

نانوسیالات در عایق ترانسفورماتور: سنتز، عملکرد و چشم اندازهای آینده

مجید میرزایی*، مجید رضائی آبادچی، علیمیراد رشیدی

گروه مواد غیرفلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

چکیده: با افزایش سطح ولتاژ در انتقال برق، نیاز به اطمینان از عملکرد عایقی ترانسفورماتورها به طور چشمگیری افزایش یافته است. روغن معدنی و کاغذ اجزای اصلی عایقی در ترانسفورماتورهای پر شده با روغن هستند. با توجه به افزایش نیاز به توسعه عایق های برتر، محققان متعددی مطالعاتی آزمایشی برای اثبات اثربخشی و توانمندی روغن ترانسفورماتورها انجام داده اند. برای ارتقاء سطح عایقی ترانسفورماتورهای با ولتاژ فوق العاده بالا و کاهش وزن و ابعاد آنها، افزایش هدایت عایقی روغن ترانسفورماتورها و سلولز آغشته به آن ضروری است. اخیراً، پروژه های نوآورانه در زمینه به کارگیری نانوفناوری در عایق های مایع ترانسفورماتورها اجرا شده که نتایج آن نشان دهنده بهبود چشمگیر در ویژگی های عایقی روغن ترانسفورماتورها بوده است. حوزه نانو سیالات مبتنی بر روغن ترانسفورماتور توجه زیادی را از هر دو جنبه نظری و کاربردی جلب کرده است. نانو سیالات می توانند به عنوان جایگزینی بالقوه برای روغن های معدنی در آینده نزدیک مورد استفاده قرار گیرند. این مقاله به بررسی مجموعه ای از پژوهش های انجام شده در این زمینه می پردازد که به سه بخش تقسیم می شود. بخش اول معطوف به تهیه نانو سیال است که شامل انواع مختلف نانو مواد و روش های سنتزی جهت تولید نانو سیالات پایدار و معلق می شود. در بخش دوم، عملکرد نانو سیالات با تمرکز بر ویژگی های حرارتی، الکتریکی و فیزیکوشیمیایی روغن ترانسفورماتور به طور دقیق بررسی و مقایسه می شود و در بخش سوم به مزایا و محدودیت های نانو سیالات پرداخته می شود. اهمیت این مقاله در گردآوری مطالعات پیشین، دسته بندی طبیعت تحقیقاتی و پیش بینی روندهای آینده نهفته است. همچنین چند توصیه برای تحقیقات و کاربردهای آتی نانو سیالات ارائه می شود.

واژگان کلیدی: ترانسفورماتور، روغن، نانوسیال، نانومواد.

mjmirzaei@nri.ac.ir

۱- مقدمه

در سامانه های الکتریکی شده است تا آنها بتوانند در شرایط سخت و غیرقابل پیش بینی دوام بیاورند. ترانسفورماتورها که وظیفه انتقال انرژی و تغییر سطوح ولتاژ را بر عهده دارند، از جمله مهم ترین اجزای شبکه الکتریکی هستند و خرابی آنها می تواند پیامدهای جدی به همراه داشته باشد. بسیاری از ترانسفورماتورهای فعال در نقاط مختلف جهان به پایان عمر پیش بینی شده خود نزدیک می شوند؛ از این رو، تمرکز محققان بر روی افزایش امنیت عملکردی این تجهیزات قرار گرفته است [۱].

برق به عنوان یک نیاز اساسی برای جامعه انسانی تلقی می شود و به طور کلی، زیرساخت اصلی برای رشد اقتصادی و رفاه اجتماعی محسوب می گردد. شبکه های هوشمند، کلان شهرها را به هم پیوند می دهند و پیشرفت های اجتماعی را با سامانه های اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی در راستای رشد جمعیت ترکیب می کنند. به همین دلیل، توسعه شبکه های ولتاژ بالا باعث افزایش تقاضا برای بهبود عملکرد و قابلیت اطمینان اجزای عایق



Transformer

- Mineral oils
- Silicone oil
- Vegetable oil
- Synthetic ester oil



Capacitor

- Synthetic hydrocarbons
- Vegetable oil
- Organic ester
- Ether



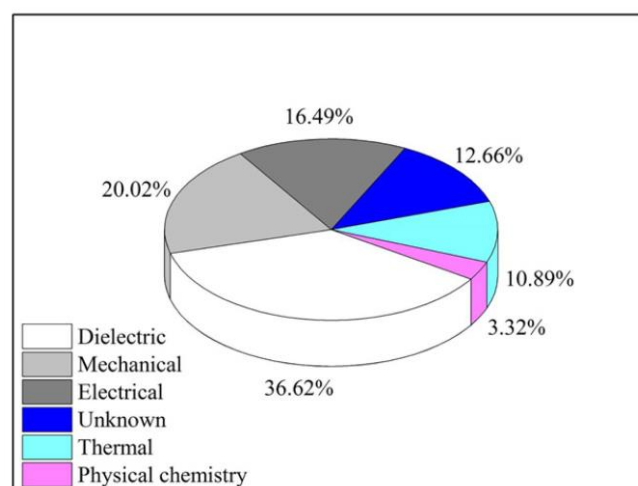
Miscellaneous (CB, Bushing, OLTC etc)

- Paraffin based high density hydrocarbons
- Mineral oil
- Synthetic ester
- Alkylbenzenes

شکل ۲. دسته‌بندی عایق مایع بر اساس کاربرد. انتخاب عایق مایع باید تحت تأثیر محدودیت‌های کاربرد و جنبه‌های تجاری قرار گیرد [۳]

ولتاژ نیز رو به افزایش است که نه تنها به افزایش وزن و حجم تجهیزات قدرت منجر می‌شود بلکه قابلیت اطمینان و امنیت آن‌ها را کاهش می‌دهد. سامانه‌های عایق روغن-کاغذ از ابزارهای معمول در دستگاه‌های الکتریکی به شمار می‌آیند، اما این سامانه‌ها با مشکلات پیری جدی، به خصوص پیری حرارتی ناشی از تنش‌های شدید حرارتی، الکتریکی و مکانیکی روبرو هستند [۴]. از دیرباز، روغن معدنی به دلیل ویژگی‌های حرارتی و عایقی خود به‌عنوان ماده‌ای برای عایق و خنک‌کننده در ترانسفورماتورها مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، روغن معدنی دارای ضعف افزایش خطر آتش‌سوزی یا انفجار در دستگاه‌های قدرت است و به دلیل وجود هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای که با معیارهای ایمنی و آتش‌سوزی سازگار نیستند. روغن معدنی که یک محصول فرعی از فرآورده‌های نفتی است، منبعی غیرپایدار و مضر برای محیط زیست محسوب می‌شود. روغن گیاهی که یک دی‌الکتریک مایع سازگار با محیط زیست است، به عنوان جایگزینی جذاب برای روغن معدنی قدیمی در تجهیزات الکتریکی مطرح شده است. با این وجود، برای پاسخ به تقاضای روزافزون برای ولتاژ بالا و اندازه‌های کوچک‌تر تجهیزات الکتریکی، توسعه روغن ترانسفورماتور با ویژگی‌های دی‌الکتریک و حرارتی برتر ضروری است [۵]. مفهوم نانو سیال^۴ (NF) اولین بار توسط چوی و همکاران در سال ۱۹۹۵ استفاده شد [۶]. نانو سیال به‌عنوان مایعی با ذرات نانو تعریف می‌شود که به طور همگن در چند درصد وزنی پراکنده (معلق)

مطالعات نشان داده‌اند که طول عمر ترانسفورماتورها به شدت به کیفیت سامانه عایق آن‌ها بستگی دارد و واحدهایی که به دلیل عایق ضعیف دچار مشکل می‌شوند، میانگین عمری حدود ۱۷/۸ سال دارند که تقریباً نصف عمر پیش‌بینی شده آن‌ها است [۲]. عمر و قابلیت اطمینان ترانسفورماتورها عمدتاً به کیفیت و ویژگی‌های مواد عایق وابسته است. شکل ۱ منابع اصلی خرابی ترانسفورماتورها را بر اساس ۹۶۴ مورد خرابی مهم نشان می‌دهد. بررسی‌های انجام‌شده در سال ۲۰۱۵ توسط شورای سامانه‌های الکتریکی بزرگ (CIGRE) نشانگر این است که اصلی‌ترین علت خرابی، نقص در سامانه عایق است.



شکل ۱. مهم‌ترین دلایل خرابی ترانسفورماتور [۳].

سامانه عایق کاغذ/ روغن معدنی^۲ (MO) به عنوان ماده اصلی در تجهیزات ولتاژ بالا مانند کابل‌ها، ترانسفورماتورها، خازن‌ها و دیگر تجهیزات، به دلیل مقاومت مکانیکی بالا و ویژگی‌های دی‌الکتریک برتر بسیار مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۲). با این حال، نیاز به اندازه کوچک‌تر، ظرفیت بالاتر و قابلیت اطمینان بیشتر از سوی صنعت برق، ویژگی‌های الکتریکی این سامانه عایقی معمولی را به چالش کشیده است.

در سامانه‌های عایق مبتنی بر MO/کاغذ، تفاوت در نفوذپذیری بین مایع (۲/۲) و جامد (بین ۳/۶ تا ۴/۵) همچنان چالشی اساسی تلقی می‌شود که می‌تواند طراحی فشرده تجهیزات ولتاژ بالا^۳ (HV) را محدود کند، زیرا عایق مایع تحت فشار بیشتری قرار دارد. با افزایش سریع زیرساخت‌های برق، ظرفیت انتقال و سطح

^۱ Council on Large Electric Systems

^۲ Mineral oil

^۳ High voltage

^۴ Nanofluid

خواص حرارتی، الکتریکی و شیمیایی روغن‌های عایق ناشی از افزودن نانوذرات است. برخی از این تاثیرات در جدول ۲ آمده است.

به طور کلی نانوسیالات می‌توانند عمر ترانسفورماتورها را افزایش دهند، اما میزان اثرگذاری آنها به نوع نانوذرات، درصد وزنی، سازگاری با روغن عایق و شرایط عملیاتی بستگی دارد. استفاده از نانوسیالات باید همراه با آزمایش‌های پایلوت و بررسی پایداری بلندمدت انجام شود.

جدول ۱. طول عمر تقریبی ترانسفورماتورها بر اساس نوع عایق بدون در نظر گرفتن نانوسیال

نوع عایق	طول عمر تقریبی (سال)
روغنی (روغن معدنی)	۳۰ تا ۵۰
استری (روغن طبیعی)	۲۰ تا ۴۰
خشک (رزینی - کلاس F)	۲۰ تا ۳۰
خشک (کلاس H - نوارهای Nomex)	۲۵ تا ۴۰
گازی (SF6)	۳۰ تا ۵۰

جدول ۲. تأثیر نانوسیالات بر افزایش عمر ترانسفورماتورها

عامل بهبود یافته	نقش در افزایش عمر
افزایش هدایت حرارتی	کاهش دمای کاری و جلوگیری از تخریب زود هنگام عایق
کاهش تخریب سلولز کاغذ عایقی	جلوگیری از کاهش استقامت دی‌الکتریک عایق
بهبود استقامت دی‌الکتریک روغن	کاهش خطر تخلیه جزئی و شکست عایقی
افزایش پایداری شیمیایی	کاهش اکسیداسیون و تشکیل لجن در روغن
کاهش نرخ تشکیل گازهای تخریبی	کاهش آسیب به سامانه و افزایش قابلیت اطمینان

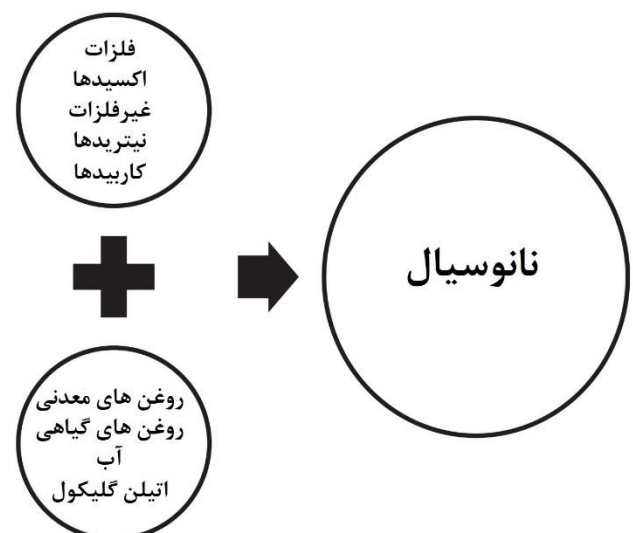
۲- مفاهیم نانو سیال

درک و دانش در زمینه انتقال حرارت در طراحی و تولید فرآیندهای متنوع صنعتی، تجاری و خانگی، مانند تولید و تبدیل انرژی، پردازش شیمیایی، تهویه مطبوع، صنعت نفت و گاز و خنک‌سازی دستگاه‌های الکتریکی، اهمیت زیادی دارد [۹، ۱۰].

هستند. در تحقیقات مربوط به عایق مایع ولتاژ بالا، اصطلاحات نانوسیال برای اشاره به ترکیبات روغن معدنی و نانوذرات برای اهداف خنک‌سازی و عایق‌سازی استفاده می‌شود. این نانوسیالات با داشتن هدایت حرارتی بهبود یافته نسبت به مایعات سنتی، جایگزین مناسبی برای تقویت عملکرد تجهیزات حرارتی به شمار می‌روند. با این حال، افزایش گرانش ناشی از افزودن نانوذرات می‌تواند نقصی در کاربرد نانوسیالات باشد. این مواد در زمینه‌های مختلفی مانند دستگاه‌های انرژی خورشیدی، سینک‌های حرارتی میکروکانال، رادیاتورهای خودرو و در پزشکی استفاده می‌شوند. کاربرد نانوفناوری در مهندسی ولتاژ بالا، عمدتاً بر تولید و شناسایی مواد نانودی‌الکتریک تمرکز دارد. از دهه ۱۹۹۰ تاکنون، نانودی‌الکتریک توجه گسترده‌ای به خود جلب کرده است و تحقیقات نشان داده‌اند که افزودن نانوذرات می‌تواند عمر عایق پلیمرهای جامد را افزایش دهد. این روش ممکن است برای عایق‌های مایع دی‌الکتریک نیز به کار رود تا ویژگی‌های حرارتی و عایق آن‌ها را بهبود ببخشد. پیش‌تر، ذرات میکرونی در مایعات معلق می‌شدند تا هدایت حرارتی ارتقاء یابد، اما نتایج نشان داد که این امر به کاهش استحکام شکست منجر می‌شود. نتایج نشان داده‌اند که تعلیق نانومواد به طور مؤثری عمر عایق پلیمرهای جامد را افزایش می‌دهد. یک روش مشابه برای بهبود ویژگی‌های حرارتی و عایق‌بندی عایق مایع مورد آزمایش قرار گرفت. نانومواد با هدف بهبود ویژگی‌های حرارتی و عایق‌بندی به روغن ترانسفورماتور اضافه شدند. نتایج تجربی NFs بهبود ویژگی‌های حرارتی [۵] و عایق‌بندی [۷] را نشان دادند. با این حال، در ابتدا از ذرات میکرونی سنتی برای بهبود هدایت حرارتی استفاده می‌شد. عیب اصلی مرتبط با این سیالات توسعه یافته، کاهش قدرت دی‌الکتریک بود [۸]. مشکل دیگری که به ذرات میکرونی مربوط می‌شود این است که آن‌ها تمایل دارند از حالت معلق خارج شوند. طول عمر تقریبی ترانسفورماتورها بر اساس نوع عایق بدون در نظر گرفتن نانوسیال در جدول ۱ آمده است. نکات مؤثر بر عمر ترانسفورماتور عبارتند از دما و تهویه مناسب، کیفیت عایق و روغن، بارگذاری استاندارد، حفظ و نگهداری منظم و میزان آلودگی و شرایط محیطی.

