



تحلیل واریانس چند عاملی و رگرسیون چند متغیره در تعیین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال

محمد رضا قلانی^{۱*}، مسلم برزگری^۲، اشکان غفوری^۳

۱. گروه آمار، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

۲. کارشناسی ارشد مکانیک، موسسه غیرانتفاعی اروند، خرمشهر، ایران.

۳. گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

* نویسنده مسئول: m_ghalani@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۸/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۵

چکیده

از روش‌های آماری، در تحلیل انواع داده‌ها استفاده می‌شود. در این مقاله با استفاده از روش آنالیز واریانس چند عاملی و رگرسیون چند متغیره، داده‌های مربوط به هدایت حرارتی نانوسیال‌ها مورد بررسی قرار گرفته و نتایج دو روش مقایسه شده است. برای آماده سازی نانوسیال اتیلن گلیکول-اکسید منیزیم از روش دو مرحله‌ای استفاده گردید. به منظور آماده‌سازی نانوسیال به وسیله تعلیق کردن نانوذرات در سیال پایه، از دستگاه همزن التراسونیک استفاده گردید. بدین منظور، از نانوذرات با قطرهای ۵۰، ۲۰ و ۱۰۰ نانومتر در کسرهای حجمی ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ درصد در دماهای ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه سانتیگراد استفاده شده است. از روش سیم داغ گذرا برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی در کسرهای حجمی مختلف استفاده شد. سپس مقادیر تجربی بدست آمده با استفاده از نرم افزار SPSS.26 مورد تحلیل قرار گرفت. نمودارهای خطا بدست آمده از دو روش نشان داد که وقتی متغیرهای مستقل به صورت گروه‌بندی شده تعریف می‌شوند استفاده از آنالیز واریانس چند عاملی بهتر می‌تواند پراکندگی ضریب هدایت حرارتی را توصیف نماید.

کلمات کلیدی: اتیلن گلیکول، ضریب هدایت حرارتی، نانوسیال، آنالیز واریانس چند عاملی، رگرسیون چند متغیره.

مقدمه

سیستم‌های خنک‌کننده از مهم‌ترین دغدغه‌های بخش صنعت بوده که با انتقال گرما مواجه هستند. سیالات رایج نظیر آب، روغن‌ها و اتیلن گلیکول که معمولاً به عنوان واسط انتقال حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرند، توانایی محدودی از لحاظ خواص حرارتی دارند و این موضوع مانع کوچک‌سازی و بالا بردن راندمان کاری مبدل‌های حرارتی در جهت کاهش مصرف انرژی می‌باشد. یکی از راه‌های بهبود فرایند انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی، افزودن مواد با ضریب هدایت حرارت بالا به سیال است. محققان سال‌ها بر روی استفاده از مخلوط ذرات جامد معلق بسیار کارآمد در ابعاد میکرو در سیال برای بهبود انتقال حرارت تحقیق کردند اما این سیالات با مشکلات فراوانی مانند رسوب‌گذاری، ناخالصی، کربن، افزایش افت فشار و ... مواجه هستند. در سال ۱۹۹۵ ایده استفاده از ذرات در ابعاد نانو مطرح شد و انقلاب بزرگی در زمینه انتقال حرارت در سیالات نانو برای اولین بار پدید آمد [۱]. نانو ذرات نسبت به ذرات بزرگتر مانند میکرو ذرات، بسیار پایدارتر بوده و سطح تماس بیشتری با ناحیه سیال دارند. در واقع دو مشخصه اصلی نانو سیال، پایداری بسیار زیاد و ضریب هدایت گرمایی بسیار زیاد آن می‌باشد. هم‌چنین به دلیل کوچک بودن ذرات، تا حد زیادی مشکلات خوردگی و افت فشار کاهش می‌یابد. با توجه به نقش بسیار موثر ضریب هدایت گرمایی در کاربردهای حرارتی نانو سیالات و اهمیت درک و شناخت پارامترهای تاثیرگذار بر این خاصیت ترموفیزیکی، انگیزه اصلی انجام این تحقیق می‌باشد.

