بررسی الکتریکی و حرارتی نانوسیالات با پایه روغن ترانسفورماتور

سید شرف الدین حسینی، استادیار

دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه پیام نور- تهران- ایران
smeampnu@gmail.com

چکیده: روغن ترانس یکی از مهمترین موادی است که در صنعت برق و ترانسفورماتور مورد استفاده قرار می گیرد. وظیفه اصلی این ماده در کنار حفظ خصوصیت عایقی و محافظت از اجزای هسته ترانسفورماتور، انتقال گرما از هسته ترانسفورماتور به محیط بیرون است. ارتقای عملکرد این ماده یکی از دغدغه های محققین بوده است. در این تحقیق آزمایشگاهی تلاش شده است با ایجاد نانوسیالات حاوی نانوذرات مختلف با پایه روغن ترانسفورماتور شرایط انتقال حرارتی و همچنین ولتاژ شکست سوسپانسیون مورد بررسی قرار گیرد. نانوسیالات با ترکیب شش نوع نانوذره مختلف درون سیال پایه و قرار گیری تحت امواج التراسونیک آماده شده اند. بررسی حرارتی با دستگاه KD_2 و بررسی الکتریکی با دستگاه سنجش ولتاژ شکست در دو دمای ۲۵ و ۵۵ درجه سانتیگراد صورت پذیرفته است. نتایج آزمایشات بیانگر آن است که حضور نانوذرات موجب کاهش قابل ملاحظه ولتاژ شکست روغن می شود اما بطور نسبی تاثیر حرارتی مثبتی دارند بطوریکه نانوذرات الماس با افزایش ۸۳ درصدی ضریب هدایت حرارتی بهترین نتیجه را نشان داده است.

واژه های کلیدی: روغن ترانسفورماتور، نانوسیال، انتقال حرارت، ولتاژ شکست الکتریکی

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۸/۰۶/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۸/۱۱/۲۰

نام نویسنده‌ی مسئول : سید شرف الدین حسینی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.4.2]

[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.39]

۱- مقدمه

امروزه یکی از مباحثی که توجه جمع کثیری از محققین و صنعت‌گران را به خود جلب نموده است، انرژی و بهینه‌سازی مصرف آن می‌باشد. کاهش منابع سوخت‌های فسیلی، لزوم استفاده از روش‌های نوین تولید انرژی را بیش از پیش محسوس نموده است. لذا یافتن راهکارهایی جهت افزایش راندمان و بهره‌وری دستگاه‌های تولید کننده و حامل انرژی ضروری است. روش‌های مختلف افزایش انتقال حرارت در تجهیزات به دو گروه فعال (نیازمند نیرو با توان خارجی) و غیرفعال (بدون نیاز به اعمال نیروی خارجی) تقسیم می‌گردند. فرایند انتقال حرارت و استفاده از مبدل‌های حرارتی در اغلب صنایع کوچک و بزرگ وجود دارد. افزایش میزان انتقال حرارت و کارایی مبدل‌های حرارتی به معنی صرفه‌جویی میلیون‌ها دلار در هزینه‌های صنایع می‌باشد. از نظر بازده انتقال حرارت در تجهیزاتی نظیر مبدل‌های حرارتی، هدایت حرارتی سیال حامل انرژی و ضریب جابجایی انتقال حرارت نقش اساسی را بر عهده دارند. سیالات متداول در انتقال حرارت نسبت به ذرات فلزی هدایت حرارتی بسیار پایینی دارند. بعنوان مثال هدایت حرارتی مس در دمای محیط حدود ۷۰۰ برابر آب و ۳۰۰۰ برابر روغن موتور است.

بیش از صد سال پیش نظریه استفاده از ذرات با هدایت حرارتی بالا بصورت مخلوط در سیال خالص حامل انرژی مانند آب، اتیلن گلایکول، روغن‌ها و غیره جهت بالا بردن ظرفیت حرارتی این سیالات مطرح شد [1]. بروز مشکلاتی همچون فرسایش دیواره تجهیزات، ته-نشینی و مسدود نمودن کانال‌ها و مجراها، و همچنین عدم افزایش محسوس ظرفیت حرارتی مخلوط نهایی هنگام بکارگیری ذرات درشت اندازه میلی‌متری و میکرومتری محققین را به سمت استفاده از ذرات در اندازه کوچکتر یعنی نانو سوق داد [2]. نانوذرات در واقع ذراتی هستند که حداقل از یک وجه دارای اندازه کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر باشند [۳]. اندازه بسیار کوچک این ذرات باعث می‌شود هنگامی که در سیال پایه مستغرق می‌شوند پایداری بسیار بهتری پیدا کنند. این در حالی است که بیشتر آزمایشات نشان دادند که استفاده از نانوذرات میزان انتقال حرارت سیال پایه را نیز افزایش می‌دهد [۴ و ۵]. عوامل گوناگونی همچون جنس، شکل و اندازه ذرات در میزان افزایش انتقال حرارت تاثیرگذار هستند [6 و 7]. انتخاب ذرات با هدایت حرارتی بالاتر موجب آن می شود که هدایت حرارتی کلی مخلوط بیشتر شود [۸ و ۹]. با کاهش اندازه ذرات، میزان سطح در حجم یکسان بیشتر شده و در نتیجه تبادل حرارتی آنها افزایش یافته و میزان انتقال حرارت افزایش خواهد یافت [10].

افزایش نسبت سطح به حجم نانوذرات باعث می شود که اتم‌های واقع در سطح، نسبت به اتم‌های درون حجم ذرات، اثر بسیار بیشتری بر خواص فیزیکی ذرات داشته باشند [۱۱]. این ویژگی واکنش پذیری نانوذرات را به شدت افزایش می‌دهد. علاوه بر این، افزایش سطح ذرات فشار سطحی را تغییر داده و منجر به تغییر فاصله بین ذرات یا فاصله بین اتم‌های ذرات می شود. در مقیاس نانو تغییر در فاصله بین اتم‌های ذرات و هندسه ذرات روی خواص الکترونیکی ماده نیز تاثیرگذار است. وقتی اندازه ذرات کاهش می‌یابد پیوند های الکتریکی در فلزات ظریف-تر و پتانسیل یونیزاسیون افزایش می‌یابد [12]. البته شایان ذکر است که کاهش اندازه ذرات موجب افزایش گرانروی و در نتیجه نیاز به مصرف انرژی بیشتر نیز خواهد شد. همچنین هرچه حالت کرویت نانوذرات کمتر شود، میزان انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد [13]. بطور کلی بکارگیری نانوسیالات نسبت به سیالات میکرومتری و میلی-متری مزایایی همچون بهبود انتقال حرارت و پایداری و کاهش اندازه سیستم‌های انتقال حرارت، کاهش توان لازم برای پمپاژ، کاهش گرفتگی و انسداد مجاری را دارد. در این تحقیق تلاش شده است با بکارگیری نانوسیالات با پایه روغن ترانسفورماتور، بجای روغن خالص خواص عملکردی نانوسیال بررسی گردد.