نانوسیالات عایقی می‌توانند تأثیر مثبتی بر عمر مفید ترانسفورماتورها داشته باشند. این تأثیر عمدتاً به دلیل بهبود

بهبود هدایت حرارتی این سامانه‌ها در مهندسی حرارتی به عنوان افزایش انتقال حرارت شناخته می‌شود. در دهه گذشته، روش‌های مختلفی برای افزایش انتقال حرارت معرفی شده‌اند. تحقیقات نشان داده که هدایت حرارتی جامدات چندین برابر بیشتر از مایعات سنتی نظیر روغن، آب یا گلیکول اتیلن است. تعلیق ذرات در یک سیال می‌تواند هدایت حرارتی مؤثر سیال را افزایش دهد. با پیشرفت نانو فناوری و به کارگیری آن برای بالا بردن کارایی دستگاه‌ها، مایعی نوآورانه به نام نانوسیال (NF) توسعه یافته است. این مایع با ترکیب مایع پایه‌ای با هدایت حرارتی کم و نانوذرات جامد با هدایت حرارتی بالا ساخته شده است. این ویژگی باعث شده تا نانوسیال نسبت به مایعات پایه، ویژگی‌های انتقال بهتری داشته باشند [۱۱، ۱۲]. NF شامل مایعی است که ذرات به اندازه نانومتر به طور یکنواخت در آن توزیع شده‌اند و یک محلول کلوئیدی از نانوذرات در مایع پایه ایجاد می‌کنند. نانوذرات معمولاً از موادی مانند فلزات (طلا، مس، آلومینیوم، آهن)، اکسیدها (Al_2O_3 ، CuO ، SiO_2 ، TiO_2)، غیر فلزات (نانولوله‌های کربنی، گرافن)، نیتrideهای فلزی (AlN ، SiN)، کاربیدهای فلزی (SiC) یا نانولوله‌های کربنی تشکیل می‌شوند و مابعات پایه شامل روغن، آب و گلیکول اتیلن هستند [۱۰، ۱۳، ۱۴] (شکل ۳). نانو سیال ویژگی‌های جدیدی را ارائه می‌دهند که آن‌ها را برای استفاده در کاربردهای مختلف انتقال حرارت مانند میکروالکترونیک، مدیریت حرارتی وسایل نقلیه، مبدل‌های حرارتی، یخچال‌ها و کاهش دمای گازهای دودکش بویلر مناسب می‌سازد.



شکل ۳. شمایی از توسعه نانو سیال

چوی و همکاران اصطلاح "نانو سیال" را برای توصیف معلق کردن نانوذرات (NPs) در سیال پایه معرفی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که معلق کردن NPs در مایع پایه هدایت حرارتی آن را بهبود می‌بخشد. تمایل به تحقیقات NFs از افزایش تقاضای مهندسان برای طراحی یک سامانه عایق پیشرفته ناشی شد که بتواند خنک‌کنندگی لازم را ارائه دهد و قادر به تحمل سطوح ولتاژ بالا (HV) باشد، به عنوان مثال، برای کاربردهای جریان متناوب با ولتاژ بالا (HVAC) و جریان مستقیم با ولتاژ بالا (HVDC). با وجود این، HVAC از دهه ۱۸۸۰ در سراسر جهان به کار گرفته شده است در حالی که سامانه انتقال HVDC در دهه ۱۹۵۰ توسعه یافته است. در حال حاضر به منظور مقابله با تقاضای روزافزون جهانی برای برق، سامانه‌های انتقال HVDC متعددی وجود دارند و به عنوان جزء حیاتی شبکه برق در نظر گرفته می‌شوند. سطوح ولتاژ AC و DC پیش‌بینی می‌شود که، بیشتر افزایش یابد. متأسفانه، سامانه عایق فعلی دارای عملکرد الکتریکی و حرارتی محدودی است و به همین دلیل، تقاضای بالایی برای حل مسائل حرارتی، الکتریکی، مکانیکی و اقتصادی وجود دارد [۱۵]. به عنوان مثال، یک سامانه عایق حرارتی کارآمد ممکن است با معلق کردن ذرات میکرونی در عایق مایع سنتی توسعه یابد تا ترکیبی از ویژگی‌های هر دو ذرات جامد و مایع پایه را به دست آورد. معلق کردن ذرات میکرونی، به رغم بهبود ویژگی‌های حرارتی (هدایت حرارتی)، همچنین باعث ایجاد نقص‌های بیشتری در سامانه عایق کلی می‌شود.

برعکس، انتظار می‌رود که معرفی نانوذرات به عایق مایع سنتی، ویژگی‌های خنک‌کنندگی و عایق‌بندی سامانه عایق را با در نظر گرفتن اصول اقتصادی و حرارتی بهبود بخشد. این بهبود به دلیل اندازه کوچک NPs است که در نتیجه منجر به ایجاد یک سطح تماس بزرگ می‌شود [۱۶]. به همین دلیل، پیش‌بینی می‌شود که NFs ویژگی‌های دی الکتریک منحصر به فردی را ارائه دهند که به طور قابل توجهی با میکروسیال‌های سنتی قبلی متفاوت است. این بهبود منحصر به فرد در ویژگی‌ها که ناشی از NPs است، منجر به ایجاد یک کلاس نوآورانه از مایعات شده است که ممکن است هم ویژگی‌های الکتریکی و هم حرارتی را ارائه دهد. در واقع، پروژه‌های تحقیقاتی متعددی برای بررسی چشم‌انداز و پتانسیل‌های NFs به عنوان عایق مایع نسل بعدی برای

سامانه‌های انتقال برق AC و DC آغاز شده است. در دو دهه اخیر، NFs به دلیل ویژگی‌های استثنایی و منحصر به فرد خود توجه زیادی را جلب کرده‌اند. این مقاله نه تنها بینش‌هایی در مورد درک ویژگی‌های حرارتی NFs مبتنی بر روغن ترانسفورماتور (TO) ارائه می‌دهد، بلکه جزئیات کاملی از چالش‌ها و فرصت‌های پیش روی آن‌ها را نیز تأمین می‌کند. علاوه بر این، خلاصه‌ای از مزایا، معایب و کاربردهای بالقوه این NFs را نیز ارائه می‌دهد [۱۲]. مزایا و معایب مرتبط با NPs و NFs بصورت خلاصه در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. مزایا و معایب مرتبط با نانوذرات (NPs) و نانوسیالات (NFs)

۳- سنتز نانوسیالات

نانوسیالات به طور گسترده‌ای به عنوان حامل‌های حرارتی در نیروگاه‌ها، سامانه‌های سرمایش و گرمایش ساختمان‌ها، تهویه مطبوع خودروها و سامانه‌های خنک‌کننده کارخانه‌های فرآوری مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۷]. فرآیند ساخت نانوسیالات با ترکیب مستقیم مایع پایه با نانوذرات آغاز می‌شود. دو روش اصلی برای تولید این سیالات وجود دارد: روش یک‌مرحله‌ای و دو

مرحله‌ای که در جدول ۳ آمده است [۱۸]. نانوذرات با استفاده از فرآیندهای مختلفی تولید می‌شوند؛ از جمله تجزیه حرارتی، روش‌های فتوشیمیایی، کاهش الکتروشیمیایی نمک‌های فلزات انتقالی و سنتز الکتروشیمیایی. برای جلوگیری از آگلومراسیون و رسوب، پیشنهاد می‌شود از خشک کردن و حمل و نقل نانو سیالات اجتناب شود. روش یک‌مرحله‌ای شامل استفاده از کندوپاش^۶ مغناطیسی است که نانوذرات را به سطح یک فیلم مایع با فشار بخار پایین هدایت می‌کند و در سیال پایه حاوی مواد فعال سطحی فرو می‌برد. این روش بیشتر برای تولید نانوسیالات در مقیاس کوچک مناسب است، در حالی که روش دو مرحله‌ای برای تولید انبوه به کار می‌رود. با این حال، انتخاب روش به عواملی مانند نوع نانو مواد، غلظت و اندازه ذرات بستگی دارد [۱۹]. فکر پراکندگی نانوذرات در مایع در ابتدا توسط کبلنسکی و همکاران مطرح شد که به دنبال بهبود ویژگی‌های حرارتی سوسپانسیون حاوی ذرات میکرو و میلی‌متری بودند [۲۰]. پراکندگی و جداسازی صحیح نانو مواد، جنبه مهمی در تولید نانوسیالات است و مستلزم از بین بردن آگلومراسیون و لایه برداری آن‌ها است. این فرآیند سنتی با چالش‌هایی مانند جداسازی فازی و تجمع ذرات مواجه است. بنابراین، انواع مختلف نانو مواد نیاز به روش‌های پایداری متناسب با ساختار شیمیایی و پیوندهای خود دارند. جدول ۴ مقایسه روش‌های پراکندگی مختلف را که توسط محققان جهانی استفاده شده‌اند، ارائه می‌دهد [۲۱]. به‌طور کلی، شش روش ذاتی مختلف برای معلق کردن وجود دارد که می‌توان از آن‌ها برای دستیابی به پراکندگی یکنواخت ذرات و توسعه روش‌های ساده اما مؤثر بهره گرفت. حمام و پروب اولتراسونیک از روش‌های مشابهی برای تعلیق استفاده می‌کنند، جایی که انرژی اولتراسونیک به نمونه اعمال

جدول ۳. روش‌های استفاده شده برای تولید نانوسیالات [۱۸]

روش تولید نانوسیال	نوع روش
اسپاترینگ مغناطیسی	روش تک مرحله‌ای
تبخیر مستقیم	
رسوب گذاری شیمیایی	
چگالش بخار شیمیایی	
حمام التراسونیک	روش دو مرحله‌ای
التراسونیک مختل کننده	
هموژنایزر فشار بالا	

^۶ Sputtering

^۵ Transformer oil

جدول ۴. ابزارهای پراکندگی برای نانوسیالات [۲۱]

ابزارهای معلق کردن	اصل عملکرد	مزایا	معایب
آسیابها (شامل آسیابهای گلوله‌ای، همزن، و آسیابهای گریز از مرکز و جت)	شامل فرآیند سنگ‌زنی فوق‌العاده ریز	مناسب برای مقیاس‌های بالای تولید	روش کند/غیرکارآمد - آسیاب گلوله‌ای ممکن است در برخی موارد روزها طول بکشد؛ می‌تواند تمیز کردن آن دشوار باشد؛ احتمال آلودگی بالا
هم زدن (هم زدن مغناطیسی/همزن بالاسری)	از میله مغناطیسی یا همزن بالاسری استفاده می‌کند؛ دارای سرعت چرخشی برای ایجاد گردابه	به ندرت منجر به تخریب یا شکستن نانوذرات می‌شود؛ ارزان/مقرون‌به‌صرفه	غیرکارآمد؛ اغلب برای بهبود یکنواختی پراکندگی به کار می‌رود
هموژنیز با سرعت بالا	استفاده از روتور و استاتور پروپ مولد؛ روتور به عنوان پمپ گریز از مرکز برای گردش مایع عمل می‌کند و جامدات را از طریق مولد به حالت معلق در می‌آورد	مناسب برای نمونه‌های مایع با ابعاد بزرگ تا ۲۵۰۰ میلی لیتر	احتمال آلودگی فلزی
هموژنیز با فشار بالا	ایجاد برش و کاویتاسیون از طریق افزایش سرعت جریان مایع تحت فشار در میکروکانال‌ها	بسیار کارآمد	ساختار نانوذرات می‌تواند تغییر کند؛ احتمال افزایش دما در پراکندگی بالا؛ گران‌قیمت
حمام سونیکیت التراسونیک	استفاده از امواج التراسونیک و کاویتاسیون در حمام	ارزان/مقرون‌به‌صرفه	هر دو روش (حمام) نسبت به روش پروپ اثربخشی کمتری دارند (نیروی برش کمتر) نوک پروپ ممکن است نمونه‌ها را آلوده کند؛ می‌تواند ساختار نانوذرات را تغییر دهد؛ احتمال افزایش دما در پراکندگی حتی برای چند دقیقه بسیار بالا
سونیکیت کردن پروپ التراسونیک یا تخریب‌کننده التراسونیک	مشابه حمام التراسونیک است اما هدف آن رساندن چگالی انرژی بیشتر در حجم کمتری نسبت به فرمت حمام مشابه است	بسیار کارآمد	

می‌شود [۲۲]. با این حال، در اثربخشی، کارایی، قابلیت‌های فرآیندی و پایداری بین این دو روش تفاوت‌هایی وجود دارد. پروپ اولتراسونیک برای اکثر مطالعات مناسب‌تر است زیرا می‌تواند چگالی انرژی بیشتری را به حجم‌های کوچک نمونه‌ها اعمال کند. همگنی نانوسیالات احتمالاً تحت تاثیر زمان، فرکانس، دما و قدرت اعمال شده توسط سونیکاتور قرار دارد؛ با این وجود، پارامترهای بهینه برای پراکندگی نانوذرات در مایعات همچنان مشخص نشده است. به گفته کول و دی، افزایش زمان التراسونیک لزوماً اندازه ذرات را کاهش نمی‌دهد، بلکه می‌تواند منجر به افزایش اندازه آن‌ها شود. در این تحقیق، از پراش نور دینامیکی برای تخمین اندازه نانوذرات ZnO در اتیلن گلیکول در برابر مدت زمان التراسونیک استفاده شده است و نتایج در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند [۲۳].

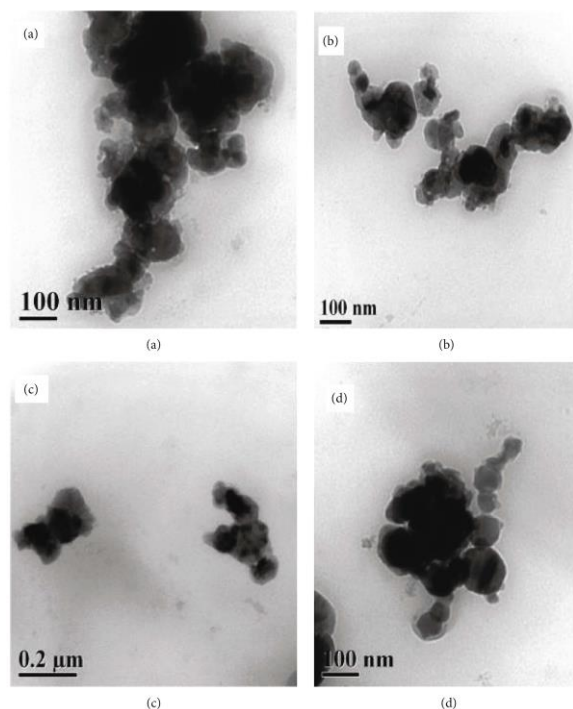
اندازه خوشه‌های نانوذرات به سرعت طی ۴ تا ۶۰ ساعت کاهش می‌یابد و پس از ۱۰۰ ساعت سونیکاسیون به ۲۲۰ نانومتر افزایش می‌کند (شکل ۶). این تغییر به دلیل ایجاد حفره‌های صوتی توسط دستگاه التراسونیک است که نیروی برشی قوی ایجاد می‌کند و می‌تواند تجمع نانوذرات را بشکند. با بهبود نرخ‌های نفوذ، می‌توان پراکندگی‌های یکنواختی از ذرات نانومتری تولید کرد [۲۴]. یکی از

چالش‌های اصلی در پراکندگی نانوسیالات، دستیابی به پایداری طولانی‌مدت است [۲۵]. نانوسیالات به دلیل حرکت براونی شدید ذرات بسیار پایدارتر از ذرات میکرو هستند. تحقیقات زیادی برای حفظ پایداری در عین کارکرد به عنوان عایق حرارتی انجام شده است. یکی از روش‌های موثر، استفاده از مواد فعال سطحی (سورفاکتانت) چون سدیم دودسیل سولفات (SDS) و صمغ عربی است که تجمع ذرات را با کاهش نیروهای جاذبه وان‌دروالس کم می‌کند [۲۶]. با این حال، کتیار و همکاران [۲۷] تأکید دارند که سورفاکتانت تأثیر کمی بر گرانشی، هدایت حرارتی و ولتاژهای شکست دارد. همچنین، ژوان و همکاران نشان داده‌اند که سورفاکتانت سدیم دودسیل بنزوئیک سولفات (SDBS) می‌تواند تأثیر منفی بر عملکرد انتقال حرارت نانوسیالات داشته باشد. لایه نازک SDBS روی سطح، مانع از انتقال حرارت مناسب می‌گردد [۲۸]. گزارش‌ها انواع مختلف سورفاکتانت‌ها و روش‌های پراکندگی نانو مواد در روغن ترانسفورماتور را بررسی کرده‌اند. بیشتر محققان اسید اولئیک را برای ارتقاء پراکندگی در روغن ترانسفورماتور پیشنهاد داده‌اند. اما مصرف اضافی سورفاکتانت ممکن است زنجیره دوگانه‌ای در اطراف نانوذرات ایجاد کند که کارایی سورفاکتانت را کاهش دهد.