غفوری و سالاری [۲] از مدل‌های ویسکوزیته مختلف برای تخمین بهبود انتقال حرارت و افزایش عدد ناسلت روی دیوار داغ استفاده کردند. غفوری و همکاران [۳] بر تأثیر مدل‌های هدایت حرارتی متغیر بر انتقال حرارت همرفت مختلط تمرکز کردند. میبیدی و همکاران [۴] یک مدل تجربی جدید برای پیش‌بینی ویسکوزیته نانوسیال‌ها با سیال مبتنی بر آب ارائه کرد. مدل آنها



نتایج بهتری را به خصوص در دماهای بالا و کسر حجمی ارائه کرد. بیامسواسد و همکاران [۵] هدایت حرارتی Al_2O_3 و TiO_2 را در آب-گلیکول بررسی کرد. آنها از روش سیم داغ برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی استفاده کردند. نتایج نشان داد که هدایت حرارتی نانوسیال با افزایش دما و غلظت ذرات افزایش می‌یابد. آنها یک مدل تجربی برای پیش بینی هدایت حرارتی نانوسیال آزمایش شده ارائه کردند. اسفه و همکاران [۶] آزمایشاتی بر روی تأثیر دما و کسر حجمی ذرات بر ویسکوزیته دینامیکی انجام داد. آنها یک همبستگی برای ویسکوزیته دینامیکی بر اساس کسر حجمی ذرات و دما ارائه کردند. آنها همچنین نشان دادند که معادلات کلاسیک مانند معادله انیشتین برای کسرهای کم حجم مناسب هستند. کاتپاتال و همکاران [۷] پایداری و خواص مکانیکی نانوسیال نفت CuO را تجزیه و تحلیل کردند. آنها هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال ها را اندازه گیری کردند. نتایج حاکی از وابستگی بالای هدایت حرارتی و ویسکوزیته دینامیکی به کسر حجمی نانوذرات است و حدود ۴۰ و ۱۰ درصد بهبود در ویسکوزیته و هدایت حرارتی نانوسیال گزارش شده است. همچنین یک مدل تجربی برای پیش‌بینی ویسکوزیته نانوسیالات ارائه شد. در یک مطالعه مروری، موریرا و همکاران [۸] نقش نانوسیال‌ها را در بهبود انتقال حرارت مورد بررسی قرار دادند. همچنین مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نیر و همکاران [۹] هدایت حرارتی CuO-W ، $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-W}$ و $\text{TiO}_2\text{-W}$ را برای سیستم‌های خنک‌کننده مورد مطالعه قرار دادند. مدل‌های مختلف برای پیش‌بینی هدایت حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. آنها مدلی را برای محاسبه هدایت حرارتی در دماهای پایین ارائه کردند. ارنی و همکاران [۱۰] رفتار هدایت حرارتی نانوسیال $\text{MWCNTS/Al}_2\text{O}_3\text{-EG}$ را بررسی کردند. نتایج حداکثر حدود ۱۷٪ بهبود هدایت حرارتی برای ۰/۸٪ کسر حجمی در ۵۰ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. یک رابطه جدید برای پیش‌بینی هدایت حرارتی پیشنهاد شد. لطفی زاده دهکردی و همکاران [۱۱] ویسکوزیته و هدایت حرارتی آلومینا-EG/W را مورد مطالعه قرار دادند. آنها همچنین بر اثر افزودن یک سورفکتانت به نانوسیالات تمرکز کردند. نتایج نشان داد که استفاده از سورفکتانت بر هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال موثر است. متواسل و همکاران [۱۲] تأثیر تجمع نانوذرات بر هدایت حرارتی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که در کسر حجمی کم، اثر تجمع ذرات باید در نظر گرفته شود. یو و همکاران [۱۳] تأثیر پارامترهای مختلف بر اندازه‌گیری هدایت حرارتی را با روش سیم داغ گذرا بررسی کردند. آنها گزارش دادند که حجم کم سلول آزمایشی انتقال حرارت انتقال طبیعی را به تاخیر می‌اندازد و در نتیجه دقت اندازه‌گیری هدایت حرارتی را افزایش می‌دهد. موسوی و همکاران [۱۴] اثر دما و کسر حجمی را بر روی خواص ترمودینامیکی نانوسیالات $\text{CuO/MgO/TiO}_2\text{-W}$ مورد بررسی قرار دادند. آنها همچنین چهار رابطه را برای محاسبه ویسکوزیته، هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی ارائه کردند. آنها افزایش رسانایی گرمایی و ویسکوزیته دینامیکی را با افزایش دما و کسر حجمی گزارش کردند. مولدووانو و همکاران [۱۵] هدایت حرارتی نانوذرات هیبریدی $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2\text{-W}$ را بررسی کردند. بهبود هدایت حرارتی با افزایش دما و کسر حجمی گزارش شد. اسفه و همکاران [۱۶] تأثیر قطر نانوذرات را بر ویسکوزیته و هدایت حرارتی نانوسیال Fe/W مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که هدایت حرارتی با کاهش قطر نانوذره افزایش می‌یابد. ویسکوزیته دینامیکی نیز با افزایش قطر نانوذرات افزایش می‌یابد. گیوا و همکاران [۱۷] سیال هیبریدی $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-W}$ را بررسی کردند. تأثیر سیال پایه، دما و کسر حجمی بر خواص ترمودینامیکی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین با استفاده از روش‌های ANN^1 و ANFIS^2 ، روابطی برای پیش‌بینی ویسکوزیته نسبی و هدایت الکتریکی ارائه شد.

