

اندازه گیری تجربی لزجت نانوسیال اکسید سریم- اتیلن گلیکول در کسرهای حجمی و دماهای مختلف و ارائه رابطه جدید تجربی

محمد اکبری^{۱*}، امیر حسین سعیدی^۲

* نویسنده مسئول: m.akbari.g80@gmail.com

واژه‌های کلیدی

نانوسیال؛ لزجت دینامیکی؛ دی اکسید سریم؛ اتیلن گلیکول

چکیده

نانوسیال‌ها از طریق معلق ساختن ذرات بسیار ریز در مایعات پایه تهیه می‌شوند و فناوری نانو یکی از تلاش‌های جدید برای بررسی علوم حرارتی است. در نتیجه سرمایه‌گذاری عظیم کشورهای پیشرفته روی فناوری نانو، تحقیقات روی خواص حرارتی نانو سیال‌ها مورد توجه خاصی قرار گرفته است. با توجه به استفاده از فناوری نانو در کاهش اتلاف انرژی، در این پروژه اکسید سریم با اتیلن- گلیکول برای تهیه نانوسیال مورد استفاده قرار گرفته شد. به منظور پایداری نانوسیال از فرآیند موج- دهی آلتراسونیک و برای اندازه‌گیری لزجت از لزجت سنج دیجیتال استفاده شد. در این مقاله به بررسی اثر دما و کسر حجمی روی لزجت نانوسیال پرداخته و نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که در تمامی غلظت‌ها با افزایش دما، لزجت کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش کسر حجمی نانو ذرات، لزجت افزایش می‌یابد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد تغییرات لزجت با دما در غلظت‌های بالاتر شدت بیشتری دارد. پس از بررسی خواص رئولوژیک و بدست آوردن دقیق داده‌های آزمایشگاهی، رابطه‌ای برای تخمین لزجت نانوسیال با توجه به دما و کسر حجمی بدست می‌آید که از دقت بالایی برخوردار است.

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، ایران

۱- مقدمه

امری مهم شناخته می‌شود. آزمایشات و پژوهش‌های متعددی پیرامون میزان لزجت و انتقال حرارت نانو سیال انجام شده است.

لزجت نانوسیال آب- دی اکسید تیتانیوم با قطر نانوذرات ۲۷ نانومتر توسط ماسودا^۱ و همکاران [۲] اندازه‌گیری شد و در کسر حجمی ۴/۳ درصد افزایش لزجت ۶۰ درصدی نسبت به سیال پایه گزارش شد.

لزجت دو نوع نانو ذرات آلومینا و اکسید مس که در سیالات پایه آب، روغن موتور، سیال پمپ تخلیه و اتیلن گلیکول حل شده بودند توسط وانگ و همکاران [۳] آزمایش شد. داده‌ها نشان دادند که نانو سیال آب- آلومینا در کسر حجمی ۳ درصد افزایش لزجت ۲۰ تا ۳۰ درصد نسبت به سیال پایه را به همراه دارد. همچنین، پس از مقایسه لزجت نانوسیال اتیلن گلیکول- آلومینا مشاهده شد که افزایش لزجت این نانوسیال مشابه با نانو سیال آب-آلومینا است.

نامبورا^۲ و همکاران [۴] در یک پژوهش آزمایشگاهی به بررسی خواص جریانی نانو سیال آب و اتیلن گلیکول (۶۰-۴۰) اکسید مس پرداختند. در این آزمایش رابطه لزجت برای کسر حجمی نانو ذرات تا ۶/۱۲٪ و محدوده دمایی ۳۵- تا ۵۰ درجه سانتیگراد بیان شد. قطر نانو ذرات مورد استفاده در این آزمایش ۲۹ نانومتر بود. تحلیل‌ها نشان دادند که لزجت با افزایش دما به صورت نمایی کاهش یافته و افزایش غلظت نانوذرات افزایش لزجت را در برداشت.

