ارائه مدلی جدید جهت تخمین ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال هیدروکسیدمنیزیم-اتیلن گلیکول

امین اسدی[1*]، میثم اسدی[2]، مجید غلامی اندارتی[2]

۱- کارشناسی ارشد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی**، سمنان، ایران
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی**، سمنان، ایران
* سمنان، صندوق پستی۳۵۱۹۶-۹۷۹۵۱، A.Asadi@stu.semnaniau.ac.ir

چکیده

در مطالعه حاضر به اندازه‌گیری ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال هیدروکسیدمنیزیم-اتیلن گلیکول پرداخته شده است. با توجه به محدودیت‌های مدل‌های ارائه شده پیشین جهت تخمین ویسکوزیته دینامیکی، مدلی جدید بر اساس داده‌های آزمایشگاهی جهت تخمین ویسکوزیته دینامیکی این نانوسیال ارائه شده است. نتایج حاصل از آزمایشات حاکی از این موضوع است که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال نیز افزایش پیدا می‌کند. همچنین در دماهای پایین، در مقایسه با دماهای بالاتر، این افزایش در ویسکوزیته چشمگیرتر می‌باشد. علاوه‌براین، در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد، کسر حجمی نانوذرات تاثیر قابل توجهی در ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال ندارد. این ویژگی خاص می‌تواند بعنوان مهمترین دستاورد پژوهش حاضر در کاربردهای صنعتی و مهندسی این نانوسیال محسوب گردد.

کلید واژگان

ویسکوزیته دینامیکی، نانوسیال هیدروکسیدمنیزیم-اتیلن گلیکول، کسر حجمی، معیار انحراف، مدل جدید

Development of new model to predict dynamic viscosity of ethylene glycol based nanofluid containing $Mg(OH)_2$

Amin Asadi[1*], Meisam Asadi[2], Majid Gholami Andarati[2]

1-Young Researchers and Elite Club, Semnan Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran
* P.O.B. 97951-35196 Semnan, Iran, A.Asadi@stu.semnaniau.ac.ir

Abstract

In this study, the dynamic viscosity of $Mg(OH)_2$-ethylene glycol(EG) is measured. Moreover, new model for determining the dynamic viscosity of the nanofluid is proposed. Due to the limitation of the previous correlations in order to predict the dynamic viscosity of the mentioned nanofluid, a new practical equation is suggested base on the experimental correlations. The results indicate that while the solid volume fraction is increased, the dynamic viscosity is increased simultaneously. It can be interesting to note that at lower temperatures, this increase is more noticeable than those in higher temperatures. In addition, it is shown that at the special temperature of 55^0C, the solid volume fraction has no significant impact on the dynamic viscosity of the nanofluid. This unique consequence can be considered as a paramount breakthrough in the engineering and industrial applications.

Keywords

Dynamic viscosity, Margin of deviation, Temperature, Propose model, $Mg(OH)_2$-EG nanofluid

۱- مقدمه

واژه نانوسیال به محلول حاوی ذرات در ابعاد نانو در سیالات پایه از قبیل آب، روغن موتور، اتیلن گلیکول[1] و دی اتیلن گلیکول[2]، اطلاق می‌شود. در سالهای اخیر، ظرفیت انتقال حرارت بالای این نسل جدید از سیالات عامل در مقابل سیالات رایج از قبیل آب، روغن و اتیلن گلیکول باعث شده است نانوسیالات مورد توجه قرار گیرند. از کاربردهای نانوسیالات می‌توان به کاربردهای وسیع صنعتی از قبیل سیستم‌های سرمایش و گرمایش، راکتورهای هسته‌ای، انرژی‌های خورشیدی و ... اشاره نمود. در سال‌های اخیر محققان زیادی به مطالعه و بررسی رفتار رئولوژیکی نانوسیالات پرداخته‌اند [۱-۴].