۲- روغن مبدل

روغن ترانسفورماتور بخش تصفیه شده روغن معدنی می باشد که در دمای بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد به جوش آمده است. این روغن پس از تصفیه از لحاظ شیمیایی کاملا خالص شده و تنها شامل هیدروکربن‌های مایع می‌باشد. روغنی که در ترانسفورماتور بکار می رود سه وظیفه اصلی عایق الکتریکی بودن، انتقال دهنده حرارت هسته به پوسته بیرونی و همچنین محافظت از اجزای داخلی ترانس را به عهده دارد. چنانچه روغن خالص باشد مشخصات الکتریکی آن خوب خواهد بود و نیز اگر ویسکوزیته روغن کم باشد خاصیت خنک کنندگی بهتری خواهد داشت و نقطه ریزش[1] آن پایین خواهد بود [۱۴]. ویسکوزیته روغن نباید از حد خاصی کمتر باشد زیرا در غیر اینصورت نقطه اشتعال[2] آن پایین می‌آید [۱۴].

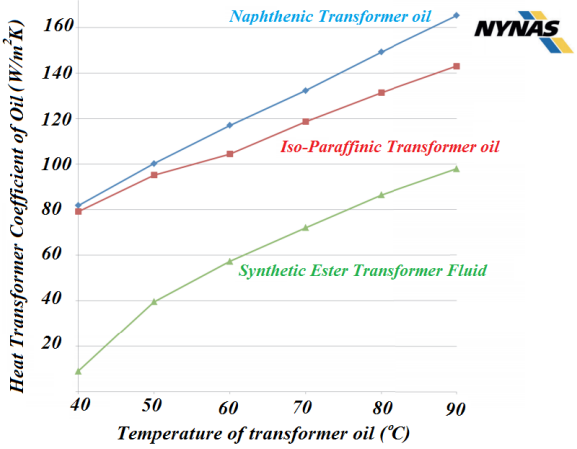
یک روغن ایده‌آل باید دارای پایداری و استقامت الکتریکی بالا و جرم مخصوص و گرانروی پایین بوده و بتواند انتقال حرارت را بخوبی انجام دهد. همچنین پایین بودن نقطه ریزش و بالا بودن نقطه اشتعال در روغن مبدل باعث می شود که روغن در درجه حرارت های پایین حرکت خود را از دست داده و تمایل به تبخیر شدن در آن کمتر خواهد شود [۱۵]. روغن مبدل باید تمیز و عاری از آلودگی معلق و رطوبت باشد. ناخالصی بزرگتر از ۱۵ میکرومتر و قطرات کوچک آب استقامت دی الکتریک روغن را کاهش می‌دهد [16]. حساسیت کارکردی روغن مبدل بسیار بالاست. از آنجا که روغن یک ترکیب آلی است، زوال پذیر بوده و تاثیر ناپذیری آن در مقابل گرما و

[1] Pour Point
[2] Flash Point

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.4.2]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.39]

اکسیژن کاملا از بین نخواهد رفت. لذا به تبع آن، روغن اکسیده شده و ترکیبات اسیدی و قطبی بوجود می‌آید و کشش سطحی روغن در برابر آب کاهش می‌یابد [۱۷]. از طرف دیگر ترکیبات اسیدی بر کاغذ و تخته‌های فشرده و همچنین عایق‌های سیم‌پیچی‌ها تاثیرات نامطلوبی مانند ترد و شکننده شدن خواهد گذاشت [18]. تشکیل لجن و کثافات در روغن ترانسفورماتور نیز از دیگر پیامدهای زوال و اضمحلال روغن می‌باشد [19]. البته لازم به ذکر است که عایق‌ها در یک ترانسفورماتور تنها به دلیل حرارت و تجزیه شیمیایی زائل نمی‌شوند بلکه تخلیه الکتریکی نیز در این فرایند موثر خواهد بود. تمامی این موارد باید برای هر سیالی جدیدی که بجای روغن بکار خواهد رفت بررسی گردد و در کنار آن خواص حرارتی آنها نیز نیاز به آزمایش و تحقیق دارد.

در "شکل ۱" نسبت ضریب انتقال حرارت روغن مبدل شرکت نیناس بر اساس تغییرات دما آورده شده است که می تواند مبنای مقایسه نتایج حرارتی سوسپانسیون نمونه با سیال پایه خالص باشد. این نمودار توسط شرکت سازنده روغن ترانسفورماتور ارائه شده است.



شکل (۱): نسبت ضریب انتقال حرارت روغن مبدل بر اساس تغییرات دما برای سه نمونه روغن ترانسفورماتور نیناس [20]

در این تحقیق از نانوذرات مختلف اکسید سیلیسیوم، اکسید آلومینیوم، اکسید تیتانیوم، نیترید آلومینیوم، کاربید سیلسیوم و نانوذرات الماسواره استفاده شده است و نتایج حرارتی و دی‌الکتریک آنها مورد مقایسه قرار گرفته است. خواص این نانوذرات در "جدول ۱" آورده شده است.

جدول (۱): خواص نانوذرات مورد استفاده در تحقیق جاری

نام ذره	نام علمی	چگالی (g/cm^3)	هدایت حرارتی ($W/m°K$)	گرمای ویژه ($J/Kg°K$)	مقاومت الکتریکی Ωm
سیلیکا	SiO_2	۲/۶۵	از ۱/۲۵ تا ۲/۵۱	۶۸۰	تا 1e+15 1e+19
آلومینا	Al_2O_3	۳/۸۹	۳۰ تا ۳۵	۸۸۰	10^{11} <
تیتانیا	TiO_2	۴/۲۳	۴/۸	۶۸۳	
نیترید آلومینیوم	AlN	۳/۲۶	۱۴۰ تا ۱۸۰	۷۴۰	10^{11} <
کاربید سیلسیوم	SiC	۳/۱	۱۲۰	۷۵۰	10^{3} تا 10^{-1}
الماسواره	C	۳/۵	۹۰۰ تا ۲۳۲۰		عایق الکتریکی

۳- بیان مسئله

یکی از تجهیزاتی که نقش بزرگی در صنعت برق بازی می‌کند ترانسفورماتور برق است که افزایش راندمان کاری این تجهیز می‌تواند در میزان مصرف و اتلاف انرژی بسیار تاثیرگذار باشد. عواملی همچون میزان رطوبت و دمای هوای خارج از عوامل موثر در راندمان ترانس می‌باشد. علاوه بر مشکل هدایت بسیار پایین حرارتی روغن مبدل، اگر دمای خارج افزایش یابد بر مشکلات عملکردی ترانس تاثیر نامطلوبی می‌گذارد. یکی از مشکلات عمده‌ای که در مناطق گرم کشور وجود دارد کاهش بسیار شدید بازده و حتی از مدار خارج شدن ترانس برق در شرایط هوای گرم خارج مخصوصا در زمان پیک مصرف برق می‌باشد. نظر به اینکه سیال حامل انتقال حرارت در ترانس (روغن مبدل) را نمی‌توان تغییر داد، بهبود کیفیت عملکرد این سیال می‌تواند کمک شایانی به بازده ترانس در شرایط بحرانی نماید. در این تحقیق تلاش شده است با استفاده از نانوذرات دارای خواص حرارتی بسیار بالاتر از سیال پایه، کیفیت حرارتی و رفتار انتقال حرارتی سیال پایه را بهبود بخشیم تا در زمان پیک مصرف برق در فصول گرم سال کمتر با مشکلاتی همچون از رده خارج شدن ترانس‌ها مواجه شویم. در چنین شرایطی لازم است خواص الکتریکی روغن نیز مورد توجه و بررسی قرار گیرد.

