

بررسی اثر دما و غلظت نانوذرات سرامیکی بر هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی آب- اتیلن گلیکول/نانوآلومینا- نانوگرافن

ملیحه نازی^۱، نسیم نایب پاشایی^{۲*}، سید محمد مهدی هادوی^۳

^۱ پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، پژوهشگاه استاندارد

^۲ پژوهشکده فناوری و مهندسی، پژوهشگاه استاندارد

^۳ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس



نویسنده مسئول:

دکتر نسیم نایب پاشایی

پژوهشکده فناوری و مهندسی،

پژوهشگاه استاندارد

نوع مقاله: پژوهشی

صفحه‌های: ۱۵ تا ۳۰

شاپا چاپی: ۳۳۵۱-۱۷۳۵

شاپا الکترونیکی: ۳۰۹۷-۲۷۸۳

زبان نشریه: فارسی

دسترس پذیر در نشانی:

www.JICERS.ir

تاریخ دریافت:

۱۴۰۰/۰۴/۱۳

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۰/۰۶/۱۰

DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.0.7.6

n.nayebpashaei@standard.ac.ir

چکیده: نانوسیال ترکیبی است که با افزودن ذرات در مقیاس نانو (۱۰۰ نانومتر) به یک سیال پایه با هدف بهبود انتقال حرارت حاصل می‌شود. در این پژوهش، تاثیر دما و غلظت نانوذرات متشکل از نانوذرات آلومینا و نانوصفحات گرافن بر هدایت حرارتی سیال پایه متشکل از آب و اتیلن گلیکول مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین به میزان ۰/۲ درصد حجمی اولتیک اسید (OA) و ۰/۲ درصد وزنی سدیم دودسیل سولفونات (SDS) به عنوان عامل فعال سطحی برای تثبیت و پراکندگی نانوذرات به سیال پایه اضافه شدند. کسر حجمی نانوذرات ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد حجمی و دماهای مورد آزمایش در بازه دمایی ۳۰۵-۲۶۰ کلوین انتخاب شد. ریخت‌شناسی و ریزساختار نانوذرات توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) انجام شد. هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی اندازه‌گیری و با سیال پایه مقایسه شد. نتایج نشان داد که هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی آب- اتیلن گلیکول/نانوگرافن- نانوآلومینا به غلظت نانوذرات و دما وابسته است. نتایج اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی آب- اتیلن گلیکول/نانوگرافن- نانوآلومینا با مدل‌های پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات مقایسه شد ولی تطابق قابل قبولی وجود نداشت. نتایج نشان داد که افزایش دما و غلظت حجمی نانوذرات موجب افزایش هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی می‌شود. حداکثر افزایش هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی برابر با ۴۴/۰۲ درصد بود که در کسر حجمی جامد ۲/۵ درصد و در دمای ۳۰۳ کلوین حاصل شد.

کلمات کلیدی: نانوسیال هیبریدی، اتیلن گلیکول، هدایت حرارتی، نانوذرات آلومینا، نانوصفحات گرافن.

۱- مقدمه

نانوسیالات سوسپانسیون‌هایی هستند که از مخلوط کردن نانوذرات جامد در مقیاس نانو (۱۰۰ نانومتر) به یک سیال پایه به دست می‌آیند و موجب بهبود و یا ایجاد خواص جدید می‌شوند. نانوذرات معمولاً ذرات فلزی همانند Cu، Ni، Al، اکسیدها مانند TiO_2 ، Al_2O_3 ، $BaTiO_3$ ، Fe_3O_4 ، Fe_2O_3 ، SiO_2 ، CuO و ترکیبات دیگری مثل AlN ، SiC ، $CaCO_3$ و گرافن می‌باشد. سیال پایه معمولاً آب، اتیلن گلیکول، پروپیلن گلیکول و یا روغن موتور می‌باشد [۱-۳]. توانایی پایین آوردن نقطه انجماد آب، فشار بخار کم و خوردگی نسبتاً کم اتیلن گلیکول، آن را به یک سیال مناسب جهت استفاده به عنوان کاهش نقطه انجماد آب و سیال انتقال حرارت در سیستم‌های خنک کننده تبدیل می‌کند. قابلیت انتقال حرارت سیالات متداول از قبیل آب، اتیلن گلیکول، روانکارها و سایر خنک‌کننده‌ها ذاتاً پایین است. بر این اساس، یکی از کاربردهای نانوسیالات، استفاده در کاربردهای هدایت حرارتی می‌باشد و در سال‌های اخیر



در این زمینه تحقیقات متعددی انجام شده است [۲، ۴، ۱۳-۱۵، ۵-۱۲]. ذرات نانو به دلیل بالا بودن ضریب هدایتی حرارتی‌شان، سبب افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال پس از توزیع در سیال پایه می‌شوند [۱۶ و ۱۷]. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که انتقال حرارت نانوسیالات نسبت به سیالات متداول افزایش قابل توجهی نشان می‌دهد. این رفتار به عواملی چون شکل نانوذرات، توزیع اندازه و کسر حجمی آن‌ها، دما، ضریب هدایت حرارتی نانوذرات و سیال پایه بستگی دارد [۱ و ۲ و ۱۸].

طی یک دهه گذشته، ویژگی انتقال حرارت نانوسیالات به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است [۱۹-۲۱]. بیش‌تر تحقیقات به ویژه به منظور افزایش سرعت انتقال حرارت در کاربردهای گرمایش، در دماهای متوسط و بالا انجام شده است. به دلیل عدم وجود مطالعات در زمینه کاربرد نانوسیالات در دماهای پایین (زیر صفر)، کاربرد و بازاریابی استفاده از نانوسیالات در مصارف صنعتی خنک‌کننده پیشرفت نکرده است [۱۶].

پژوهش انجام شده توسط Aladag و همکاران [۱۲] و اسکوزیته نانوسیالات Al_2O_3 و CNT مبتنی بر آب را در غلظت کم و دمای پایین و تغییرات آن ناشی از کاهش دما و زمان برشی را مورد بررسی قرار داده است. این تحقیقات نشان داد که بسته به میزان سرعت برشی، نانوسیالات به عنوان مایعات نیوتنی یا غیر نیوتنی رفتار می‌کنند [۲۲].

به منظور تعیین کاربرد نانوسیالات برای استفاده به عنوان یک سیال انتقال حرارت در دماهای پایین، Kulkarni و همکاران [۲۲ و ۲۳]، ویژگی‌های رئولوژیکی ترکیبات اتیلن و پروپیلن گلیکول و مخلوط آب ۶۰:۴۰ (با وزن) با درصد حجمی متفاوت (۰ درصد تا ۶/۱۲ درصد) نانوذرات اکسید مس (CuO) در دماهای مختلف در محدوده ۳۵- درجه سانتی‌گراد تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد را بررسی کردند. Naik و همکاران [24] و اسکوزیته مخلوط پروپیلن گلیکول و آب (۶۰:۴۰ نسبت وزنی) را اندازه‌گیری کرده و نانوسیالات حاصل از آن را با اضافه کردن غلظت متفاوت حجم (از ۰/۲۵ تا ۱/۲) از نانوذرات مس در دمای بین ۱۵- درجه سانتی‌گراد و ۳۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری کرد. آن‌ها گزارش دادند که با کاهش دما، ویسکوزیته بصورت تصاعدی افزایش می‌یابد. در این پژوهش، رفتار رئولوژیکی نانوذرات مخلوط آب- اتیلن گلیکول (۵۰:۵۰ نسبت حجمی در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد) در دماهای بین ۲۰- درجه سانتی‌گراد و ۲۰ درجه سانتی‌گراد بررسی شده تا عملکرد اینگونه نانوسیالات از طریق مطالعات تجربی در شرایط کاهش دما بررسی شود.