برای اولین بار ماسودا و همکاران[۵] به اندازه‌گیری ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالی با سیال پایه آب در دماهای مختلف (از دمای محیط تا ۳۴۰ کلوین) پرداختند. پس از آن پاک و چو[۶] در ادامه این تحقیق، به بررسی ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال اکسیدآلومنیم-آب پرداختند. همچنین در تحقیقی دیگر آنها به بررسی رفتار ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات اکسیدآلومنیم-آب و اکسیدتیتانیم-آب پرداختند. نتایج آنها نشان داد که در کسرحجمی ۱۰ درصد، ویسکوزیته نسبی نانوسیال اکسیدتیتانیم-آب و اکسیدآلومنیم-آب بترتیب به مقدار ۳ و ۱۰۰ برابر افزایش می‌یابد. در تحقیق آزمایشگاهی دیگری نگوئین و همکاران[۷] به بررسی رفتار ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات اکسیدآلومنیم-آب و اکسیدمس-آب باتوجه به تاثیرات دما، کسرحجمی و اندازه ذرات پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد که در کسرهای حجمی بالا با افزایش دما، ویسکوزیته دینامیکی افزایش می‌یابد. این

[1] Ethylene glycol
[2] Diethylene glycol

در حالی است که در کسرهای حجمی پایین، دما تاثیر قابل توجهی بر ویسکوزیته دینامیکی ندارد. تاثیرات دما بر ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال اکسیدتیتانیم-آب توسط چاندراسکار[۸] مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. آنها آزمایشات خود را در دماهای مختلف (بین ۱۵ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد) و کسرهای حجمی مختلف (بین ۰/۲ تا ۲ درصد) انجام دادند. یو و همکاران[۹] در سال ۲۰۰۹ برای نانوسیال اتیلن گلیکول-اکسیدروی ویسکوزیته دینامیکی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که این نانوسیال در کسرهای حجمی پایین($\phi \leq 0.02$) رفتار نیوتنی و در کسرهای حجمی بالا ($\phi \leq 0.03$) رفتار رقیق برشی[۱] از خود نشان می‌دهند. همچنین در کسرهای حجمی پایین با افزایش دما، ویسکوزیته دینامیکی بطور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند .کوله و دی در[۱۰] در سال ۲۰۱۱، تاثیر کلوخه‌ای[۲] شدن نانوذرات اکسید مس را بر ویسکوزیته دینامکی نانوسیال روغن دنده-اکسید مس را بصورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. آنها نتایج خود را به صورت تابعی از کسرحجمی نانوذره و محدوده دمایی بین ۱۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد ارائه نمودند. آنها دریافتند که افزایش در کسر حجمی نانوذرات باعث افزایش تقریباً سه برابری ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال نسبت به ویسکوزیته سیال پایه می‌گردد. همچنین رفتار نیوتنی سیال پایه با افزایش کسرحجمی به رفتار غیرنیوتنی تبدیل می‌گردد. در سال ۲۰۰۷، پراوین و همکاران[۱۱] مطالعه‌ای تجربی بر روی خواص رئولوژیکی نانوسیال اکسید مس در محلولی با نسبت حجمی ۶۰:۴۰ اتیلن گلیکول و آب انجام دادند. آنها آزمایشات خود را در محدوده کسرهای حجمی بین ٪۰ تا ٪۶,۱۲ و محدوده دمایی بین ۳۵- تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد به انجام رساندند. نتایج آنها نشان می‌دهد که در محدوده کسرهای حجمی مورد آزمایش، نانوسیال رفتاری نیوتنی از خود نشان می‌دهد. آنها دریافتند زمانیکه کسر حجمی نانوسیالات افزایش پیدا می‌کند، ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات نیز افزایش پیدا می‌کند.

برطبق اطلاعات نویسندگان، هیچگونه مطالعه جامعی در زمینه بررسی رفتار ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال هیدروکسیدمنیزیم-اتیلن گلیکول در دماها و کسرهای حجمی مختلف گزارش نشده است. بنابراین فقدان چنین مطالعه‌ای باتوجه به کاربردهای مهندسی و صنعتی این نانوسیال احساس شد. همچنین ارائه رابطه‌ای جهت تخمین ویسکوزیته دینامیکی این نانوسیال باتوجه به دما و کسر حجمی از دیگر اهداف پژوهش حاضر می‌باشد.

