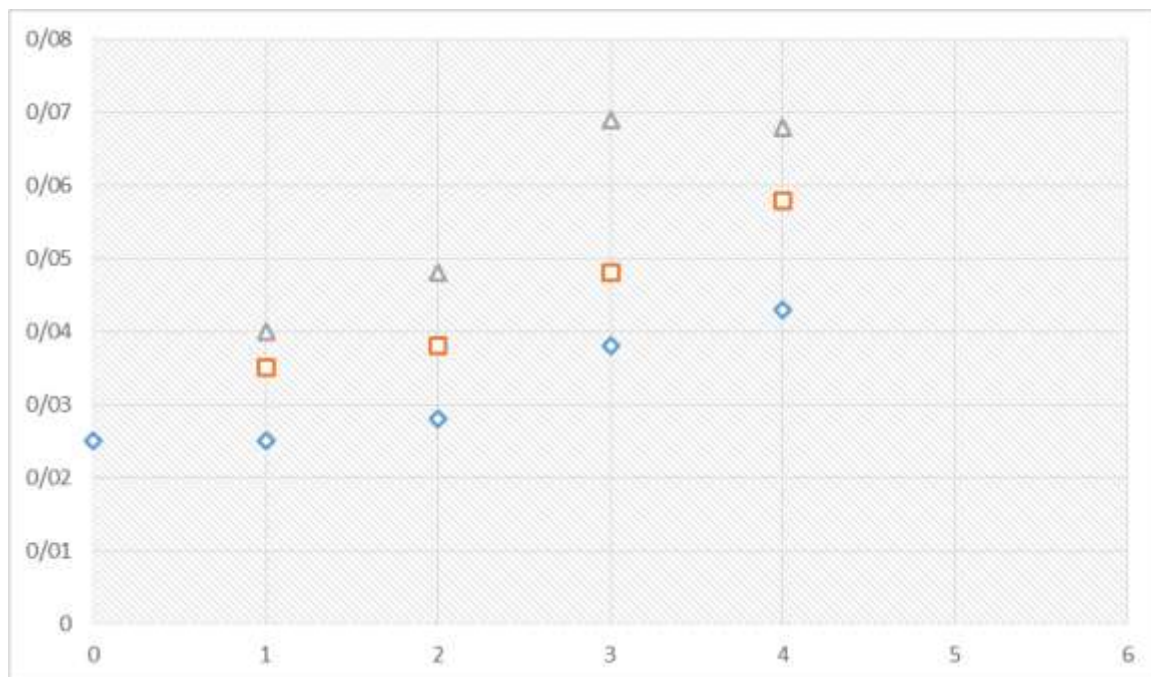




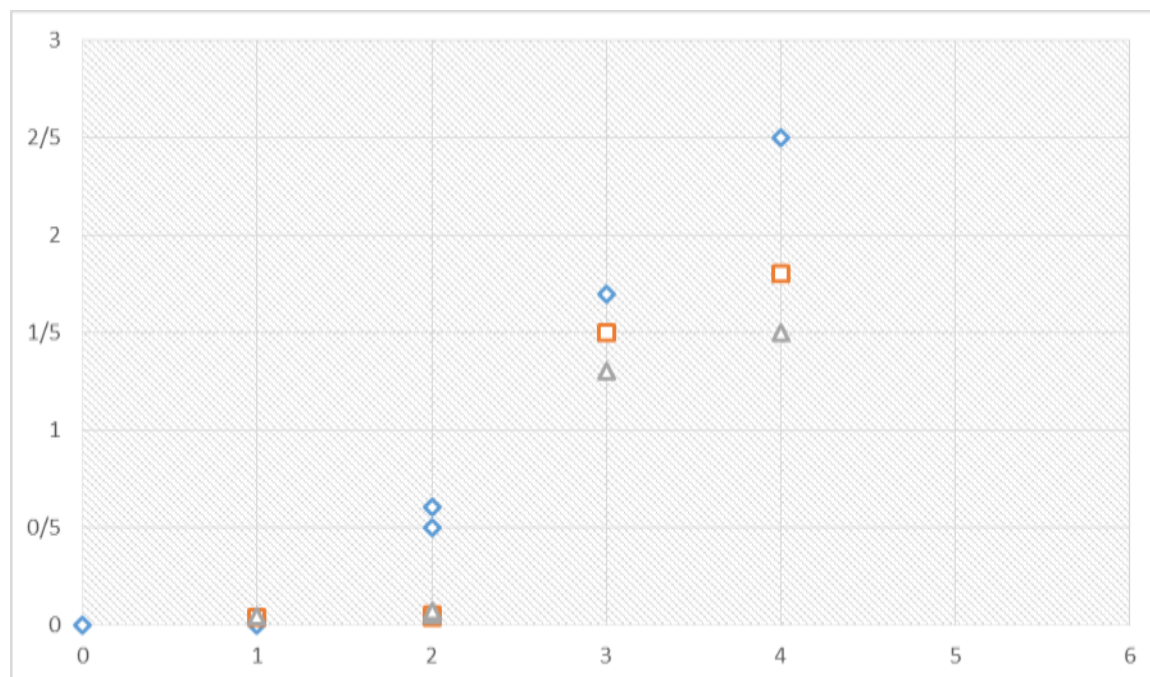
شکل ۴-۱۴) (a, b) و (c) منحنی جریان PCM و PCM / CuO در کسر جرمی متفاوت و دمای به ترتیب $^{\circ}\text{C}$ ۴۵، $^{\circ}\text{C}$ ۳۵ و $^{\circ}\text{C}$ ۵۵ (d, e) و (f) لزجت مؤثر بر حسب نرخ برش PCM و PCM / CuO در کسر جرمی متفاوت و دمای به ترتیب $^{\circ}\text{C}$ ۴۵، $^{\circ}\text{C}$ ۳۵ و $^{\circ}\text{C}$ ۵۵

اثر افزودن نانو ذرات در دماهای مختلف روی لزجت پلاستیک بینگهام و تنش تسلیم بینگهام به ترتیب در شکل ۴-۱۵ و شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است.

همانگونه که از شکل ۴-۱۵ پیداست، مقدار لزجت پلاستیک بینگهام با کاهش دما افزایش می یابد به طوریکه بعنوان نمونه در ۴٪ وزنی، لزجت پلاستیک بینگهام وقتی دما از 55°C به 35°C کاهش پیدا کند، از $33/4 \text{ mPa.s}$ به $61/4 \text{ mPa.s}$ افزایش می یابد که معادل ۴۸٪ افزایش است. همچنین شکل ۱۸۶ نشان می دهد وقتی کسر جرمی از ۲٪ به ۳٪ افزایش می یابد مقدار لزجت پلاستیک با یک شیب تند افزایش می یابد به طوریکه ۴۳٪، ۴۴٪ و ۹٪ افزایش برای دماهای به ترتیب 45°C ، 35°C و 55°C به دست آمد. با توجه به شکل ۶-۱۹ با افزایش