

تأثیر حضور نانوذرات اکسید تیتانیوم بر افزایش هدایت حرارتی و رفتار رئولوژی نانوسیال تشکیل شده بر پایه روغن موتور خودرو

محمدحسن واشقانی*، بابک رئیسی دهکردی، محمد امینی و احسان مرزبان‌راد

تهران، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده سرامیک

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۸۸/۰۵/۱۸، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۸۸/۰۷/۱۲، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۸۸/۱۲/۱۹

چکیده

در این پژوهش که به منظور اندازه‌گیری هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیالات انجام شده است، روش سیم داغ گذرا جهت اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوسیالات استفاده شد. روابط همیلتون و کراسر (Hamilton-Crosser) و انیشتین (Einstein) برای تخمین و پیش‌بینی هدایت حرارتی و ویسکوزیته مورد استفاده قرار گرفت. در مقایسه بین نتایج تئوری و آزمایشگاهی تفاوت‌هایی دیده می‌شود که این اختلاف به دلیل عدم دقت روابط تئوری می‌باشد. جهت مشاهده مورفولوژی نانوذرات از تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بهره گرفته شد. همچنین جهت اندازه‌گیری اندازه ذرات نیز از آنالیز اندازه ذرات استفاده شد. با انجام آزمایش‌ها مشخص شد که با اضافه کردن ۳٪ وزنی از نانوذرات اکسید تیتانیوم با اندازه ذرات ۲۱ نانومتر و ۲۰۰ نانومتر، به روغن موتور، هدایت حرارتی روغن موتور به ترتیب تا ۵۶/۷۲٪ و ۲۳/۳۴٪ افزایش یافت. همچنین رفتار ویسکوزیته نانوسیالات نیز بررسی شد و مشاهده گردید که با افزودن ۳٪ وزنی نانوذرات ۲۱ نانومتری و ۲۰۰ نانومتری اکسید تیتانیوم در روغن موتور خودرو ویسکوزیته به ترتیب به میزان ۰/۳٪ و ۶/۷۵٪ افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: نانوسیال، هدایت حرارتی، روش سیم داغ گذرا، ویسکوزیته، نانوذرات تیتانیوم.

۱- مقدمه

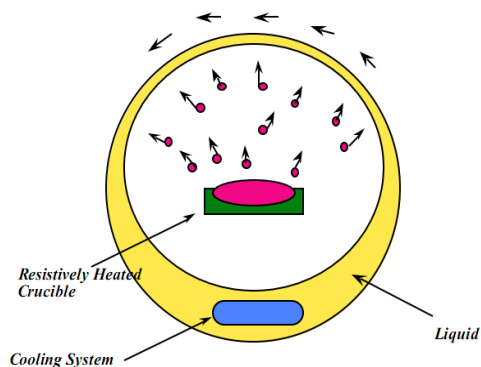
در زمینه انتقال حرارت پیشرفت کرده و امید به کاهش هزینه‌های بخش صنعت داشت که حتی شامل صنایع کوچک نیز خواهد بود. برای بالا بردن بازده حرارتی تجهیزات از قبیل مبدل‌های حرارتی، هدایت حرارتی سیال حامل انرژی و ضریب انتقال حرارت جابجایی نقش حیاتی ایفا می‌کنند. حال با توجه به سیالات مرسوم در انتقال

در اغلب صنایع کوچک و بزرگ، فرآیند انتقال حرارت و استفاده از مبدل‌های حرارتی وجود دارد. افزایش انتقال حرارت و کارایی مبدل‌های حرارتی به معنی کاهش چشم‌گیر هزینه‌ها است، حال با وجود نانوسیالات می‌توان

*عهده‌دار مکاتبات: محمدحسن واشقانی

نشانی: کرج، مشکین دشت، پژوهشگاه مواد و انرژی

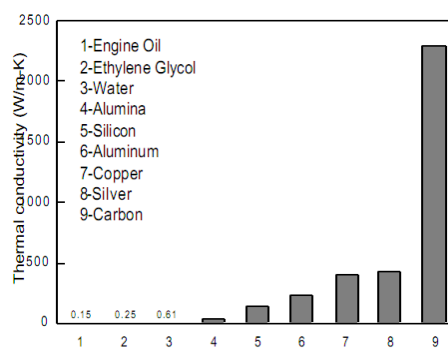
نانوسیال فلزی تهیه کرد که این خود یک محدودیت به حساب می‌آید. ولی مزیت این روش در این است که در این روش سطح نانوذرات در معرض شرایط نامطلوب قرار نمی‌گیرد و پوشش‌های ناخواسته‌ای روی آنها تشکیل نمی‌شود. به همین دلیل نانوذرات تولید شده از این طریق بسیار تمیز است. این مورد، مزیت خیلی مهم روش تک مرحله‌ای است [۱].