یامساوا^۳ و همکاران [۵] کار خود را روی لزجت نانوذرات آلومینا و دی اکسید تیتانیوم با کسر حجمی تا ۴٪ معلق در اتیلن گلیکول و آب (۸۰:۲۰) و در دمای ۱۵ تا ۶۰ درجه

در انتقال حرارت سیالات رایج، عواملی چون اختلاف دما، سطح مقطع و ضریب انتقال حرارت پارامترهای تاثیر گذار بر میزان تبادل حرارت در مبدل‌های حرارتی هستند. چنانچه افزایش نرخ انتقال حرارت مد نظر باشد، با افزایش ضریب انتقال حرارت سیال این امر را می‌توان محقق کرد. یکی از عوامل تاثیرگذار بر ضریب انتقال حرارت لزجت است که نقش چشمگیری در روابط حاکم بر انتقال حرارت دارد. در برخی از کاربردها برای افزایش خاصیت انتقال حرارت سیال از نانوسیال استفاده می‌شود. واژه نانوسیال اولین بار توسط چوی [۱] برای معرفی ذرات بسیارکوچک (نانوذرات با اندازه قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر) که داخل سیال معلق شده‌اند معرفی شد. در نانوسیال‌ها یک یا چند فاز جامد به سیال اضافه شده که موجب افزایش نرخ انتقال حرارت و تغییر در لزجت می‌شود. برخی از نانوذرات ها به صورت اکسیدی هستند و در پراکندگی و معلق سازی در مایعات نقش بسزایی برعهده دارند و برخی نیز به صورت ذرات غیر اکسید فلزی بوده که موجب افزایش چشمگیری در انتقال حرارت نسبت به نانوذرات اکسیدی خواهند شد. سیالات مختلفی مانند آب، اتیلن گلیکول و انواع روغن ها در سال های گذشته به عنوان سیال عامل در صنعت و طراحی مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است که مشکل عمده این سیالات ضریب هدایت گرمایی کم آن‌ها بوده و کاهش نرخ انتقال حرارت را به همراه دارد. یکی از روش‌های جدید که برای افزایش رسانش حرارتی این سیالات معرفی شده است افزودن نانو ذرات باخواص ترموفیزیکی حرارتی بالا به سیال عامل است. میزان لزجت در طراحی نانو سیال برای جریان سیال بسیار حیاتی و مهم است. در پروژه‌های کاربردی در صنعت به دلیل افت فشار در پمپ، غلظت سیال

¹. Masuda

². Namburu

³. Yiamsawas

اکسید سریم- اتیلن گلیکول در کسرهای حجمی مختلف و دماهای متفاوت اندازه گیری شده و نتایج ارائه می شوند.

۲- آماده سازی نانوسیال

اولین قدم در آماده سازی نانوسیال تعلیق و پایداری نانوذرات در سیال پایه است. در این مقاله اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه مورد استفاده قرار گرفته است. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی اتیلن گلیکول و اکسید سریم در جداول ۱ و ۲ آمده است. نانوسیال اکسید سریم- اتیلن گلیکول در کسر حجمی های ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۲ درصد به روش دو مرحله ای تهیه گردید. مقدار اکسید سریم مورد

جدول (۱) مشخصات اتیلن گلیکول [۸]

پارامتر	مقدار
مقدار pH	۶-۷/۵
چگالی	۱/۱۱ (g/cm ³)
نقطه جوش	(°C) -۱۳
جرم مولی	۶۲/۰۷ (g/mol)

جدول (۲) مشخصات نانوذرات اکسید سریم [۹]

REO) %۹۹/۹۷	خلوص (%)
زرد روشن	رنگ
۱۰-۳۰	اندازه (nm)
۳۰-۵۰	سطح ویژه (m ² /g)
۷,۱۳۲	چگالی (g/cm ³)

نیاز برای کسر حجمی های متفاوت با استفاده از رابطه زیر مشخص می شود [۱۰]،

$$\phi\% = \left[\frac{\left(\frac{W}{\rho}\right)_{Ceo}}{\left(\frac{W}{\rho}\right)_{Ceo} + \left(\frac{W}{\rho}\right)_{EG}} \right] \quad (1)$$

که ϕ کسر حجمی، ρ چگالی و W وزن می باشد. آماده سازی نانوذرات با استفاده از یک ترازوی دیجیتالی با دقت ۱ میلی گرم انجام می شود. ظروف محتوی نانوسیال که شامل

سانتیگراد انجام دادند. پس از استخراج رابطه از نتایج آزمایش و مقایسه با روابط نظری دیگر محققین مشخص شد که روابط نظری جهت محاسبه لزجت نانوسیالها مناسب نیستند. رابطه پیشنهاد شده تابعی از لزجت سیال پایه، دما و کسر حجمی نانوذرات بود.