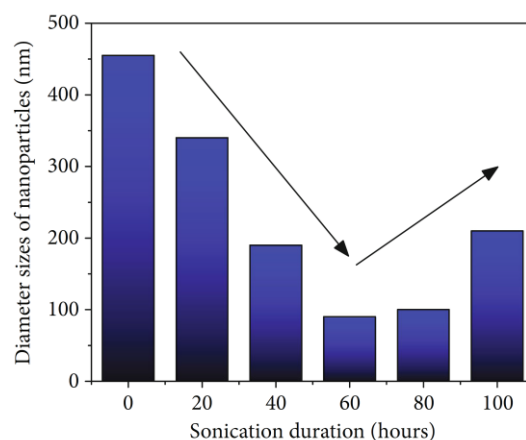
ن سازند، تایید شد. تنوع سورفاکتانت‌ها نتایج متفاوتی در خصوص ویژگی‌هایی مثل چگالی، گرانروی، هدایت حرارتی و پایداری فراهم می‌کند. در نهایت، استاندارد قطعی برای پراکندگی نانومواد سیال وجود ندارد. اطلاعات متناقضی درباره روش بهینه تهیه نانوسیالات برجای مانده که به نوع نانومواد، سازگاری با مایع پایه، غلظت‌ها و روش پراکندگی بستگی دارد، یعنی آماده‌سازی نمونه تأثیر بنیادی بر جلوگیری از تجمع و عدم پایداری دارد. جدول ۵ خلاصه ای از کارهای انجام شده با استفاده از روش سونیکیت کردن را نشان می‌دهد.

جدول ۵. روش سونیکیت کردن [۳۳-۳۸]

نانونمواد	انواع روغن	سورفاکتانت	مدت زمان هم زدن مغناطیسی	مدت زمان سونیکیت
ZnO, BaTiO ₃ , TiO ₂ (> ۱۰۰ نانومتر)	روغن معدنی	سوربیتان مونو اولئات	۳۰ دقیقه	۲ ساعت
TiO ₂	روغن معدنی	ستیل تری متیل آمونیوم برومید	۱۵ دقیقه	۳ ساعت
SiO ₂ , TiO ₂	روغن معدنی	سپن ۸۰، عامل جفت کننده سیلان Z6011	۳۰ دقیقه	۲ ساعت
Fe ₃ O ₄	روغن معدنی	هگزا دسیل تری متیل آمونیوم برومید	-	۲ ساعت
Fe ₂ O ₃	FR3	اسید اولئیک	۲۰ دقیقه	۲ ساعت
SiO ₂ (۱۵ نانومتر)	بنزتونیم کلراید (BZC)	بنزتونیم کلراید (BZC)، بنزالکونیوم کلراید (BAC) CTAB	-	۵۰ دقیقه



شکل ۵. تصویر TEM نانو سیال ZnO پس از (الف) ۴ ساعت، (ب) ۱۲ ساعت، (ج) ۶۰ ساعت و (د) ۱۰۰ ساعت سونیکیت کردن [۳۳].



شکل ۶. اندازه خوشه نانو سیال ZnO در زمان‌های مختلف التراسونیک [۳۳].

۴-ویژگی‌های حرارتی، الکتریکی و فیزیکی-شیمیایی

درک حقایق مربوط به ویژگی‌های دی‌الکتریک و ترموفیزیکی یک سامانه حرارتی که با نانو سیال کار می‌کند، برای ارزیابی عملکرد آن بسیار حیاتی است. این ویژگی‌ها به شدت به میزان نانوذرات پراکنده شده در مایع پایه بستگی دارند. با نادیده گرفتن ویژگی‌های ترموفیزیکی نانوسیالات به صورت سامانه‌های یا

زکریا و همکاران [۲۹] معتقدند که بهتر است نانوذرات قبل از ترکیب با روغن معدنی و سورفاکتانت تحت فرآیند پلازما قرار گیرند. دسوکی و همکاران [۳۰] از تابش مادون قرمز بعد از التراسونیک برای حذف رطوبت استفاده کردند. شوکلا و آبی [۳۱] نشان دادند که مخلوط SiO₂ و روغن معدنی می‌تواند زمان‌های پراکندگی متفاوت را نسبت به غلظت‌ها ایجاد کند. این یافته توسط کراجنیک و همکاران [۳۲] که اعلام کردند افزودن سورفاکتانت می‌تواند زمان پراکندگی را کاهش دهد اما ممکن است همه مولکول‌های سورفاکتانت پیوند مؤثری با نانوذرات

از نانوسیالات مورد استفاده در ترانسفورماتورها را نمایش می‌دهد. این داده‌ها معمولاً بر اساس تحقیقات آزمایشگاهی جمع‌آوری شده که در ادامه با جزئیات ارائه خواهد شد و بسته به ترکیب و شرایط می‌توانند متفاوت باشند.

در تصاویر گرافیکی ارائه شده در شکل ۷، نمای کلی از ویژگی‌های ترموفیزیکی و الکتریکی نانوسیالات به نمایش گذاشته شده است. ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی عایق مایع از اهمیت بالایی برخوردارند زیرا به اجرای مؤثر وظایف عایق‌بندی و خنک‌کنندگی کمک می‌کنند. در بخش بعد، یک توضیح کلی از ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی عایق مایع ترانسفورماتور ارائه خواهد شد.

۴-۱- گرانی

گرانی روغن به عنوان معیاری از مقاومت در برابر نرخ برش شناخته می‌شود و به مقاومت در برابر حرکت جریان پیوسته نیز اشاره دارد. گرانی مایع عایق تأثیر مستقیمی بر خنک‌سازی ترانسفورماتور دارد و بررسی آن برای تعیین ویژگی‌های مایع عایق بسیار ضروری است. اکسیداسیون در عایق مایع باعث شروع فرآیند تخریب و افزایش گرانی می‌شود. اگر گرانی بالاتر باشد، نشان‌دهنده مقاومت بیشتر در مقابل جریان است و در مقابل، گرانی پایین‌تر به معنای مقاومت کمتر است. این ویژگی بر ظرفیت انتقال حرارت از طریق هدایت

تجربی، فرض بر این است که نانوذرات به‌طور همگن در مایعات پایه پراکنده شده‌اند. چوبی نانوسیالاتی را برای تبادل حرارت در اوایل دهه ۱۹۹۰ توسعه داد که به عنوان جایگزینی چشمگیر برای روغن ترانسفورماتور سنتی با ویژگی‌های حرارتی برجسته شناخته شد. این نانوسیالات دارای ویژگی‌های متعددی از جمله هدایت حرارتی، چگالی، ظرفیت حرارتی ویژه و گرانی هستند. افت فشار و ضریب انتقال حرارت نیز باید مورد توجه قرار گیرند. ویژگی‌های حرارتی به طور عمده تحت تأثیر برخی خصوصیات فیزیکی مانند اندازه، شکل، غلظت و نوع سورفکتانت نانوذرات قرار دارند. هدایت حرارتی یک مایع ارتباط مستقیم با ظرفیت انتقال حرارت آن دارد، در حالی که گرانی به افت فشار، جریان و قدرت پمپاژ در انتقال نانوذرات مربوط می‌شود [۳۹]. هدایت حرارتی نانوسیالات بسته به نوع، اندازه، شکل و غلظت نانوذرات تغییر می‌کند. گرانی همچنین تحت تأثیر قدرت یونی مایع پایه، pH محلول و نیروهای وان‌دروالس و دافعه‌ای نانوذرات قرار می‌گیرد [۴۰]. اضافه کردن سورفکتانت‌ها باید با احتیاط انجام شود، زیرا مقدار زیاد آن‌ها می‌تواند اثر منفی بر گرانی، پایداری و ویژگی‌های حرارتی بگذارد. نانوذرات ممکن است تمایل به آگلومراسیون در مایع داشته و در نهایت قطر آن‌ها افزایش یافته و گرانی کل نیز بالا برود. عوامل دیگری مانند مایع پایه و دمای کاری نیز باید در هنگام تحلیل ویژگی‌های ترموفیزیکی در نظر گرفته شوند [۴۱]. جدول ۶ مشخصات الکتریکی و رسانایی برخی

جدول ۶ خواص الکتریکی و رسانایی نانوسیالات در ترانسفورماتورها

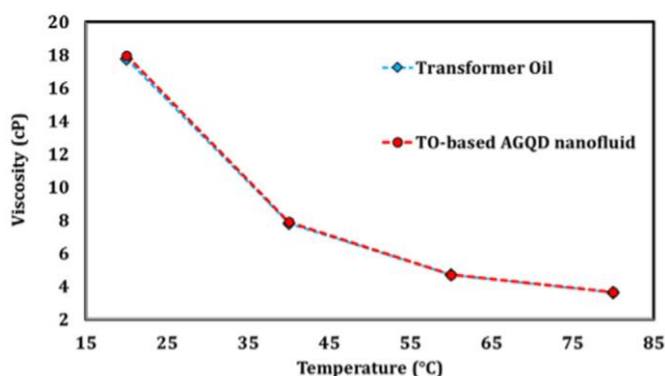
نانوسیال	تحرك یونی (cm ² /V.s)	مقاومت ویژه (Ω.m)	استحکام شکست دی‌الکتریک (kV/mm)	ثابت دی‌الکتریک (ε _r)	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)
روغن معدنی خالص	کم	۱۰ ^{-۹} - ۱۰ ^{-۱۲}	۱۰ - ۱۵	۲/۲ - ۲/۳	۰/۱۲ - ۰/۱۴
روغن معدنی + نانو Al ₂ O ₃	متوسط	۱۰ ^{-۸} - ۱۰ ^{-۱۱}	۱۵ - ۲۰	۲/۵ - ۳/۰	۰/۱۵ - ۰/۱۸
روغن معدنی + نانو TiO ₂	متوسط	۱۰ ^{-۸} - ۱۰ ^{-۱۱}	۱۸ - ۲۲	۳/۰ - ۳ - ۵	۰/۱۶ - ۰/۱۹
روغن معدنی + نانو SiO ₂	کم	۱۰ ^{-۹} - ۱۰ ^{-۱۲}	۱۶ - ۲۱	۲/۸ - ۳/۲	۰/۱۴ - ۰/۱۷
روغن استری + نانو Al ₂ O ₃	بالا	۱۰ ^{-۷} - ۱۰ ^{-۱۰}	۲۰ - ۲۵	۳/۵ - ۴/۰	۰/۱۷ - ۰/۲
روغن طبیعی + نانو ZnO	بالا	۱۰ ^{-۷} - ۱۰ ^{-۹}	۲۲ - ۲۷	۳/۸ - ۴/۵	۰/۱۸ - ۰/۲۲

معدنی پایه است [۴۶]. تحقیقات لیا و همکاران [۴۰] نیز نشان داد که با افزایش غلظت، گرانی دینامیکی افزایش می‌یابد، اما این اثر در نرخ‌های برش بالا ناچیز است. همچنین تاها-تجیرینا و همکاران تأثیر جزئی نانوذرات نیتريد بور بر گرانی و غلظت معینی را مشاهده کردند، اما با افزایش بیشتر غلظت، اثر افزایش گرانی مشهود بود [۴۷]. قینگ و همکاران نیز مباحث مشابهی را در مورد نانوسیالات هیبریدی مطرح کردند [۴۸].

۴-۱-۱-۲- تأثیر دما

گرانی نانوسیالات تحت تأثیر دما قرار دارد و معمولاً با افزایش دما کاهش می‌یابد. تحقیقات تاها-تجیرینا [۴۷] و همکاران کاهش گرانی را با افزایش دما تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده کردند. پژوهش لیا و همکاران [۴۰] درباره نانوسیالات مبتنی بر روغن معدنی نشان داد که گرانی با افزایش دما و کاهش نیروهای جاذبه بین مولکولی کاهش می‌یابد. آنها بیان کردند که تغییرات در گرانی در نرخ‌های برش مختلف و دامنه دمایی ۲۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد بسیار کم است. در نهایت، امیری و همکاران گرانی روغن ترانسفورماتور خالص و نانوسیال را به عنوان تابع دما بررسی کردند (شکل ۸).

گرانی نانوسیالات تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی نانوذرات معلق، از جمله نوع، اندازه و شکل قرار دارد. تحقیقات تجربی انجام‌شده توسط محققان نشان می‌دهد که با کاهش اندازه نانوذرات، گرانی افزایش می‌یابد. همچنین، همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، شکل نانوذرات به‌طور قابل توجهی بر گرانی نانوسیالات تأثیرگذار است.



شکل ۸. تأثیر دما بر گرانی روغن ترانسفورماتور و نانوسیال [۴۹].



شکل ۷. تصاویر گرافیکی از نمای کلی ویژگی‌های ترموفیزیکی و الکتریکی نانوسیالات

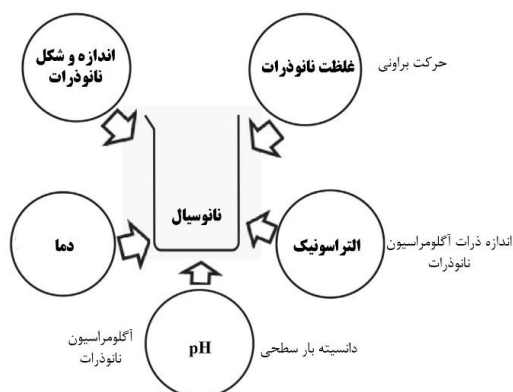
نیز تأثیرگذار است. در تجهیزات ولتاژ بالا (HV)، خنک‌سازی از طریق هدایت از اهمیت بالایی برخوردار است و افزایش گرانی منجر به بالا رفتن دمای نقاط داغ می‌شود. تحقیقات نشان داده‌اند که گرانی نانوسیالات با استفاده از نانوذرات مس، با افزایش دما کاهش و با افزایش غلظت نانوذرات افزایش می‌یابد، اما همچنان بیش از مایع پایه است [۴۲].

۴-۱-۱-۱- عوامل مؤثر بر گرانی نانوسیال

یافته‌های تحلیل نشان داده‌اند که گرانی نانوسیالات متأثر از عواملی مختلف مانند دما، نرخ برش، میزان نانوذرات، روش سنتز، شکل و اندازه نانوذرات است [۴۳، ۴۴]. در این بخش، پارامترهای مؤثر بر گرانی به صورت مختصر بررسی شده‌اند.