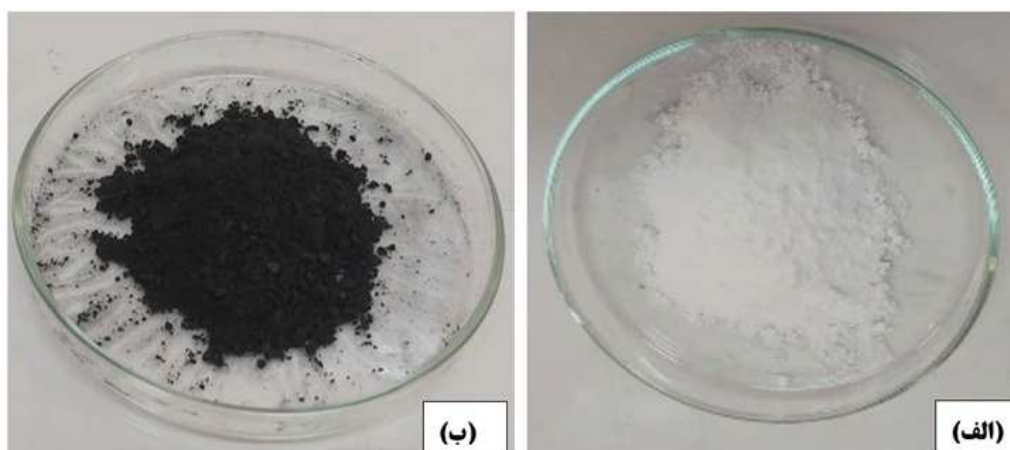
اکثر تحقیقات انجام شده در زمینه مطالعه رفتار نانوسیالات در دماهای متوسط و بالا (۳۲۸-۲۹۸ کلوین) انجام شده است. مطالعات بسیار کمی به طور خاص روی رفتار رئولوژیکی و خواص ترموفیزیکی نانوسیالات در دمای پایین متمرکز شده است [۱۲ و ۲۵]. فقدان چنین مطالعاتی در زمینه رفتار نانوسیالات هیبریدی در دماهای منفی (زیر صفر درجه سانتی‌گراد) آشکارتر است. عدم وجود مطالعات کافی در زمینه اندازه‌گیری خواص ترموفیزیکی نانوسیالات هیبریدی در دماهای پایین انگیزه اصلی این تحقیق بوده است. در این مطالعه، تاثیر دما و غلظت نانوذرات متشکل از نانوذرات آلومینا و نانوصفحات گرافن بر رفتار هدایت حرارتی سیال پایه متشکل از آب و اتیلن گلیکول مورد مطالعه قرار گرفت. در تهیه نانوسیال هیبریدی، مخلوط آب- اتیلن گلیکول با نسبت ۵۰:۵۰ درصد حجمی در دمای ۲۹۸ کلوین به عنوان سیال پایه در نظر گرفته شد. نانوذرات که از حجم مساوی نانوذرات آلومینا و نانوصفحات گرافن تشکیل شده بودند در مقدار معینی از سیال پایه تعلیق شدند. همچنین به میزان ۰/۲ درصد حجمی اولئیک اسید (OA) و ۰/۲ درصد وزنی سدیم دودسیل سولفونات (SDS) به عنوان عامل فعال سطحی^۱ برای تثبیت و پراکندگی نانوذرات به سیال پایه اضافه شدند. نانوسیالات با استفاده از روش دو مرحله‌ای تهیه شدند. کسر حجمی نانوذرات در این تحقیق ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد حجمی لحاظ گردید و همچنین جهت بررسی اثر دما، دماهای مورد آزمایش در بازه دمایی ۳۰۵-۲۶۰ کلوین انتخاب شد. ریخت‌شناسی و ریزساختار نانوذرات توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) انجام شد. پس از سنتز نانوسیال هیبریدی آب- اتیلن گلیکول / نانوگرافن- نانوالومینا، هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی اندازه‌گیری و با سیال پایه و برخی مدل‌های مهم پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات مقایسه شد.

¹ Surfactant

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد اولیه و مشخصه‌یابی نانوذرات

به منظور تهیه نانوسیالات هیبریدی از نانوذرات آلومینا و گرافن، آب و اتلین گلیکول به عنوان سیال پایه و اولئیک اسید (OA) و سدیم دودسیل سولفونات (SDS) به عنوان عامل فعال سطحی استفاده شد. نانوذرات مورد استفاده در این تحقیق از شرکت پیشگامان نانومواد ایران تهیه شده است. خواص فیزیکی و شیمیایی نانوذرات آلومینا و نانوصفحات گرافن در جداول ۱ و ۲ گزارش شده است. پیش از سنتز نانوسیالات، نانوذرات مشخصه‌یابی شدند. شکل ۱ نانوذرات گرافن و نانوپودر آلومینا را نشان می‌دهد. خواص فیزیکی و شیمیایی اتیلن گلیکول و اولئیک اسید به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده‌اند.



شکل ۱- تصویر نانوپودر الف) آلومینا و ب) گرافن.

جدول ۱- اطلاعات فیزیکی و شیمیایی نانوذرات Al_2O_3

مقدار	مشخصه
+۹۹٪	خلوص
سفید	رنگ
۱۵ nm	اندازه
تقریباً کروی	ریخت
$138 \text{ m}^2/\text{g}$	مساحت سطح ویژه (SSA)
$3890 \text{ Kg}/\text{m}^3$	دانسیته
$880 \text{ J}/(\text{Kg}\cdot\text{K})$	ظرفیت حرارتی ویژه

جدول ۲- اطلاعات فیزیکی و شیمیایی نانوصفحات گرافن

مقدار	مشخصه
۹۹/۵٪	خلوص
سیاه	رنگ
۲-۱۸nm	ضخامت
شبه صفحه‌ای	ریخت
$500-1200 \text{ m}^2/\text{g}$	مساحت سطح ویژه (SSA)
$230 \text{ Kg}/\text{m}^3$	دانسیته



جهت آماده‌سازی نمونه برای مطالعه ریزساختاری، ابتدا کل پودر توسط اسپاچول هم زده شد. سپس مقدار ناچیزی از پودر به استون اضافه شد تا مات شود. ظرف حاوی محلول مات، به مدت ۱۰ دقیقه داخل آلتراسونیک قرار گرفت و پس از اتمام آلتراسونیک، دو قطره از نمونه روی لام چکانده شد و پس از خشک شدن کامل نمونه، لام حاوی نمونه روی جانمونه‌ای قرار گرفت. از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Vega Tescan، مجهز به آشکارساز EDS (Inca OXFORD) برای بررسی و تعیین ریخت و اندازه نانوذرات استفاده گردید. خروجی این آنالیز تصاویری هستند که می‌توانند در فهم بهتر توپوگرافی سطح نمونه‌ها به کار روند. دستگاه به کار گرفته شده برای این آنالیز ساخت شرکت TE-SCAN است و از دقت بالایی برخوردار است. تصاویر حاصل از آنالیز میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) به منظور ریخت‌شناسی و بررسی ریزساختاری نانوذرات مورد استفاده قرار گرفت. دستگاه مورد استفاده برای این آنالیز Philips CM120 است.

جدول ۳- اطلاعات فیزیکی و شیمیایی اتیلن گلیکول

مقدار	مشخصه
$C_2H_6O_2$	فرمول شیمیایی
شفاف، بی‌رنگ	ظاهر
بدون بو	بو
۶۲/۰۷ g/mol	جرم مولی
۱۱۳۰/۲۰ kg/m ³	دانسیته
۱۹۷/۳°C	نقطه جوش
۰/۲۴۴ W/m K (20°C)	هدایت حرارتی
۱۶/۱ cP (۲۰°C)	ویسکوزیته

جدول ۴- اطلاعات فیزیکی و شیمیایی اولئیک اسید [۱۷ و ۲۶ و ۲۷]

مقدار	مشخصه
C18H34O2	فرمول شیمیایی
۲۸۶/۱۵ K	نقطه ذوب
۲۷۷/۱۵ K	نقطه انجماد
۲۹۳/۱۵ K ± 1	نقطه ابری شدن ^۱
۲۷۳/۱۵ K ± 1	نقطه ریزش ^۲
۳۸/۸۰ mPa.s	ویسکوزیته

۲-۲- تهیه نانوسیال

اولین قدم در انجام مطالعه حاضر، آماده‌سازی نانوسیال و تعلیق پایدار نانوذرات درون سیال پایه می‌باشد. در این تحقیق برای آماده سازی نانوسیال از روش دومرحله‌ای استفاده می‌شود. برای انجام آزمایش‌هایی با کم‌ترین خطا در اختیار داشتن نمونه‌های پایدار و همگن مهم‌ترین شرط است. کلوخه شدن یا عدم تعلیق مناسب نانوذرات در سیال پایه می‌تواند خطای زیادی در اندازه‌گیری ایجاد کند. برای جلوگیری از این پدیده روش‌های مختلفی وجود دارد. استفاده از ماده فعال سطحی یکی از راهکارهای موثر در این زمینه می‌باشد. در این مطالعه، در بررسی‌های آزمایشگاهی، مخلوط آب/ اتیلن گلیکول با نسبت ۵۰:۵۰ درصد حجمی در دمای ۲۹۸ کلون به عنوان سیال پایه در نظر گرفته شدند. همچنین به میزان ۰/۲ درصد حجمی اولئیک اسید (OA) و ۰/۲ درصد وزنی سدیم دودسیل سولفونات (SDS) به عنوان ماده فعال سطحی برای تثبیت و پراکندگی نانوذرات به سیال پایه اضافه شدند. کسر حجمی نانوذرات در این تحقیق ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد حجمی لحاظ گردید و همچنین جهت بررسی اثر

¹ Cloud point

² Pour point



دما، دماهای مورد آزمایش در بازه دمائی ۳۰۵-۲۶۰ کلوین قرار داده شد. نانوذرات که از حجم مساوی نانوالومینا و گرافن تشکیل شده بودند در مقدار معینی از مخلوط آب/ اتیلن گلیکول تعلیق شدند. مقادیر مورد نیاز نانوذرات Al_2O_3 و گرافن برای تهیه نمونه های نانوسیال هیبریدی از معادله ۱ به دست آمد [۲۸-۳۲]:

$$\varphi = \left[\frac{\left(\frac{W}{\rho}\right)_{Al_2O_3} + \left(\frac{W}{\rho}\right)_{\text{گرافن}}}{\left(\frac{W}{\rho}\right)_{Al_2O_3} + \left(\frac{W}{\rho}\right)_{\text{گرافن}} + \left(\frac{W}{\rho}\right)_{EG} + \left(\frac{W}{\rho}\right)_{\text{آب}}} \right] \times 100 \quad (1)$$

که در آن φ درصد حجمی نانوذرات است، ρ دانسیته بر حسب کیلوگرم در متر مکعب و W جرم بر حسب کیلوگرم است. مقادیر نانوذرات، اتیلن گلیکول (EG) و آب مورد استفاده برای تهیه حجم ۴۰۰ میلی لیتر نانوسیال هیبریدی محاسبه و در جدول ۵ گزارش شده است. غلظت ماده فعال سطحی برای همه نمونه ها ثابت بود. در تحقیق حاضر، نانوسیالات با استفاده از روش دومرحله ای تهیه شدند. جهت شکستن تجمع ذرات و تعلیق یکنواخت از دستگاه همزن التراسونیک پرابی به مدت ۱۸۰ دقیقه استفاده گردید.