۳-۱- روش سنتز نانوسیال

تهیه نانوسیال اولین قدم کلیدی در کاربردی کردن این مفهوم برای تغییر راندمان انتقال حرارت می‌باشد. تهیه نانوسیال را که از طریق افزودن نانوذرات به سیال پایه صورت می‌گیرد نباید مانند یک اختلاط ساده جامد - مایع در نظر گرفت زیرا تهیه نانوسیال مستلزم ایجاد شرایط خاص و ویژه ای برای پایدار و یکنواخت بودن سوسپانسیون، عدم تغییر ماهیت شیمیایی سیال، و کلوخه نشدن ذرات است [۲۱]. برای رسیدن به چنین خواص ویژه ای از راهکارهای مختلفی استفاده می‌شود. راه کارهایی همچون تغییر pH محلول سوسپانسیون، استفاده از مواد فعال در سطح[3]، استفاده از مواد پراکنده ساز، استفاده از مواد

[3] surfactants

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.4.2]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.39]

ضد انعقاد، استفاده از ارتعاشات و غیره روش های متداول موثر در ساخت نانوسیال هستند [۱۴، 22]. در این تحقیق با مخلوط کردن نانوذرات از پیش آماده شده در سیال پایه در غلظت‌های مورد نظر، نانوسیال آماده شده است. جهت جلوگیری از کلوخه شدن نانوذرات از ماده فعال اسید اُلیک و امواج مافوق صوت استفاده شده است.

اولین گام کلیدی برای محاسبات انتقال حرارتی دانستن خواص فیزیکی (هدایت حرارتی، گرانروی، چگالی و گرمای ویژه) سیال کاری می‌باشد. تاکنون روش‌های تجربی و تئوری بسیاری برای محاسبه خواص فیزیکی نانوسیالات ارائه شده است. اما مشکل اصلی آن است که هر کدام از این روابط تحت شرایط خاصی صورت پذیرفته و جامع و کامل نمی‌باشند. بنابراین انجام آزمایشات تجربی جهت بدست آوردن نتایج صحیح و کاربردی الزامی می‌باشد. پس از بدست آوردن مقادیر خواص فیزیکی می‌توان با خطای قابل صرف‌نظر، سوسپانسیون را به مانند یک سیال تک فاز در نظر گرفت و بررسی انتقال حرارتی را انجام داد. جهت کنترل پایداری نانوسیال از عکس‌های TEM استفاده شده است.

برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوسیال، رایج‌ترین روش، روش KD_2 می‌باشد. این دستگاه‌ها دارای سوزن[4] مخصوصی می‌باشند که بطور همزمان بعنوان فرستنده حرارتی و ترموکوپل عمل نموده و با استفاده از روابط خاص انتقال حرارتی به محاسبه میزان هدایت حرارتی سیال و یا سوسپانسیون می پردازد. در این تحقیق آزمایشات مربوط به خواص روغنی، شامل آزمایش حرارتی و آزمایش شکست الکتریکی می باشد.

۴- روش تحقیق

روش تحقیق آزمایشگاهی بوده و به بخش های آزمایشات روغن و تهیه نانوسیالات تقسیم می شود.

۴-۱- آزمایشات روغن:

روغن ترانس مورد استفاده در این تحقیق روغن نیناس درجه عالی محصول کشور سوئد می باشد. برای تست های آزمایشگاهی سه کلاس روغن نیناس مورد استفاده قرار گرفت.

۱. روغن شماره ۱: روغن موجود در بشکه های پلمپ شده ۲۲۰ لیتری
۲. روغن شماره ۲: روغن بشکه بعد از تصفیه اولیه و قبل از ورود به ترانس
۳. روغن شماره ۳: روغن کارکرده ترانس

معمولاً روغن موجود در بشکه های پلمپ شده را قبل از استفاده با روش گرم کردن تصفیه و رطوبت گیری می شوند. آنچه بسیار اهمیت دارد آن است که روغن ترانس باید بتواند هر سه شرط عایقی و حرارتی و محافظت از اجزای داخلی را ارضا نماید. یک روغن ترانس با هر ترکیب فیزیکی و یا شیمیایی، هر چقدر دارای خاصیت حرارتی مطلوبی باشد اگر نتواند شرایط عایقی مورد نیاز ترانس را ارضا کند، بکار نمی آید. جهت رسیدن به این مقصود آزمایش دی الکتریک روغن در دستور کار قرار گرفت. دستگاه آزمایش دی الکتریک روغن یک SetUp آزمایشگاهی است که در آن دو گوی با فاصله مشخص درون محفظه ای مملو از روغن قرار دارند. با شروع بکار دستگاه، ولتاژ در سیستم بالا می رود تا جایی که بین این دو گوی توسط واسطه روغن ارتباط جریانی ایجاد گردد. این مقدار ولتاژ شاخص تحمل روغن در برابر افزایش بار ولتاژی سیستم است. برابر با استانداردهای ترانس های فوق توزیع و انتقال حداقل مقدار شاخص دی الکتریک نباید از حداقل ۵۰ کیلو ولت کمتر باشد.

طبق استاندارد های مختلف روی یک روغن نمونه، این تست باید ۶ بار با فاصله زمانی مشخصی انجام پذیرد. میانگین نتایج تست های ۲ تا ۶، برابر با شاخص دی الکتریک روغن نمونه (ولتاژ شکست) خواهد بود. در این آزمایشات از استاندارد IEC-60156 استفاده شده که طبق این استاندارد فاصله دو گوی از هم ۲۵ mm و حداقل زمانی بین تست ها ۳ دقیقه می باشد. تصویر دستگاه آزمایش دی الکتریک در "شکل ۲" نشان داده شده است.

شکل (۲): دستگاه آزمایش دی الکتریک

نمونه های آزمایشگاهی شامل روغن های ترانس بدون نانوذرات و روغن های حاوی نانوذرات می باشند.

۴-۲- تهیه نانوسیالات:

در این تحقیق با مخلوط کردن نانوذرات از پیش آماده شده در سیال پایه در غلظت‌های مورد نظر نانوسیال آماده شده است. سپس مخلوط با کمک کپسول‌های مغناطیسی بر روی استیرر[5] هم زده می شود (شکل شماره ۳). استیرر دستگاهی است که با چرخاندن کپسول مغناطیسی که درون ظرف حاوی سیال نمونه قرار گرفته است موجبات اختلاط مکانیکی نمونه سیالی را فراهم می آورد.