شکل ۲: روش تک مرحله‌ای تهیه نانوسیال [۱].

سونگ‌جو و همکارانش [۱] در سال ۲۰۰۵ مقاله‌ای در مورد روش تولید نانوسیال TiO_2 به روش تک مرحله‌ای منتشر کردند. آنها آب را به عنوان مایع دی‌الکتریک انتخاب نموده و با اعمال قوس الکتریکی با دمای ۶۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ مولکول‌های آب با فشار زیاد تبخیر شده و در عین حال در منطقه تحت قوس از الکترودهای تیتانیوم قسمتی ذوب و بخار می‌شدند. بخارات تیتانیوم با بخارات آب مخلوط و یونیزه می‌شوند. بخارات آب با فشار زیاد، بخارات تیتانیوم را از الکترودها دور می‌کنند. با دور شدن بخارات از دمای بالای قوس طی یک مرحله که به آن هسته‌گذاری گویند، رشد انجماد رخ داده و نانوذرات فلزی تولید می‌شوند که درون مایع دی‌الکتریک پخش می‌شوند. در روش دو مرحله‌ای ابتدا نانوذرات مورد نظر را تهیه نموده و در سیال پایه مورد نظر می‌افزایند. حال باید پس از این مرحله سعی بر این باشد که ذرات کلوخه شده را از یکدیگر جدا کرد. عمده مشکل محققین این است که بتوانند به طریق مطلوب به این مهم دست پیدا کنند، که روش‌های متنوعی در این میان ارائه شده است. از روش‌های متداول می‌توان به روش‌های ذیل اشاره نمود:

حرارت و بررسی این ضرایب که صرفاً به خود سیال بستگی دارد ملاحظه می‌گردد که این ضرایب نسبت به فلزات و یا حتی اکسید فلزات پایین‌تر می‌باشند. در نتیجه انتظار می‌رود که سوسپانسیون‌های نانوسیال دارای ضریب هدایت حرارتی بالاتری از سیالات خالص باشند. همچنین در آزمایش‌هایی که تاکنون انجام شده این مطلب آشکار است که با افزایش نسبت حجمی ذرات در سوسپانسیون، ضریب انتقال حرارت هدایتی نانوسیال نیز بالا می‌رود. در ضمن لازم به ذکر است که ضریب انتقال حرارت هدایتی سیال اصلی در تغییرات ضریب انتقال حرارت هدایتی سوسپانسیون بسیار تاثیرگذار است [۱].



شکل ۱: ضریب هدایت حرارتی تعدادی از مواد [۱].

همانطور که انتظار می‌رود افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی، افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی را نیز به دنبال دارد و ضریب انتقال حرارت جابجایی با ضخامت لایه مرزی نسبت عکس دارد. در ضمن مکانیزم دیگری که در انتقال حرارت تاثیرگذار است، معلق بودن این نانوذرات در سوسپانسیون است که باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود. از این نکته نمی‌توان گذشت که با افزایش سرعت که افزایش عدد رینولدز را به همراه دارد، انتقال حرارت افزایش می‌یابد. تولید نانوسیال به دو روش انجام می‌گیرد:

- روش تک مرحله‌ای
- روش دو مرحله‌ای

در روش تک مرحله‌ای همان طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌گردد در یک محفظه، فلز را بخار کرده و این بخار فلزات در مایع مورد نظر به مایع و سپس به جامد تبدیل می‌شود و به پایداری می‌رسد. در این روش فقط می‌توان

ویسکوزیته نانوسیال اکسید مس و مخلوط آب و اتیلن گلیکول ارائه کردند نتایج ارائه شده این مطالب را در بر داشت:

- در نانوسیال مورد بررسی با تغییرات نسبت حجمی از صفر تا ۶/۱۲٪ حجمی و در محدوده دمایی ۵۰ تا ۳۵- درجه سانتیگراد رفتار سیال، از رفتار سیالات نیوتنی پیروی می‌کند.
 - ویسکوزیته سیال با افزایش نسبت حجمی ذرات افزایش می‌یابد.
 - با افزایش دما ویسکوزیته سیال کاهش می‌یابد.
- در این تحقیق با توجه به مطالب مطرح شده توسط روش سیم داغ گذرا میزان هدایت حرارتی نانوسیالات تشکیل شده از نانوذرات اکسید تیتانیوم در روغن موتور خودرو اندازه‌گیری شد. یکی از مهمترین دلایل استفاده از اکسید تیتانیوم در این تحقیق، غیر سایشی بودن این نانوذرات نسبت به دیگر ذرات سرامیکی می‌باشد. پس از بررسی هدایت حرارتی نانوسیالات به بررسی رفتار رئولوژیکی نانوسیالات پرداخته شد که با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری ویسکوزیته، میزان تغییرات ویسکوزیته نانوسیالات بررسی شد.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- مواد اولیه

به جهت بررسی تاثیر اندازه ذرات از دو نوع پودر استفاده گردید پودر اول، نانوپودر اکسید تیتانیوم ساخت شرکت دگوسا (Degussa) آلمان با نام تجاری P25 با متوسط اندازه ذره ۲۱ nm و پودر دوم، پودر اکسید تیتانیوم صنعتی با متوسط اندازه ذرات ۲۰۰ nm استفاده شد.

۲-۲- روش انجام کار

شکل ۳ فلوچارت انجام فرآیند تهیه نانوسیال اکسید تیتانیوم و روغن موتور خودرو را نشان می‌دهد. ابتدا با نسبت مشخص وزنی، نانوذرات اکسید تیتانیوم در محیط روغن بدون اضافه نمودن پایدارساز اضافه می‌گردد. سپس با استفاده از همزن به مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد نانوذرات در روغن یکنواخت می‌شود. در این

- حمام فراصوت
 - همزن‌های مغناطیسی
 - همزن با توان برشی بالا
 - همگن‌ساز فراصوت
- زمان و شدت همزن و یا نوسانات حمام فراصوت در کیفیت پایداری نانوسیال تاثیر مهمی دارند.
- چو و همکارانش [۲] در آزمایشگاه ملی آراگون در سال ۱۹۹۵ برای اولین بار از ذراتی با ابعاد نانومتر در سوسپانسیون استفاده کردند و این نکته را مشاهده کردند که ضریب انتقال حرارت هدایتی با افزایش نسبت حجمی ذرات معلق در نانوسیال افزایش می‌یابد. لی و همکارانش [۳] در سال ۱۹۹۹ طی گزارشی افزایش ۴۰٪ ضریب انتقال حرارت هدایتی را مطرح کرد که این مهم با افزایش ۴٪ حجمی نانوذرات ۳۵ نانومتری اکسید مس در اتیلن گلیکول ایجاد شده بود. چو و یارانش [۴] در سال ۲۰۰۱ مشاهده کردند با افزایش ۱٪ حجمی نانولوله‌های کربنی به روغن موتور ۱۶۰٪ ضریب انتقال حرارت هدایتی افزایش می‌یابد. داس و همکارانش [۵] در سال ۲۰۰۳ به بررسی به صورت آزمایشگاهی بر روی تاثیر درجه حرارت روی افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی نانوسیال پرداختند. آنها گزارشی در مورد ۲-۴ برابر شدن ضریب انتقال حرارت هدایتی نانوسیالات در بالاتر از بازه دمایی ۵۱-۲۱ درجه سانتیگراد ارائه کردند. لی به همراه ژوان [۶] در سال ۲۰۰۳ تحقیقات خود را در مورد انتقال حرارت نانوسیال مس و آب روی دیواره‌ای با شار حرارتی ثابت و جریان مغشوش ادامه دادند. آنها نتایج آزمایش‌های خود را اینطور مطرح کردند که افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی به عوامل زیادی بستگی دارد که برخی از این عوامل عبارت است از:
- نوع سیال
 - نوع ذرات
 - نسبت حجمی
 - اندازه ذرات
 - شکل هندسی ذرات
 - توزیع ذرات در سوسپانسیون
 - حرکات تصادفی ذرات در سیال (حرکت براونی)
- حتی عوامل دیگر که تاکنون مشخص نشده است. داس و همکارانش [۷] در سال ۲۰۰۷ گزارشی در مورد

اندازه‌گیری متوسط اندازه ذرات از دستگاه موجود (Fritsch, model Labortechnik Germany) بهره گرفته شد.