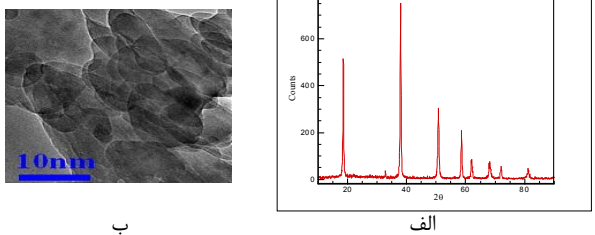
۲- آماده سازی نانوسیال

در این تحقیق نانوسیال هیدروکسیدمنیزیم-اتیلن گلیکول، با استفاده از روش دو مرحله‌ای[۳] بدون استفاده از هیچگونه پایدارکننده[۴]، به عنوان نمونه آزمایشگاهی تولید شد. در خلال مراحل تولید و به منظور توزیع کردن[۵] نانوذرات در کسرهای حجمی[۶] مختلف از قبیل ٪۰,۱، ٪۰,۲، ٪۰,۴، ٪۰,۸، ٪۱، ٪۱,۵ و ٪۲، از یک همزن مکانیکی[۷] استفاده شد. در مرحله بعدی، برای هر کسر حجمی مقداری معین از نانوذره هیدروکسیدمنیزیم به سیال پایه اتیلن گلیکول افزوده شد. همچنین به منظور مخلوط کردن نانوذرات در سیال پایه، از یک همزن مغناطیسی[۸] به مدت دو ساعت استفاده شد. در مرحله نهایی، از یک پردازشگر اولتراسونیک[۹]، با قدرتی برابر با ۴۰۰ وات و فرکانس ۲۴ کیلو هرتز، به منظور از بین بردن پدیده کلوخه شدن بین نانوذرات و همچنین جلوگیری از مشکل ته‌نشین شدن به مدت پنج ساعت استفاده شد. این روش باعث پایدار شدن نمونه برای مدت زمانی طولانی(حداقل یک هفته) می‌شود و هیچگونه اثر ته‌نشین شدن با چشم غیر مصلح مشاهده نمی‌شود.

تصویر مربوط به نانوپودرهیدروکسید منیزیم در شکل۱ آمده است. همانگونه که در این شکل مشخص است، نانوسیال در هفت کسر حجمی مختلف (٪۰,۱، ٪۰,۲، ٪۰,۴، ٪۰,۸، ٪۱، ٪۱,۵ و ٪۲) به دست آمده است. این شکل نانوسیال تولید شده پس از سه روز را نشان می دهد.

شکل ۱ الف) نانوذره هیدروکسید منیزیم، ب) نانوسیال تولید شده به روش دومرحله‌ای

به منظور اطمینان از شکل و میانگین اندازه قطر نانوذرات مورد مطالعه، تصاویر TEM و XRDمربوط به نانوذرات هیدروکسیدمنیزیم در شکل ۲ نشان داده شده است. همانگونه که در این تصاویر مشخص است ذرات اندازه‌ای در



شکل ۲ الف) تصویر تست XRD نانوذرات، ب) تصویر تست TEM نانوذرات

۳- دستگاه اندازه گیری ویسکوزیته دینامیکی

در این تحقیق به منظور اندازه‌گیری ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال، از دستگاه اندازه‌گیری ویسکوزیته دینامیکی بروکفیلد[۱۰] و با استفاده از یک یو آداپتور[۱۱] که توسط آزمایشگاه مهندسی بروکفیلد[۱۲] در کشور آمریکا تولید شده است، استفاده شده است. شکل ۳ شمایی کلی از دستگاه اندازه‌گیری ویسکوزیته دینامیکی بروکفیلد را نشان می‌دهد.