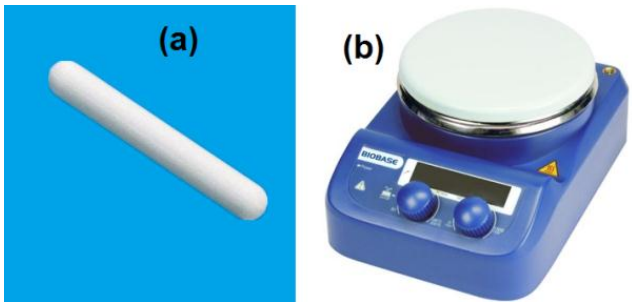
[4] probe

[5] Stirrer

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.4.2]

[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.39]



شکل (۳): (a) کپسول مغناطیسی و (b) استیرر

مخلوط به مدت ۳۰ دقیقه هم زده می شود. سپس باید مخلوط را در همزن ما فوق صوت[6] قرار داد. مطابق "شکل ۴ این همزن یک پروپ عمودی دارد که با استفاده از کابل رابط به دستگاه فرمان دهنده متصل است.

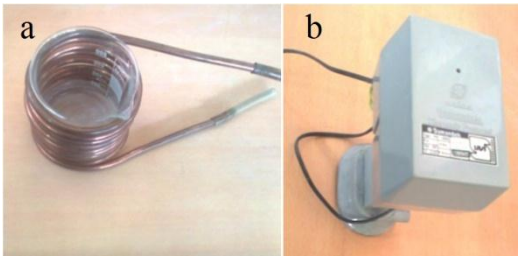
شکل (۴): آلتراسونیک پروپ دار

با شروع بکار این دستگاه امواج مافوق صوت توسط پروپ به درون نمونه سیال ساتع می شود و موجب از هم گسیختن ذرات کلوخه شده می گردد. این سیستم دو عیب عمده دارد:

الف) سر و صدای دستگاه بسیار گوشخراش و آزار دهنده است.

ب) دمای سیال نمونه را به سرعت و به مقدار زیادی افزایش می دهد.

در نانوسیالات آبی (با سیال پایه آب) که رطوبت محیط اهمیت خاصی ندارد ظرف آزمایش را در یک تشت مملو از آب سرد قرار می دهند تا با کاهش دما مانع از تاثیرات مخربی همچون اثر پسماند گرمایی ناشی از افزایش دما در سیال نمونه شود. در استفاده از روغن ترانس بعلت اینکه روغن شدیدا به محتوی رطوبت حساس است، این روش کاربرد ندارد. همانطور که در "شکل ۵" مشاهده می شود، جهت حل این مشکل از یک بِشِر شیشه ای بعنوان ظرف حاوی نمونه سیال که پروپ دستگاه مافوق صوت نیز در آن قرار می گیرد استفاده شد. حول این بشر با استفاده از لوله مسی مطابق با "شکل ۵a" پوشانده شد. ورودی و خروجی این لوله مسی توسط لوله پلاستیکی انعطاف پذیر به مخزن حاوی آب و یخ ارتباط می یابد. یک پمپ کوچک مخصوص کولر آبی مطابق با "شکل ۵b"، آب را در این سیستم به گردش در می آورد. وظیفه این مبدل کاهش دمای سیال درون بشر بوده است.



شکل (۵): (a) پمپ گرداننده سیال خنک کننده، (b) مبدل حرارتی

جهت کاهش اثرات صوتی دستگاه، کل دستگاه آزمایش درون یک محفظه دو جداره UPVC به ابعاد داخلی ۰/۵۵×۰/۵۵× ۰/۶۵ متر قرار گرفت (شکل ۶).

شکل (۶): محفظه UPVC

سپس جهت یکنواختی بهتر نانوسیال، پس از همزن مکانیکی و دستگاه مافوق‌صوت، محتوی نانوسیال درون ظروف با درب کاملا بسته ریخته و درون حمام مافوق صوت[7] قرار داده شد (شکل ۷). حمام مافوق‌صوت دستگاهی است دارای مخزن آب که که ظرف آزمایش درون مخزن آب قرار می‌گیرد و امواج مافوق صوت از طریق آب به ظرف آزمایش انتقال می‌یابد. ظرف آزمایش به مدت ۳۰ دقیقه درون حمام آلتراسونیک تحت اثر امواج قرار گرفت. دستگاه حمام مافوق صوت نسبت به همزن مافوق صوت سطح سر و صدای[8] پایین تری دارد.

شکل (۷): حمام مافوق صوت

با استفاده از بطری تیره شیشه ای بصورت دربسته دیگر رطوبت محیط روی سیال نمونه تاثیر نمی گذاشت. شیشه های حاوی روغن به رنگ تیره

[6] Ultrasonic

[7] Ultrasonic bath

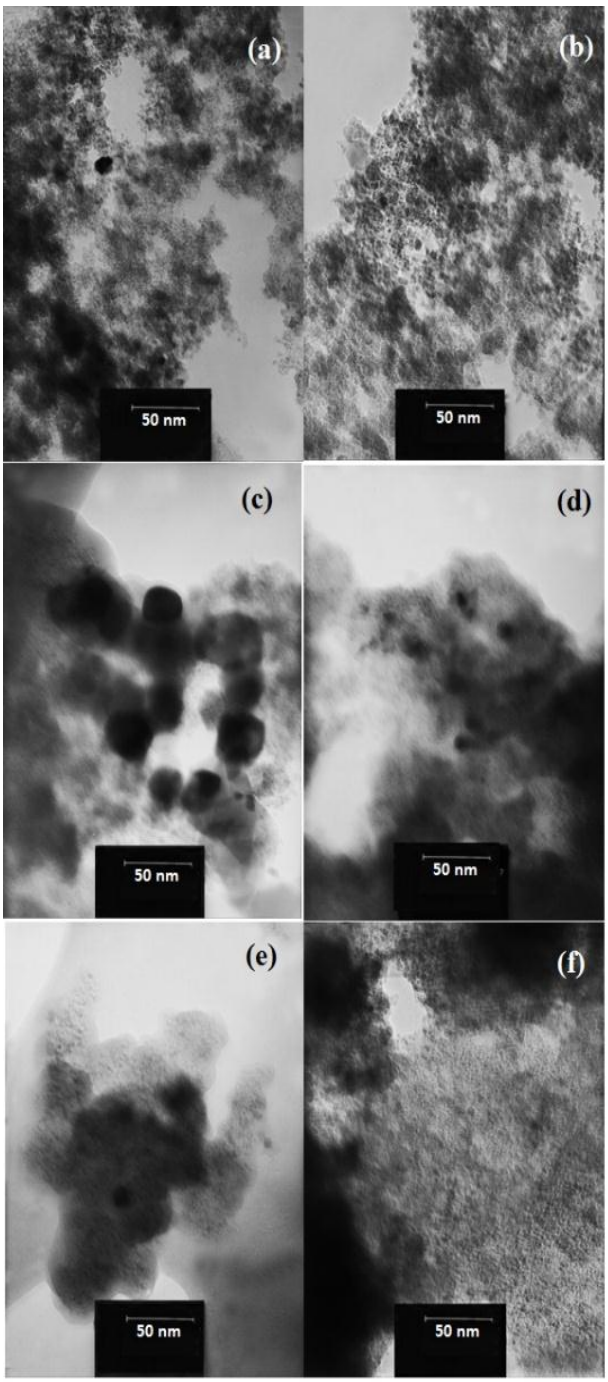
[8] Noise

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.4.2]

[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.39]

بوده و دور از نور خورشید نگه داشته می شد. شیشه های رنگ روشن نیز با استفاده از ورق آلومینیوم پوشش داده می شد. نانوسیالات روغنی پس از آماده سازی، جهت دو تست حرارتی و دی الکتریک مورد استفاده قرار گرفت. نمونه های نانوسیال آماده شده با سیال پایه روغن شماره ۳ تحت عکسبرداری TEM قرار گرفتند که نتایج این عکسبرداری نشان از توزیع مناسب نانوذرات و عدم کلوخه شدن آنها بوده است (شکل ۸).