جدول ۵- مقادیر نانوذرات، اتیلن گلیکول (EG) و آب مورد استفاده برای تهیه حجم ۴۰۰ میلی لیتر نانوسیال هیبریدی

درصد حجمی جامد (%)	جرم (g) [± 0.001]			
	Al_2O_3	گرافن	اتیلن گلیکول (EG)	آب
۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱۹۹/۶۴۲	۲۲۲/۶۴۰
۰/۰۵	۰/۳۸۹	۰/۰۲۳	۱۹۹/۵۴۲	۲۲۲/۵۲۹
۰/۱	۰/۷۷۸	۰/۰۴۶	۱۹۹/۴۴۲	۲۲۲/۴۱۷
۰/۵	۳/۸۹۰	۰/۲۳۰	۱۹۸/۶۴۴	۲۲۱/۵۲۷
۱	۷/۷۸۰	۰/۴۶۰	۱۹۷/۶۴۶	۲۲۰/۴۱۴
۱/۵	۱۱/۶۷۰	۰/۶۹۰	۱۹۶/۶۴۷	۲۱۹/۳۰۰
۲	۱۵/۵۶۰	۰/۹۲۰	۱۹۵/۶۴۹	۲۱۸/۱۸۷
۲/۵	۱۹/۴۵۰	۱/۱۵۰	۱۹۴/۶۵۱	۲۱۷/۰۷۴

۲-۳- آنالیز پایداری نانوسیالات

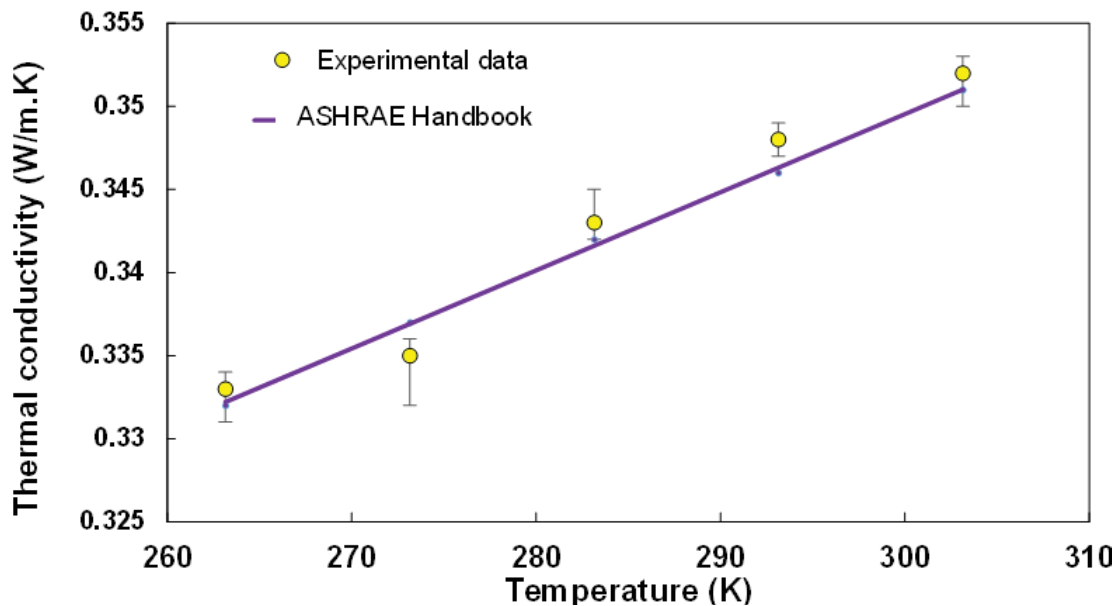
در این مطالعه، از پتانسیل زتا به عنوان یکی از روش های ارزیابی پایداری نانوسیالات استفاده شد. پتانسیل زتای نانوسیالات هیبریدی در دمای ۲۹۸ کلوین با استفاده از دستگاه Zetasizer Nano SZ100 ساخته شده توسط شرکت Horiba ژاپن اندازه گیری شد.

۲-۴- اندازه گیری هدایت حرارتی نانوسیالات

در این تحقیق از دستگاه آنالیزور حرارتی KD2 Pro و سنسور KS-1 جهت تعیین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال استفاده شد. این دستگاه مجهز به یک حمام آب جهت ثابت نگه داشتن دما و همچنین سیرکولاسیون آب حول ظرف دوجداره که حاوی نمونه است، بود. در این بررسی سنسور KS-1 با قطر ۱/۳ میلی متر و طول ۶۰ میلی متر انتخاب گردید. با انتخاب این سنسور، میزان هدایت حرارتی نانوسیال در بازه ۰/۰۲ W/(m K) تا ۰/۲ W/(mK) با دقت ± 0.1 W/(mK) اندازه گیری شد.

پیش از اندازه گیری هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی، جهت اندازه گیری دقیق هدایت حرارتی نانوسیال های مورد بررسی، کالیبراسیون دستگاه انجام شد. برای اطمینان از دقت ابزار KD2 pro، قبل از اندازه گیری میزان هدایت حرارتی نانوسیال های هیبریدی، هدایت حرارتی مخلوط های آب اتیلن گلیکول (۵۰:۵۰ درصد حجمی) در دماهای مختلف توسط KD2 pro اندازه گیری شد و با داده های ارائه شده در ASHRAE [۳۳] مقایسه شد. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، در محدوده دمایی ذکر شده هدایت حرارتی سیال پایه که به طور آزمایشگاهی تعیین شده است، با داده های ASHRAE مطابقت خوبی دارد و اختلاف جزئی (کمتر از ۰/۵ درصد) با داده های مرجع مشاهده می شود. در نتیجه میزان خطای دستگاه در محدوده قابل قبول می باشد. اندازه گیری

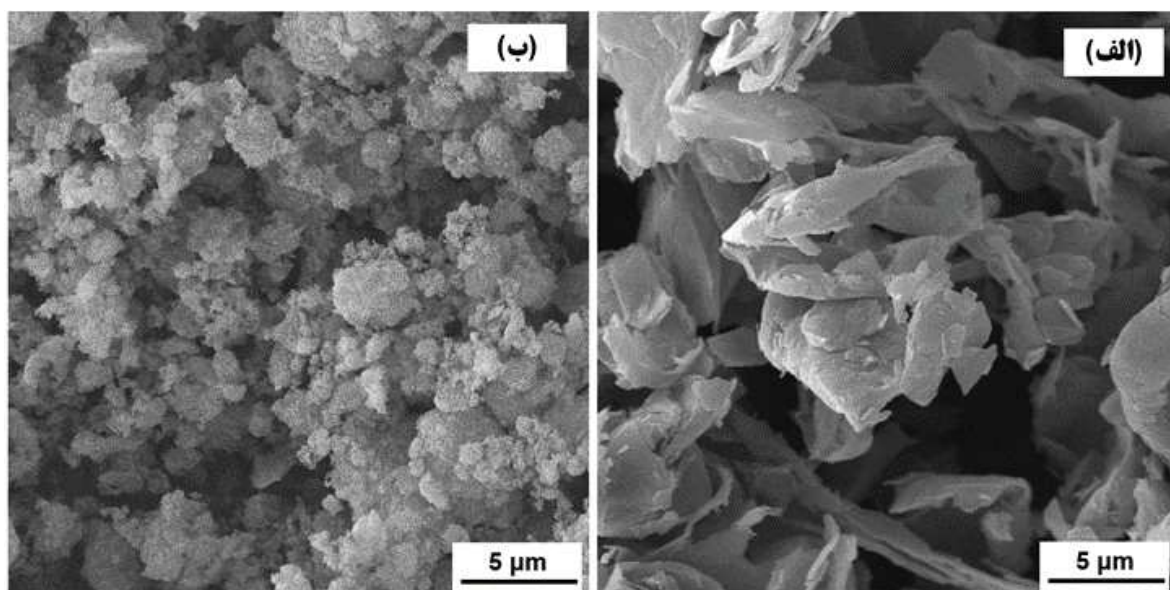
میزان هدایت حرارتی برای هر نانوسیال سه بار تکرار و در نهایت میزان هدایت حرارتی نانوسیال در هر دما و غلظت برابر میانگین سه اندازه‌گیری گزارش شد.



شکل ۲- مقایسه بین نتایج تجربی و داده‌های ASHRAE [۳۳] در مورد هدایت حرارتی مخلوط آب- اتیلن گلیکول (۵۰:۵۰ درصد حجمی) در دماهای مختلف.