1 Shear-thinning
2 Agglomeration
3 Two-step method
4 Surfactant
5 Disperse
6 Solid volume fractions
7 Mechanical mixture
8 Magnetic stirrer
9 Ultrasonic processor
10 Brookfield viscometer
11 UL adaptor
12 Brookfield engineering laboratories of USA

شکل ۳ دستگاه اندازه گیری ویسکوزیته دینامیکی بروکفیلد

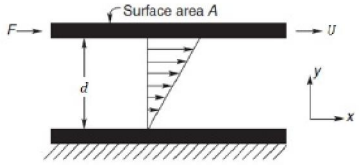
۴- مفهوم ویسکوزیته دینامیکی

ویسکوزیته یا همان اصطکاک داخلی، میزان مقاومت یک سیال در برابر جاری شدن است. در یک جریان برشی ساده مانند شکل ۴، نیروی لازم در واحد سطح برای تولید حرکت(تنش برشی)، $\tau = \frac{F}{A}$ می باشد که با گرادیان سرعت (نرخ برشی)، $\dot{\gamma} = \frac{U}{A}$ متناسب است. ثابت تناسب η ویسکوزیته برشی نام دارد[۱۲]، یعنی:

$$\tau = \eta \dot{\lambda} \quad (۱)$$

شکل دیفرانسیلی رابطه ۱ بصورت زیر است که به قانون ویسکوزیته نیوتن معروف است[۱۳]:

$$\tau_{xy} = \eta\left(\frac{du_x}{dy}\right) = \eta \dot{\gamma}_{yx} \quad (۲)$$



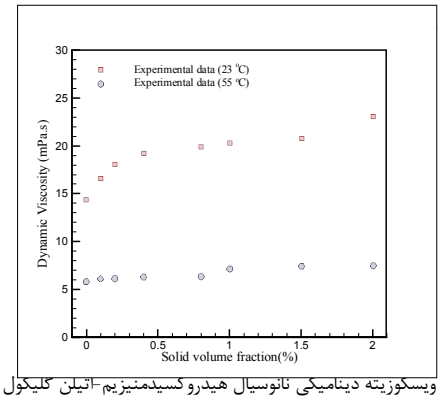
شکل ۴ نمایش مدل دو صفحه موازی، هر یک به مساحت A، در فواصل y=0 و y=d [10]

برای مایعات نیوتنی، چون η دارای یک مقدار ثابت است، آنرا ضریب ویسکوزیته دینامیکی می‌نامند. ولی برای اکثر مایعات η تابعی از تنش برشی می‌باشد. در این تابع $\eta(\dot{\gamma})$را بعنوان ویسکوزیته دینامیکی برشی یا بطور ساده ویسکوزیته دینامیکی تعریف می‌کنند، هر چند که در مقالات از آن با عنوان ویسکوزیته دینامیکی ظاهری یا گاهی اوقات با عنوان ویسکوزیته دینامیکی وابسته به برش نیز نام برده می شود[۱۴].

واحد ویسکوزیته در سیستم SI پاسکال ثانیه (Pa.s) و در سیستم CGS پواز (Poise) می‌باشد که ۱۰ برابر کوچکتر از Pa.s است.