همت و سعدالدین^۱ [۶] در یک کار آزمایشگاهی به بررسی اثر دو پارامتر دما و کسر حجمی بر لزجت نانو سیال اتیلن گلیکول-اکسیدروی پرداختند. پس از اتمام آزمایش با استفاده از پردازش داده ها در کسر حجمی و دماهای مختلف رابطه ای با میانگین انحراف ۲ درصد بدست آمد. آن ها با مقایسه ای که بین اعداد بدست آمده و مدل های پیشنهادی انجام دادند، مشاهده کردند که سازگاری خوبی بین اعداد اندازه گیری شده و مدل های پیشنهادی وجود دارد. همچنین نتایج آن ها نشان دادند که لزجت دینامیکی نسبی به صورت غیر خطی با افزایش کسر حجمی افزایش یافته و مقدار ماکزیمم لزجت متعلق به بیشترین کسر حجمی است.

همت و همکاران [۷] به بررسی خواص انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال آب- نانولوله کربنی چند جداره عاملدار هیدروکربنی در جریان مغشوش و کسر حجمی متعدد نانوذرات پرداختند. براساس نتایج آزمایش مشاهده شد مدل های تئوری لزجت پاسخگوی تخمین لزجت نانو سیال نیستند.

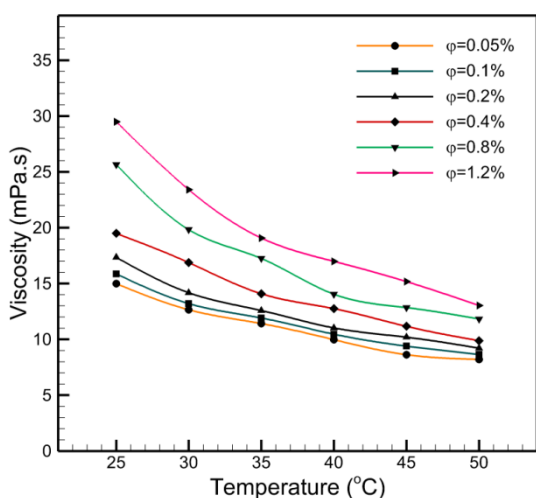
همانطور که ملاحظه شد تا کنون بر روی اندازه گیری لزجت دینامیکی نانو سیال اکسید سریم- اتیلن گلیکول در کسرهای حجمی مختلف و دماهای متفاوت کار خاصی انجام نشده است. در این مقاله لزجت دینامیکی نانو سیال

¹.Hemmat, Saedodin

UL Adaptor ریخته و با استفاده از دستگاه اندازه گیری لزجت بروکفیلد، آزمایش در دماهای مختلف انجام می شود. در بررسی رفتار رئولوژیک نانوسیال هر آزمایش به منظور دقت بیشتر ۳ بار تکرار شد. پس از داده برداری از نتایج آزمایش با میانگین گیری از ۳ تکرار هر آزمایش مقدار لزجت ثبت می شود.

۴- نتایج و بحث بر روی نتایج

شکل (۲) تغییرات لزجت دینامیکی با دما را در کسر حجمی های متفاوت نشان می دهد. ملاحظه می شود که با افزایش کسر حجمی نانوذرات در یک دمای ثابت لزجت نانو سیال افزایش می یابد. در دمای 25°C لزجت سیال پایه 0.144 پواز است که با اضافه کردن نانوذرات و رسیدن به کسر حجمی 0.2 درصد لزجت نانوسیال به 0.173 پواز و در



شکل (۲) تغییرات لزجت با دما در کسرهای حجمی متفاوت

کسر حجمی 0.4 و $1/2$ درصد لزجت نانوسیال به ترتیب 0.195 و 0.295 پواز افزایش می یابد. در کسرهای حجمی ذکر شده افزایش در صد لزجت نانو سیال نسبت به سیال پایه به ترتیب 20 ، 35 و 104 درصد است. دلیل این امر را این گونه می توان تشریح کرد که حرکت تصادفی نانوذرات در سیال پایه و برخورد پیوسته بین نانوذرات و

پودر اکسید سریم و اتیلن گلیکول است را داخل بشر 600 میلی لیتر ریخته و بر روی دستگاه هم زن مافوق صوت به مدت 7 ساعت جهت شکستن ذرات کلوخه شده و حل شدن کامل نانو ذرات در سیال پایه قرار گرفته تا نانوسیال به صورت پایدار به دست آید. ضمناً قبل از انجام آزمایش نانوسیال موجود به مدت 15 دقیقه موج دهی شده است.