در این بررسی تجربی با در نظر گرفتن نقش پارامترهایی مانند کسر حجمی نانو ذرات، دمای سیال و اندازه قطر نانوذرات برای نانوسیال اتیلن گلیکول-اکسید منیزیم، درک دقیق رفتار ضریب هدایت حرارتی و نقش هر یک از پارامترهای مورد اشاره در افزایش یا کاهش آن مدنظر می‌باشد. بررسی رابطه بین متغیرهای کمی و کیفی از روش‌های مختلف آماری قابل انجام است. در پژوهش حاضر ارزیابی آنالیز واریانس چند عاملی (MANOVA^3) و رگرسیون چند متغیره در تعیین ضریب هدایت حرارتی

¹ Artificial Neural Networks

² Adaptive Network-Based Fuzzy Inference

³ Multivariate Analysis of Variance



نانوسیال جهت کاربرد در سیستم های مکانیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این پژوهش دو روش آنالیز واریانس چند عاملی و رگرسیون چند متغیره با هم مقایسه شده است. این تحقیق می‌تواند به عنوان یک تحقیق اولیه در مورد نقش اندازه نانوذرات منیزیم در سیال پایه شناخته شده و تاثیرات متقابل آن با دما به کمک روش تحلیل آنالیز واریانس چند عاملی و تحلیل رگرسیون چند متغیره مورد بررسی قرار گیرد.

روش کار

به منظور آماده سازی نانوسیال به وسیله معلق کردن نانوذرات اکسید منیزیم (MgO) در سیال پایه (اتیلن گلیکول)، از دستگاه همزن التراسونیک استفاده گردید. بدین منظور از نانوسیال در کسرهای حجمی $0/25$ ، $0/5$ ، $0/75$ و 1 و $1/25$ درصد در دماهای 25 ، 30 ، 35 ، 40 ، 45 ، 50 درجه سانتیگراد استفاده شده است. از دستگاه KD2-Pro برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی در کسرهای حجمی مختلف استفاده شد. همچنین از حمام آب TC-650 برای کنترل شرایط دمایی استفاده گردید. سپس با استفاده از نتایج و مقادیر تجربی بدست آمده تحلیل داده‌ها انجام پذیرفت.