کسر جرمی تنش تسلیم افزایش و با افزایش دما تنش تسلیم کاهش داشته است. با افزایش دما، سرعت مولکول های سیال افزایش یافته و حرکت آن ها سریعتر می شود و سیال آسانتر تغییر شکل می دهد.



شکل ۴-۱۵- لزجت پلاستیک بینگهام در کسر جرمی و دماهای مختلف



شکل ۴-۱۶- تنش تسلیم بینگهام در کسر جرمی و دماهای مختلف

فصل ۵:

جمع بندی و پیشنهاد ها

در فصل چهارم نتایج حاصل از تعیین ضریب هدایت گرمایی و ویژگی های رئولوژیکی مواد تغییر فاز دهنده حاوی مواد نانو ساختار و نیز اثر مقدار مواد نانو ساختار و دما روی این ویژگی ها آورده شد. اندازه گیری و بررسی ضریب هدایت گرمایی و ویژگی های رئولوژیکی مواد تغییر فاز دهنده حاوی مواد نانوساختار نتایج زیر را در پی داشت:

(الف) ماده نانوساختار آلومینا دارای ساختار منحصر بفردی است و شامل ذراتی با حفراتی در مقیاس نانومتر بوده که وقتی در محیط آن - اکتاد کان به عنوان ماده تغییر فاز دهنده پراکنده می شود، ضریب هدایت گرمایی آن را افزایش می دهد. بیشترین افزایش در فاز جامد و مایع حدود ۵٪ می باشد. همچنین افزایش ضریب هدایت در فاز جامد به صورت غیر یکنواخت است به طوریکه بیشترین افزایش در کسر جرمی ۸٪ رخ می دهد و در کسر جرمی ۵٪ ضریب هدایت کاهش دارد.