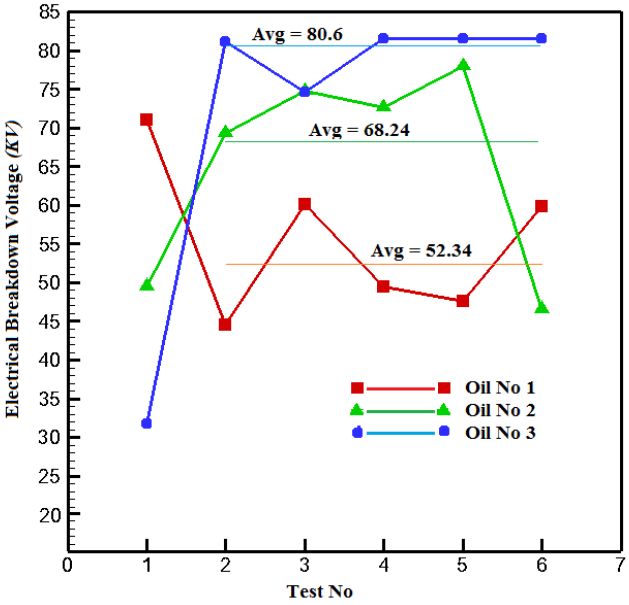


شکل (۸): تصویر TEM از نانوسیالات حاوی (a) سیلیکون کاربید، (b) نیترید آلومینیوم، (c) الماسواره، (d) اکسید آلومینیوم، (e) اکسید سیلیسیوم، (f) اکسید تیتانیوم

۵- نتایج و بحث:

۵-۱- آزمایشات دی الکتریک:

آزمایشات دی الکتریک جهت آزمایش ولتاژ شکست روغن خالص شماره ۱، ۲ و ۳ صورت پذیرفت که نتایج در "شکل ۹" نشان داده شده است.



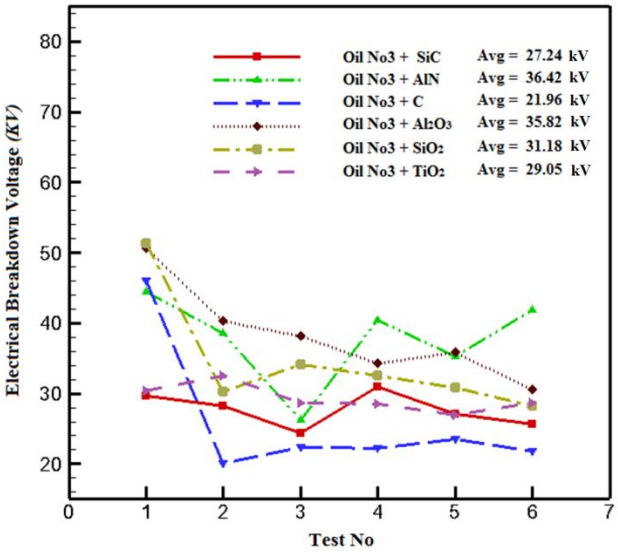
شکل (۹): نتایج شکست الکتریکی روغن خالص شماره ۱، ۲ و ۳

در بررسی نتایج طبق استاندارد میانگین مرحله ۲ تا ۶ را در نظر می گیرند. این مقدار برای روغن خالص شماره ۱ عدد ۵۲/۳۴ کیلو ولت بدست آمده است. نتیجه میانگین مرحله ۲ تا ۶ آزمایش روغن شماره ۲ مقدار ۶۸/۲۴ کیلو ولت بوده که نسبت به روغن خالص شماره ۱ رشد ۶/۲ درصدی داشته است. نتیجه میانگین مرحله ۲ تا ۶ آزمایش روغن شماره ۳ نیز با مقدار ۸۰/۶ کیلو ولت، رشد ۲۴/۶ درصدی ولتاژ شکست نسبت به روغن شماره ۱ و رشد ۱۷/۳ درصدی نسبت به روغن شماره ۲ را نشان داد که علت آن را می توان به حذف رطوبت موجود در روغن بعلت گرمای موجود در ترانس برق نسبت داد. در ادامه شش نوع نانوذره انتخاب شده با روغن ترانس شماره ۳ که در آزمایش دی الکتریک بهترین نتایج را نشان داده است، بصورت نانوسیال سنتز و آماده شدند و مورد آزمایش دی الکتریک قرار گرفتند. این نانوسیالات ۳۰ دقیقه تحت امواج مافوق صوت قرار داشته اند. نتایج آزمایشات نانوذرات با درصد جرمی مختلف در سیال پایه روغن ترانس شماره ۳ و همچنین میانگین ولتاژ شکست مرحله ۲ تا ۶ در "شکل ۱۰" نشان داده شده است.

در آزمایش دی الکتریک نانوسیال حاوی روغن خالص شماره ۳ و نانوذرات سلیکون کاربید شاهد کاهش بسیار زیاد ولتاژ شکست تا حدود ۲۷/۲۴ کیلو ولت بودیم. در آزمایش دی الکتریک نانوسیال حاوی روغن خالص شماره ۳ و نانوذرات نیترید آلومینیوم نیز کاهش بسیار زیاد ولتاژ شکست تا مقدار ۳۶/۴۲ کیلو ولت را شاهد بوده ایم. با بررسی علل این رویداد تنها دلیل واضح، وجود ناخالصی فیزیکی معلق بصورت نانوذره در روغن خالص بوده که تعادل الکتریکی روغن را به هم زده است. آزمایش دی الکتریک نانوسیال حاوی روغن خالص

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.4.2]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.39]

شماره ۳ به همراه نانوذرات الماس کاهش چشمگیری در ولتاژ شکست نسبت به روغن خالص نشان می دهد.



شکل (۱۰): آزمایشات نانوذرات ۱٪ جرمی در سیال پایه روغن ترانس شماره ۳ و میانگین ولتاژ شکست مرحله ۲ تا ۶

آزمایش دی الکتریک نانوسیال حاوی اکسید آلومینیوم شاهد ۵۵/۲۶ درصد کاهش نسبت به روغن خالص شماره ۳ نشان بودیم. نانوسیال حاوی نانوذرات اکسید سلیسیوم نیز نسبت به روغن‌های شماره ۱، ۲ و ۳ به ترتیب کاهش ولتاژ شکست به میزان ۴۰، ۵۴/۳ و ۶۱ درصد را نشان می دهد.