۴-۱-۱-۱- غلظت نانوذرات

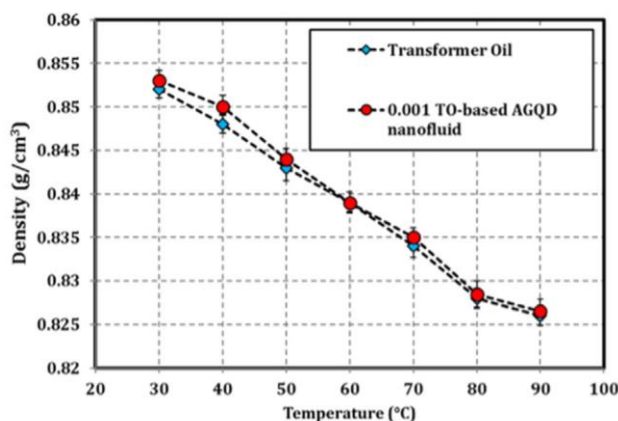
تحقیقات نشان داده‌اند که افزایش غلظت نانوذرات باعث افزایش گرانی نانوسیالات می‌شود. برای مثال، فونتس و همکاران [۴۵] نانوسیالاتی با نانوذرات چند جداره کربنی در روغن ترانسفورماتور با غلظت‌های مختلف تهیه کردند و متوجه شدند که گرانی با افزایش میزان نانوذرات به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. نانوسیالی با غلظت بهینه ۲۵ درصد، گرانی بیشتری نسبت به روغن پایه نشان داد. جین و همکاران با بارگذاری نانوذرات سیلیکا دریافتند که گرانی این نانوسیالات تقریباً برابر با روغن



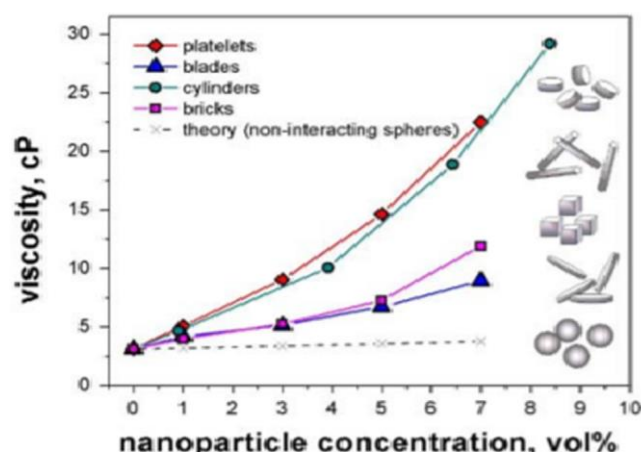
شکل ۱۰. شمایی از مکانیسم‌های کلیدی تأثیرگذار بر گرانیوی نانوسیالات.

۴-۳- چگالی

چگالی یکی از مهم‌ترین عواملی است که با دما تغییر می‌کند. تنها چند تحقیق در مورد چگالی مایع با توجه به غلظت نانوذرات و دما انجام شده است. به عنوان مثال، لیا و همکاران [۵۰] چگالی نانوسیالات مبتنی بر TO که با نانوذرات آلومینا اضافه شده بود را با استفاده از یک مدل نظری که توسط پک و چو پیشنهاد شده بود [۵۱]، پیش‌بینی کردند. نتایج به دست آمده در غلظت‌های پایین نانوذرات با نتایج تجربی همخوانی داشت. مشاهده شد که چگالی با معلق کردن نانوذرات افزایش می‌یابد و با افزایش دما کاهش می‌یابد. امیری و همکاران نتیجه‌گیری کردند که چگالی نانوسیالات مبتنی بر TO که با نقاط کوانتومی گرافن مبتنی بر آمین تهیه شده‌اند، با افزایش دما به دلیل انبساط حرارتی روغن کاهش می‌یابد، همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. اما همچنان تحقیقات بیشتری برای ارزیابی تأثیر اندازه، نوع و غلظت نانوذرات بر چگالی نانوسیالات مورد نیاز است.



شکل ۱۱. چگالی نانوسیالات مبتنی بر AGQD و روغن خالص [۴۹].



شکل ۹. گرانیوی نانوسیالات آلومینا به عنوان تابعی از غلظت و اشکال نانوذرات [۵۰].

۴-۲- اصلاح سطح نانوذرات

تغییرات در گرانیوی نانوسیالات به نحوه اصلاح سطح نانوذرات بستگی دارد. استفاده بیش از حد سورفکتانت می‌تواند اثرات منفی بر گرانیوی، ویژگی‌های حرارتی و پایداری شیمیایی داشته باشد، بنابراین کنترل دقیق مقدار مصرفی آن بر روی نانوذرات ضروری است [۴۷].

۴-۲-۱- روش‌های پراکندگی نانوذرات

روش‌های پراکندگی نانوذرات نیز نقشی تعیین‌کننده در گرانیوی نانوسیالات دارند. افزون بر این، عواملی مانند مدت زمان فراصوت نیز بر گرانیوی اثرگذارند. پراکنده نمودن نانوذرات در روغن ترانسفورماتور می‌تواند موجب افزایش گرانیوی گردد، اما با افزایش دما این گرانیوی کاهش می‌یابد. افزایش غلظت نانوذرات می‌تواند باعث افزایش گرانیوی شود، زیرا تشکیل خوشه‌هایی که با نیروهای جاذبه به هم متصل هستند، جریان نانوسیالات را مختل می‌کند و برای غلبه بر مقاومت ذاتی نیاز به انرژی بیشتری دارد [۴۸]. با این حال، دمای بالا موجب کاهش گرانیوی به دلیل افزایش سرعت حرکت براونی نانوذرات می‌شود، زیرا انرژی اضافه لازم است تا پیوندهای مولکولی را تضعیف کرده و مقاومت داخلی را کاهش دهد. گرانیوی کمتر برای نانوسیالات مناسب‌تر است زیرا مایع به راحتی جریان پیدا می‌کند. تصویری از مکانیسم‌های کلیدی که بر گرانیوی تأثیر دارند در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

چگالی نانوسیالات تحت تأثیر غلظت نانوذرات و دما تغییر می‌کند. با افزایش غلظت نانوذرات، چگالی افزایش می‌یابد، اما با بالا رفتن دما، حجم مایع گسترش یافته و چگالی کاهش می‌یابد. پراکنده کردن نانوذرات در روغن ترانسفورماتور می‌تواند ویژگی‌های انتقال حرارت را تحت تأثیر قرار دهد؛ این برتری بسته به افزایش چگالی که به جاذبه طبیعی ناشی از شناوری وابسته است، ممکن است محدود شود. بنابراین، برای بررسی دقیق‌تر تأثیر پراکنده‌سازی نانوذرات بر روی چگالی نانوسیالات، تحقیقات بیشتری لازم است.

۴-۴- هدایت حرارتی

هدایت حرارتی نشان‌دهنده قابلیت یک ماده برای انتقال گرماسی و نقشی حیاتی در ارزیابی عملکرد عایق مایع در انتقال حرارت دارد. یک عایق مایع با هدایت حرارتی بالا به‌عنوان خنک‌کننده‌ای کارآمد برای تجهیزات ولتاژ بالا عمل می‌کند. در ترانسفورماتورهای قدرت، مایع دی الکتریک نه تنها وظیفه عایق‌بندی بلکه پراکنده‌گری گرما را نیز برعهده دارد. معمولاً منبع اصلی گرما در ترانسفورماتور از تلفات هسته و سیم‌پیچ سرچشمه می‌گیرد که به گرما تبدیل و باعث افزایش دما می‌شود [۵۲]. این افزایش دما، فرآیند پیری مواد عایق را تسریع و عمر مفید ترانسفورماتور را کاهش می‌دهد. بنابراین، بهبود قابلیت عایق و عملکرد انتقال حرارت برای کاهش ابعاد ترانسفورماتورهای ولتاژ بالا ضروری است. هدایت حرارتی یکی از عوامل کلیدی برای بهبود انتقال حرارت در مایعات عایق است و پیشنهاد می‌شود مایعی با هدایت حرارتی بالا انتخاب شود. برای ارتقای هدایت حرارتی عایق‌ها، روش‌های مختلفی ابداع شده که یکی از آن‌ها، تعلیق نمودن نانوذرات در روغن برای بهینه‌سازی عملکرد حرارتی ترانسفورماتور است. مطالعات متعددی روی هدایت حرارتی نانوسیالات انجام شده و نشان داده‌اند که یک مایع مناسب برای انتقال حرارت باید دارای هدایت حرارتی بالا و گرانیروی پایین باشد. با توجه به اینکه هدایت حرارتی روغن‌های معدنی معمولاً پایین است، امکان افت حرارتی بیشتری در شرایط بارگذاری موقتی وجود دارد. بنابراین، بهبود هدایت حرارتی روغن معدنی برای افزایش عمر ترانسفورماتور و ارتقاء سامانه خنک‌کنندگی بسیار مهم است. یک روغن ترانسفورماتور باید علاوه بر

ویژگی‌های عایق‌بندی مطلوب، هدایت حرارتی بالا و گرانیروی کمی داشته باشد تا جریان پیوسته و پراکنده‌گری گرما را تسهیل کند. پراکنده‌گری نانوذرات در روغن برای افزایش هدایت حرارتی می‌تواند مزایای زیادی از جمله نرخ خنک‌کنندگی بالا، کاهش نیاز به انرژی پمپاژ و مقاومت بیشتر در برابر سایش به همراه داشته باشد. این ویژگی‌ها موجب شده تا محققان به طور ویژه‌ای بر روی خصوصیات انتقال حرارت نانوسیالات تمرکز کنند. هدایت حرارتی این مایعات با افزایش میزان نانوذرات بهبود می‌یابد و افزودن نانوذرات سیلیکا و آلومینا تأثیر مثبتی بر این ویژگی داشته است [۵۳].

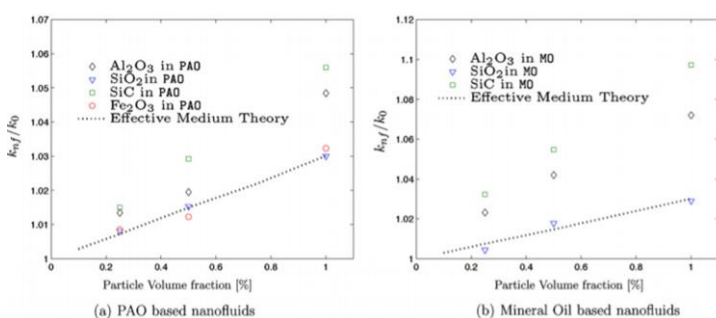
۴-۴-۱- عوامل مؤثر بر هدایت حرارتی

تحقیقات تجربی نشان داده‌اند که هدایت حرارتی نانوسیالات تحت تأثیر عوامل متعددی قرار دارد، مانند نوع، بارگذاری، اندازه و شکل نانوذرات، همچنین نوع مایع پایه و دما. ماهیت و مقدار افزودنی‌ها نیز در بهبود هدایت حرارتی نقش دارد [۵۴]. در بخش بعدی، یافته‌های تجربی مربوط به هدایت حرارتی نانوسیالات بر پایه روغن ترانسفورماتور بررسی می‌شود.

۴-۴-۱-۱- کسری حجم/جرم نانوذرات

تأثیر غلظت نانوذرات بر هدایت حرارتی روغن پایه در مطالعات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات لی و همکاران نشان داد که هدایت حرارتی نانوسیالات مبتنی بر نفت سفید با افزایش کسری جرمی نانوذرات مس بهبود می‌یابد. تحقیقات سینغ و همکاران درباره روغن معدنی معلق با نانوذرات آلومینا نشان داد که با افزایش غلظت حجمی نانوذرات، بهبودی تا ۴٪ در هدایت حرارتی مشاهده می‌شود [۵۳]. فونتس و همکاران نیز هدایت حرارتی نانوسیالات شامل نانوذرات الماس و نانو لوله‌های کربنی چند جداره را ارزیابی کردند و بهبودهایی با مقادیر ۲۷٪ برای نانو لوله‌های کربنی و ۲۳٪ برای نانوذرات الماس گزارش دادند، که این مقادیر فراتر از تخمین‌های مدل محیط مؤثر ماکسول بود [۴۶]. مطالعه زنگ و همکاران نشان داد که هدایت حرارتی نانوسیالات نه تنها با افزایش کسری جرمی، بلکه با افزایش دما نیز بالا می‌رود [۵۵]. بررسی جین و همکاران بر روی نانوسیالات با نانوذرات سیلیکا و فولرین نشان داد که در

در شکل ۱۳ آمده است [۵۹]. دو و همکارانش افزایش چشمگیر در ویژگی‌های حرارتی TO با استفاده از نانوذرات BN و Fe_3O_4 را به دلیل انتقال فونون بالستیک و تأثیر کم حرکت براونی، به ویژه با BN که ویژگی‌های حرارتی برجسته‌ای دارد، توضیح داده‌اند [۶۰]. همچنین یائو و گروهش نتیجه‌گیری کردند که استفاده از غلظت‌های حجمی کم در نانوسیالات مبتنی بر روغن گیاهی بهبود ۱۴ درصدی در هدایت حرارتی را به همراه داشته است [۶۱]. همچنین، وجود میدان الکتریکی برای بهبود انتقال حرارت نانو روغن‌های مبتنی بر پرکننده‌های h-BN مفید واقع شد. این پیشرفت‌ها می‌تواند برای کوچک‌سازی ترانسفورماتورهای ولتاژ بالا بسیار سودمند باشد.



شکل ۱۳. بهبودهای هدایت حرارتی به عنوان تابعی از غلظت حجم ذرات [۵۹].

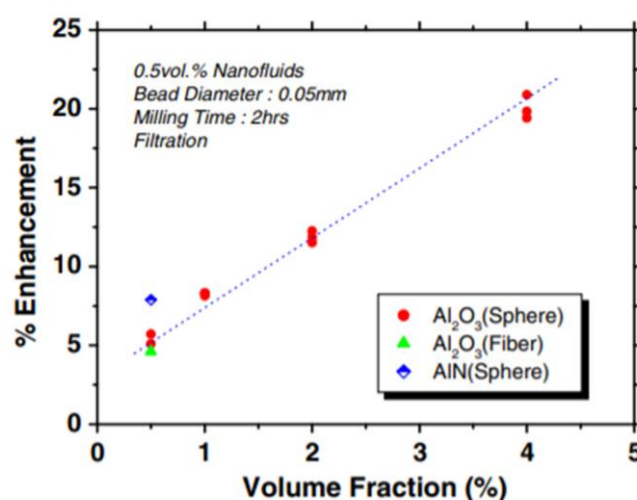
۴-۱-۳- مقدار سورفکتانت

نوع و مقدار سورفکتانت یکی از عوامل مهم در تأثیرگذاری بر هدایت حرارتی نانوسیالات است. به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد هر سورفکتانت، نوع و مقدار آن می‌تواند به شکل‌های مختلفی بر هدایت حرارتی نانوسیالات تأثیر بگذارد. تحقیقات چوی و همکاران نشان داده است که هدایت حرارتی نانوسیالات تهیه شده با نانوذرات مختلف (مانند Al_2O_3 و AIN) افزایش می‌یابد و با افزایش مقدار سورفکتانت، این هدایت کاهش پیدا می‌کند.