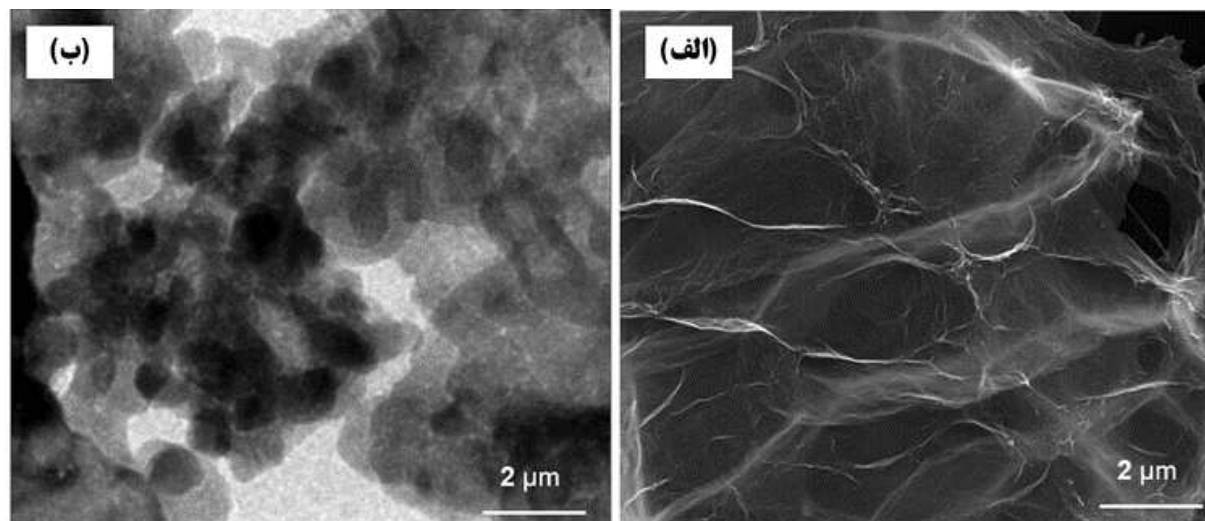
۳- نتایج و بحث

ریخت نانوذرات Al_2O_3 و نانوصفحات گرافن توسط SEM بررسی شد (شکل ۳). مشاهدات SEM (شکل ۳- الف) نشان می‌دهد که نانوصفحات گرافن از ورقه‌های کوتاه لایه‌های گرافن تشکیل شده‌اند. ورقه‌های گرافن روی هم جمع شده و مانند کاغذهای نازک چروکیده به نظر می‌رسند. شکل ۳- ب تصویر SEM از نانوذرات $\gamma-Al_2O_3$ را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود ریخت اغلب نانوذرات آلومینا به صورت شبه‌کروی دیده می‌شود. همانطور که در شکل ۳- ب مشاهده می‌شود، پودرهای نانو تا حدی آگلومره شده‌اند. تشکیل تجمع ذرات (آگلومراسیون) به دلیل نسبت سطح و حجم بسیار زیاد نانوذرات است.



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (الف) نانوصفحات گرافن و (ب) $\gamma-Al_2O_3$.

بررسی‌های بیش‌تر در مورد اندازه و شکل ذرات نانو با استفاده از تصاویر TEM به دست آمد. شکل ۴- الف تصویر TEM از نانوصفحات گرافن است که چین و چروک‌ها^۱ و مناطق تا شده^۲ را نشان می‌دهد که ساختار معرف نانوصفحات گرافن است. تصاویر TEM از نانوذرات $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ در شکل ۴- ب نشان داده شده است. تصاویر TEM از نانوذرات Al_2O_3 نشان داد که اغلب ذرات شکل شبه‌کروی را نشان می‌دهند.



شکل ۴- تصاویر TEM از (الف) نانو صفحات گرافن و (ب) نانوذرات $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.

برای تأیید پایداری نانوسیالات هیبریدی، آنالیز پتانسیل زتا انجام شد. پتانسیل زتای نانوسیالات هیبریدی در ۲۹۸ کلوین به عنوان تابعی از کسر حجمی جامد و زمان در شکل ۵ نشان داده شده است. از شاخص پتانسیل زتا برای ارزیابی پایداری نانوذرات استفاده می‌شود که مربوط به نیروهای دافعه الکترواستاتیک بین نانوذرات است. نانوسیال پایدار دارای پتانسیل زتا بیش از ۳۰ میلی‌ولت می‌باشد. مقادیر کمتر از ۱۵ میلی‌ولت برای پتانسیل زتا نشان‌دهنده ناپایداری نانوسیالات است [۳۶-۳۴].

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، مقادیر پتانسیل زتای نانوسیالات هیبریدی از ۳۱- تا ۵۵- میلی‌ولت متغیر است که برای پایداری نانوسیال کافی است. این امر نشان‌دهنده آن است که در حضور عامل فعال سطحی، نانوذرات دارای توزیع و پراکندگی مناسب بدون آگلومره شدن می‌باشند. همچنین با توجه به شکل مشخص می‌شود که حداکثر مقادیر پتانسیل زتا در بالاترین مقادیر غلظت نانوذرات حاصل شده است. این را می‌توان با فاصله کمتر بین نانوذرات در غلظت‌های بالاتر، که منجر به تجمع ذرات می‌شود، توضیح داد. مطابق با شکل ۵- ب مقادیر پتانسیل زتای نانوسیالات با افزایش زمان کاهش می‌یابد. با توجه به گرانش و حرکت براونی، ذرات نانو به تدریج با گذشت زمان تمایل به آگلومراسیون و تشکیل تجمع دارند [۲۰ و ۳۵ و ۳۷].

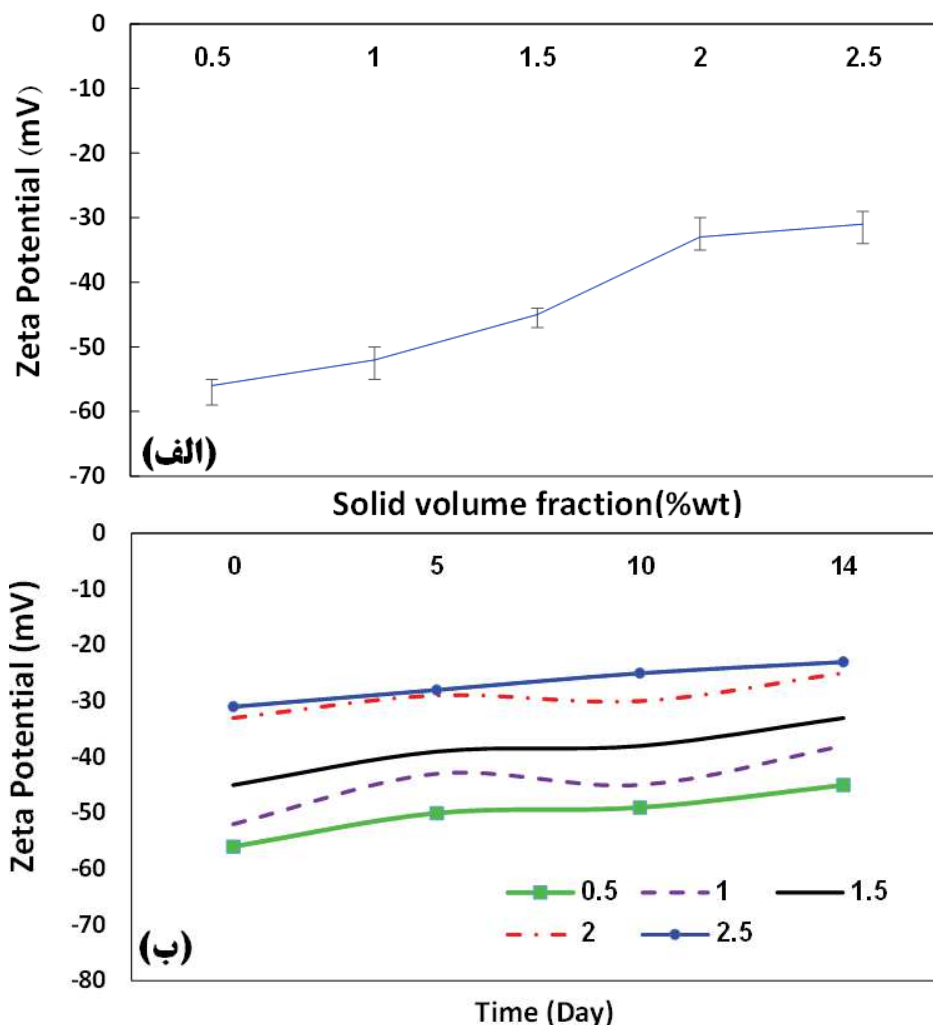
در این مطالعه، اندازه‌گیری‌های هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی در محدوده دمائی از ۲۶۰ تا ۳۰۵ کلوین برای سوسپانسیون‌های با کسر حجمی جامد ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد انجام شد. شکل ۶ هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی را بر حسب کسر حجمی جامد در دماهای مختلف نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، در نمونه فاقد نانوذرات ($\varphi=0$) حضور عامل فعال سطحی اثر قابل ملاحظه‌ای بر هدایت حرارتی سیال پایه نشان نمی‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی با کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد. با فرض تعلیق یکنواخت، در کسر حجمی بالای جامد، تعداد ذرات موجود در حجم معینی از نانوسیال هیبریدی بیش‌تر است و فاصله بین ذرات جامد در سیال پایه نسبتاً کمتر از غلظت‌های پایین‌تر است. هدایت حرارتی نانوسیال، به دلیل پایداری بالا، اندازه ذرات و ماهیت ذاتی هدایت حرارتی در جامدات به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد. به همین دلیل کاربرد نانوسیالات در مبدل‌های حرارتی بسیار مناسب است. نانوسیالاتی که خواص انتقال حرارتی بهتر و

¹ wrinkles

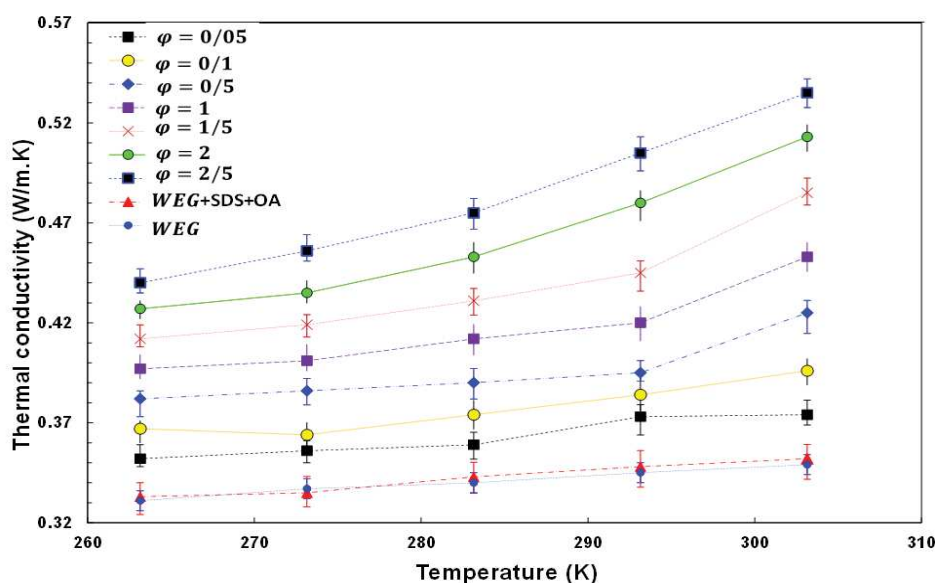
² folded regions



هدایت حرارتی بالاتری را داشته باشند در افزایش ضریب انتقال حرارت سیال پایه مناسب‌تر خواهند بود.