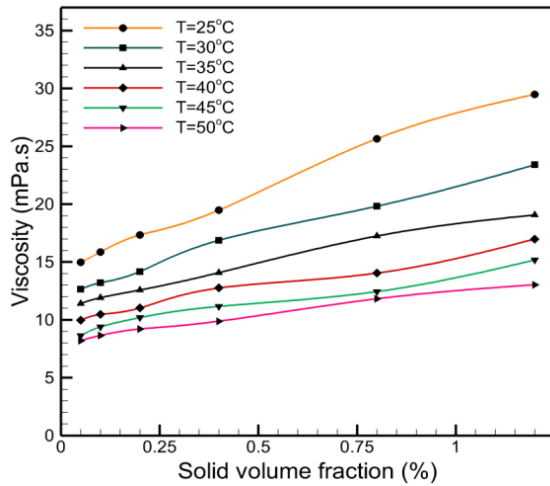
۳- روش انجام آزمایش

در این تحقیق، برای اندازه گیری لزجت دینامیکی نانوسیال اکسید سریم- اتیلن گلیکول از لزجت سنج نوع دورانی، مدل لزجت سنج بروکفیلد استفاده شده است. نمای کلی دستگاه بروکفیلد در شکل (۱) نشان داده شده است.

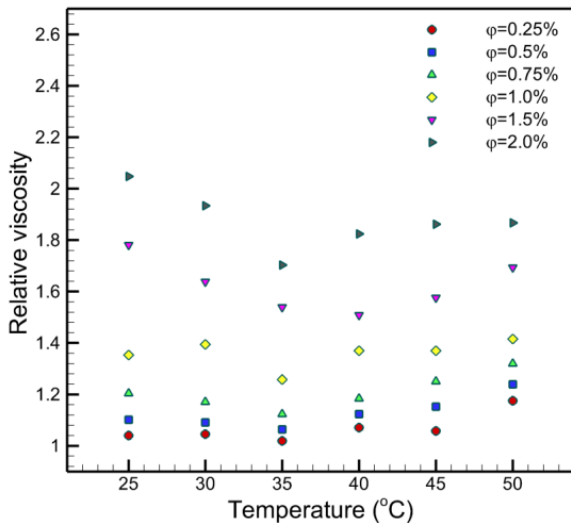


شکل (۱) دستگاه اندازه گیری لزجت بروکفیلد

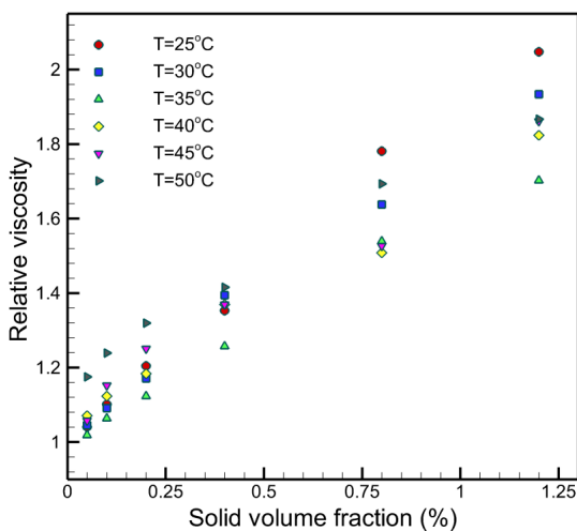
محدوده دقت و تکرار پذیری لزجت سنج بروکفیلد به ترتیب $\pm 1\%$ و $\pm 0.2\%$ است. برای اندازه گیری لزجت با حجم مایعات کم در دستگاه UL Adaptor در دماهای مختلف و تنظیم دما، نیاز به حمام آب گرم است. دماهای مورد استفاده در این تحقیق 25 ، 30 ، 35 ، 40 ، 45 و 50 درجه سانتی گراد هستند. آب درون حمام آب را به 50°C رسانده و سپس آب به دستگاه UL Adaptor به صورت رفت و برگشت پمپاژ می شود. برای دماهای پایین تر دمای آب داخل حمام به دمای دلخواه رسانده می شود. بعد از رسیدن آب به دمای مورد نیاز آزمایش، نانوسیال را داخل دستگاه