۴-۱-۴- سیال پایه

گرانروی مایعات پایه بر حرکت براونی نانوذرات و به تبع آن بر هدایت حرارتی نانوسیالات تأثیر می‌گذارد. گوپین و همکاران اثر لایه دوگانه الکتریکی ایجاد شده در نزدیکی نانوذرات را مورد بررسی قرار دادند و مشخص کردند که این لایه به همراه هدایت

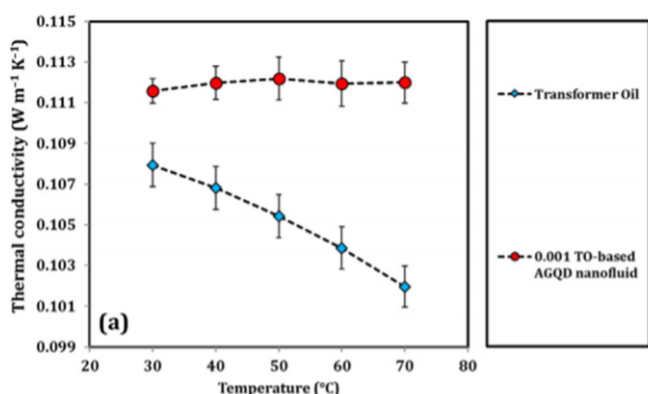
غلظت‌های بسیار کم تأثیر محسوسی بر روغن مشاهده نشد [۳۵]. هوانگ و همکاران همچنین افزایش هدایت حرارتی نانوسیالات حاوی نانولوله‌های چنددیواره (MWCNT) و فولرین را نسبت به غلظت ارزیابی کردند [۵۶]. شاکلا و همکاران هدایت حرارتی نانوسیالات توسعه یافته با نانوذرات AIN و نانو الماس را مورد بررسی قرار دادند. لیاس و همکاران دریافتند که افزایش دما و غلظت نانوذرات می‌تواند به حداکثر بهبود ۱۶٪ در هدایت حرارتی منجر شود [۳۱]. تحقیق چوی و همکاران تأثیر کسری حجم نانوذرات بر هدایت حرارتی نانوسیالات مختلف را نشان داده است که این اطلاعات در شکل ۱۲ آورده شده است [۵۷].



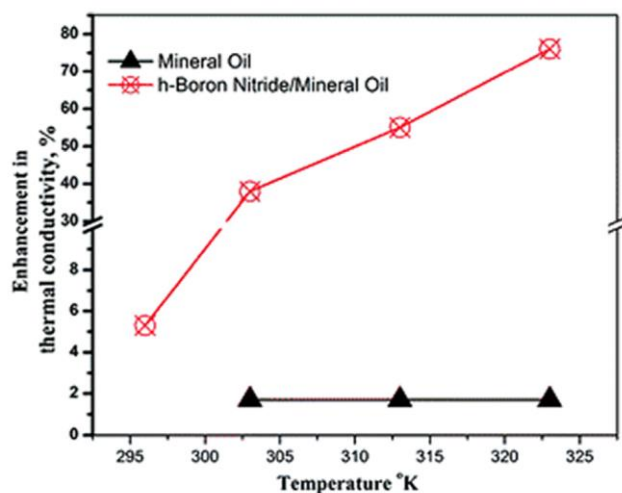
شکل ۱۲. هدایت حرارتی به عنوان تابعی از کسری حجم برای معلقات نانوذرات-روغن [۵۷].

۴-۱-۲- نوع نانوذرات

نوع نانوذرات نقش چشمگیری در هدایت حرارتی مایعات پایه دارد، زیرا نانوذرات مختلف از نظر هدایت حرارتی متفاوت هستند. این یعنی تأثیر آن‌ها بر هدایت حرارتی نانوسیالات نیز بسته به نوع نانوذرات استفاده شده فرق می‌کند. تحقیقاتی نشان داده‌اند که انتخاب نوع نانوذره می‌تواند تغییراتی در هدایت حرارتی ایجاد کند. به عنوان نمونه، در پژوهشی که توسط چن و همکاران انجام شد، نانوسیالات مبتنی بر روغن که با نانوذرات MWCNT تقویت شده بودند، بهبود ۱۶۰ درصدی را تجربه کردند، که این افزایش بزرگ به ویژگی‌های خاص نانوذرات نسبت داده شده است [۵۸]. چیزا و گروهش ترمودینامیک نانوذرات مختلف در TO را با ارزیابی هدایت حرارتی و مدل محیط مؤثر بررسی کرده‌اند که



شکل ۱۴. هدایت حرارتی روغن ترانسفورماتور خالص و نانوسیالات مبتنی بر TO [۴۹].



شکل ۱۵. تأثیر دما بر هدایت حرارتی نانوسیالات [۴۷].

کاهش یافته و نرخ انتقال حرارت بین نانوذره و مایع پایه کاهش می‌یابد، که منجر به کاهش هدایت حرارتی می‌شود. مطالعات مختلفی به بررسی تأثیر اندازه بر هدایت حرارتی پرداخته‌اند. نانوذرات با اشکال مختلف مساحت تماس متفاوتی با مایع پایه دارند که بر هدایت حرارتی تأثیرگذار است. به عنوان مثال، نانوذرات استوانه‌ای به دلیل داشتن نسبت ابعاد بزرگ‌تر، مساحت تماس بیشتری با سیال پایه دارند و بنابراین افزایش هدایت حرارتی را نشان می‌دهند. این بهبود ناشی از شبکه‌ای است که ذرات بزرگ‌تر ایجاد می‌کنند و گرما را بهتر در مایع هدایت می‌کند. تأثیر شکل نانوذرات بر هدایت حرارتی در نمودارهای مربوطه قابل مشاهده است. مکانیسم‌های اصلی تأثیرگذاری عناصر مختلف بر هدایت حرارتی نیز در شکل ۱۶ و ۱۷ به تصویر کشیده شده است [۷۰، ۷۱].

حرارتی، وابسته به نوع سیال پایه است [۶۲]. اثرات استفاده از روغن‌های گیاهی و معدنی به عنوان مایع پایه متفاوت است و درک اینکه کدام یک اثر بیشتری دارد، به تحقیقات بیشتری نیاز دارد. مطالعات آلیسیا و همکاران بر روی نانوذرات گرافن نشان دادند که در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد، هدایت حرارتی نانوسیالات کاهش می‌یابد که این مسئله به ویژگی‌های خاص روغن ترانسفورماتور ارتباط دارد [۶۳].

۴-۱-۵-دما

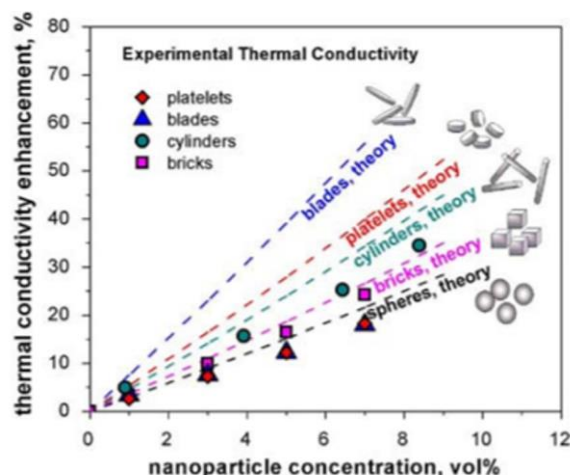
هدایت حرارتی نانوسیالات به میزان زیادی به دما بستگی دارد. امیری و همکاران تأثیر دما را بر هدایت حرارتی بررسی کردند، که نتایج آن در تحقیقات پیتل و همکاران با انواع مختلف نانوذرات (مانند Al_2O_3 ، CuO ، Cu ، Al) تأیید شد (شکل ۱۴). نتایج نشان دادند که هدایت حرارتی در دامنه ۲۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد برای نانوذرات Al_2O_3 بین ۳ تا ۱۷٪ و برای دیگر نانوذرات تا ۳۸٪ بهبود یافته است [۶۴]. ژوان و همکاران بهبود ۴۵ درصدی را در هدایت حرارتی با استفاده از نانوذرات Cu در دمای بین ۲۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد ثبت کردند [۶۵]. همچنین، طاه‌ا-تجیرینا و همکاران برای نانوسیالات مبتنی بر h-BN بهبود ۷۷ درصدی در دمای مشابه ثبت کردند (شکل ۱۵) [۴۷، ۴۶]. بیهانیا و سایرین با مطالعه روی نانوصفحات نیتريد بور، افزایش قابل توجهی را در غلظت‌های پایین مشاهده کردند [۶۷]. جعفری مقدم نیز در حال بررسی هدایت حرارتی نانوسیالات مبتنی بر TO بوده و بهبود ۴۱ درصدی را گزارش کرده است [۶۸]. بهشتی و دیگران کاهش هدایت حرارتی روغن ترانسفورماتورها را مورد توجه قرار دادند؛ آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که با افزایش دما، حرکت براونی به دلیل انرژی جنبشی بیشتر نانوذرات افزایش می‌یابد که منجر به برخورد بیشتر ذرات می‌شود [۶۹].

۴-۱-۶-شکل و اندازه نانوذرات

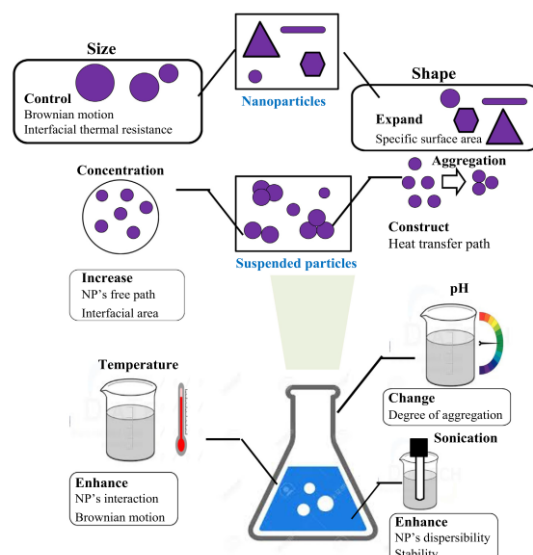
عامل مهمی برای تأثیر بر هدایت حرارتی نانوسیالات هستند. کاهش اندازه نانوذرات، هدایت حرارتی بهبود می‌یابد. این به دلیل توسعه لایه مایع در اطراف نانوذره و همچنین حرکت براونی نانوذرات اتفاق می‌افتد. با افزایش اندازه نانوذرات، حرکت براونی

۴-۶- نقطه اشتعال و نقطه آتش

در سال‌های اخیر، قابلیت اشتعال مایعات به عنوان یک نگرانی جدی ایمنی مطرح بوده است. گزارش‌های زیادی در مورد انفجار ترانسفورماتورها وجود دارد که مهار آن‌ها دشوار بوده و نشی روغن ممکن است به محیط اطراف آسیب برساند. نقطه اشتعال دمایی است که بالاتر از آن، مایع بخارهایی آزاد می‌کند که می‌توانند مخلوطی قابل اشتعال در جو ایجاد کنند. تعیین نقطه اشتعال به منظور کاهش خطر آتش‌سوزی ناشی از انفجارهای ناگهانی انجام می‌شود و معمولاً این دما بالاتر از ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد است. اندازه‌گیری نقطه اشتعال نانوسیالات معمولاً با استفاده از استاندارد ASTM D93 انجام می‌گیرد. در تحقیقات ساماتی و همکاران، نانوسیالاتی با نانوذرات TiO_2 ، Al_2O_3 و MoS_2 توسعه یافت و نتایج نشان داد که نقطه اشتعال این نانوسیالات نسبت به روغن پایه TO بالاتر بود [۷۳]. نقطه آتش به دمایی اشاره دارد که در آن بخارات مایع پس از احتراق، سوزش را به صورت پیوسته ادامه می‌دهند. این کمترین دماست که در آن، با حرارت دادن بیش از نقطه اشتعال، نمونه می‌تواند آتش را حداقل برای پنج ثانیه حفظ کند. بنابراین، گرم شدن کافی مایع باعث شروع اشتعال می‌شود. نقطه اشتعال به عنوان یکی از شاخص‌های کیفیت مورد استفاده قرار می‌گیرد تا احتمال وقوع خطرات آتش‌سوزی مشخص شود. بهشتی و همکاران اثر بارگذاری نانوذرات را بر نقطه اشتعال بررسی کرده‌اند و گزارش داده‌اند که افزایش ۴/۶ درصدی در نقطه اشتعال با بارگذاری نانوذرات (۰/۰۰۱ کسری جرمی) مشاهده شده است، البته افزایش بیشتر بارگذاری منجر به کاهش نقطه اشتعال می‌شود که در شکل ۱۸ به تصویر کشیده شده است. همچنین، تحقیقات ساماتی و همکاران نشان داده است که نقطه آتش نانوسیالات توسعه یافته نسبت به روغن پایه بالاتر بود. کارتیک و همکاران فاکتورهای کلیدی نانوسیالات توسعه یافته را ارزیابی کرده و دریافتند که تغییرات در غلظت نانوذرات در TO می‌تواند منجر به بهبود گرانیروی، نقطه آتش و نقطه اشتعال شود [۷۴]. انتخاب صحیح اندازه و بارگذاری نانوذرات می‌تواند عناصر کلیدی TO را بهبود بخشد. امیری و همکاران نقاط اشتعال روغن ترانسفورماتور خالص و نانوسیالات مبتنی بر AGQD را مورد بررسی قرار دادند که نتایج آن در شکل ۱۹ نمایش داده شده است.



شکل ۱۶. هدایت حرارتی نانوسیالات آلومینا با اشکال مختلف نانوذرات [۷۲].

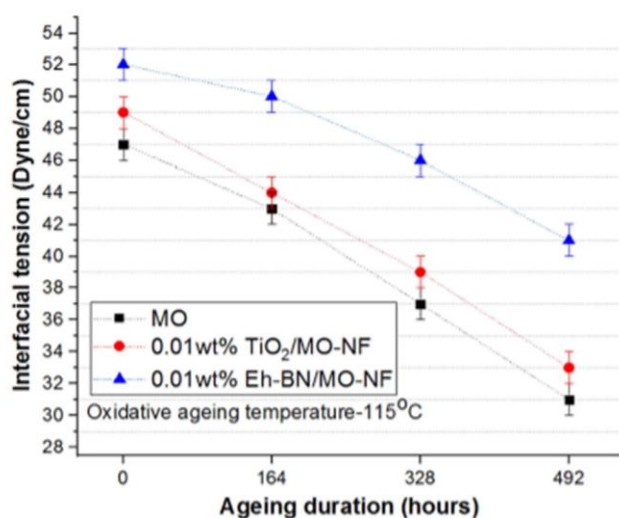


شکل ۱۷. مکانیسم‌های بنیادی تأثیر عناصر مختلف بر هدایت حرارتی نانوسیالات [۷۲].

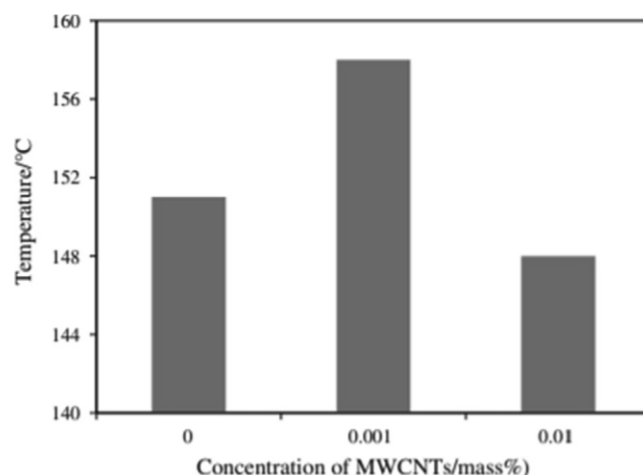
۴-۵- نقطه ریزش

نقطه ریزش به دمایی اطلاق می‌شود که در آن یک مایع تبدیل به حالت نیمه‌جامد می‌شود و قابلیت جریان داشتن خود را از دست می‌دهد. این دما نشان‌دهنده پایین‌ترین حدی است که مایع می‌تواند بدون از دست دادن خصوصیات مایع بودن، جریان یابد. این شاخص همچنین یکی از معیارهای اصلی در توصیف عملکرد عایق مایع برای تجهیزات فشار قوی محسوب می‌شود. بر اساس تحقیقات بهشتی و همکاران، نمونه‌هایی شناسایی شده‌اند که نقطه ریزش آنها کمتر از منفی ۴۵ درجه سانتی‌گراد است [۶۹].