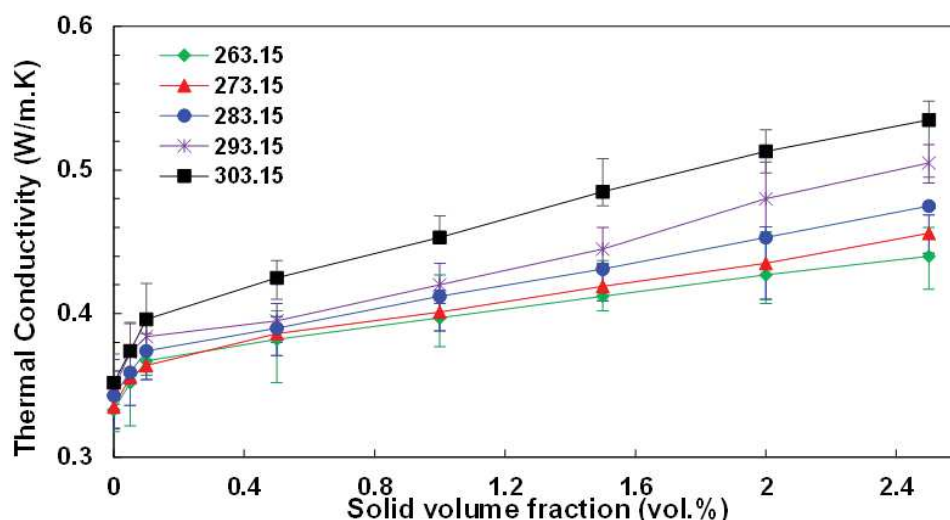
شکل ۵- پتانسیل زتای نانوسیالات هیبریدی بر حسب الف) کسر حجمی جامد و ب) زمان.



شکل ۶- تغییرات هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی بر حسب کسر حجمی جامد در دماهای مختلف

با افزایش دما، انرژی جنبشی ذرات افزایش یافته و تعداد برخورد تصادفی بین ذرات افزایش می‌یابد. افزایش برخورد نانوذرات باعث افزایش تبادل انرژی بین ذرات می‌شود. این امر هدایت حرارتی سیال پایه را افزایش می‌دهد. این افزایش در نانوسیالات هیبریدی با غلظت بالاتر چشمگیرتر است. فاصله زیاد بین ذرات از افزایش قابل توجه هدایت حرارتی در غلظت‌های پایین جلوگیری می‌کند. افزایش غلظت نانوذرات، هدایت حرارتی را افزایش می‌دهد، اما از سوی دیگر، می‌تواند موجب افزایش احتمال آگلومراسیون نانوذرات شود. آگلومراسیون نانوذرات، نسبت سطح به حجم را کاهش می‌دهد و هدایت حرارتی را کاهش می‌دهد. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، با افزایش دما، هدایت حرارتی افزایش می‌یابد. در دماهای بالاتر، شیب این تغییرات مثبت بیش‌تر است. این بدان معنی است که در دماهای بالاتر، بازده حرارتی نانوسیال هیبریدی بهبود یافته است.

هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی بر حسب دما برای مقادیر مختلف کسر حجمی نانوذرات در شکل ۷ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۷ دیده می‌شود، در کسرهای حجمی جامد بالاتر (۲/۵-۱ درصد حجمی)، اثر دما بر هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی چشمگیرتر است. هدایت حرارتی بر اساس حرکت براونی و برخورد بین ذرات نانو است. در غلظت‌های زیاد، اثر دما ملموس‌تر است.



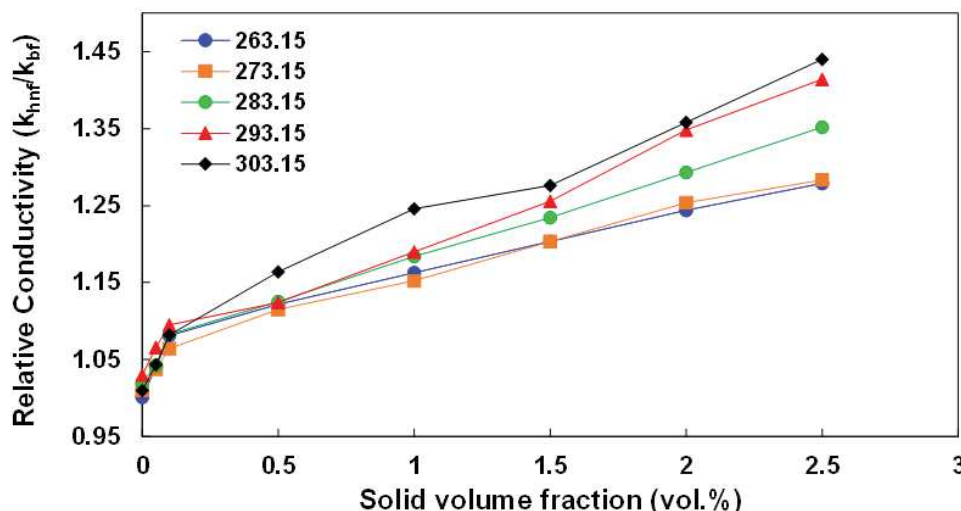
شکل ۷- هدایت حرارتی نانوسیالات بر حسب دما در کسر حجمی های مختلف جامد

شکل ۸ تغییرات نسبت هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی به سیال پایه را به عنوان تابعی از دما و کسر حجمی جامد نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که نسبت هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی با افزایش دما و افزایش کسر حجمی جامد افزایش می‌یابد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزودن نانو ذرات به سیال پایه، هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی در مقایسه با سیال پایه، بهبود می‌یابد. اندازه‌گیری‌های هدایت حرارتی نشان داد که حداکثر افزایش هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی ۴۴/۰۲ درصد بود که در کسر حجمی جامد ۲/۵ درصد و دمای ۳۰۳/۱۵ کلوین حاصل شد.

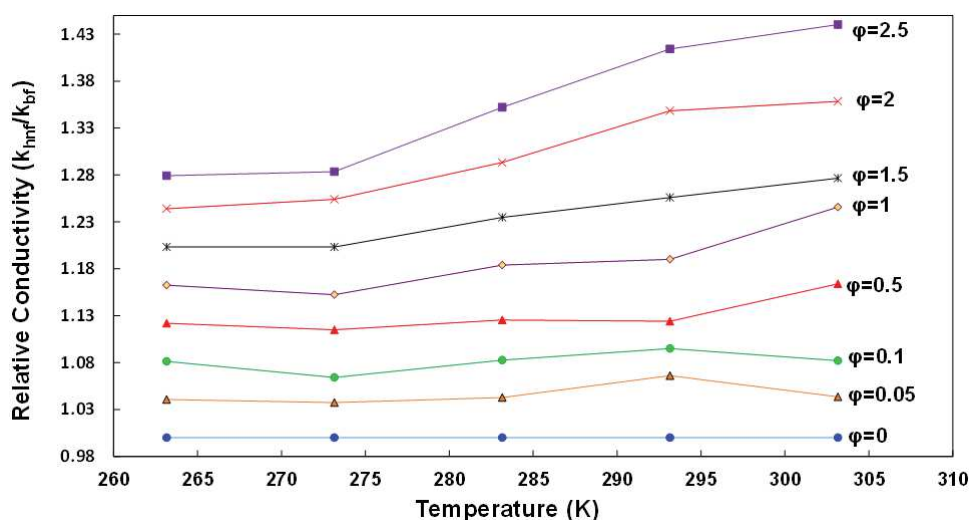
هدایت حرارتی نانوصفحات گرافن و نانوذرات Al_2O_3 به ترتیب حدود $500 [389 \text{ و } 39]$ و $44 [40]$ W/m.K است، در حالی که برای اتیلن گلیکول $244/0$ W/m K و برای آب $0/6 [19]$ W/m.K است. بنابراین، با افزودن مواد افزودنی نانو به سیال پایه، هدایت حرارتی آن افزایش می‌یابد. همچنین، همانطور که قبلاً ذکر شد، با افزایش غلظت نانوذرات، تعداد نانوذرات معلق افزایش می‌یابد. از این رو، سرعت انتقال حرارت بهبود می‌یابد و همزمان ویسکوزیته نانوسیال افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، پایداری نانوسیال در غلظت‌های بالا کاهش یافته و منجر به آگلومراسیون و تجمع ذرات نانو می‌شود. از این رو، میزان افزایش هدایت حرارتی در کسر حجمی بالاتر جامد نسبتاً کاهش می‌یابد.