(ب) بررسی هدایت گرمایی آن - اکتاد کان حاوی نانوذرات اکسیدمس نشان دهنده افزایش حدود ۵٪ ضریب هدایت گرمایی در فاز جامد و مایع است. در فاز جامد در کسر جرمی ۳٪ نایکنواختی در افزایش ضریب هدایت اتفاق می افتد. همچنین در فاز مایع نایکنواختی در افزایش ضریب هدایت در کسر جرمی ۴٪ است.

(پ) بررسی ویژگیهای رئولوژیکی آن - اکتاد کان حاوی مواد نانو ساختار آلومینا و اکسیدمس نشان می دهد که افزودن این مواد نانوساختار به طور کلی لزجت فاز مایع را افزایش می دهد، به علاوه افزودن این مواد سبب تغییر رفتار نیوتنی سیال به رفتار غیر نیوتنی می شود به طوریکه در کسر جرمی بزرگتر از ۲٪، سیال حاوی آلومینا دارای رفتار توانی و سیال حاوی اکسیدمس دارای رفتار سیال بینگهام می شود.

۵-۱- پیشنهادهایی برای پژوهشهای آینده

اگرچه پراکنش مواد نانوساختار در مواد تغییر فاز دهنده آلی به عنوان یک روش مؤثر در ذخیره انرژی گرمایی ارزیابی شد، اما نتایج این پژوهش راهی برای پژوهشهای آینده در زمینه توسعه مواد و کاربردها باز می کند. از این رو، پیشنهادهای زیر برای پژوهشهای آینده ارائه می گردد.

- ۱- بهبود پایداری مواد تغییر فاز دهنده در فاز مایع و ساخت یک ماده تغییر فاز دهنده ای که همواره پایدار باشد. این امر نیازمند همکاری بین رشته ای مهندسان، شیمیدانان و غیره است.

۲- استفاده از مواد نانوساختار و مواد تغییر فاز دهنده دیگر برای رسیدن به یک الگوی علمی مناسب برای تعیین ویژگیها

۳- تعیین دیگر ویژگیهای مواد تغییر فاز دهنده حاوی مواد نانوساختار مانند گرمای ویژه، دانسیته و غیره

۴- توسعه مدل‌های نظری برای تعیین ویژگی های گرمایی مواد تغییر فاز دهنده حاوی مواد نانوساختار

۵- استفاده از روشهای پیشرفته توصیف ویژگی ها مانند لیزر برای بررسی مکانیسم های تغییر ویژگی ها در فاز مایع و جامد

۶- استفاده از روش های پیشرفته اندازه گیری و تعیین عیوب مانند اشعه ایکس و لیزر برای بررسی فرایند ذوب و انجماد

۷- استفاده از هندسه های دیگر مانند هندسه های کروی و استوانه ای برای بررسی تأثیر هندسه بر انتقال گرما

۸- توسعه روش های عددی برای تحلیل فرایند ذوب و انجماد

۹- بررسی پدیده های خاص مانند تشکیل حفرات خالی در فرایند انجماد و نقش نانو ذرات در آن

۱۰ - بررسی کارایی یک سیستم ذخیره انرژی در مقیاس واقعی که از مواد تغییر فاز دهنده حاوی مواد نانوساختار در آن استفاده شده است