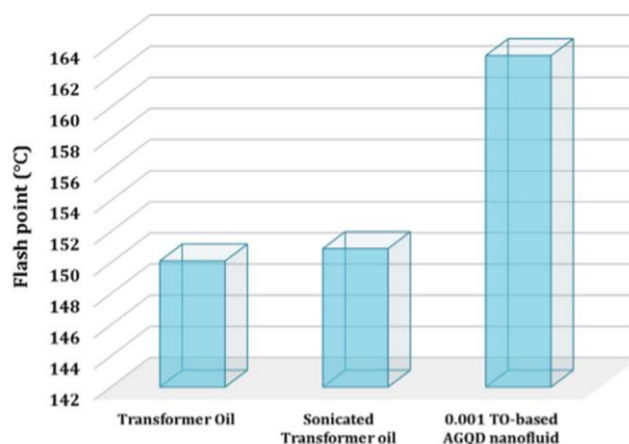
می‌شود. این مقدار می‌تواند با استفاده از دستگاهی به نام تنسیومتر اندازه‌گیری شود. IFT از تفاوت تعاملات بین مولکول‌های یک مایع با مولکول‌های مایع دیگر به دست می‌آید. بنابراین، نانوذرات به خوبی پراکنده شده، IFT را نسبت به TO بهبود می‌بخشند، زیرا نیروهای موئینگی بین ذرات هرگونه تغییر شکل در سطح را مخالفت می‌کنند. یافته‌های تجربی مرجع نشان داد که نانوسیالات مبتنی بر TO که با نانوذرات TiO_2 و Al_2O_3 توسعه یافته‌اند، IFT بالاتری نسبت به روغن پایه TO دارند، در حالی که نانو مایع مبتنی بر TO که با نانوذرات MoS_2 تهیه شده، IFT کمتری نسبت به روغن پایه TO نشان داد. ماهارانا فرآیند پیری را مشاهده کرد و آزمایش را در حضور اکسیژن انجام داد [۷۵]. IFT نانوسیالات مبتنی بر TO که با نیتريد بور هگزاگونال (Eh-BN) و نانوذرات TiO_2 تهیه شده بودند، به مراتب بالاتر از روغن پایه TO بود. افزایش مداوم در دوره پیری اکسیداتیو منجر به کاهش IFT برای هر دو روغن پایه TO و نانوسیالات می‌شود، با این حال در تمام موارد، نانوسیالات IFT بهتری نسبت به TO ارائه می‌دهند (شکل ۲۰). نیهاریکا و همکاران [۷۶] IFT نانوسیالات را با نانوذرات Eh-BN با استفاده از روغن‌های پایه مختلف تعیین کردند. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که IFT نانوسیالات مبتنی بر روغن گیاهی (VO) نسبت به نانوسیالات مبتنی بر روغن معدنی (MO) کمتر است. این به دلیل ساختار مولکولی VO است که شامل زنجیره‌های اسید چرب غیراشباع و محتوای رطوبت در روغن می‌باشد.



شکل ۲۰. کشش سطحی در مقابل مدت زمان پیری [۷۷].



شکل ۱۸. نقاط اشتعال روغن خالص و نانوسیالات [۶۹].



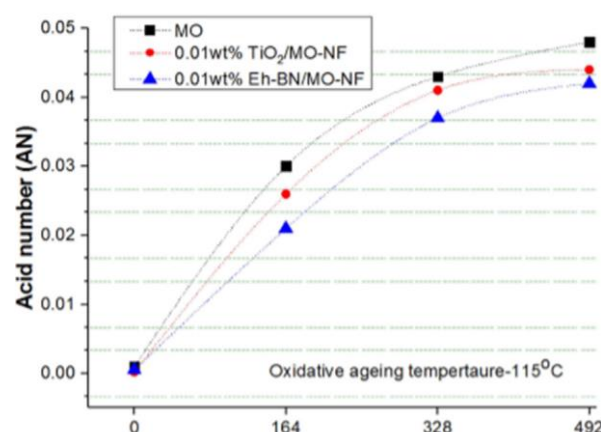
شکل ۱۹. نقاط اشتعال نانوسیالات مبتنی بر AGDQ و روغن ترانسفورماتور خالص [۴۹].

۴-۷- کشش سطحی بین‌فازی (IFT)

IFT مقدار نیروی جاذبه مولکولی بین مولکول‌های روغن و آب در سطح بین‌فازی آن‌ها است. این مقدار می‌تواند به ارزیابی ناخالصی‌های قطبی محلول موجود در روغن که نیروی جاذبه مولکولی بین روغن و آب را کاهش می‌دهد، کمک کند. مقدار IFT کیفیت روغن را نشان می‌دهد. مقدار بالای IFT نشان‌دهنده وجود کمتر آلاینده‌های قطبی در روغن است و بنابراین کیفیت و عملکرد بهتری را برای روغن تضمین می‌کند. مقدار پایین IFT منجر به کاهش یکپارچگی روغن ترانسفورماتور می‌شود که منجر به توسعه اکسیدها و پراکسیدها در روغن عایق در طول سرویس می‌گردد. روغن خالص TO باید حداقل مقدار 18 dyn/cm و حداکثر 40 dyn/cm داشته باشد. IFT روغن ترانسفورماتور معمولاً با استاندارد ASTM D971 ارزیابی

۴-۸- عدد اسیدی

اسیدیته معیاری است برای سنجش میزان اسیدهای آلی و غیرآلی در روغن، که به صورت میلی گرم هیدروکسید پتاسیم لازم برای خنثی سازی اسیدهای موجود در یک گرم روغن اندازه گیری می شود. برای تعیین اسیدیته روغن ترانسفورماتور معمولاً از استاندارد ASTM D974 استفاده می شود. اسیدها از تجزیه یا اکسیداسیون روغن ناشی می شوند و همچنین ممکن است از منابع خارجی مانند آلاینده های جوی به وجود آیند. این اسیدهای آلی می توانند به ساختار عایق آسیب رسانده و در حضور رطوبت باعث خوردگی در ترانسفورماتور شوند. اگرچه ایده آل این است که هیچ اسیدی در TO خالص وجود نداشته باشد، اما در عمل همیشه مقداری اسید موجود است. ساماتی و همکاران، میزان اسیدیته نانوسیالات را با TO پایه مقایسه کردند [۷۳]. نانوسیالات شامل نانوذرات Al_2O_3 ، TiO_2 و MoS_2 نشان دادند که محتوای اسیدی کمتری نسبت به TO پایه دارند و از این رو خطر خوردگی در ترانسفورماتور کاهش می یابد. با گذشت زمان و پیر شدن روغن، اسیدیته افزایش می یابد. ماهارانا و همکاران، عدد اسیدی نانوسیالات را بررسی کرده و مشاهده کردند که برای مدت ۴۹۲ ساعت، محتوای اسیدی آنها نسبت به TO پایه کمتر بوده است (شکل ۲۱) [۷۵].



شکل ۲۱. عدد اسیدی در مقابل مدت زمان پیری [۷۷].

۴-۹- استحکام دی الکتریک (DS) / ولتاژ شکست (BDV)

استحکام دی الکتریک از مهم ترین پارامترها در تعیین عملکرد روغن عایق ترانسفورماتور است و نشان دهنده توانایی آن در

تحمل تنش های الکتریکی بدون شکست است، حتی در برابر فشار، دما، رطوبت و پیکربندی خاصی از الکترودها. تجهیزات با ولتاژ بالا مانند ترانسفورماتورها نیازمند روغنی هستند که بتواند نه تنها حرارت را منتقل کند، بلکه باید میدان الکتریکی را نیز عایق کند تا عملیات ایمنی صورت گیرد. روغن ترانسفورماتوری با DS بالا به امنیت عملکرد کمک کرده و وزن و حجم تجهیزات را کاهش می دهد. DS باید در حد بالاترین سطوح باقی بماند. عوامل مختلفی مانند آلودگی، رطوبت، حباب ها، ذرات و اسیدیته، بر DS روغن تأثیر می گذارند. هر مایع عایقی بایستی بتواند ولتاژ AC فرکانس قدرت را در کنار تنش های ناشی از رعد و برق و سوئیچینگ تحمل کند که طی عملیات سامانه قدرت پیش می آید. عایق های نانو سیال جدید نشان داده اند که DS بهتری نسبت به TO پایه دارند و این بهبود بسته به نوع ولتاژها و شکل موج های مختلف از جمله AC، DC یا امپالس ها و با توجه به نوع نانوذرات اندازه گیری شده است.

استحکام دی الکتریک (AC BDS) یکی از ضروری ترین معیارها برای استفاده از عایق های مایع در ترانسفورماتورها است. این مقاومت حداکثر ولتاژ AC را نشان می دهد که عایق مایع قادر به تحمل بدون وقوع تخلیه مخرب است. عوامل آلودگی مانند ذرات کوچک، رطوبت و حباب های هوا نقش مهمی بر AC BDS دارند. بنابراین، ولتاژ شکست ارزیابی شده معمولاً نشان دهنده کیفیت مایع به جای ویژگی های ذاتی آن است. ولتاژ شکست عایق مایع (LI BDV) به وسیله ضربه های الکتریکی که معمولاً از ۱/۲ میکروثانیه برای رسیدن به ۹۰٪ دامنه و کاهش به ۵۰٪ دامنه در ۵۰ میکروثانیه استفاده می کنند، تعیین می شود. آزمایش های LI BDV طبق استاندارد IEC 60897 انجام می گیرد. این ویژگی تحت تأثیر عوامل مختلف نانوذرات مانند نوع، شکل و غلظت قرار می گیرد. بررسی ها نشان داده اند که نانوسیالات تهیه شده اولیه باعث بهبود AC و LI BDS می شوند. مطالعات گوناگون AC، DC و LI BDS را نیز بررسی کرده اند. به عنوان مثال، سارتوراتو و همکاران [۷۸] نانوسیالات مبتنی بر روغن ترانسفورماتور را با نانوذرات مغناطیسی و سورفکتانت های مختلف آزمایش کردند. هوانگ و اوسالوان [۱۵] به بهبود هدایت نانوسیالات مبتنی بر TO پرداختند. برخی پژوهش ها نشان می دهند که افزودن نانوذرات اصلاح شده TiO_2

مشاهده شده اما برخی مطالعات اخیر نشان‌دهنده تراکم ذرات نیز هستند که نیازمند بررسی دقیق‌تر است. هزینه بالای توسعه نانوسیالات یکی از موانع اصلی در استفاده تجاری و عملی از نانوذرات، هزینه بالای توسعه آن‌ها است. برای تهیه نانوسیالات، روش‌های تک‌فازی یا دو فازی معمولاً به کار می‌روند؛ ولی هر دو روش به تجهیزات پیچیده و هزینه‌بر نیاز دارند. وضع تحقیق جدید نانوسیالات توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده‌اند، زیرا از محدودیت‌های اساسی مفاهیم سنتی عبور می‌کنند و به یک حوزه تحقیقاتی و کاربردی نوظهور تبدیل شده‌اند.

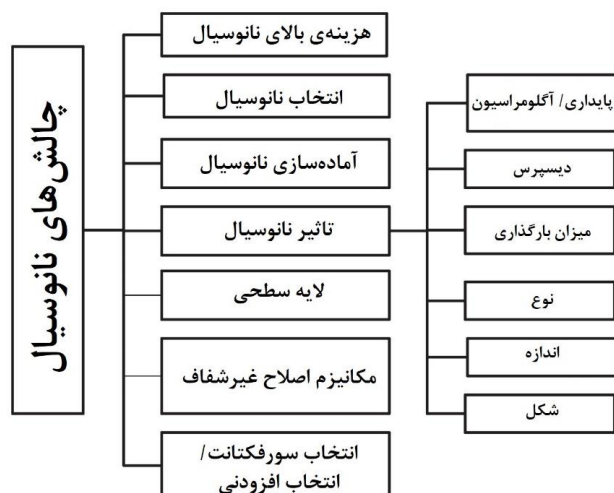
آگاهی از قابلیت‌ها به دلیل بهبود خصوصیات ترموفیزیکی و کارایی بهتر در پدیده‌های حرارتی، نانوسیالات به عنوان گزینه‌ای امیدوارکننده در کاربردهای مهندسی شناخته شده‌اند. با این حال، برای افزایش آگاهی در میان محققان دانشگاهی و صنعتی، تحقیقات بیشتری مورد نیاز است. بازار در حال رشد نانوسیالات به دلیل ویژگی‌های حرارتی برتر و سطوح بهبودیافته انتقال حرارت نسبت به مایعات خنک‌کننده معمولی، آینده انتقال حرارت را شکل می‌دهند. تحقیق برای پیدا کردن مایعی با خصوصیات حرارتی بهتر، جهت بهینه‌سازی طراحی اجزا و تجهیزات با کارایی بالاتر ضروری است و این بازار توان بالایی برای رشد اقتصادی دارد. بهبود انتقال حرارت نانوسیالات به عنوان نسلی آینده‌دار برای کاربردهای انتقال حرارت شناخته می‌شوند و انتظار می‌رود عملکرد حرارتی برتری نسبت به سیالات سنتی داشته باشند، زیرا وجود نانوذرات پراکنده باعث افزایش هدایت حرارتی می‌شود. آزمایش‌های صنعتی آینده تلاش‌هایی برای آزمایش نانوسیالات در محیط‌های واقعی در حال انجام است تا تأثیر شرایط کار بر عملکرد و کارایی آن‌ها ارزیابی شود. نتایج این آزمایش‌ها می‌تواند اثبات‌کننده مزایای بلندمدت و اثرات نانوذرات بر سایر قسمت‌های سامانه باشد. سیالات کاری دوستدار محیط زیست برای تولید نانوسیالات از روش‌های غیرسمی و دوستدار محیط زیست استفاده می‌شود تا کاربرد آن‌ها گسترش یابد. هدف این است که نانوذراتی توسعه یابند که هم محیط زیست را حفظ کنند و هم ویژگی‌های انتقال حرارت بالایی داشته باشند؛ در عین حال هزینه کم و توان تولید انبوه هم مدنظر باشد [۸۰].

۵-۱- سایر مشکلات مرتبط با فرآیند تولید

به TO مقاومت بیشتری در برابر رطوبت ایجاد می‌کند. نانوسیالات بر پایه روغن گیاهی نیز با استفاده از نانوذرات Fe_2O_3 یا TiO_2 نشان داده‌اند که می‌توانند ولتاژ شکست دی‌الکتریک را به میزان قابل توجهی افزایش دهند [۷۹]. تحقیقات دیگر نیز بر روی تأثیر اندازه و غلظت نانوذرات بر BDS تمرکز داشته‌اند و یافته‌ها نشان‌دهنده بهبود در استحکام دی‌الکتریک با اندازه‌ها و غلظت‌های متفاوت بوده‌اند. نانوذرات با تأخیرهای کمتر زمانی بهتر عمل کرده‌اند و نانوسیالات تهیه‌شده با نانوذرات Fe_3O_4 به دلیل زمان استراحت کمتر، BDV بالاتری نشان دادند. اما تجمع زیاد نانوذرات می‌تواند باعث کاهش BDV شود. این یافته‌ها تأکید بر اهمیت نانوذرات در بهبود ویژگی‌های الکتریکی روغن‌های ترانسفورماتور دارند. برای مثال، استفاده از نانوذرات TiO_2 توانسته استحکام دی‌الکتریک را تا ۳۰٪ افزایش دهد.