برای نشان دادن هدایت حرارتی بهبود یافته، تغییر نسبت هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی به عنوان تابعی از کسر حجمی جامد و دما در شکل ۹ نشان داده شده است. این شکل، به وضوح تأثیر محتوای نانوذرات و دما بر افزایش هدایت حرارتی نانوسیالات را

اثبات می‌کند. افزایش نسبت هدایت حرارتی تقریباً برابر با ۱۴/۴٪ و ۱۰/۷٪ در بالاترین و کم‌ترین دمای آزمایش به ازای بالاترین کسر حجمی (۲/۵ درصد حجمی) است. نتایج اندازه‌گیری‌های هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی در دمای پایین نشان دهنده بهبود قابل قبول در هدایت حرارتی نسبت به سیال پایه است. بر این اساس، نتیجه گرفته شد که کاربرد آن‌ها در محیط‌های دمای پایین می‌تواند مفید باشد. این نتایج برای استفاده از نانوسیال هیبریدی در کاربردهای دمای پایین، نتایج امیدوارکننده‌ای است.



شکل ۸- نسبت هدایت حرارتی نانوسیال نسبت به سیال پایه بر حسب کسرهای حجمی مختلف جامد و در دماهای مختلف



شکل ۹- نسبت هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی به سیال پایه در دماهای مختلف.

چند مدل برای توضیح مکانیزم افزایش هدایت حرارتی سیال پایه در حضور افزودنی‌های نانو وجود دارد مانند: نظریه ماکسول، مدل همیلتون- کراسر، حرکت براونی و تجمع ذرات [۱۷]. در تحقیقات انجام شده، اغلب مطالعات بر روی یافتن معادله حاکم بر هدایت حرارتی نانوسیالات متمرکز بوده است و با توجه به تأثیر دما و کسر حجمی نانوذرات، معادلات متعددی برای پیش‌بینی رفتار هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی پیشنهاد شده است [۱۷]. معادله ۲ مدل ماکسول است که معادله پایه‌ای برای پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات است:

$$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_{bf} + 2\phi(k_p)}{k_p + 2k_{bf} - \phi(k_p - k_{bf})} \quad (2)$$

که در آن k_{nf} هدایت حرارتی نانوسیال، ϕ غلظت کلی نانوذرات و k_p و k_{bf} به ترتیب هدایت حرارتی ذرات نانو و سیال پایه هستند. Takabi و همکاران [۴۱] یک معادله برای هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی، بر اساس مدل ماکسول و قانون اختلاط



(mixture rule) ارائه داده‌اند. این مدل با در نظر گرفتن k_p به صورت معادله (۳) معادله (۴) را پیشنهاد می‌دهد:

$$k_p = \frac{(\varphi_{np1}k_{np1} + \varphi_{np2}k_{np2})}{\varphi} \quad (3)$$

$$k_{hnf} = k_{bf} \frac{(\varphi_{np1}k_{np1} + \varphi_{np2}k_{np2}) + 2k_{bf} + 2(\varphi_{np1}k_{np1} + \varphi_{np2}k_{np2}) - 2\varphi k_{bf}}{(\varphi_{np1}k_{np1} + \varphi_{np2}k_{np2}) + 2k_{bf} - (\varphi_{np1}k_{np1} + \varphi_{np2}k_{np2}) + \varphi k_{bf}} \quad (4)$$

که در آن k_{hnf} هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی است، φ غلظت حجمی دو نوع مختلف ذره نانو است که در نانوسیال هیبریدی پراکنده شده‌اند و به صورت $\varphi = \varphi_{np1} + \varphi_{np2}$ محاسبه می‌شود، φ_{npi} کسر حجمی نانوذرات است و k_{npi} هدایت حرارتی نانوذرات است. نتایج محاسبه شده هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی آب- اتیلن گلیکول / نانوالومینا- نانوگرافن توسط این مدل در شکل ۱۰ همراه با داده‌های تجربی نشان داده شده است. از شکل ۱۰ می‌توان دریافت که هدایت حرارتی اندازه‌گیری شده کم‌تر از مقداری است که با استفاده از مدل Takabi [۴۱] محاسبه می‌شود. به نظر می‌رسد که در کسرهای حجمی‌های بسیار کم (۰/۱-۰/۰۵) این مدل کاربرد بیش‌تری دارد و در غلظت‌های بالا نتایج تجربی انحراف قابل توجهی از مقادیر محاسبه شده دارند.

نانوذرات معلق با دو روش هدایت حرارتی نانوسیالات را افزایش می‌دهند: هدایت حرارتی ثابت استاتیک و حرکت تصادفی ذرات نانو. حرکت تصادفی ذرات نانو مربوط به فعل و انفعالات سطحی بین ذرات و مولکول‌های مایع است [۴۲]. با در نظر گرفتن این دو مکانیزم، کل هدایت حرارتی موثر در نانوسیالات را می‌توان به صورت معادله (۵) نوشت:

$$k_{eff} = k_{eff,EMT} + k_{eff,Brown} \quad (5)$$

که در آن k_{eff} کل هدایت حرارتی موثر نانوسیال است و $k_{eff,EMT}$ بخشی از هدایت حرارتی است که به تئوری محیط موثر مرتبط است و $k_{eff,Brown}$ بخشی از هدایت حرارتی است که به حرکت براونی مرتبط است. Gao و همکاران [۴۲] هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی Graphene oxide - Al₂O₃/Water را در دامنه‌ای از دما (۷۰-۰ درجه سانتی‌گراد) و کسر جرمی ذرات نانو از ۰/۰۲۵ تا ۰/۲ بررسی کرده و مدل جدیدی را برای هدایت گرمایی موثر نانوسیالات هیبریدی پیشنهاد کرده‌اند. با در نظر گرفتن ساختار و حرکت براونی، هدایت حرارتی به صورت معادله ۶ در نظر گرفته می‌شود:

$$k_{eff,hnf} = \varphi \left[k_{bf} \left(\frac{k_{eff,EMT,1}}{k_{bf}} + k_{eff,Brown,1} \right) \right] + (1 - \varphi) \left[k_{bf} \left(\frac{k_{eff,EMT,2}}{k_{bf}} + k_{eff,Brown,2} \right) \right] \quad (6)$$

که در آن φ کسر حجمی نانوذره Al₂O₃ است و زیرنویس ۱ به هر نانوذره ارجاع می‌شود. با اعمال مدل Gao به نانوسیال مورد مطالعه در این پژوهش، k_{hnf} به روشی که در ادامه شرح داده شده محاسبه می‌شود. در این مدل، $k_{eff,EMT}$ برای نانوذره Al₂O₃ که هدایت حرارتی استاتیک آن از مدل همیلتون - کراسر (H-C) قابل محاسبه است، توسط معادله (۷) تعیین می‌شود:

$$\frac{k_{eff,EMT,1}}{k_{bf}} = \frac{k_{np} + (n-1)k_{bf} - (n-1)\varphi(k_{bf} - k_{np})}{k_{np} + (n-1)k_{bf} + \varphi(k_{bf} - k_{np})} \quad (7)$$

که در آن $k_{eff,EMT,1}$ هدایت حرارتی موثر Al₂O₃ است و n عامل شکل تجربی است که برای ذرات کروی مقدار n برابر ۳ است. مطابق مدل Gao [۴۲]، هدایت گرمایی موثر نانوذره گرافن، $k_{eff,EMT,2}$ ، به صورت معادله (۸) محاسبه می‌شود:

$$\frac{k_{eff,EMT,2}}{k_{bf}} = \frac{3 + 2\eta^2\varphi / \left[k_{bf} \left(2\frac{Rk}{L} + 13.4\sqrt{\bar{t}} \right) \right]}{3 - \eta\varphi} \quad (8)$$

که در آن t ضخامت، L طول، Rk مقاومت حرارتی سطحی و η میانگین نسبت صافی^۱ است. افزایش هدایت حرارتی توسط حرکت تصادفی نانوذرات توسط معادله (۹) محاسبه می‌شود:

$$k_{eff,Brown} = \frac{\rho_{np}\varphi C_{p,np}}{2} \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi\mu r_c}} \quad (9)$$

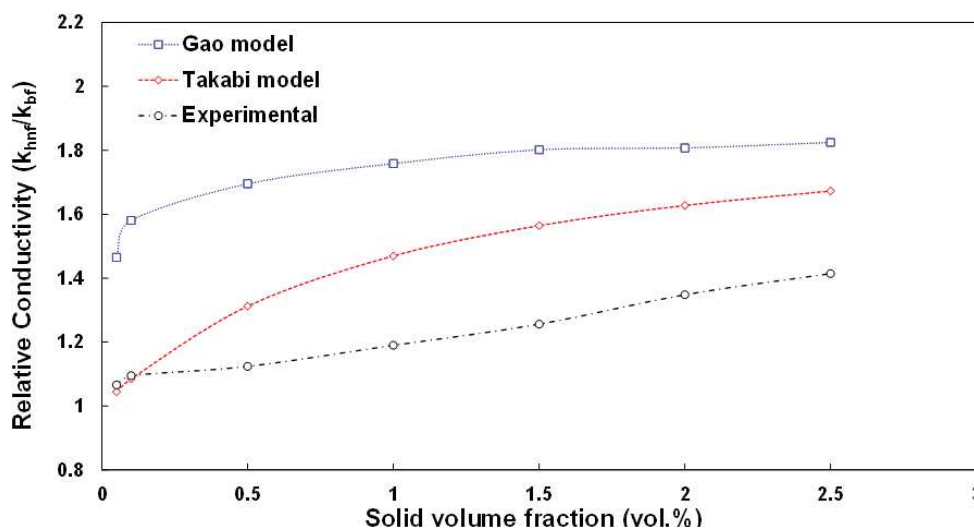
که در آن ρ_{np} و $C_{p,np}$ به ترتیب چگالی و ظرفیت حرارتی ویژه نانوذرات، μ ویسکوزیته سیال پایه، k_B ثابت بولتزمن، T دمای کلین و r_c میانگین شعاع خوشه است. برای نانو ذرات کروی Al₂O₃، شعاع است و برای نانو ورقه‌های گرافن r_c تقریباً نیمی از قطر معادل ($d_{p,eq}$) ورقه است:

¹ flatness ratio



$$d_{p,eq} = \left(\frac{6v_{non-sph}}{\pi} \right)^{1/3} \quad (10)$$

با استخراج مقادیر L ، t ، η و R_k بر اساس داده‌های تجربی، هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی آب-اتیلن گلیکول/نانوآلومینا-نانوگرافن با استفاده از مدل Gao [۴۲] محاسبه و نتایج محاسبه شده در مقایسه با داده‌های تجربی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۱۰ مشخص شد که هدایت حرارتی اندازه‌گیری شده بیش‌تر از مقدار محاسبه شده با استفاده از مدل GAO [۴۲] است و نتایج تجربی با نتایج پیش‌بینی شده مطابقت قابل قبولی ندارند.



شکل ۱۰- مقایسه بین نتایج تجربی اندازه‌گیری شده هدایت حرارتی و مقادیر هدایت حرارتی محاسبه شده با استفاده از مدل Gao [۴۲] و مدل Takabi [۴۱] برای نانوسیال هیبریدی آب-اتیلن گلیکول/نانوآلومینا-نانوگرافن.

همانگونه که از روابط مربوط به مدل‌های مدل Gao [۴۲] و مدل Takabi [۴۱] استنباط می‌شود، این دو مدل برای تخمین ضریب هدایت حرارتی تابع عواملی مانند کسر حجمی نانوذرات و شکل ذرات معلق می‌باشند و تاثیر عوامل بسیار مهم و تاثیرگذاری مانند دما و قطر نانوذرات، نوع و میزان مواد عامل فعال سطحی و نوع روش پایدارسازی در آن‌ها لحاظ نشده است. پارامترهای مختلف موثر بر هدایت حرارتی نانوسیالات ترکیبی مانند دما، چگالی، گرمای ویژه، pH، حرکات براونی^۱، پارامترهای شکل و اندازه افزودنی نانو، کسر حجم جامد، تشکیل آگلومرها (اثر خوشه‌بندی)، ویسکوزیته، خواص اتمی و شیمیایی ذرات نانو و روش تولید نانوسیال منجر به ایجاد ساختار پیچیده‌ای در نانوسیالات هیبریدی می‌شود. بر این اساس، نتایج تجربی به طور قابل توجهی از نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل‌های نظری متفاوت است. روابط مشخص شده در مطالعات انجام شده، یک دستور صریح برای پیش‌بینی نسبت هدایت حرارتی نمی‌دهد و به نظر می‌رسد که یک مدل واحد و منحصر به فرد نمی‌تواند طیف گسترده‌ای از مشاهدات تجربی را برای نانوسیالات هیبریدی مختلف پیش‌بینی کند. این اختلاف ممکن است به دلیل کمبود داده‌ها برای نانوسیالات خاص باشد. بر این اساس، مدل‌ها با استفاده از مجموعه داده‌های کوچک و فرضیات ساده ساخته شده‌اند. از سوی دیگر، در نظر نگرفتن پارامترهای مهم و اثرگذار مانند دما یا اندازه نانوذرات در روابط و مدل‌های تخمین ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات می‌تواند باعث عدم کارایی و کاهش نتیجه بخشی مدل‌های تخمین هدایت حرارتی شود. پارامترهای قطر نانوذرات و دمای نانوسیال در کنار پارامترهایی مانند کسر حجمی اثر تعیین‌کننده‌ای بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال دارند. بسیاری از مدل‌هایی که تاکنون به صورت تحلیلی یا تجربی ارائه شده‌اند میزان اثرگذاری این پارامترها را ناچیز فرض کرده‌اند و یا اثر این پارامترها را به صورت مستقیم لحاظ ننموده‌اند.

¹ Brownian



۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، تاثیر دما و غلظت نانوذرات متشکل از نانوذرات آلومینا و نانوصفحات گرافن بر هدایت حرارتی نانوسیال پایه متشکل از آب و اتیلن گلیکول مورد مطالعه قرار گرفت. در تهیه نانوسیال هیبریدی، مخلوط آب- اتیلن گلیکول با نسبت ۵۰:۵۰ درصد حجمی در دمای ۲۹۸ کلون به عنوان سیال پایه در نظر گرفته شد. نانوذرات که از حجم مساوی نانوذرات آلومینا و نانوصفحات گرافن تشکیل شده بودند در مقدار معینی از سیال پایه تعلیق شدند. همچنین به میزان ۰/۲ درصد حجمی اولئیک اسید (OA) و ۰/۲ درصد وزنی سدیم دودسیل سولفونات (SDS) به عنوان ماده فعال سطحی برای تثبیت و پراکندگی نانوذرات به سیال پایه اضافه شدند. نانوسیالات با استفاده از روش دو مرحله‌ای تهیه شدند. کسر حجمی نانوذرات در این تحقیق ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد حجمی لحاظ گردید و همچنین جهت بررسی اثر دما، دماهای مورد آزمایش در بازه دمایی ۳۰۳-۲۶۰ کلون طراحی شد. ریخت‌شناسی و ریزساختار نانوذرات توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) انجام شد. پس از سنتز نانوسیال هیبریدی آب- اتیلن گلیکول/ نانوغرافن- نانوالومینا، هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی اندازه‌گیری و با سیال پایه مقایسه شد و نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- نتایج نشان داد که خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال هیبریدی آب- اتیلن گلیکول/ نانوغرافن- نانوالومینا خصوصاً در دماهای زیر صفر به شدت به دما و غلظت نانوذرات وابسته است.
- ۲- هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی آب- اتیلن گلیکول/ نانوغرافن- نانوالومینا به غلظت نانوذرات و دما وابسته است. نتایج نشان داد که افزایش دما و غلظت حجمی نانوذرات موجب افزایش هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی می‌شود. حداکثر افزایش هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی برابر با ۴۴/۰۲ درصد بود که در کسر حجمی جامد ۲/۵ درصد و در دمای ۳۰۳ کلون حاصل شد.
- ۳- نتایج اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی آب- اتیلن گلیکول/ نانوغرافن- نانوالومینا با مدل‌های پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات مقایسه شد ولی تطابق قابل قبولی وجود نداشت.

منابع مالی/ حمایت‌ها

این پژوهش تحت حمایت صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور- معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری با شماره طرح ۹۷۰۱۷۹۶۴ انجام شده است.

مراجع

- [1] S. Chakraborty, P. K. Panigrahi, "Stability of nanofluid: A review", *Appl. Therm. Eng.*, 2020, 174 115259.
- [2] I. M. Mahbubul, R. Saidur, M. A. Amalina, "Latest developments on the viscosity of nanofluids", *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2012, 55 874-885.
- [3] D. Dey, P. Kumar, S. Samantaray, "A review of nanofluid preparation, stability, and thermo-physical properties", *Heat Transf. - Asian Res.*, 2017, 46 1413-1442.
- [4] A. K. Rasheed, M. Khalid, W. Rashmi, T. C. S. M. Gupta, A. Chan, "Graphene based nanofluids and nanolubricants - Review of recent developments", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2016, 63 346-362 .
- [5] D. Khurana, R. Choudhary, S. Subudhi, "A critical review of forced convection heat transfer and pressure drop of Al₂O₃, TiO₂ and CuO nanofluids", *Heat Mass Transf.*, 2017, 53 343-361
- [6] Sarafraz, M. M., Safaei, M. R., Tian, Z., Goodarzi, M., Bandarra Filho, E. P., & Arjomandi, M. (2019). "Thermal assessment of nano-particulate graphene-water/ethylene glycol (WEG 60: 40) nano-suspension in a compact heat exchanger". *Energies*, 12 (10).
- [7] Y. R. Sekhar, K. V. Sharma, "Study of viscosity and specific heat capacity characteristics of water-based Al₂O₃ nanofluids at low particle concentrations", *J. Exp. Nanosci.*, 2015, 10 86-102.
- [8] S. S. J. Aravind, S. Ramaprabhu, "Graphene-multiwalled carbon nanotube-based nanofluids for improved heat dissipation", *RSC Adv.*, 2013, 3 4199-4206.
- [9] P. Van Trinh, N. N. Anh, B. H. Thang, L. D. Quang, N. T. Hong, N. M. Hong, P. H. Khoi, P. N. Minh, P. N. Hong, "Enhanced thermal conductivity of nanofluid-based ethylene glycol containing Cu nanoparticles decorated on a Gr-MWCNT hybrid material", *RSC Adv.*, 2017, 7 318-326.