آخرین آزمایش نیز مربوط به ولتاژ شکست نانوسیال حاوی روغن خالص شماره ۳ به همراه نانوذرات اکسید تیتانیوم بوده است که نتایج آن کاهش ۶۳/۷ درصدی نسبت به روغن خالص شماره ۳ نشان داد. نتایجی که از این آزمایشات بدست می آید همگی نشان دهنده کاهش شدید میزان ولتاژ شکست در اثر افزودن نانوذرات در سیال خالص پایه می باشد که این نکته منفی، استفاده از نانوسیالات روغنی را بجای روغن خالص ترانس دچار مشکل می نماید.

۵-۲- آزمایشات حرارتی:

اندازه گیری هدایت حرارتی مواد با استفاده از دستگاه KD_2 صورت پذیرفت (شکل ۱۱). در این روش پروپ سوزنی متصل به دستگاه فرمان دهنده، درون نمونه آزمایش قرار می گیرد. پس از ایجاد شرایط پایداری محیط، به دستگاه فرمان شروع بکار می دهیم. پس از طی مدتی کمتر از یک دقیقه نتایج هدایت حرارتی به همراه خطای اندازه گیری و دمای محیط آزمایش ارائه می گردد. پیش از آزمایش، دستگاه توسط نمونه کارخانه ای همراه دستگاه کالیبره شد.

جهت بررسی تاثیر افزایش دما روی نمونه های آزمایش این سری تست ها در دو دمای ۲۵ درجه و ۵۵ درجه سانتیگراد صورت گرفت. حرارت مورد نیاز برای دمای ۵۵ درجه توسط یک آون ایجاد شد. نتایج بررسی هدایت حرارتی نمونه های نانوسیال با روغن ترانس شماره ۳ که تحت آزمایش قرار گرفتند به شرح "جدول ۲" می باشد.

شکل (۱۱): تصویر دستگاه KD_2

در برخی از این نمونه ها تاثیر مواد فعال در سطح (با توجه درصد جرمی نانوذرات) نیز بررسی شده است. در این جدول، نوع نمونه های آزمایش و نتایج اندازه گیری هدایت حرارتی با دستگاه KD_2 در دو دمای ۲۵ و ۵۵ درجه سانتیگراد و همچنین درصد افزایش هدایت حرارتی نمونه ها نسبت به نمونه خالص اولیه، نشان داده شده است.

در "شکل ۱۲" نمودار تغییرات هدایت حرارتی نمونه ها با افزایش دما قابل مشاهده است.

نتایج آزمایشات نشان داد که به ترتیب نانوسیال حاوی نانوذرات الماس ۰/۴ درصد جرمی در دمای ۵۵ درجه سانتیگراد بهترین و نانوسیال حاوی نانوذرات اکسید سیلیسیم ۰/۲ درصد جرمی در دمای ۵۵ درجه سانتیگراد نامطلوب ترین نتایج حرارتی را از خود نشان دادند. در بهترین حالت هدایت حرارتی ۸۳ درصد افزایش یافته است. استفاده از مواد فعال در سطح با اینکه پراکندگی نانوذرات را افزایش می دهد، اثر نامطلوبی روی هدایت حرارتی سوسپانسیون خواهد داشت. بصورت کلی آزمایشات حرارتی نشان از بهبود شرایط انتقال حرارت روغن با استفاده از نانوذرات الماس داده است.

۶- نتجه گیری:

این تحقیق با توجه به ضرورت بررسی راهکارهای ارتقای شرایط عملکردی روغن ترانسفورماتور در شرایط آزمایشگاهی صورت پذیرفت. در این تحقیق از روغن ترانس کارکرده فاقد رطوبت که دارای بالاترین ضریب شکست الکتریکی بود استفاده شد. با استفاده از شش نوع نانو ذره در غلظت های جرمی مختلف، نمونه های گوناگون نانوسیال در دو دمای ۲۵ و ۵۵ درجه سانتیگراد آماده و مورد آزمایش قرار گرفت. آزمایشات شکست الکتریکی و آزمایشات هدایت حرارتی در دستور کار این آزمایش بوده است. نتایج این تحقیق عبارت است از:

۱. استفاده از نانوذرات بصورت مخلوط در روغن ترانسفورماتور باعث کاهش شدید ولتاژ شکست روغن نسبت به ولتاژ شکست روغن خالص شده است که این میزان کاهش در نانوسیال روغنی حاوی

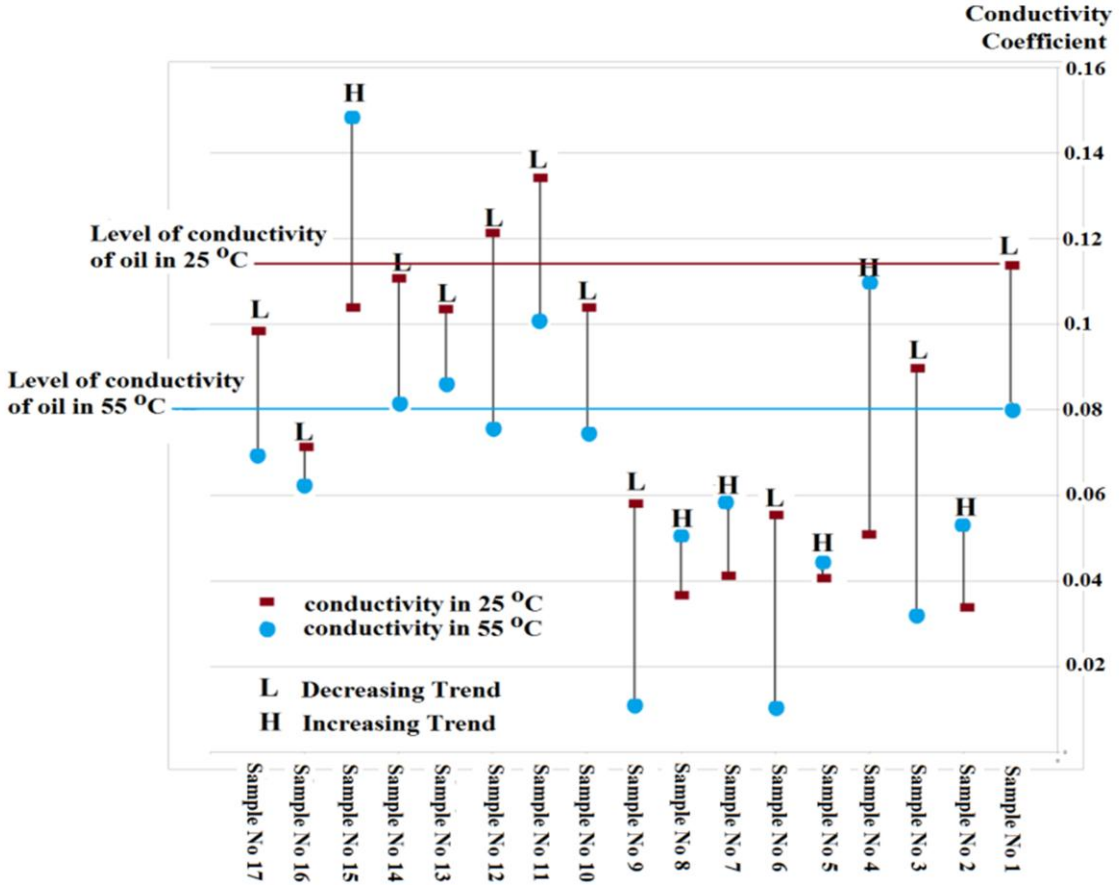
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.4.2]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.39]

اکسید تیتانیوم بیشتر بوده است. البته ترکیب نانوذرات ALN تغییرات نامنظمی را نشان داده است.