نتایج پژوهش

نتایج حاصل از تحلیل رگرسیون خطی چند متغیره در جدول (۱) آمده است. در این تحلیل متغیر هدایت حرارتی به عنوان متغیر وابسته و قطر نانوذرات، کسرهای حجمی و دما به عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شد. با توجه به این نتایج مقدار ضریب تعیین مدل برابر $0/829$ است و با توجه به اینکه از $0/7$ بیشتر است مدل رگرسیونی به خوبی می‌تواند پراکندگی داده‌ها را توصیف کند.

جدول ۱: خلاصه مدل رگرسیون چند متغیره

مدل	ضریب همبستگی	ضریب تعیین	ضریب تعیین تصحیح شده
رگرسیون	$0/910$	$0/829$	$0/823$
<ul style="list-style-type: none"> متغیرهای پیش بینی: مقدار ثابت، قطر نانومتر، کسر حجمی، دما متغیر وابسته: ضریب هدایت حرارتی 			

در جدول (۲) نتایج آنالیز واریانس مدل رگرسیونی آماره فیشر برابر $138/710$ است و سطح معنی‌داری متناظر با آن تا سه رقم معنی‌دار صفر است و با توجه به اینکه از $0/01$ کمتر است حاکی از معنی‌دار بودن مدل رگرسیونی است.

جدول ۲: آنالیز واریانس مدل رگرسیون چند متغیره

منبع	مجموع مربعات (پراکندگی)	درجه آزادی	میانگین پراکندگی	آماره F	سطح معنی‌داری
رگرسیون	$0/460$	۳	$0/153$	$138/710$	$0/000$
خطا	$0/095$	۸۶	$0/001$	-	-
کل	$0/555$	۸۹	-	-	-

در جدول (۳) ضرایب مدل رگرسیونی آورده شده است. با توجه به اینکه سطح معنی‌داری متغیرها از $0/05$ کمتر است همه ضرایب معنی‌دارند و باید در مدل حضور داشته باشند.

¹Magnesium oxide



جدول ۳: ضرایب مدل رگرسیون چند متغیره

متغیر	ضریب	انحراف معیار	آماره t	سطح معنی داری
مقدار ثابت	۰/۰۴۴	۰/۰۱۸	۲/۴۰۸	۰/۰۱۸
x_1 دما	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰۴	۱۹/۰۱۵	۰/۰۰۰
x_2 کسر حجمی	۰/۰۶۴	۰/۰۱۰	۶/۴۹۶	۰/۰۰۰
x_3 قطر ذرات	-۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۱	-۳/۵۱۴	۰/۰۰۱

مدل نهایی برآورد شده به صورت رابطه (۱) می‌باشد و با قرار دادن مقادیر مختلف متغیرهای مستقل در این مدل می‌توان متغیر وابسته ضریب هدایت حرارتی را برآورد کرد.

$$y = 0/044 + 0/008(x_1) + 0/064(x_2) - 0/0004(x_3) \quad (1)$$

با توجه به رابطه (۱) با افزایش یک واحدی در دما میزان ضریب هدایت حرارتی به میزان ۰/۰۸۸ افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش یک واحد در متغیر کسر حجمی ضریب هدایت حرارتی به میزان ۰/۰۶۴ افزایش می‌یابد و با افزایش ۱ واحد متغیر قطر (نانومتر) ضریب هدایت حرارتی به میزان ۰/۰۰۰۴ کاهش می‌یابد.