۲-۴- سیستم اندازه‌گیری خواص هدایت حرارتی نانوسیالات

در این تحقیق، جهت اندازه‌گیری هدایت حرارتی سیالات از روش سیم داغ گذرا (transient hot wire method) استفاده شد. در این روش از سیستم ثبت و ذخیره اطلاعات با سرعت بالا و متصل به رایانه استفاده شده است. این روش به صورت بسیار وسیع جهت اندازه‌گیری هدایت حرارتی مایعات استفاده می‌شود. یک سیم بسیار نازک فلزی جهت ایجاد منبع حرارتی و اندازه‌گیری دما استفاده می‌شود.

اطراف سیم توسط مایع مورد نظر که در آزمون به آن پرداخته خواهد شد پر می‌شود. جریان الکتریکی که از سیم متصل شده عبور می‌کند، باعث تولید حرارت و افزایش دمای سیم می‌گردد. حال هر چه هدایت حرارتی مایع مورد آزمایش بالاتر باشد، شیب افزایش دمای سیم با زمان کمتر خواهد شد و یا به عبارت دیگر گرمای سیم بیشتر و سریع‌تر از سیم خارج شده و به داخل مایع پخش می‌شود. این مطلب اساس کار اندازه‌گیری هدایت حرارتی مایع با این روش می‌باشد. مدت زمان آزمایش حداکثر بین ۲ الی ۸ ثانیه خواهد بود. این روش بسیار سریع بوده و اجازه ایجاد نیروهای شناوری که باعث ایجاد جریان داخل سیال می‌شود را نمی‌دهد و به بیان دیگر سرعت پاسخ بالای این سیستم اثرات جابجایی آزاد را از بین می‌برد.

یک سیم بلند به صورت قائم در داخل مایع مورد آزمایش به صورت معلق قرار خواهد گرفت. به این روش، روش گذرا اطلاق می‌گردد، زیرا گرما به صورت ناگهانی توسط جریان الکتریسیته گذری از سیم فلزی تولید می‌شود و سپس سیم گرم شده و تغییرات دما بر حسب زمان مورد بررسی قرار خواهد گرفت. این محاسبه به واسطه معادله معروف قانون فوریه در مختصات استوانه‌ای (تک بعدی) شبیه‌سازی شده و به عنوان منبع حرارتی که در مرکز دایره قرار داشته و به صورت شعاعی حرارت در مایع پخش می‌شود محاسبه می‌گردد.

حالت رنگ روغن از حالت قهوه‌ای به شیری تغییر یافته است و ذرات کلوخه شده با کمی دقت مشخص می‌باشد. در این حالت با استفاده از حمام مافوق صوت (Ultrasonic bath) به مدت ۳۰ دقیقه در فرکانس ۲۸ Hz و در نهایت با استفاده از همزن دور بالا (۲۵۰۰۰ دور بر دقیقه) به مدت ۱۵ دقیقه تمامی کلوخه‌های موجود در سیال از بین خواهد رفت و سیالی با رنگ کاملاً یکنواخت شیری و پایدار به مدت یک هفته بدست خواهد آمد. نکته قابل توجه آن است که با افزایش غلظت ذرات در نانوسیال میزان عمر پایداری کم خواهد شد و از طرفی مدت زمان بیشتری باید توسط همزن در دمای ۷۰ °C و همچنین زمان بیشتری در حمام مافوق صوت سپری شود. پس از آماده شدن نانوسیال مورد نظر آزمایش هدایت حرارتی و یا آزمایش رفتار رئولوژی انجام می‌گیرد.



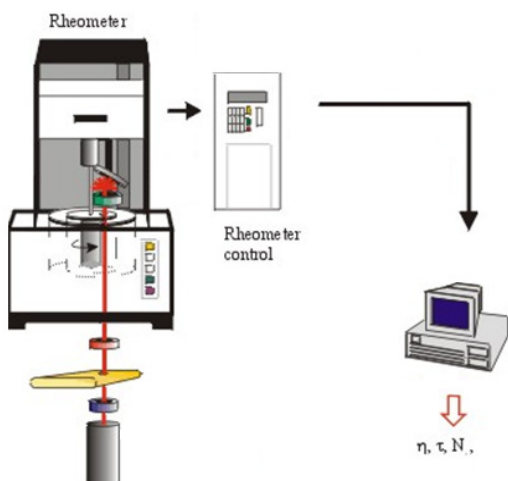
شکل ۳: فلوجارت انجام کار.