شکل (۳) تغییرات لزجت با کسر حجمی در دماهای متفاوت



شکل (۴) رابطه لزجت نسبی با دما در کسرهای حجمی متفاوت



شکل (۵) رابطه لزجت نسبی با کسر حجمی در دماهای متفاوت

ملکول‌های سیال پایه یکی از عوامل تاثیر گذار بر لزجت است. به علاوه وقتی نانوذرات به سیال پایه اضافه می شوند، این نانومواد در سیال پایه پراکنده شده و در اثر نیروی واندروالس بین نانوذرات و سیال پایه، نانوخوشه های متقارن و بزرگتر تشکیل می شوند. این نانوخوشه ها باعث ممانعت از حرکت اتیلن گلیکول روی یکدیگر شده و در نتیجه لزجت افزایش می یابد. شکل (۳) تاثیر دما بر لزجت نانو سیال در کسرهای حجمی متفاوت را نشان می دهد. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می شود، در کسر حجمی ۰/۸ درصد در دمای ۳۰، ۴۰ و ۵۰°C لزجت نانو سیال به ترتیب ۰/۱۹۸، ۰/۱۴۰ و ۰/۱۱۸ پواز است. از نتایج مشخص است که با افزایش دما در یک کسر حجمی ثابت لزجت نانو سیال کاهش می یابد. دلیل این امر این است که در مایعات مولکول‌ها در دماهای بالاتر تحت تاثیر انرژی قرار گرفته و نیروهای چسبندگی بین ملکولی کاهش پیدا می کنند. در نتیجه ملکول‌های انرژی دار راحت تر حرکت می کنند. کاهش نیروهای بین مولکولی در اثر افزایش دما سبب کاهش مقاومت در برابر جریان می شود. در نتیجه لزجت نانو سیال با افزایش دما کاهش می یابد. به علاوه تاثیر حرکت براونی نانوذرات با افزایش دما بر لزجت نانو سیال نیز قابل توجه است. وقتی دما افزایش یابد، حرکت ملکولی نانو ذرات و سیال پایه آزادانه بوده و ملکول های نانو ذرات کمتر به هم برخورد کرده و در نتیجه لزجت کاهش پیدا می کند.

شکل های (۴) و (۵) تغییرات لزجت نسبی را در دماها و کسرهای حجمی متفاوت نشان می دهند. شکل ها گویای این مطلب هستند که حداکثر افزایش لزجت نانو سیال نسبت به سیال پایه در دمای ۲۵°C و کسر حجمی ۱/۲ درصد است.

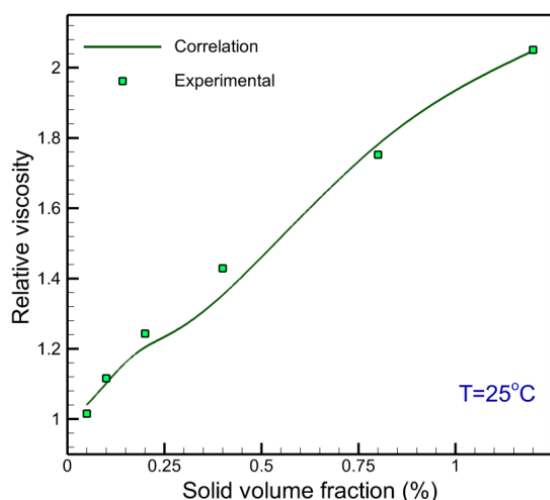
لزجت نانوسیال اکسید سریم- اتیلن گلیکول در دما و کسرهای حجمی متفاوت، معادله (۴) استخراج گردید. این رابطه با برازش منحنی نمودار در نرم افزار سیگماپلات ۱۲،۳ بدست آمده است،

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 781.4 \times T^{-2.117} \times \phi^{0.2722} + \frac{0.05776}{T^{-0.7819} \times \phi^{-0.04009}} + 0.511 \times \phi^2 - 0.1779 \times \phi^3 \quad (4)$$

با استفاده از رابطه (۴) لزجت نسبی نانوسیال در محدوده دمایی ۲۵ تا ۵۰°C و کسر حجمی ۰/۰۵ تا ۱/۲ درصد قابل دستیابی است.