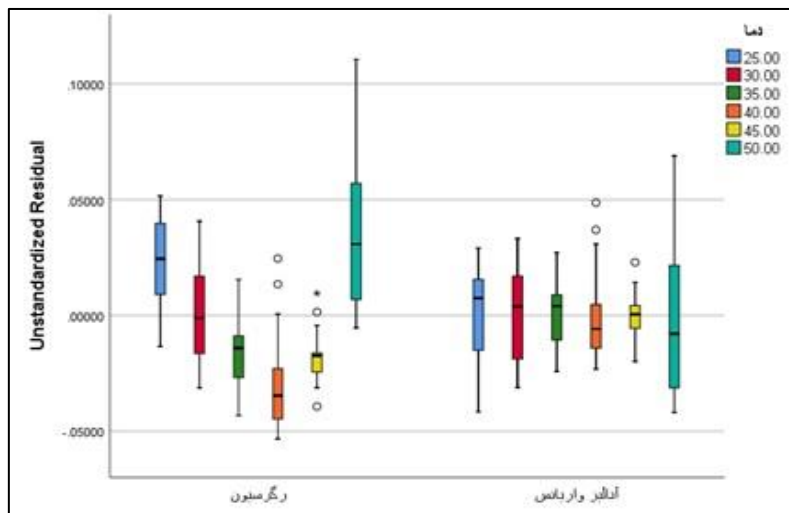
در جدول (۴) نتایج مربوط به آنالیز واریانس چند عاملی آمده است. با توجه به اینکه ضریب تعیین در این مدل برابر ۰/۹۲۲ است و از ضریب تعیین مدل رگرسیونی بیشتر است. به نظر می‌رسد آنالیز واریانس چند عاملی در توصیف پراکندگی داده‌های ضریب هدایت حرارتی با استفاده از متغیرهای دما، کسر حجمی و قطر ذرات مناسب‌تر است.

جدول ۴: تحلیل واریانس چند عاملی داده‌های تحقیق

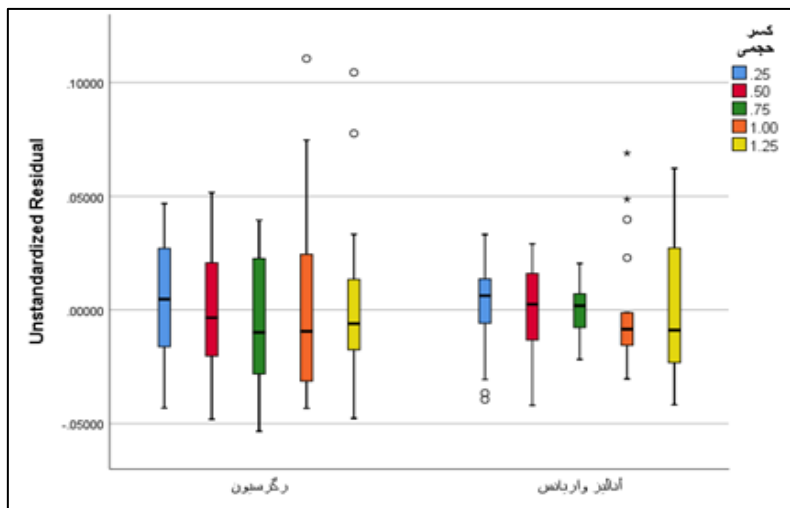
منبع پراکندگی	مجموع مربعات (پراکندگی)	درجه آزادی	میانگین پراکندگی	آماره F	سطح معنی داری
مقدار ثابت	۱۱/۹۳۶	۱	۱۱/۹۳۶	۲۱۶۳۳/۹۱۹	۰/۰۰۰
دما	۰/۴۵۰	۵	۰/۰۹۰	۱۶۲/۹۵۷	۰/۰۰۰
کسر حجمی	۰/۰۴۸	۴	۰/۰۱۲	۲۱/۶۶۸	۰/۰۰۰
اندازه	۰/۰۱۴	۲	۰/۰۰۷	۱۳/۰۵۶	۰/۰۰۰
خطا	۰/۰۴۳	۷۸	۰/۰۰۱	-	-
کل	۱۲/۴۹۰	۹۰	-	-	-