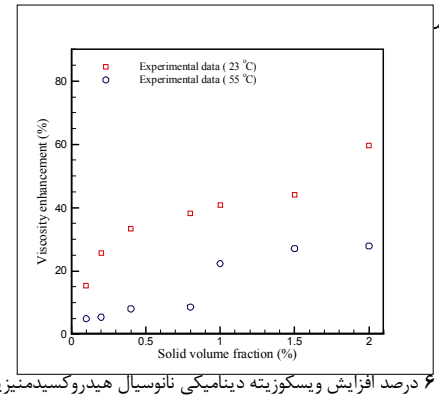
۵- تحلیل و بررسی نتایج

شکل ۵ اطلاعات اندازه‌گیری شده مربوط به ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال اتیلن گلیکول-هیدروکسیدمنیزیم در دماهای ۲۳ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد و در کسرهای حجمی مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل پیداست، در هر دو دمای مطالعه شده با افزایش کسرحجمی نانوذرات، ویسکوزیته دینامیکی افزایش پیدا می‌کند. این افزایش ویسکوزیته دینامیکی در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد مقدار بیشتری را در مقایسه با دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد از خود نشان می‌دهد. همچنین، با افزایش درجه حرارت (از ۲۳ به ۵۵ درجه سانتی‌گراد) ویسکوزیته دینامیکی کاهش پیدا می‌کند. این کاهش در کسرهای حجمی بالاتر به صورت ملموس‌تری خود را نشان می‌دهد در حالیکه در کسرهای حجمی پایین، این کاهش، مقدار خیلی کمی را از خود نشان می‌دهد. بر طبق این شکل، می‌توان این نکته را بیان کرد که تاثیر کسر حجمی نانوذرات بر روی ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال در دماهای پایین خیلی بیشتر می‌باشد. این مطلب می‌تواند در کاربردهای صنعتی این نانوسیال، از قبیل مبدل‌های حرارتی، رادیاتورها، سیستم‌های سرد و گرم کننده و



شکل ۵ ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال هیدروکسیدمنیزیم-اتیلن گلیکول در دماهای ۲۳ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد و در کسرهای حجمی مختلف

شکل۶ درصد افزایش ویسکوزیته دینامیکی این نانوسیال را با تغییر در کسرحجمی نانوذرات نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل برداشت می‌شود، بالاترین درصد ویسکوزیته دینامیکی در بیشترین کسرحجمی (کسرحجمی ۲٪) روی می‌دهد. بیشترین افزایش در ویسکوزیته دینامیکی این نانوسیال بترتیب ۵۹,۷٪ و ۲۷,۳٪ در دماهای ۲۳ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد گزارش م



شکل ۶ درصد افزایش ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال هیدروکسیدمنیزیم-اتیلن گلیکول با تغییر کسرحجمی نانوذره و با توجه به سیال پایه

۶- مدل ارائه شده

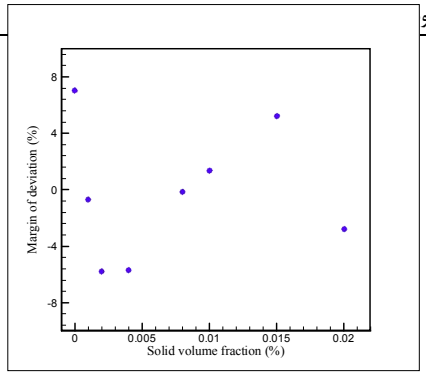
با توجه به داده‌های تجربی به دست آمده از تحقیق حاضر، یک مدل به منظور تخمین ویسکوزیته در محدوده دمایی مورد مطالعه و در کسرهای

حجمی مختلف پیشنهاد می‌گردد. این مدل بر مبنای برازش منحنی[1] از روی داده‌های تجربی به دست آمده و تقریب بسیار خوبی با این داده‌ها دارد. بیان این نکته حائز اهمیت می‌باشد که که این اولین مدلی است که جهت تخمین ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال هیدروکسیدمنیزیم-ایتلن گلیکول در کسرهای حجمی کمتر از ۲ درصد ارائه می‌شود.

$$\mu_{nf} = 15.89 + 614.4\varphi - 14526\varphi^2 \quad (۳)$$

۷- انحراف از معیار

در شکل شماره ۷ به منظور اثبات دقت و صحت مدل تجربی ارائه شده در این پژوهش، معیار انحراف باتوجه به نتایج آزمایشگاهی در دماهای مختلف ارائه شده است. همانطور که در شکل مشخص است در محدوده کسرهای حجمی مورد مطالعه، بیشترین و کمترین مقدار میزان انحراف بترتیب برابر با ۷/۰۳ و ۰/۱۲ درصد می‌باشد. برطبق میزان انحراف بدست آمده می‌توان رابطه ارائه شده را بعنوان رابطه‌ای قابل اطمینان، در محدوده دمایی ۲۳ تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد و در کسرهای حجمی کمتر از ۲ درصد، برای این نانوسیال تلقی نمو