۲-۳- روش‌های آنالیز

جهت بررسی ریزساختار و پخش نانوذرات از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM, Cambridge S360) و به جهت

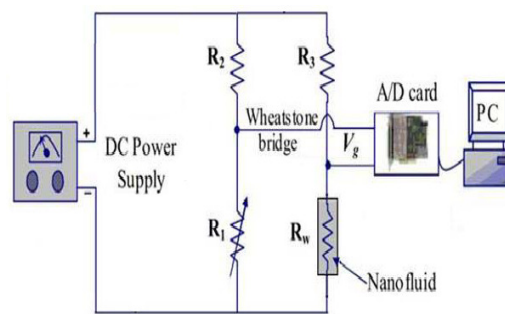
۲-۵- دستگاه بررسی رفتار رئولوژی نانوسیالات

خواص رئولوژیکی سوسپانسیون‌ها توسط رئومتر چرخشی مدل MSR301 شرکت AntonPaar انجام گرفت. که شماتیک دستگاه در شکل ۶ مشاهده می‌گردد.



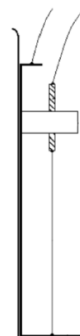
شکل ۶: شماتیک سیستم رئومتر.

سیم پلاتینی با ضخامت ۸۰ میکرومتر و طول ۲۰ سانتیمتر به جهت ایجاد انتقال حرارت تک بعدی و منطبق بر معادلات انتقال حرارت مختصات استوانه‌ای استفاده گردید. مدار الکترونیکی این سیستم در شکل ۴ مشاهده می‌شود. سرعت ثبت اطلاعات در این سیستم آزمایشگاهی ۱۰۰ Hz می‌باشد.



شکل ۴: شماتیک سیستم روش سیم داغ گذرا.

در شکل ۵ شماتیک سلول سیم داغ گذرا جهت اندازه‌گیری هدایت حرارتی مشاهده می‌شود.



شکل ۵: شماتیک سلول سیم داغ گذرا.

جهت اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوسیالات پس از ثبت اطلاعات بر روی رایانه، جهت انجام فعالیت پایانی از رابطه ذیل استفاده می‌گردد [۸،۹].

$$k = \frac{q}{4\pi \left(\frac{dT}{dr} \right)} \quad (1)$$

که در این رابطه، k هدایت حرارتی نانوسیال، q حرارت تولیدی توسط مقاومت سیم بر واحد طول سیم، T دما و t زمان می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

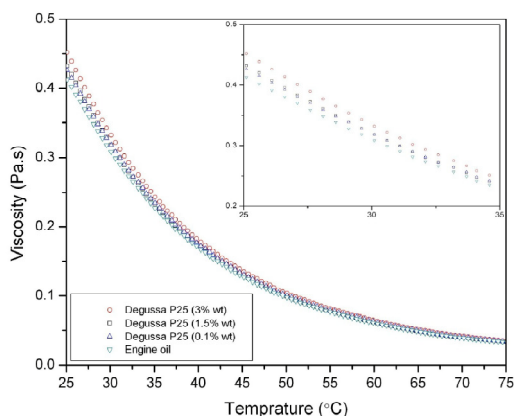
۳-۱- اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوسیالات

نانوسیالات متعددی با غلظت‌های مختلف از نانوذرات اکسید تیتانیوم آماده و مورد اندازه‌گیری هدایت حرارتی قرار گرفتند (۱/۰ الی ۳ درصد وزنی). در شکل ۷ نتایج اندازه‌گیری‌های به عمل آمده بر هدایت حرارتی نانوسیالات اکسید تیتانیوم مشاهده می‌گردد.

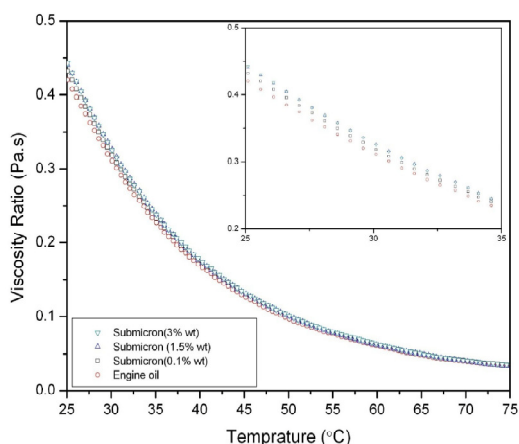
در شکل ۷ مشاهده می‌گردد که با افزودن ۳ درصد وزنی نانوذرات ۲۱ نانومتری و ۲۰۰ نانومتری اکسید تیتانیوم در روغن موتور خودرو هدایت حرارتی به ترتیب به میزان ۵۶/۷۲٪ و ۲۳/۳۴٪ افزایش می‌یابد، همچنین در غلظت‌های کم نیز رفتار غیرخطی در نانوذرات ۲۱ نانومتری مشاهده می‌شود که در تحقیق دیگران نیز گزارش شده است [۱۰-۱۶].