(۰/۹۱۱ = ضریب تعیین تصحیح شده) (۰/۹۲۲ = ضریب تعیین)

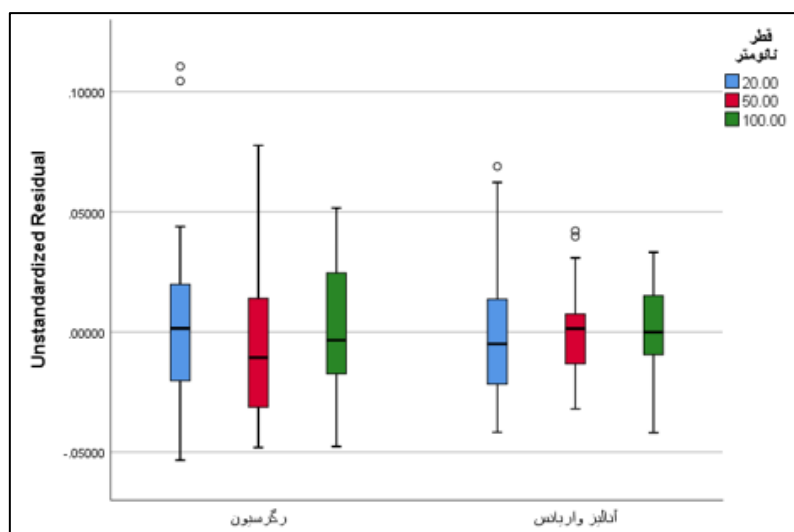
به منظور مقایسه بهتر دو روش ابتدا مقادیر ضریب هدایت حرارتی با استفاده از هر دو روش توسط نرم افزار SPSS برآورد شده و خطای برآورد برای هر کدام از روش‌ها محاسبه شده است. در شکل‌های (۱) تا (۳) خطای برآورد در هر گروه بندی‌های مختلف دما، کسر حجمی و قطر ذرات با استفاده از نمودار جعبه‌ای آورده شده است. با توجه به این نمودارها مشاهده می‌شود که خطای برآورد در تحلیل رگرسیونی دارای پراکندگی بیشتری است و تحلیل واریانس خطای کمتری را نشان می‌دهد. لذا در شبیه سازی مدل برای برآورد ضریب هدایت حرارتی وقتی متغیرهای تحقیق به صورت گروه بندی تعریف شده‌اند استفاده از آنالیز واریانس چند عاملی مناسب‌تر است.



شکل ۱: خطای برآورد ضریب هدایت حرارتی دو روش برای دما



شکل ۲: خطای برآورد ضریب هدایت حرارتی دو روش برای کسر حجمی نانوذرات



شکل ۳: خطای برآورد ضریب هدایت حرارتی دو روش برای قطر ذرات



نتیجه‌گیری

آنالیز واریانس چند عاملی و با ضریب تعیین ۰/۹۲۲ می‌توان هدایت حرارتی نانوسیال آب-اکسید منیزیم را به صورت یک مدل سه متغیره با دقت بالا تعیین برآورد نماید. این روش نسبت به روش رگرسیون چند متغیری خطی با ضریب تعیین ۰/۸۲۹ از دقت بالاتری برخوردار است. این نتیجه‌گیری از مقایسه دامنه تغییرات خطای برآورد هر کدام از روش‌ها در نمودار جعبه‌ای میزان خطاهای برآورد نیز قابل مشاهده است.