مراجع

مراجع

- (1) Maxwell, J.C., A Treatise on Electricity and Magnetism, second ed., Oxford University Press, Cambridge, 1 (1904) 435–441.
- (2) Hamilton, R.L., and Crosser, O.K. , Thermal Conductivity of Heterogeneous two Component Systems, Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals, 1 (1962) 187-191.
- (3) Wasp, E.J., Kenny, J.P., and Gandhi, R.L., Solid – Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation, Series on Bulk Materials Handling, Trans. Tech. Publications, 1:4, Clausthal, Germany, 1977.
- (4) Masuda, H., Ebata, A., Teramae, K., Hishinuma, N., Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles, Netsu Bussei 7 (1993) 227-233.
- (5)Choi U.S., Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, in Developments and application of non-newtonian flows, ASME, (1995)99-105.
- (6) Das, S.K., Putra, P., and Roetzel, w., Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids, Transactions of ASME, Journal of Heat Transfer, 121 (2003) 567-574.
- (7) Prakash, M., Giannelis, E. P., Mechanism of Heat Transport in Nanofluids, Journal of Computer-Aided Material Design 14 (2007) 109-117.
- (8) Karthikeyan, N. R., Philip, J., Raj, B., Effect of Clustering on the Thermal Conductivity of Nanofluids, Materials Chemistry and Physics 109 (2008) 50-55.

-
- (9) Wang, X., Xu, X., Choi, S. U. S., Thermal Conductivity of Nanoparticle-Fluid Mixture, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 13 (1999) 474-480.
- (10) Jang, S. P., Choi, S. U. S., Effects of Various Parameters on Nanofluid Thermal Conductivity, *ASME Journal of Heat Transfer* 129 (2007) 617-623.
- (11) Jang, S. P., Choi, S. U. S., Role of Brownian Motion in the Enhanced Thermal conductivity of Nanofluids, *Applied Physics Letters*. 84 (2004) 4316-4318.
- (12) Chon, C. H., Kihm, K. D., Lee, S. P., Choi, S. U. S., Empirical Correlation Finding the role of Temperature and Particle Size for Nanofluid (Al_2O_3) Thermal Conductivity Enhancement, *Applied Physics Letters* 87 (2005) 153107.
- (13) Prasher, R., Bhattacharya, P., Phelan, P. E., Brownian-Motion-Based Convective-Conductive Model or the Effective Thermal Conductivity of Nanofluids, *ASME Journal of Heat Transfer* 128 (2006) 588-595.
- (14) Yu, W., France, D. M., Routbort, J. L., Choi, S. U. S., Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements, *Heat Transfer Engineering* 29 (2008) 432-460.
- (15) Yu, C. J., Richter, A. G., Datta, A., Durbin, M. K., Dutta, P., Observation of Molecular Layering in Thin Liquid Films Using X-Ray Reflectivity, *Physical Review Letters* 82 (1999) 2326-2329.
- (16) Ren, Y., Xie, H., Cai, A., Effective Thermal Conductivity of Nanofluids Containing Spherical Nanoparticles, *Journal of Physics D: Applied Physics* 38 (2005) 3958-3961.

-
- (17) Keblinski, P., Phillpot, S. R., Choi, S. U. S., and Eastman, J. A. Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids), *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45 (2002) 855–863.
- (18) Lee, S., Choi, S.U.S., Li, S., and Eastman, J.A., Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles, *Transaction of ASME, Journal of heat Transfer* 121 (1991) 280-289.
- (19) Xie, H.Q., Wang, J.C., Xi, T.G., Liu, Y., Ai, F., and Wu, Q.R., Thermal Conductivity Enhancement of Suspensions Containing Nanosized Alumina Particles, *Journal of Applied Physics* 91 (2002) 4568-4572.
- (20) Eastman, J.A., Choi, S.U.S., Li, S., Yu, W., and Thompson, L.J., Anomalous Increased Effective Thermal Conductivities of Ethylene Glycol Based Nanofluids Containing copper Nanoparticles, *Applied physics Letters* 78 (2001) 718-720.
- (21) Patel, H.E., Das, S.K., Sundararajan, T., Sreekumaran, N.A., George, B., and Pradeep, T., Thermal Conductivities of Naked and monolayer Protected Metal nanoparticle Based Nanofluids: Manifestation of Anomalous Enhancement and Chemical Effects, *Applied Physics Letters* 83 (2003) 29931 - 2933.
- (22) Choi, S. U. S., Zhang, Z.G., Yu, W., Lockwood, F.E., and Grulke, E.A., Anomalous Thermal Conductivity Enhancement in Nano-Tube Suspensions, *Applied Physics Letters* 79 (2001) 2252-2254.
- (23) Xie, H., Lee, H., Youn, W., and Choi, M., Nanofluids Containing Multiwalled Carbon Nanotubes and Their Enhanced Thermal Conductivities, *Journal of Applied Physics* 94 (2003) 4967-4971.