نتایج فوق اشاره به این نکته دارد که افزایش غلظت نانوذرات در نانوسیالات، افزایش هدایت حرارتی نانوسیالات را در پی خواهد داشت و همچنین با ریزتر شدن نانوذرات هدایت حرارتی نانوسیالات افزایش می‌یابد.

می‌یابد. همچنین با ریزتر شدن نانوذرات ویسکوزیته نانوسیالات افزایش می‌یابد.



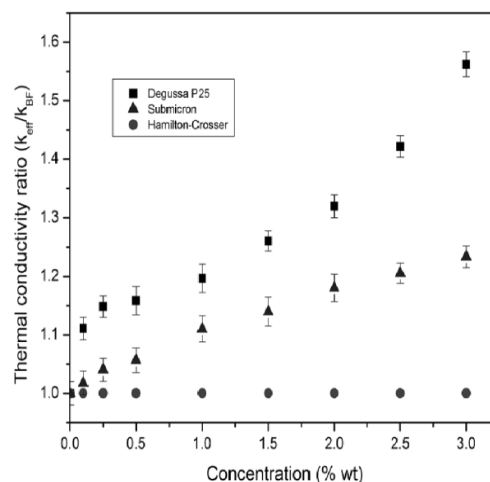
شکل ۷: رفتار رئولوژی نانوسیال تشکیلی از نانوذرات P25 در روغن و مقایسه چند غلظت و تغییرات آن با دما.



شکل ۸: رفتار رئولوژی نانوسیال تشکیلی از نانوذرات صنعتی در روغن و مقایسه چند غلظت و تغییرات آن با دما.

در شکل ۹ می‌توان مشاهده نمود که با افزایش غلظت نانوذرات ویسکوزیته نانوسیالات افزایش می‌یابد. حال آن که این رفتار در غلظت‌های پایین از رفتار خطی دور بوده و در غلظت‌های بالاتر از رفتار خطی تبعیت می‌کند. این رفتار غیرخطی در گزارشات هی و همکارانش [۱۸] نیز ارائه شده است. همچنین اطلاعات آزمایشگاهی بدست آمده با نتایج تئوری رابطه انیشتین مقایسه شد. رابطه مورد استفاده در این تحقیق به قرار ذیل می‌باشد [۱۹].

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{BF}} = 1 + 2.5f \quad (2)$$

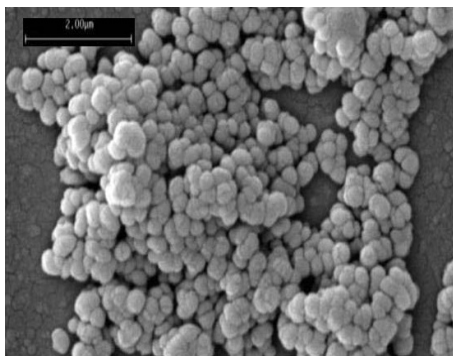


شکل ۹: نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوسیالات اکسید تیتانیوم در روغن موتور خودرو.

۳-۲- بررسی رفتار رئولوژی سوسپانسیون

هدایت حرارتی و ویسکوزیته از مهمترین خصوصیات نانوسیالات در مسائل کاربردی به شمار می‌روند. در محیط‌های جدید انتقال حرارت همچون مبدل‌های حرارتی و سیستم‌های خنک‌کننده به این دو خصوصیت بسیار توجه می‌گردد در این تحقیق، ویسکوزیته روغن موتور خودرو اندازه‌گیری شد. همچنین به جهت تمایز رفتاری روغن خودرو با نانوسیالات، ویسکوزیته نانوسیالات با غلظت‌های مختلف نیز اندازه‌گیری و مورد بررسی قرار گرفت (۱/۳- درصد جرمی). نتایج حاصله اندازه‌گیری انجام شده بر روی روغن در مقایسه با پیوست کتاب انتقال حرارت اینکروپرا Incropera [۱۷] حکایت از اختلاف ۱/۹۳٪ دارد. ویسکوزیته متاثر از حضور نانوذرات اکسید تیتانیوم ۲۱ نانومتری در روغن با غلظت‌های مختلف در بازه دمایی ۲۵ الی ۷۵ درجه سانتیگراد در شکل ۷ مشاهده می‌شود. تمایز بیشتر رفتاری بین سوسپانسیون‌ها در بازه ۲۵ الی ۳۵ درجه سانتیگراد نیز در شکل ۷ مشخص شده است.