۵- چالش‌های مرتبط با نانوسیالات

نانوسیالات در گذشته به دلیل ویژگی‌های جذاب متعددی که ارائه داده‌اند، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. تحقیقات قبلی بیشتر بر هدایت حرارتی تمرکز داشته‌اند، اگرچه اخیراً تمرکز بیشتری بر روی دیگر خصوصیات انتقال حرارت نانوسیالات شده است. با اینکه نانوسیالات پتانسیل گسترده‌ای برای کاربردهای مختلف دارند، اما رشد این حوزه به دلیل مسائل گوناگون مانند: (۱) پایداری ضعیف مواد پراکنده شده؛ (۲) تفاوت در نتایج حاصل از مطالعات مختلف؛ (۳) کمبود دانش نظری در مورد مکانیزم‌های بهبود ویژگی‌ها کند بوده است. این بررسی تلاش می‌کند تا مسائل کلیدی نیازمند توجه و حل‌وفصل در آینده را شناسایی کند. چالش‌هایی همچون هدایت حرارتی، حرکت ذرات و تغییر ویژگی‌های ترموفیزیکی با دما باید به دقت بررسی شوند و تأثیرات حرارتی آن‌ها با دقت بیشتری سنجیده شود. بیشتر تحقیقات جابجایی موجود روی نانوذرات اکسیدی انجام شده‌اند، که معمولاً گرانش و قدرت پمپاژ سیال را افزایش می‌دهند. مطالعه نانوسیالات حاوی نانوذرات فلزی جالب به نظر می‌رسد؛ چراکه هدایت حرارتی نانومواد فلزی بسیار بالاتر از نوع اکسیدی است. تحقیقات آتی باید بر روی نانوذرات فلزی با شکل‌ها و بارگذاری‌های متفاوت متمرکز شوند تا انتقال حرارت بهینه شود. هرچند که بهبودهایی در انتقال حرارت با استفاده از نانوسیالات



شکل ۲۲. چالش‌های کلی توسعه نانوسیالات.

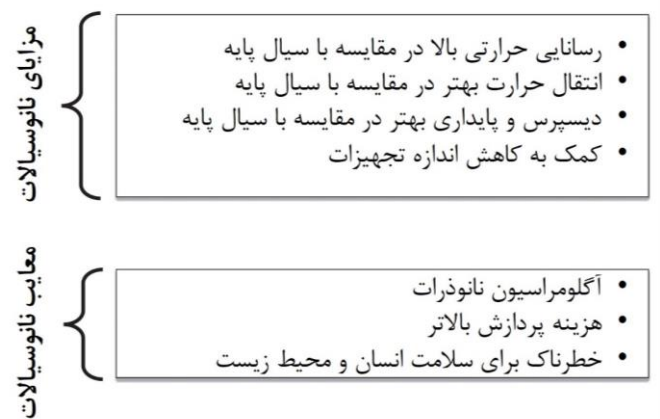
داده‌اند که هدایت حرارتی و توانایی انتقال حرارت نانوسیالات بهبود یافته است. گزارش‌ها حاکی از افزایش قابل توجه در سطح انتقال حرارت با استفاده از نانوسیالات در مقایسه با مایعات معمولی هستند. شناخت دقیق خواص نانوسیالات مانند هدایت حرارتی، گرانبوی و ظرفیت حرارتی ویژه برای کاربردهای مختلف بسیار ضروری است و اصول انتقال حرارت و دینامیک اصطکاک نیز باید بررسی شوند تا بتوان استفاده از نانوسیالات را گسترش داد. نانوسیالات مبتنی بر TO دارای مزایای متعددی هستند که شامل موارد زیر می‌شود: (۱) عملکرد عایق بندی و خنک‌کنندگی بهتری نسبت به مایعات سنتی دارند، (۲) هدایت حرارتی بالایی ارائه می‌دهند که به عملکرد بهتر تجهیزات HV کمک می‌کند. (۳) سطح بالا و در نتیجه تبادل حرارت بیشتری بین نانوذرات و مایعات فراهم می‌کنند. (۴) پایداری پراکندگی با حرکت براونی مناسب دارند. (۵) قدرت پمپاژ کمتری برای دستیابی به انتقال حرارت معادل نیاز دارند. (۶) ریسک انسداد کمتری نسبت به دوغاب‌های سنتی دارند، که به کوچک‌سازی سامانه کمک می‌کند. (۷) ویژگی‌های قابل تنظیمی مانند هدایت حرارتی و قابلیت مرطوب شدن سطح ارائه می‌دهند که برای کاربردهای مختلف مناسب هستند. سنتز ترکیبات آلی بدون حلال به شدت مورد توجه قرار گرفته است. این روش سازگار با محیط زیست بوده و مزایای متعددی مانند واکنش‌های غیرسمی، کاهش ضایعات مضر و بازده بالاتر محصول نهایی با شرایط واکنش ملایم‌تر دارد. این امر موجب پیدایش روش‌های نوآورانه برای تولید ترکیبات سازگار با محیط زیست شده است [۸۳].

به طور سنتی، نانوسیالات با استفاده از یک فرآیند تک مرحله‌ای که در آن نانوذرات به طور همزمان تولید و در سیال پایه معلق می‌شوند، یا یک روش دو مرحله‌ای که شامل تشکیل NPs و سپس معلق کردن آن‌ها در مایع میزبان است، توسعه می‌یابند. در هر دو این روش‌ها، NPs به طور ذاتی از روش‌هایی که شامل واکنش‌های کاهش یا تبادل یون هستند، تولید می‌شوند. علاوه بر این، مایعات پایه شامل سایر یون‌ها و محصولات واکنش هستند که جدا کردن آن‌ها از مایعات چالش‌برانگیز است. مشکل دیگری که به توسعه NFS مربوط می‌شود، تمایل NPs به آگلومراسیون و تبدیل شدن به ذرات بزرگ‌تر است که مزایای NPs با سطح بالا را محدود می‌کند. معمولاً چندین افزودنی پراکنش به مایع پایه با NPs اضافه می‌شود. با این حال، این رویکرد ممکن است سطح NPs را تغییر دهد و NFS توسعه‌یافته ممکن است شامل سطوح نامطلوبی از آلودگی‌ها باشد. اکثر تحقیقات تاکنون به اندازه نمونه‌ای محدود به چند صد میلی‌متر از NFS محدود شده‌اند. این مورد نیز یک مشکل است، زیرا نمونه‌های بزرگ‌تری برای آزمایش ویژگی‌های متعدد مرتبط با NFS و به ویژه برای ارزیابی کاربردهای بالقوه آن‌ها در کاربردهای عملی مورد نیاز است [۸۱]. اطلاعات موجود نشان می‌دهد که استفاده از NFS به عنوان مایع خنک‌کننده توجیه قوی‌تری دارد که این حوزه به عنوان یک چشم‌انداز غیرقابل انکار توسعه یافته است. اما این حوزه نیاز به تحقیقات جدی‌تری در مورد NFS دارد و لازم است مواردی مانند آماده‌سازی، شناسایی، ویژگی‌های ترموفیزیکی، انتقال حرارت و جرم، مدل‌سازی و همچنین کاربردهای تجاری در این حوزه بررسی شود. بنابراین، یک رویکرد چندرشته‌ای شامل محققانی مانند شیمی‌دانان، مهندسان حرارتی، کارشناسان مواد و فیزیک‌دانان باید آغاز شود. تنها چنین روشی می‌تواند آینده خنک‌کننده‌ها را با NFS تضمین کند [۸۲]. چالش‌های مطرح شده در NFS مبتنی بر TO در شکل ۲۲ خلاصه شده است.

۶- مزایای نانوسیالات

نانوسیالات به عنوان نسل آینده مایعات انتقال حرارت در کاربردهای متعدد شناخته می‌شوند. انتظار می‌رود این سیالات به دلیل وجود نانوذرات پراکنده با هدایت حرارتی بالاتر، عملکرد بهتری نسبت به مایعات سنتی داشته باشند. تحقیقات اخیر نشان

با این حال، نانوسیالات نیز چالش‌هایی ارائه می‌دهند که محدودیت‌هایی برای کاربرد صنعتی آن‌ها ایجاد می‌کند. هزینه پایین‌تر، پایداری بلندمدت و توجه به تأثیرات زیست محیطی و سلامت از جمله نیازمندی‌های ضروری هستند. نقاط ضعف مرتبط با نانوسیالات شامل موارد زیر است: (۱) پایداری ضعیف و تمایل به تجمع و رسوب نانوذرات. (۲) هزینه بالای فرایند ساخت و نیاز به تجهیزات پیشرفته. (۳) استفاده از سورفاکتانت که ممکن است هدایت الکتریکی را کاهش دهد. (۴) خطرات ایمنی ناشی از واکنش‌پذیری بالای نانوذرات. (۵) احتمال تأثیرات زیست‌محیطی منفی ناشی از آزادسازی نانوذرات در محیط [۸۴، ۸۵]. مزایا و محدودیت‌های نانوسیالات در شکل ۲۳ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۲۳. مزایا و محدودیت‌های نانوسیالات

۷- کاربرد نانوسیالات

نانوسیالات مبتنی بر روغن ترانسفورماتور تجهیزات ولتاژ بالا به مایعاتی با ویژگی‌های عایق و خنک‌کنندگی قوی نیاز دارند. نانوسیالات در مقایسه با مایعات سنتی عملکرد عایق و خنک‌کنندگی بهتری ارائه می‌دهند و به عنوان جایگزین‌های مناسبی برای مایعات در تجهیزات ولتاژ بالا شناخته می‌شوند. با استفاده از نانوسیالات، می‌توان اندازه و وزن تجهیزات را نیز کاهش داد، زیرا این سیالات خاصیت دی‌الکتریک و خنک‌کنندگی بالایی دارند. همچنین، ولتاژ انتقال و طول عمر تجهیزات ممکن است با این فناوری بهبود یابد. پراکنده کردن نانوذرات رسانا در روغن ترانسفورماتور ممکن است دمای آن را تا ۵ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد [۸۶، ۸۷]. مطالعات تجربی نشان می‌دهند که استفاده از نانوسیالات مبتنی بر روغن Al_2O_3/AlN

می‌تواند اثرات مثبتی بر روی اجزای حرارتی تجهیزات بگذارد. با این حال، مقدار زیاد مواد فعال سطحی ممکن است اثرات منفی بر هدایت حرارتی و گرانروی داشته باشد. با توجه به شکاف‌های تحقیقاتی و فعالیت کم در حوزه تحقیق و توسعه، استفاده از نانوسیالات مبتنی بر روغن روند رو به افزایش دارد. بهبود ویژگی‌های دی‌الکتریک و خنک‌کنندگی این سیالات از عوامل اصلی در استفاده از آن‌ها در تجهیزات ولتاژ بالا هستند. البته، پایداری طولانی‌مدت این نانوسیالات و تأثیر بلندمدت نانوذرات در روغن پایه همچنان نیازمند بررسی بیشتر است.

شکاف تحقیقاتی و چشم‌انداز آینده براساس مطالعات موجود، اکثر محققان بر مکانیزم‌هایی که باعث بهبود عملکرد حرارتی و دی‌الکتریک نانوسیالات می‌شوند، تمرکز دارند. غلظت نانوذرات بستگی زیادی به ماهیت مایع پایه، نوع نانوذرات، مواد فعال سطحی و فرایند سنتز دارد. برای بهره‌برداری مؤثرتر از نانوسیالات در ترانسفورماتورها، نیازمند تحقیقات عمیق‌تر درباره مواد و تأثیر آن‌ها بر ویژگی‌های حرارتی و دی‌الکتریک هستیم. ملزومات بررسی شامل پایداری بلندمدت نانوسیالات و تأثیر تجمع نانوذرات است. همچنین باید سازگاری آن‌ها با عایق‌های جامد و امکان توسعه آن‌ها با استفاده از مایعات گیاهی یا استرهای مصنوعی که به عنوان "عملکرد سبز" شناخته می‌شوند نیز ارزیابی شود. بررسی عملکرد نانوسیالات در دماهای بالاتر نیز ضروری است. در نهایت، جامعه تحقیقاتی باید راه‌های تبدیل آزمایش‌های کوچک به نمونه‌های صنعتی بزرگ‌تر را نیز بررسی کند.

۸- واکنش نانوسیالات با عوامل محیطی

نانوسیالات به دلیل داشتن نانوذرات پراکنده در سیال پایه، می‌توانند با محیط اطراف خود واکنش‌هایی داشته باشند که بر پایداری، عملکرد و خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها تأثیر می‌گذارد. در ادامه به برخی از مهم‌ترین واکنش‌های نانوسیالات با عوامل محیطی پرداخته شده است:

۱- اکسیداسیون و تخریب حرارتی

- عامل محیطی: اکسیژن هوا و دماهای بالا.

- واکنش: برخی نانوسیالات می‌توانند تحت تأثیر میدان الکتریکی قوی دچار تجزیه الکتریکی شوند و گازهایی مانند H_2 ، CO و CO_2 تولید کنند.
- تأثیر: کاهش استقامت دی‌الکتریک، افزایش تخریب عایقی در ترانسفورماتورها.
- راهکار: انتخاب نانوذرات پایدار در برابر تخریب الکتریکی، استفاده از ترکیبات مقاوم در برابر UV.
- ۵- واکنش با مواد موجود در سامانه (سازگاری با روغن عایق)
 - عامل محیطی: ترکیبات شیمیایی روغن‌های معدنی یا استری.
 - واکنش: برخی نانوذرات ممکن است با ترکیبات موجود در روغن عایق واکنش داده و خواص آن را تغییر دهند. به عنوان مثال نانوذرات فلزی مانند Ag و Cu می‌توانند در روغن‌های عایق اکسید شده و رنگ و گرانیوی روغن را تغییر دهند. همچنین نانوذرات کربنی می‌توانند ساختار شیمیایی روغن را تغییر داده و منجر به افزایش لجن شوند.
 - راهکار: انتخاب نانوذرات سازگار با روغن عایق و انجام آزمایش‌های بلندمدت پایداری.
- ۲- رسوب و تجمع ذرات
 - عامل محیطی: نیروی جاذبه، نیروی واندروالس، بار سطحی.
 - واکنش: نانوذرات در طول زمان ممکن است به دلیل جاذبه بین ذرات و نیروی واندروالس به هم بچسبند و توده‌های بزرگ تشکیل دهند.
 - تأثیر: کاهش پایداری نانوسیال، مسدود شدن مسیرهای خنک‌کننده، کاهش انتقال حرارت.
 - راهکار: استفاده از مواد فعال سطحی (سورفکتانت‌ها) و روش‌های پایدارسازی مانند التراسونیک.
- ۳- واکنش با رطوبت و آب (هیدرولیز)
 - عامل محیطی: رطوبت محیط یا نشت آب در سامانه.
 - واکنش: برخی نانوذرات مانند نانوذرات فلزی آلومینوم، منیزیم و روی در تماس با آب، واکنش داده و اکسید یا هیدروکسید تشکیل می‌دهند.
 - تأثیر: تغییر در pH نانوسیال، کاهش هدایت حرارتی و ناپایداری ترکیب نانوسیال.
 - راهکار: استفاده از روغن‌های خشک و مواد جاذب رطوبت.
- ۴- تجزیه شیمیایی و تولید گازهای نامطلوب
 - عامل محیطی: تابش UV، میدان الکتریکی قوی.