۲. نانوسیال حاوی نانوذرات الماس ۰/۴ درصد جرمی در دمای ۵۵ درجه سانتیگراد بهترین میزان افزایش هدایت حرارتی به میزان ۸۳٪ نسبت به سیال پایه را از خود نشان داد.

۳. نانوسیال حاوی نانوذرات اکسید سیلیسیم ۰/۲ درصد جرمی در دمای ۵۵ درجه سانتیگراد نامطلوب ترین نتیجه حرارتی را از خود نشان داد.

۴. استفاده از مواد فعال در سطح اثر نامطلوبی روی هدایت حرارتی نانوسیال دارد.



شکل (۱۲): تغییرات هدایت حرارتی نمونه ها با افزایش دما

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.4.2]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.39]

جدول (۲): نتایج هدایت حرارتی نانوسیالات نمونه

شماره نمونه	شماره تست	ماده مورد استفاده	دما (°C)	R^2 دقت	هدایت حرارتی (W/m°C)	افزایش نسبت به سیال پایه (٪)
۱	۱	روغن ترانس	۲۵	۰/۹۹۸	۰/۱۱۴۱	–
	۲		۵۵	۰/۹۹۲	۰/۰۸۰۵	–
۲	۳	روغن ترانس + ماده فعال در سطح اسید اُلیک ۰/۷۵ گرم	۲۵	۰/۹۹۷	۰/۰۳۳۸	−۷۰
	۴		۵۵	۰/۸۷۲	۰/۰۵۲۵	−۳۵
۳	۵	روغن ترانس + نانوذرات اکسید آلومینیوم ۰/۲ درصد جرمی+ماده فعال	۲۵	۰/۹۹۸	۰/۰۸۹۷	−۲۱
	۶	در سطح اسید اُلیک ۰/۲۵ گرم	۵۵	۰/۹۸۹	۰/۰۳۳۱	−۵۹
۴	۷	روغن ترانس + نانوذرات اکسید آلومینیوم ۰/۵ درصد جرمی+ماده فعال	۲۵	۰/۹۹۸	۰/۰۵۱۱	−۵۵
	۸	در سطح اسید اُلیک ۰/۷۵ گرم	۵۵	۰/۹۸۳	۰/۱۰۹۳	+۳۵
۵	۹	روغن ترانس + نانوذرات اکسید آلومینیوم ۱ درصد جرمی+ماده فعال در	۲۵	۰/۹۹۸	۰/۰۴۱۰	−۶۴
	۱۰	سطح اسید اُلیک ۱/۲۵ گرم	۵۵	۰/۹۸۰	۰/۰۴۲۶	−۲۹
۶	۱۱	روغن ترانس + نانوذرات اکسید سلیسیوم ۰/۱ درصد جرمی	۲۵	۰/۹۹۸	۰/۰۵۵۴	−۶۷
	۱۲		۵۵	۰/۹۸۵	۰/۰۱۱۰	−۳۹
۷	۱۳	روغن ترانس + نانوذرات اکسید سلیسیوم ۰/۲ درصد جرمی	۲۵	۰/۹۹۷	۰/۰۴۰۹	−۴۹
	۱۴		۵۵	۰/۹۶۹	۰/۰۵۶۸	−۸۵
۸	۱۵	روغن ترانس + نانوذرات اکسید تیتانیوم ۰/۵ درصد جرمی+ماده فعال در	۲۵	۰/۹۹۸	۰/۰۳۷۱	−۸
	۱۶	سطح اسید اُلیک ۰/۷۵ گرم	۵۵	۰/۹۸۳	۰/۰۴۹۳	−۶
۹	۱۷	روغن ترانس + نانوذرات اکسید تیتانیوم ۱ درصد جرمی+ماده فعال در	۲۵	۰/۹۹۹	۰/۰۵۸۲	+۱۸
	۱۸	سطح اسید اُلیک ۱/۲۵ گرم	۵۵	۰/۹۸۸	۰/۰۱۲۰	+۲۷
۱۰	۱۹	روغن ترانس + نانوذرات الماس ۰/۱ درصد جرمی	۲۵	۰/۹۹۷	۰/۱۰۴۳	+۶
	۲۰		۵۵	۰/۹۹۸	۰/۰۷۵۳	−۵
۱۱	۲۱	روغن ترانس + نانوذرات الماس ۰/۲ درصد جرمی	۲۵	۰/۹۹۷	۰/۱۳۴۴	−۹
	۲۲		۵۵	۰/۹۷۳	۰/۱۰۲۵	+۸
۱۲	۲۳	روغن ترانس + نانوذرات الماس ۰/۳ درصد جرمی	۲۵	۰/۹۹۸	۰/۱۲۱۴	−۳
	۲۴		۵۵	۰/۹۷۸	۰/۰۷۶۷	+۳
۱۳	۲۵	روغن ترانس + نانوذرات الماس ۰/۴ درصد جرمی	۲۵	۰/۹۹۸	۰/۱۰۴۰	−۹
	۲۶		۵۵	۰/۹۹۵	۰/۰۸۷۲	+۸۳
۱۴	۲۷	روغن ترانس + نانوذرات الماس ۰/۱ درصد جرمی + ماده فعال در سطح	۲۵	۰/۹۹۹	۰/۱۱۰۷	−۳۸
	۲۸	اسید اُلیک ۰/۲۵ گرم	۵۵	۰/۹۹۵	۰/۰۸۳۰	−۲۲
۱۵	۲۹	روغن ترانس + نانوذرات الماس ۰/۲ درصد جرمی + ماده فعال در سطح	۲۵	۰/۹۹۸	۰/۱۰۴۰	−۱۴
	۳۰	اسید اُلیک ۱/۲۵ گرم	۵۵	۰/۹۷۲	۰/۱۴۷۱	−۱۳
۱۶	۳۱	روغن ترانس + نانوذرات سلیکون کاربید ۱ درصد جرمی	۲۵	۰/۹۸۷	۰/۰۷۱۰	−۳۸
	۳۲		۵۵	۰/۹۸۸	۰/۰۶۲۹	−۲۲
۱۷	۳۳	روغن ترانس + نانوذرات نیترید آلومینیوم ۱ درصد جرمی	۲۵	۰/۹۹۶	۰/۰۹۸۴	−۱۴
	۳۴		۵۵	۰/۹۹۳	۰/۰۷۰۰	−۱۳

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.4.2]

[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.39]

مراجع

[1] Hosseini, S, sh., Farhadi, M., Sedighi, K., "*Experimental investigation of a solar desalination system using twisted tape and wire coil inside of spiral heat exchanger*", Desalination, Vol. 420, No. 15, 2017.