۷- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و داده‌های به دست آمده از رابطه استخراج شده

شکل‌های (۷) تا (۹) نشان دهنده انطباق کامل اعداد به دست آمده از رابطه ریاضی استخراج شده با نتایج آزمایشگاهی هستند. می‌توان استنباط کرد که رابطه ریاضی به دست آمده پیشگویی مناسبی برای تخمین لزجت نانوسیال مورد نظر انجام می‌دهد که در دامنه کسرهای حجمی و دماهای تعیین شده منطبق با نتایج آزمایشگاهی است.



شکل (۷) مقایسه نتایج آزمایشگاهی با رابطه ریاضی استخراج شده در دمای ۲۵°C

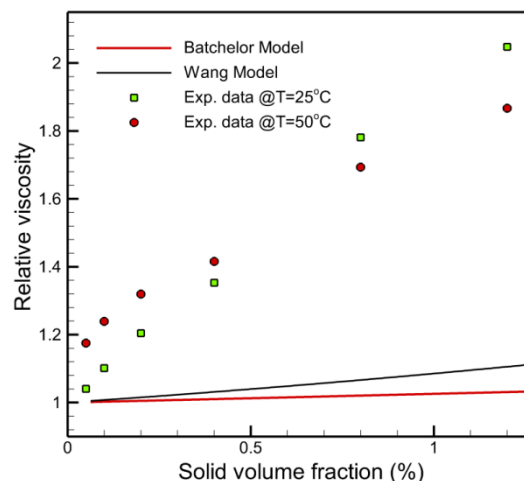
۵- مقایسه داده‌های حاصل از آزمایش با روابط تحلیلی ارائه شده توسط محققین

روابط مختلفی توسط محققین برای محاسبه لزجت نانوسیال به صورت تحلیلی ارائه شده‌اند. که در اینجا دو رابطه بررسی می‌شود. روابط (۲) و (۳) به ترتیب توسط بچلر [۱۱] و وانگ [۱۲] برای پیشگویی لزجت نانوسیال‌های مختلف استفاده می‌شود،

$$\mu_r = 1 + 2.5\phi \quad (2)$$

$$\mu_r = 1 + 7.3\phi + 123\phi^2 \quad (3)$$

در شکل (۶) مقایسه بین نتایج آزمایش با مدل‌های تئوری ارائه شده توسط محققین نشان داده شده است. با مقایسه روابط تحلیلی با نتایج آزمایش می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌های تئوری ارائه شده توسط محققین قادر به پیشگویی و بیان دقیق لزجت نانوسیال در دماهای مختلف نیستند. علت را این گونه می‌توان توضیح داد که در روابط تحلیلی دما مورد استفاده قرار نگرفته است.



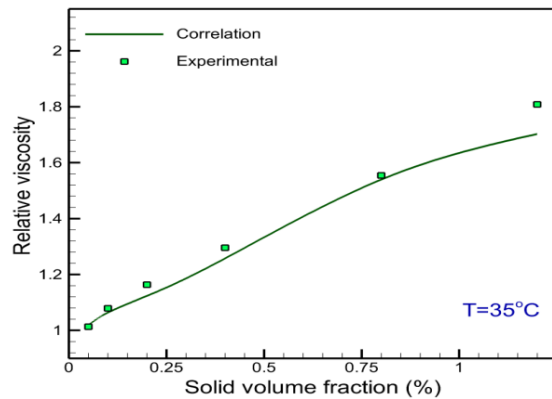
شکل (۶) مقایسه روابط تحلیلی با نتایج آزمایش

۶- رابطه پیشنهادی

همانطور که در بخش ۴ ذکر شد، روابط تحلیلی جوابگویی محاسبه لزجت نانو سیال مورد نظر در دماها و کسرهای حجمی مختلف نیست. از این رو به منظور تسهیل در محاسبه

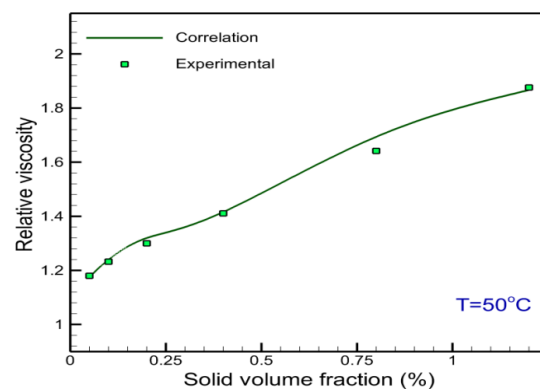
مراجع:

- [1] Choi S. U. S., Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *Developments Applications of Non-Newtonian Flows*, vol. 66, 1995, pp. 99-105.
- [2] Masuda A. E, Teramae H, Hishinuma K. N., Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of $c\text{-Al}_2\text{O}_3$, SiO_2 and TiO_2 ultra fine particles), *Netsu Bussei (japan)*, vol. 4, 1993, pp. 227-233.
- [3] Wang X, Choi, S. U. S., Thermal conductivity of nanoparticlefluid mixture, *Thermophysics Heat Transfer*, vol. 13, 1999, pp. 474-480.
- [4] Praveen D. P. K, Namburu K, Debasmita M. D. K, Das S. K, Choi S. U.S, Pradeep W., Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture, *Thermal Fluid Science*, vol. 32, 2007, pp. 397-402.
- [5] Yiamsawas O. M. T, Selim Dalkilic A, Kaewnai S, Wongwises S., Experimental studies on the viscosity of TiO_2 and Al_2O_3 nanoparticles suspended in a mixture of ethylene glycol and water for high temperature applications, *Applied Energy*, vol. 111, 2013, pp. 40-45.
- [6] Saedodin S, Hemmat Esfe M., An experimental investigation and new correlation of viscosity of ZnO-EG nanofluid at various temperatures and different solid volume fractions, *Thermal and Fluid science*, vol. 55, 2014, pp. 82-98.
- [7] Hemmat Esfe M, Saedodin S, Mahian O, Wongwises S., Heat transfer characteristics and pressure drop of COOH -functionalized DWCNTs/water nanofluid in turbulent flow at low concentrations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 73, 2014, pp. 186-194.
- [8] S. S. M. Chandrasekar, A. Chandra Bose, "Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{water}$ nanofluid, *Experimental Thermal Fluid Science*, vol. 34 (2), pp. 210-216, 2010.



شکل (۸) مقایسه نتایج آزمایشگاهی با رابطه ریاضی استخراج شده

در دمای ۳۵°C



شکل (۹) مقایسه نتایج آزمایشگاهی با رابطه ریاضی استخراج شده

در دمای ۵۰°C

۸- نتیجه گیری کلی

در این پژوهش تجربی آزمایشگاهی، لزجت نانوسیال اکسید سریم- اتیلن گلیکول در کسر حجمی ها و دماهای مختلف اندازه گیری شد. همانطور که مشاهده شد لزجت نانوسیال ها به دما و کسر حجمی نانوذرات بستگی دارد. مشاهده شد که نرخ تغییرات لزجت در دمای کم با افزایش کسر حجمی نسبت به دماهای بالا بیشتر است. با توجه به اینکه مدل‌های تئوری ارائه شده در زمینه لزجت نانوسیال پاسخگوی پیش بینی رفتار رئولوژیک نانوسیال‌ها نیستند، رابطه ریاضی حاصل از برازش منحنی جهت تخمین لزجت نانوسیال ارائه شد. از مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و مدل ریاضی مشخص است که مدل ریاضی به خوبی قادر به پیش بینی لزجت دینامیکی نانوسیال است.

- [9] A H, T Y, Y S, T A, Magnetic properties of ferromagnetic ultrafine particles prepared by a vacuum evaporation on running oil substrate, *Journal of Crystal Growth*, vol. 45, 1978, pp. 495–500.
- [10] Syam Sundar L, Hashim Farooky M, Naga Sarada S, Singh M.K., Experimental thermal conductivity of ethylene glycol and water mixture based low volume concentration of Al₂O₃ and CuO nanofluids, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, vol. 41, 2013, pp. 41–46.
- [11] Long G.J, Hautot D, Pankhurst Q.A, Vandormael D, Grandjean F., Mössbauer-effect and X-Ray Absorption Spectral Study of Sonochemically Prepared Amorphous Iron, *Physics Review*, vol. 57, 1998, pp. 10716-22.
- [12] HC B, The viscosity of concentrated suspensions and solution, *Journal of Chemical Physics*, vol. 20, 1952, pp. 571-81.