- [10] M. M. Sarafraz, M. R. Safaei, Z. Tian, M. Goodarzi, "Nano-Suspension in a Compact Heat Exchanger", *Energies*, 2019, 1217.
- [11] J. Gangwar, A.K. Srivastava, S.K. Tripathi, M. Wan, R.R. Yadav, "Strong enhancement in thermal conductivity of ethylene glycol-based nanofluids by amorphous and crystalline Al₂O₃ nanoparticles", *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 105 19–23 .
- [12] J. Xu, K. Bandyopadhyay, D. Jung, "Experimental investigation on the correlation between nano-fluid characteristics and thermal properties of Al₂O₃ nano-particles dispersed in ethylene glycol-water mixture", *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2016, 94 262–268.
- [13] R. Agarwal, K. Verma, N. K. Agrawal, R. Singh, "Sensitivity of thermal conductivity for Al₂O₃ nanofluids", *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2017, 80 19–26.
- [14] S. Tanvir, L. Qiao, "Surface tension of nanofluid-type fuels containing suspended nanomaterials", *West. States Sect. Combust. Inst. Spring Tech. Meet.* 2012, 2012 551–573.
- [15] B. Aladag, S. Halefadi, N. Doner, T. Maré, S. Duret, P. Estellé, "Experimental investigations of the viscosity of nanofluids at low temperatures", *Appl. Energy.*, 2012, 97 876–880.
- [16] G. Sekrani, S. Poncet, "Ethylene- and propylene-glycol based nanofluids: A literature review on their thermophysical properties and thermal performances", *Appl. Sci.*, 2018, 8.
- [17] A. Banisharif, M. Aghajani, S. Van Vaerenbergh, P. Estellé, A. Rashidi, "Thermophysical properties of water ethylene glycol (WEG) mixture-based Fe₃O₄ nanofluids at low concentration and temperature", *J. Mol. Liq.*, 2020, 302 112606.
- [18] L. S. Sundar, K. V. Sharma, M. T. Naik, M. K. Singh, "Empirical and theoretical correlations on viscosity of nanofluids: A review", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2013, 25 670–686.
- [19] J. R. Satti, D. K. Das, D. Ray, "Investigation of the thermal conductivity of propylene glycol nanofluids and comparison with correlations", *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2017, 107871–881.
- [20] N. Tan, Y. Zhang, B. Wei, C. Zou, "Experimental investigation on optical and thermal properties of propylene glycol–water based nanofluids for direct absorption solar collectors", *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, 2018, 124 0
- [21] A. Ahmadian, M. Bilal, M. A. Khan, and M. I. Asjad, "Numerical analysis of thermal conductive hybrid nanofluid flow over the surface of a wavy spinning disk," *Sci. Rep.*, 2020, 10(1) 1–13.
- [22] D. P. Kulkarni, D. K. Das, S. L. Patil, "Effect of temperature on rheological properties of copper oxide nanoparticles dispersed in propylene glycol and water mixture", *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 2007, 7 2318–2322.
- [23] P. K. Namburu, D. P. Kulkarni, D. Misra, D. K. Das, "Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture", *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2007, 32 397– 402.
- [24] M. T. Naik, G. Ranga Janardhana, K. Vijaya Kumar Reddy, B. Subba Reddy, "Experimental investigation into rheological property of copper oxide nanoparticles suspended in propylene glycol-water based fluids", *J. Eng. Appl. Sci.*, 2010, 5 29–34.
- [25] D. P. Kulkarni, D. K. Das, R. S. Vajjha, "Application of nanofluids in heating buildings and reducing pollution", *Appl. Energy.*, 2009, 86 2566–2573 .
- [26] N. Salih, J. Salimon, E. Yousif, "The physicochemical and tribological properties of oleic acid based triester biolubricants", *Ind. Crops Prod.*, 2011, 34 1089–1096 .
- [27] D. R. Lide, "Hardness of Minerals and Ceramics", *CRC Handb. Chem. Phys.* 2005, 2313–2314 .
- [28] Z. Y. Zhou, D. Q. Qian, L. Bin, Y. M. Xiao and H. C. Bi. "Experimental study on the surface tension of Al₂O₃-H₂O nanofluid" *Mater. Sci. Forum*, 2016, 852 394-400.
- [29] Lu, Gui, Yuan-Yuan Duan, and Xiao-Dong Wang. "Surface tension, viscosity, and rheology of water-based nanofluids: a microscopic interpretation on the molecular level." *J. Nanopart. Res.*, 2014, 16(9) 1-11.
- [30] M. Afrand, D. Toghraie, B. Ruhani, "Effects of temperature and nanoparticles concentration on rheological behavior of Fe₃O₄-Ag/EG hybrid nanofluid: An experimental study", *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2016, 77 38–44 .
- [31] H. W. Xian, N. Azwadi, C. Sidik, S.R. Aid, T. L. Ken, Y. Asako, "Review on Preparation Techniques, Properties and Performance of Hybrid Nanofluid in Recent Engineering Applications ", *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, 2018, 1 1–13.
- [32] S. Atashrouz, M. Mozaffarian, G. Pazuki, "Viscosity and rheological properties of ethylene glycol+water+Fe₃O₄ nanofluids at various temperatures: Experimental and thermodynamics modeling", *Korean J. Chem. Eng.*, 2016, 33 2522–2529.
- [33] M. S. Owen, *ASHRAE Handbook: Fundamentals*, Inch-Pound Ed., 2009.
- [34] S. N. M. Zainon, W. H. Azmi, "Recent progress on stability and thermo-physical properties of mono and hybrid towards green nanofluids", *Micromachines*. 2021, 12 1–35.
- [35] H. W. Xian, N. A. C. Sidik, R. Saidur, "Impact of different surfactants and ultrasonication time on the stability and thermophysical properties of hybrid nanofluids", *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 2020, 110.
- [36] F. Rubbi, L. Das, K. Habib, N. Aslfattahi, R. Saidur, M. T. Rahman, "State-of-the-art review on water-based nanofluids for low temperature solar thermal collector application", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, 2021, 230 111220.
- [37] F. Rubbi, K. Habib, R. Saidur, N. Aslfattahi, S. M. Yahya, L. Das, "Performance optimization of a hybrid PV/T solar system using Soybean oil/MXene nanofluids as A new class of heat transfer fluids", *Sol. Energy.*, 2020,



- 208 124–138 .
- [38] Mahanta, Nayandeep K., and Alexis R. Abramson. "Thermal conductivity of graphene and graphene oxide nanoplatelets." In 13th InterSociety conference on thermal and thermomechanical phenomena in electronic systems, 2012, IEEE, 1-6.
- [39] M. Sang, J. Shin, K. Kim, and K. J. Yu, "Electronic and thermal properties of graphene and recent advances in graphene based electronics applications," J. Nanomater., 2019, 9(3) 1–33.
- [40] H. Zamzaman and M. T. Jamal-Abadi, "Factor effect estimation in the convective heat transfer coefficient enhancement of Al₂O₃/EG nanofluid in a double-pipe heat exchanger," Int. J. Eng. Trans. B Appl., 2013, 26(8) 837–844.
- [41] B. Takabi, S. Salehi, "Augmentation of the heat transfer performance of a sinusoidal corrugated enclosure by employing hybrid nanofluid", Adv. Mech. Eng. 2014, 2014.
- [42] Y. Gao, J. An, Y. Xi, Z. Yang, and J. Liu, "Thermal Conductivity and Stability of Novel Aqueous Graphene Oxide – Al₂O₃ Hybrid Nanofluids for Cold Energy Storage." Appl. Sci., 2020, 10(17) 5768.



Investigation of the Effect of Temperature and Concentration of Ceramic Nanoparticles on the Thermal Conductivity of Water-Ethylene Glycol/ Nano Alumina-Nano Graphen Hybrid Nanofluid

M.Nazi¹, N. Nayeypashae^{2*}, S. M. M. Hadavi³

¹ Chemistry and Petrochemistry Research Center, Standard Research Institute (SRI)

² Technology and Engineering Research Center, Standard Research Institute (SRI)

³ Department of Materials Engineering, Tarbiat Modares University

* n.nayeypashae@standard.ac.ir

Abstract: Nanofluid is a suspension obtained by adding nanoscale particles (100 nm) to a base fluid to improve heat transfer. In this study, the effect of temperature and concentration of nanoparticles consisting of Alumina nanoparticles and Graphene nanosheets on the thermal conductivity of a base fluid consisting of water and ethylene glycol was studied. Also, 0.2% by volume of oleic acid (OA) and 0.2% by weight of sodium dodecyl sulfonate (SDS) were added to the base fluid as a surfactant to stabilize and disperse the nanoparticles. The volume fraction of nanoparticles of 0.05, 0.1, 0.5, 1, 1.5, 2 and 2.5% by volume and the tested temperatures were selected in the temperature range of 260-305 K. The morphology and microstructure of the nanoparticles were investigated by scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM). Thermal conductivity of hybrid nanofluids was measured and compared with the base fluid. Results showed that thermal conductivity of water-ethylene glycol/ nano Graphene-nano Alumina hybrid nanofluid depends on nanoparticle concentration and temperature. The thermal conductivity measurements of water-ethylene glycol/ nano Graphene-nano Alumina hybrid nanofluid were compared with the thermal conductivity prediction models of nanofluids but there was no acceptable agreement. The results showed that increasing the temperature and volumetric concentration of nanoparticles increases the thermal conductivity of hybrid nanofluids. The maximum increase in thermal conductivity of hybrid nanofluid was 44.02% which was obtained in solid volume fraction of 2.5% and at temperature of 303 K.

Keywords: Hybrid nanofluid, ethylene glycol, thermal conductivity, alumina nanoparticles, graphene nanosheets.