شکل ۷ معیار انحراف با توجه به کسرحجمی

۸- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، رفتار رئولوژیکی نانوسیال هیدروکسید منیزیم- اتیلن گلیکول در دماهای ۲۳ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نانوسیال در کسرهای حجمی مختلف از جمله ٪۰,۱، ٪۰,۲، ٪۰,۴، ٪۰,۸، ٪۱، ٪۱,۵ و ٪۲ به روش دو مرحله‌ای تهیه، و در دماهای مختلف به صورت تجربی و آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین بر اساس داده های تجربی، مدلی جدید جهت تخمین ویسکوزیته دینامیکی این نانوسیال در کسرهای حجمی مختلف ارائه شد. علاوه براین معیار انحراف مدل ارائه شده مورد بررسی قرار گرفت.

۹- مراجع

[۱] M. H. Esfe, M. Afrand, S. Wongwises, A. Naderi, A. Asadi, S. Rostami, *et al.*, "Applications of feedforward multilayer perceptron artificial neural networks and empirical correlation for prediction of thermal conductivity of Mg (OH) 2–EG using experimental data," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 67, pp. 46-50, 2015.

[۲] M. H. ESFE, S. SAEDODIN, and A. ASADI, "An empirical investigation on the dynamic viscosity of Mg (OH) 2–ethylene glycol in different solid concentrations and proposing new correlation based on experimental data," *International Journal of Natural and Engineering Sciences*, vol. 8, pp. 29-34, 2014.

[۳] M. H. Esfe, S. Saedodin, A. Asadi, and A. Karimipour, "Thermal conductivity and viscosity of Mg (OH) 2-ethylene glycol nanofluids," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 120, pp. 1145-1149, 2015.

[۴] M. H. Esfe, S. Wongwises, A. Naderi, A. Asadi, M. R. Safaei, H. Rostamian, *et al.*, "Thermal conductivity of Cu/TiO 2–water/EG hybrid nanofluid: Experimental data and modeling using artificial neural network and correlation," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2015.

[۵] H. Masuda, A. Ebata, and K. Teramae, "Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles. Dispersion of Al2O3, SiO2 and TiO2 ultra-fine particles," 1993.

[۶] B. C. Pak and Y. I. Cho, "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles," *Experimental Heat Transfer an International Journal*, vol. 11, pp. 151-170, 1998.

[۷] W. Duangthongsuk and S. Wongwises, "Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO 2-water nanofluids," *Experimental thermal and fluid science*, vol. 33, pp. 706-714, 2009.

[۸] M. Chandrasekar, S. Suresh, and A. C. Bose, "Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al 2 O 3/water nanofluid," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 34, pp. 210-216, 2010.

[۹] W. Yu, H. Xie, L. Chen, and Y. Li, "Investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluid," *Thermochimica Acta*, vol. 491, pp. 92-96, 2009.

[۱۰] M. Kole and T. K. Dey, "Effect of aggregation on the viscosity of copper oxide–gear oil nanofluids," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 50, pp. 1741-1747, 2011.

[۱۱] Praveen K. Namburu a, Devdatta P. Kulkarni a, Debasmita Misra b, Debendra K. Das, Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture ,Experimental Thermal and Fluid Science 32 (2007) 397–402

[۱۲] H.A. Barnes, J.F. Hutton, K. Walters, "An introduction to rheology", Elsevier, 1989 .

[۱۳] R.P. Chhabra, J.F. Richardson, "Non-Newtonian Flow and applied rheology: Engineering applications", 2nd Ed., IChemE, 2008.

[۱۴] H.A. Barnes, J.F. Hutton, K. Walters, "An introduction to rheology", Elsevier, 1989 .

1 Curve fitting