[2] Hosseini, S, sh., Shahrjerdi, A., Vazifeshenas, Y., *"A Review of Relations for Physical Properties of Nanofluids"* , Australian Journal of Basic and Applied Sciences, Vol. 5, No. 10, 2011.

[۳] اشگرف، حامد.، افرند، مسعود.، همت اسفه، محمد.، **"بررسی آزمایشگاهی اثر دما و کسر حجمی نانوذرات بر لزجت نانوسیال هیبریدی غیر نیوتنی "** نشریه علمی پژوهشی مکانیک تربیت مدرس، دوره ۱۶، شماره ۳، صفحه ۹۸ تا ۱۰۴، سال ۱۳۹۵

[۴] کریمی، سمانه.، قاسمی، بهزاد.، **" انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال آب – آلومینا در محفظه L شکل مورب"** نشریه علمی پژوهشی مکانیک تربیت مدرس، دوره ۱۳، شماره ۲، صفحه ۱۳۳ تا ۱۴۴، سال ۱۳۹۲

[۵] شهریاری، علیرضا.، **" مطالعه تاثیر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال در محفظه موجی با توزیع دمای غیر یکنواخت"** نشریه علمی پژوهشی مکانیک تربیت مدرس، دوره ۱۷، شماره ۴، صفحه ۲۹ تا ۴۰، سال ۱۳۹۶

[6] Koca, H. D., Doganay, S., Turgut, A., Tavman, I. H., Saidur, R., Mahbubul, I. M., *"Effect of particle size on the viscosity of nanofluids: A review"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 82, No. 1, 2018.

[7] Kumar, D. D., Arasu, A. V., *"A comprehensive review of preparation, characterization, properties and stability of hybrid nanofluids"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 81, No. 2, 2018.

[۸] شجاعی فرد، محمد حسن.، خلخالی، ابوالفضل.، زارع، جواد.، **" بهینه سازی چند هدفی عملکرد گرمایی لوله حرارتی هنگام استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم"** نشریه علمی پژوهشی مکانیک تربیت مدرس، دوره ۱۴، شماره ۱، صفحه ۱۵۸ تا ۱۶۷، سال ۱۳۹۳

[۹] سلیمی گچویی، محمد.، پیغمبرزاده، سید محسن.، هاشم آبادی، سید حسن.، چعبی، علیرضا.، **" بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آبی Al_2O_3 در میکرومبدل حرارتی "** نشریه علمی پژوهشی مکانیک تربیت مدرس، دوره ۱۵، شماره ۲، صفحه ۲۷۰ تا ۲۸۰، سال ۱۳۹۴

[10] Gupta, N. K., Tiwari, A. K., Ghosh, S. K., "*Heat transfer mechanisms in heat pipes using nanofluids – A review*", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 90, No. 1, 2018.

[۱۱] حسینی، سید شرف الدین.، فرهادی، موسی.، صدیقی، کورش.، **" مطالعه آزمایشگاهی سیستم آب شیرین کن خورشیدی با استفاده از PCM و متلاطم ساز های جریان"** نشریه علمی پژوهشی مکانیک تربیت مدرس، دوره ۱۷، شماره ۶، صفحه ۱۱۷ تا ۱۲۷، سال ۱۳۹۶

[12] Hosseini, S, sh., Adam, N, M., Azmi, Z., Shahrjerdi, A., "*A Model to Predict the Thermal Difusivity of Aqueous Nanofluids*" , Australian Journal of Basic and Applied Sciences, Vol. 5, No. 9, 2011.

[13] Yazid, M. W., Chesidik, N. A., Yahya, W. J., *"Heat and mass transfer characteristics of carbon nanotube nanofluids: A review"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 80, No. 1, 2017.

[۱۴] آقایی، علیرضا.، خراسانی زاده، حسین.، شیخ زاده، قنبر علی.، **" اندازه‌گیری آزمایشگاهی لزجت دینامیکی نانوسیال هیبریدی روغن روانکار موتور- نانولوله‌کربنی چند جداره- اکسیدمس و ارائه نتایج به‌صورت یک رابطه کاربردی "** نشریه علمی پژوهشی مکانیک تربیت مدرس، دوره ۱۶، شماره ۱۲، صفحه ۵۱۸ تا ۵۲۴، سال ۱۳۹۵

[۱۵] نفیسی، حامد.، عسکریان ابیانه، حسین.، عابدی، مهرداد.، **" مدلسازی احتمالی میزان کاهش عمر ترانسفورماتورهای توزیع با در نظر گرفتن نفوذ خودروهای اتصال الکتریکی هایبریدی"**، نشریه علمی پژوهشی کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران، دوره سوم، شماره پنجم، صفحه ۱ تا ۷، ۱۳۹۳

[16] Kaur, N., Chudasama, B., *"Effect of thermal aging on stability of transformer oil based temperature sensitive magnetic fluids"*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 451, No. 1, 32018.

[۱۷] نفیسی، حامد.، عابدی، مهرداد.، قره پتیان، گئورگ، **" مکان یابی تخلیه جزئی با استفاده از مدل مشروح ترانسفرماتورها به کمک شبکه عصبی FAM و بیزین"**، نشریه علمی پژوهشی کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران، دوره اول، شماره اول، صفحه ۴۶ تا ۵۶، ۱۳۹۱

[18] Najar, S., Tissier, J. F., Cauet, S., Etien, E., *"Improving thermal model for oil temperature estimation in power distribution transformers"*, Applied Thermal Engineering, Vol. 119, No. 1, 2017.

[19] Ghani, S., Muhamad, N. A., Noorden, Z. A., Zainuddin, H., Bakar, N. A., Talib, M. A., *"Methods for improving the workability of natural ester insulating oils in power transformer applications: A review"*, Electric Power Systems Research, in press, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.10.008, 2017.

[20] "*Properties behind effective Transformer Oil Cooling*", Transformer – life – management conference, Nynas Company, P 14, 2007

[۲۱] اسدی، علی اکبر.، هیهات، محمد مهدی.، **"بررسی تاثیر استفاده از نانوسیال درون مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله با اندازه‌های مختلف"** نشریه علمی پژوهشی مکانیک تربیت مدرس، دوره ۱۷، شماره ۳، صفحه ۴۵۵ تا ۴۵۸، سال ۱۳۹۶

[22] Bhattad, A., Sarkar, J., Ghosh, P., *"Improving the performance of refrigeration systems by using nanofluids: A comprehensive review"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 82, No. 3, 2018.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.4.2]

[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.39]