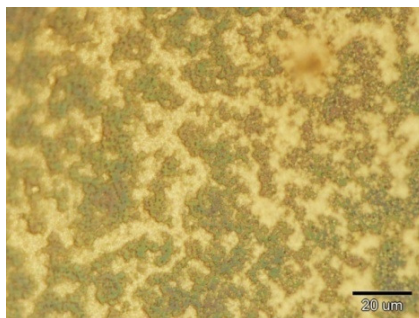
ویسکوزیته متاثر از حضور نانوذرات اکسید تیتانیوم ۲۰۰ نانومتری در روغن با غلظت‌های مختلف نیز به جهت مشاهده تمایز اندازه ذرات، در بازه دمایی ۲۵ الی ۷۵ درجه سانتیگراد در شکل ۸ مشاهده می‌شود. شواهد حکایت از این دارند که با افزایش غلظت، ویسکوزیته نانوذرات افزایش



شکل ۱۰: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوذرات اکسید تیتانیوم صنعتی.

۳-۴- نتایج میکروسکوپ نوری

شکل ۱۱ و ۱۲ نتایج حاصل از میکروسکوپ نوری را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ذرات اکسید تیتانیوم صنعتی پس از خشک شدن کاملاً به صورت کلوخه‌ای در آمده است (شکل ۱۱) ولی ذرات اکسید تیتانیوم کاملاً یکنواخت و به دور از هر گونه کلوخه شدن در شکل ۱۲ مشخص می‌باشد که نشان‌دهنده پایداری مطلوب نانوسیال اکسید تیتانیوم ۲۱ نانومتری می‌باشد.

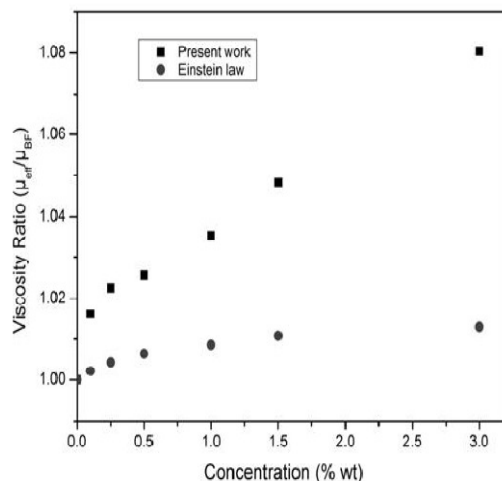


شکل ۱۱: تصویر میکروسکوپ نوری ذرات اکسید تیتانیوم صنعتی.



شکل ۱۲: تصویر میکروسکوپ نوری نانوذرات اکسید تیتانیوم ۲۱ نانومتری.

که در این رابطه μ_{eff} ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال، μ_{BF} ویسکوزیته سیال پایه و f غلظت نانوسیال می‌باشد.



شکل ۹: رفتار رئولوژی نانوسیال تشکیلی از نانوذرات P25 در روغن و مقایسه با رابطه تجربی انیشتین.

در شکل ۹ مشاهده می‌گردد که با افزودن ۳ درصد وزنی نانوذرات ۲۱ نانومتری و ۲۰۰ نانومتری اکسید تیتانیوم در روغن موتور خودرو ویسکوزیته به ترتیب به میزان ۰.۳/۸٪ و ۰.۶/۷۵٪ افزایش می‌یابد.

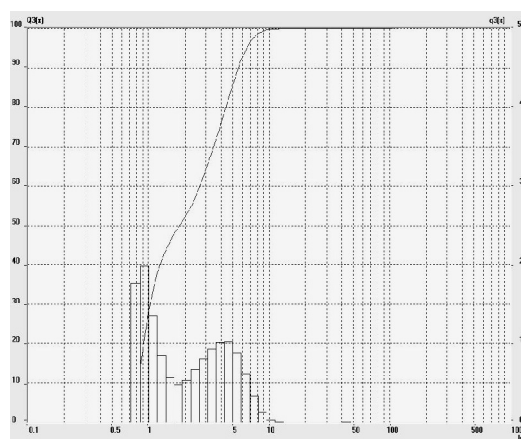
حال با توجه به نانوذرات اکسید تیتانیوم ۲۱ nm که به استناد شناسنامه شرکت سازنده به صورت کروی بوده است و تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد استفاده در این تحقیق که برای نانوذرات ۲۰۰ nm به عمل آمده است و مشخص می‌نماید که این نانوذرات به صورت کروی می‌باشد، نشان می‌دهد که اگر ذرات به صورت غیر کروی باشند میزان افزایش ویسکوزیته نانوسیالات از نتایج ویسکوزیته موجود (حالت کروی) بیشتر خواهد بود. نتیجه نهایی که در این تحقیق می‌توان به آن اشاره نمود این است که با کاهش اندازه ذرات اثرات حرکت کاتوره‌ای و همچنین سطح ویژه این نانوذرات افزایش می‌یابد.