-
- (24) Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., Yu, W., Thompson, L. J., Anomalous increase in effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, *Applied Physics Letters* 78 (2001) 718–720.
- (25) Li, C. H., Peterson, G. P., Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids), *Journal of Applied Physics* 99 (2006) 284–314.
- (26) Xiang-Qi Wang, Arun S., Mujumdar, A Review on Nanofluids - Part I: Theoretical and Numerical Investigations, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 4 (2008) 613–630.
- (27) Simha, R. The influence of Brownian movement on the viscosity of solutions, *Journal of Physical Chemistry* 44 (1940) 25–34.
- (28) Koo, J., Kleinstreuer, C., Impact analysis of nanoparticle motion mechanisms on the thermal conductivity of nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 32 (2005a) 1111–1118.
- (29) Xuan, Y., Li, Q., Heat transfer enhancement of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 21 (2000) 58–64.
- (30) Ding, Y., Alias, H., Wen, D., Williams, R. A., transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids), *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49 (2005) 240–250.
- (31) Khanafer K., Vafai K., Lightstone M., Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46 (2003) 3639–3653.

-
- (32) Ho C.J., Chen M.W., Li Z.W., Numerical simulation of natural convection of nanofluid in a square enclosure: effects due to uncertainties of viscosity and thermal conductivity, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51 (2008) 4506-4516.
- (33) Abu-Nada E., Masoud Z., Hijazi A., Natural convection heat transfer enhancement in horizontal concentric annuli using nanofluids, *International Communication of Heat and Mass Transfer* 35 (2008) 657-665.
- (34) Khodadadi J.M., Hosseinizadeh S.F., Nanoparticle-enhanced phase change materials (NEPCM) with great potential for improved thermal energy storage, *International Communication of Heat and Mass Transfer* 34 (2007) 534-543.
- (35) Alipanah, M., Ranjbar, A.A., Hassannasab, P., Hosseinizadeh, S.F., 12th Fluid Dynamics Conference, Babol Noshirvani Univ, Of Tech., 26-28 (2009), in Persian.
- (36) Solomon, A.S., Morris, M.D., and Olszewski, M., The Development of Simulation Code for a Latent Heat Thermal Energy Storage System in a Space Station, Technical Report ORNAL -6213 (1986).
- (37) Stovall, T.K., and Armilli, R.V., Transient Thermal Analysis of Three Fast Changing Latent Heat Storage Configuration for a Space Based Power System, Proc. 23rd Intersociety Energy Conversion Energy Con (1988) 171-177.
- (38) Cao, Y., and Faghri, A., Performance Characteristics of a Thermal Energy Storage Module: a Transient PCM Forced Convection Analysis, *International Journal of Heat Mass Transfer* 34 (1991) 93-101.

-
- (39) Bellecci, C., and Conti, M., Phase change Thermal Storage : Transient Behavior Analysis of a solar Receiver Storage Module Using Enthalpy Method, International Journal of Heat Mass Transfer 36 (1993) 2157-2163.
- (40) Bellecci, C., and Conti, M., Phase Change Energy Storage :Entropy Production irreversibility and Second Law Efficiency, solar Energy 53 (1994) 163-170.
- (41) Maveety, J.G., and Razani., Energy Analysis and Optimal Removal Time for a Lithium Fluoride Phase Change Material, ASME Thermodynamic Design , Analysis and Improvement of Energy System 35 (1995) 89-96.
- (42) Couti, M., Bellecci, C., and Chararch, Ch.Ch., Thermodynamic Design of a Phase Change Thermal Storage Module, Solar Energy 118 (1996) 89-96.
- (43) Gong, Z.X., and Mujumdar, A.S., Exergetic Analysis of Energy Storage Using Multiple Phase Change Material, ASME 118sep 1996.
- (44) Korin, E., Reshef, R., Tshemichovsky, D., and Sher., Reducing Cold Start Emission from internal Combustion Engine by Means of a Catalytic Converter Embedded in a Phase change Material, ImechE 213 part D 1999.
- (45) Vyshak, N.R., and Jilani G. Numerical analysis of latent heat thermal energy storage system, Energy Conversion and Management 48 (2007) 2161–2168.