مراجع

- [1] Humnic, G., Humnic, A., (2012) Application of nanofluids in heat exchangers: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), pp. 5625-5638.
- [2] Ghafouri, A., Salari, M. (2014) Numerical investigation of the heat transfer enhancement using various viscosity models in chamber filled with water-CuO nanofluid, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 36, pp. 825-836.
- [3] Ghafouri, A., Salari, M., Jozaei, A. F., Effect of variable thermal conductivity models on the combined convection heat transfer in a square enclosure filled with a water-alumina nanofluid, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 58(1), pp. 103-115.
- [4] Meybodi, M. K., Daryasafar, A., Koochi, M. M., Moghadasi, J., Meybodi, R. B., Ghahfarokhi, A. K., (2016), A novel correlation approach for viscosity prediction of water based nanofluids of Al₂O₃, TiO₂, SiO₂ and CuO, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 58, pp. 19-27.
- [5] Yiamsawasd, T., Dalkilic, A. S., Wongwises, S., (2012), Measurement of the thermal conductivity of titania and alumina nanofluids, *Thermochimica acta*, 545, pp. 48-56.
- [6] Esfe, M. H. Saedodin, S., (2014), An experimental investigation and new correlation of viscosity of ZnO-EG nanofluid at various temperatures and different solid volume fractions, *Experimental thermal and fluid science*, 55, pp. 1-5.
- [7] Katpatal, D. C., Andhare, A. B., Padole, P. M., Khedkar, R. S., (2017) Study of dispersion stability and thermo-physical properties of CuO-Jatropha oil-based nanolubricants, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39, pp. 3657-3668.
- [8] Moreira, T. A., Colmanetti, A. R. A., Tibirica, C. B., (2019), Heat transfer coefficient: a review of measurement techniques, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41, pp. 1-25.
- [9] Nair, V., Parekh, A., Tailor, P., (2020), Performance analysis of Al₂O₃-R718 nanorefrigerant turbulent flow through a flooded chiller tube: a numerical investigation, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42, pp. 1-16.
- [10] Arani, A. A. A., Pourmoghdam, F., (2019), Experimental investigation of thermal conductivity behavior of MWCNTS-Al₂O₃/ethylene glycol hybrid Nanofluid: Providing new thermal conductivity correlation, *Heat and Mass Transfer*, 55, pp. 2329-2339.
- [11] LotfizadehDehkordi, B., Kazi, S. N., Hamdi, M., Ghadimi, A., Sadeghinezhad, E., Metselaar, H. S. C., (2013), Investigation of viscosity and thermal conductivity of alumina nanofluids with addition of SDBS, *Heat and Mass transfer*, 49, pp. 1109-1115.
- [12] Motevasel, M., Nazar, A. R. S., Amialahmadi, M. J., (2018), The effect of nanoparticles aggregation on the thermal conductivity of nanofluids at very low concentrations: experimental and theoretical evaluations, *Heat and Mass Transfer*, 54, pp. 125-133.
- [13] Yoo, D., Lee, J., Lee, B., Kwon, S., Koo, J., (2018), Further elucidation of nanofluid thermal conductivity measurement using a transient hot-wire method apparatus, *Heat and Mass Transfer*, 54, pp. 415-424.
- [14] Mousavi, S. M., Esmailzadeh, F., Wang, X. P., (2019), Effects of temperature and particles volume concentration on the thermophysical properties and the rheological behavior of CuO/MgO/TiO₂ aqueous ternary hybrid nanofluid, *Experimental investigation. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 137, pp. 879-901.



- [15] Moldoveanu, G. M., Minea, A. A., Huminic, G., Huminic, A., (2019), Al₂O₃/TiO₂ hybrid nanofluids thermal conductivity: an experimental approach, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 137, pp. 583-592.
- [16] Esfe, M. H., Arani, A. A., Rezaie, M., Yan, W.-M., Karimipour, A., (2015), Experimental determination of thermal conductivity and dynamic viscosity of Ag-MgO/water hybrid nanofluid, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 66, pp. 189-195.
- [17] Giwa, S., Sharifpur, M., Goodarzi, M., Alsulami, H., Meyer, J., (2021), Influence of base fluid, temperature, and concentration on the thermophysical properties of hybrid nanofluids of alumina-ferrofluid: experimental data, modeling through enhanced ANN, ANFIS, and curve fitting, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143, pp. 4149-4167.