۳-۳- نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی

شکل ۱۰ نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی را نشان می‌دهد. به جهت مشخص شدن مورفولوژی ذرات اکسید تیتانیوم صنعتی مورد بررسی قرار گرفته شد.

۳-۵- نتایج اندازه‌گیری متوسط اندازه ذرات

شکل ۱۳ نتایج حاصل از متوسط اندازه ذرات را نشان می‌دهد. به جهت مشخص شدن اندازه ذرات اکسید تیتانیوم صنعتی و مقایسه آن با ذرات اکسید تیتانیوم از دستگاه آنالیز اندازه ذرات استفاده شد.



شکل ۱۳: متوسط اندازه نانوذرات اکسید تیتانیوم صنعتی.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تولید نانوسیال اکسید تیتانیوم در روغن موتور خودرو با موفقیت انجام شد و خواص هدایت حرارتی و رفتار رئولوژی نیز بررسی گردید.

مشاهده می‌گردد که با افزودن ۳ درصد وزنی نانوذرات ۲۱ نانومتری و ۲۰۰ نانومتری اکسید تیتانیوم در روغن موتور خودرو هدایت حرارتی به ترتیب به میزان ۵۶/۷۲٪ و ۲۳/۳۴٪ افزایش می‌یابد. با ریزتر شدن نانوذرات تاثیر حرکت‌های کاتوره‌ای (Brownian Motion) نیز افزایش می‌یابد، همچنین هرچه ذرات کوچکتر شود سطح ویژه ذرات نیز افزایش می‌یابد که این نکته بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

مراجع

- [1] C.S. Jwo, D.C. Tien, T.P. Teng, H. Chang, *Review Advanced Material Science*, **10**, 2005, 283.
- [2] S.U.S. Choi, *ASME*, **231**, 1995, 99.
- [3] S. Lee, S.U.S. Choi, S. Li, J.A. Eastman, *Journal of Heat Transfer*, **121**, 1999, 280.
- [4] S.U.S. Choi, Z.G. Zhang, W.F.E. Lockwood, F.A. Grulke, *Applied Physics Letters*, **79**, 2001, 2252.
- [5] S.K. Das, N. Putra, W. Roetzel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **46**, 2003, 851.
- [6] Y. Xuan, Q. Li, *Journal of Heat Transfer*, **125**, 2003, 151.
- [7] S.K. Das, N. Putra, P. Theisen, W. Roetzel, *Journal of Heat Transfer*, **125**, 2007, 567.
- [8] Y. Nagasaka, A. Nagashima, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, **14**, 1981, 1435.
- [9] J. Garg, B. Poude, M. Chiesa, J.B. Gordon, J.J. Ma, J.B. Wang, Z.F. Ren, Y.T. Kang, H. Ohtani, J. Nanda, G.H. McKinley, G. Chen, *Journal of Applied Physics*, **103**, 2008, 074301.
- [10] B.C. Pak, Y.I. Cho, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **28**, 2007, 797.
- [11] J.A. Eastman, S.U.S. Choi, S. Li, W. Yu, L.J. Thompson, *Journal of Applied Physics Letter*, **78**, 2001, 718.
- [12] I. Manna, *Journal of the Indian Institute of Science*, **89**, 2009, 21.
- [13] Y. Xuan, Q. Li, W. Hu, *AIChE Journal* **49**, 2003, 1038.
- [14] J.A. Eastman, S.U.S. Choi, S. Li, L.J. *Materials Research Society*, **457**, 1997, 3.
- [15] X. Wang, X. Xu, S.U.S. Choi, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, **13**, 1999, 474.
- [16] Y. Xuan, Q. Li, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **21**, 2000, 58.
- [17] F.P. Incropera, D.P. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. fifth ed. 2002, New York, Wiley.
- [18] Y. He, Y. Jin, H. Chen, Y. Ding, D. Cang, H. Lu, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **50**, 2007, 2272.
- [19] A. Einstein, "Investigation on the Theory of Brownian Movement". 1956, New York, Dover.