۹- نتیجه‌گیری

نانوفناوری به عنوان یک فناوری نوین، ارائه‌دهنده راه‌حل‌های دقیق برای توسعه سامانه‌های عایق نوآورانه با ویژگی‌های دی‌الکتریک و انتقال حرارت پیشرفته است. این مقاله به بررسی مطالعات موجود در زمینه بهبود ویژگی‌های حرارتی روغن ترانسفورماتور و سایر مواد که حاوی نانوذرات معلق هستند، می‌پردازد. آماری از منابع متعدد بررسی شده تا تأثیر نانوذرات بر پارامترهایی مانند هدایت حرارتی، گرانیوی و چگالی مشخص شود. برای بهره‌مندی خوانندگان، یک فهرست جامع از ادبیات موجود تهیه شده است. مواد فعال سطحی به عنوان یک افزودنی، نقشی مؤثر در بهبود هدایت حرارتی نانوسیالات ایفا می‌کند. اگرچه بسیاری از پژوهشگران از مواد فعال سطحی برای توسعه نانوسیالات پایدار بهره برده‌اند، اما تأثیر غلظت آن بر هدایت

1. M. Rafiq, Y. Lv, Y. Zhou, K. Ma, W. Wang, C. Li, Q. Wang, *Renew. Sust. Energ.*, 52, 308-324(2015).
2. E. Portfolio, *Transmission reliability and performance: 37.002, transformer life extension*, Accessed: Dec, 12 (2007) 2020.
3. M. Rafiq, M. Shafique, A. Azam, M. Ateeq, J. Mol. Liq., 302, 112482(2020).
4. R. Liao, C. Lv, L. Yang, Y. Zhang, W. Wu, C. Tang, *J. Nanomater.*, 2013, 373959(2013).
5. E.C. Nsofor, *Recent Pat. Mech. Eng.*, 1, 190-197(2008).
6. S.U. Choi, J.A. Eastman, *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles*, Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States), 1995.
7. D. Wen, Y. Ding, *IEEE Trans. Nanotechnol.*, 5, 220-227(2006).
8. P. Kopčanský, L. Tomčo, K. Marton, M. Koneracka, I. Potočová, M. Timko, J. Jadzyn, G. Czechowski, *Status Solidi B Basic Res.*, 236, 454-457(2003).
9. A. Hosseinpour, M.R. Abadchi, M. Mirzaee, F.A. Tabar, B. Ramezanzadeh, *Surf. Interfaces.*, 23, 100994(2021).
10. Z. Zhou, A. Seif, S. Pourhashem, J. Duan, A. Rashidi, P.L. Silvestrelli, X. Ji, M. Mirzaee, B. Hou, *Constr. Build. Mater.*, 384, 131229 (2023).
11. V. Segal, A. Rabinovich, D. Nattrass, K. Raj, A. Nunes, *J. Magn. Magn. Mater.*, 215, 513-515(2000).

حرارتی به‌طور کامل بررسی نشده است. در مقاله اشاره شده که تحقیقات محدودی درباره گرانشی نانوسیالات مبتنی بر روغن انجام شده است و بررسی‌های مختلفی در این خصوص با انواع و اندازه‌های مختلف نانوذرات ارائه شده است. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که نانوسیالات قادر به بهبود قابل ملاحظه انتقال حرارت هستند و برای کاربردهای عملی در این حوزه بسیار مناسب‌اند. این موضوع افق جدیدی برای محققان به منظور طراحی دستگاه‌های انتقال حرارت فشرده و کارآمد فراهم می‌کند. بنابراین، نیاز به تحقیقات بیشتر برای درک ویژگی‌های پیچیده انتقال حرارت در نانوسیالات مبتنی بر روغن احساس می‌شود.

استحکام دی‌الکتریک و BDV نانوسیالات تاکنون به‌صورت کامل ارزیابی نشده‌اند. عواملی چون اندازه، شکل، غلظت، اصلاح سطح نانوذرات، محتوای رطوبت و فاصله الکترود نیازمند بررسی جامع هستند. با این حال، تهیه نانوسیالات مبتنی بر روغن همچنان با چالش‌هایی مانند عدم توافق در نتایج و کاراکترسازی ضعیف مواجه است. تحقیقات جامع‌تر در این زمینه برای بهره‌برداری بهتر از این فناوری مورد نیاز است. بر اساس ادبیات موجود، تبیین شده است که هدایت حرارتی نانوسیالات به عنوان یک انگیزه برای بهبود عملکرد در کاربردهای مختلف شناخته می‌شود. نانوسیالات پتانسیل بالایی برای استفاده در کاربردهای متعدد دارند و یافته‌ها نشان داده‌اند که می‌توان خصوصیات حرارتی و رئولوژیکی آنها را بدون اتصال مستقیم به کاربردهای خاص بهبود بخشید. همچنین، استفاده از نانوسیالات می‌تواند باعث افزایش کارایی و کاهش اندازه دستگاه‌های تبادل حرارت شود. با وجود این، یافته‌های برخی محققان نشان‌دهنده تناقضاتی بین مدل‌ها و نتایج تجربی درباره هدایت حرارتی نانوسیالات است. اگرچه مکانیزم دقیق بهبود انتقال حرارت هنوز کاملاً مشخص نیست، اما چالش‌های شناسایی شده نیازمند راه حل هستند تا بتوان از ظرفیت کامل آنها بهره برد. پایداری و هزینه بالای تولید نانوسیالات نیز موارد مهمی هستند که پیش روی تجاری‌سازی گسترده آنها قرار دارد. پس از رفع این مسائل، انتظار می‌رود که نانوسیالات به عنوان خنک‌کننده‌ای مؤثر در دستگاه‌های تبادل حرارت جایگاه قابل توجهی کسب کنند.

23. M. Kole, T. Dey, *Thermochim. Acta*, 535, 58-65(2012).
24. J. Park, K. An, Y. Hwang, J.-G. Park, H.-J. Noh, J.-Y. Kim, J.-H. Park, N.-M. Hwang, T. Hyeon, *Nat. Mater.*, 3, 895-891(2004).
25. A. Nasiri, M. Shariaty-Niasar, A. Rashidi, A. Amrollahi, R. Khodafarin, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 35, 717-723(2011).
26. J.H. Fendler, *Korean J. Chem. Eng.*, 18, 1-13(2001).
27. A. Katiyar, P. Dhar, T. Nandi, L. S. Maganti, S. K. Das, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 23(6), 3494-3503(2016).
28. Y. Xuan, Q. Li, P. Tie, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 46, 259-262(2013).
29. I. Zakaria, M. Ahmad, Z. Abdul-Malek, M. Sidik, Z. Nawawi, M. Jambak, AC breakdown strength performance of plasma treated mineral oil-based nanofluids, 2017 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS), IEEE, 2017, pp. 333-337.
30. S.S. Dessouky, S.A.M. Abdelwahab, M. Shaban, Effect of titanium oxide nanoparticles on breakdown strength of transformer oil, 2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), IEEE, 2017, pp. 538-542.
31. G. Shukla, H. Aiyer, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 22, 2185-2190(2015).
32. P. Krajnik, F. Pusavec, A. Rashid, Nanofluids: properties, applications and sustainability aspects in materials processing technologies, *Advances in*
12. A. Zolriasatein, Z. RajabiMashhadi, D.H. Ardebili, N.R. Noori, M.R. Abadchi, M. Mirzaee, *Int. J. Adhes. Adhes.*, 126, 103465(2023).
13. M. Shafique, X. Luo, *Mater.*, 12, 2493(2019).
14. M. Mirzaee, T. Mohebbi, M. Rezaei Abadchi, *Nashrieh Shimi va Mohandesi Shimi Iran*, 43, 63-98(2024).
15. J.G. Hwang, F. O'Sullivan, M. Zahn, O. Hjortstam, L.A. Pettersson, R. Liu, Modeling of streamer propagation in transformer oil-based nanofluids, 2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE, 2008, pp. 361-366.
16. M. Mirzaee, A. Rashidi, A. Zolriasatein, M. Rezaei Abadchi, *J. Polym. Res.*, 28, 62(2021).
17. M. Mirzaee, A. Yousefpour, T. Mohebbi, *Farayandno*, 19, 20-36(2024).
18. Y. Hwang, J.-K. Lee, J.-K. Lee, Y.-M. Jeong, S.-i. Cheong, Y.-C. Ahn, S.H. Kim, *Powder Technol.*, 186, 145-153 (2008).
19. Y. Li, S. Tung, E. Schneider, S. Xi, *Powder Technol.*, 196, 89-101 (2009).
20. P. Keblinski, S. Phillpot, S. Choi, J. Eastman, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 45, 855-863(2002).
21. I. Kaur, L.-J. Ellis, I. Romer, R. Tantra, M. Carriere, S. Allard, M. Mayne-L'Hermite, C. Minelli, W. Unger, A. Potthoff, *J. Vis. Exp.*, 130, 56074(2017).
22. C. Ying, Z. Zhaoying, Z. Ganghua, , *Ultrasound Med. Biol.*, 32, 415-420 (2006).

40. S. Suresh, K. Venkataraj, P. Selvakumar, M. Chandrasekar, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 38, 54-60(2012).
41. S.M. Abbasi, A. Rashidi, A. Nemati, K. Arzani, *Ceram. Int.*, 39, 3885-3891(2013).
42. D.K. Devendiran, V.A. Amirtham, *Renew. Sust. Energ.*, 60, 21-40 (2016).
43. A. Nasiri, M. Shariaty-Niasar, A.M. Rashidi, R. Khodafarin, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 55, 1529-1535(2012).
44. A. Rashidi, H. Ahmadi, S.S. Mohtasebi, M. Pourkhalil, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 48, 178-182(2013).
45. N. Putra, W. Roetzel, S.K. Das, *Heat Mass Transf.*, 39, 775-784(2003).
46. D.H. Fontes, G. Ribatski, E.P. Bandarra Filho, *Diam. Relat. Mater.*, 58, 115-121(2015).
47. J. Taha-Tijerina, T.N. Narayanan, G. Gao, M. Rohde, D.A. Tsentalovich, M. Pasquali, P.M. Ajayan, *ACS Nano*, 6, 1214-1220(2012).
48. S.H. Qing, W. Rashmi, M. Khalid, T. Gupta, M. Nabipoor, M.T. Hajibeigy, *Mater. Res. Express*, 4, 015504(2017).
49. A. Amiri, M. Shanbedi, G. Ahmadi, S. Rozali, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 83, 40-47(2017).
50. S.U. Ilyas, R. Pendyala, M. Narahari, L. Susin, *Energy Convers. Manage.*, 142, 215-229(2017).
51. B.C. Pak, Y.I. Cho, *Exp. Heat Transf.*, 11, 151-170(1998).
- Sustainable Manufacturing: Proceedings of the 8th Global Conference on Sustainable Manufacturing, Springer, 2011, pp. 107-113.
33. P. Muangpratoom, N. Pattanadech, A. Kunakorn, W. Vittayakorn, Impulse breakdown characteristic of mineral oil based nanofluid, 2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), IEEE, 2017, pp. 1-4.
34. E.G. Atiya, D.-E.A. Mansour, R.M. Khattab, A.M. Azmy, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 22, 2463-2472 (2015).
35. H. Jin, Dielectric strength and thermal conductivity of mineral oil based nanofluids, Delft University of Technology, (2015) 1-170.
36. B. Du, J. Li, B.-M. Wang, Z.-T. Zhang, Preparation and breakdown strength of Fe₃O₄ nanofluid based on transformer oil, 2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application, IEEE, 2012, pp. 311-313.
37. V. Charalampakos, A. Bakandritsos, G. Peppas, E. Pyrgioti, I. Gonos, A comparative study of natural ester based nanofluids with Fe₂O₃ and SiO₂ nanoparticles, 2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), IEEE, 2017, pp. 1-4.
38. E.V. Timofeeva, M.R. Moravek, D. Singh, J. Colloid Sci., 364, 71-79(2011).
39. H. Ahmadi, A. Rashidi, A. Nouralishahi, S.S. Mohtasebi, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 46, 142-147(2013).

64. H.E. Patel, T. Sundararajan, S.K. Das, J. Nanopart. Res., 12, 1015-1031(2010).
65. Y. Xuan, Q. Li, W. Hu, Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids, AIChE J., 49, 1038-1043(2003).
66. M. Mirzaee, A. Rashidi, A. Zolriasatein, M.R. Abadchi, Ceram. Int., 47, 5977-5984(2021).
67. M.M. Bhunia, S. Das, P. Chattopadhyay, S. Das, K.K. Chattopadhyay, Enhancement of thermal conductivity of transformer oil by exfoliated white graphene nanosheets, 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), IEEE, 2016, pp. 1-5.
68. S. Aberoumand, A. Jafarimoghaddam, Alex. Eng. J., 57, 169-174 (2018).
69. A. Beheshti, M. Shanbedi, S.Z. Heris, J. Therm. Anal. Calorim., 118, 1451-1460(2014).
70. M. Chopkar, S. Sudarshan, P. Das, I. Manna, Metall. Mater. Trans. A: Phys., 39, 1535-1542(2008).
71. H.-q. Xie, J.-c. Wang, T.-g. Xi, Y. Liu, Int. J. Thermophys., 23, 571-580(2002).
72. M.J. Pastoriza-Gallego, C. Casanova, J.a. Legido, M.M. Piñeiro, Fluid Ph. Equilib., 300, 188-196 (2011).
73. S. Sumathi, R. Rajesh, Current Sci., 118, 29-33(2020).
74. R. Karthik, T.S.R. Raja, R. Madavan, Arab. J. Sci. Eng., 38, 2725-2733(2013).
52. A. Amiri, M. Shanbedi, M.J. AliAkbarzade, J. Dispers. Sci. Technol., 37, 949-955(2016).
53. E.V. Timofeeva, J.L. Routbort, D. Singh, , J. Appl. Phys. 106 (2009).
54. A. Ghozatloo, A. Rashidi, M. Shariaty-Niassar, Exp. Therm. Fluid Sci., 53, 136-141(2014).
55. Y.-X. Zeng, X.-W. Zhong, Z.-Q. Liu, S. Chen, N. Li, J. Nanomater., 2013, 270490(2013).
56. Y.-j. Hwang, J. Lee, C. Lee, Y. Jung, S. Cheong, C. Lee, B. Ku, S. Jang, Thermochim. Acta, 455, 70-74(2007).
57. X. Wang, X. Xu, S.U. Choi, J. Thermophys. Heat Transf., 13, 474-480 (1999).
58. C. Chen, M. Niu, L. Wang, Y. Ge, M. Huang, Y. Lv, C. Li, Effect of nanoparticle type on prebreakdown and breakdown characteristics of transformer oil, 2018 IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (ICD), IEEE, 2018, pp. 1-4.
59. M. Chiesa, S.K. Das, Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp., 335, 88-97(2009).
60. B. Du, X. Li, J. Li, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 22, 2530-2536 (2015).
61. W. Yao, Z. Huang, J. Li, L. Wu, C. Xiang, J. Nanomater., 2018, 4504208 (2018).
62. A.M. Gobin, M.H. Lee, N.J. Halas, W.D. James, R.A. Drezek, J.L. West, Nano lett., 7, 1929-1934 (2007).
63. C.P.Y. Alicia, R. W, M. Khalid, A.K. Rasheed, T. Gupta, J. Eng. Sci. Technol., 11, 140-152(2016).

87. T. Rouse, IEEE Electr. Insul. Mag., 14, 6-16(1998).
75. M. Maharana, M.M. Bordeori, S.K. Nayak, N. Sahoo, IET Sci. Meas. Technol., 12, 878-885(2018).
76. N. Baruah, M. Maharana, S.K. IET Sci. Meas. Technol., 13, 995-1002 (2019).
77. L. Dong, D. Johnson, Langmuir, 19, 10205-10209 (2003).
78. P. Sartoratto, A. Neto, E. Lima, A. Rodrigues de Sá, P. Morais, J. Appl. Phys., 97 (2005).
79. J. Kudelcik, P. Bury, P. Kopcansky, M. Timko, Physics procedia, 9, 78-81(2010).
80. D. Liu, Y. Zhou, Y. Yang, L. Zhang, F. Jin, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 23, 2757-2767(2016).
81. Y. Hwang, H. Park, J. Lee, W. Jung, Curr. Appl. Phys., 6, e67-e71(2006).
82. D. Wen, G. Lin, S. Vafaei, K. Zhang, Particuology, 7, 141-150(2009).
83. B. Baroli, M.G. Ennas, F. Loffredo, M. Isola, R. Pinna, M.A. López-Quintela, J. Invest. Dermatol., 127, 1701-1712(2007).
84. R.H. Hurt, M. Monthieux, A. Kane, Carbon, 44, 1028-1033(2006).
85. M. Geiser, B. Rothen-Rutishauser, N. Kapp, S. Schürch, W. Kreyling, H. Schulz, M. Semmler, V.I. Hof, J. Heyder, P. Gehr, Environ. Health Perspect., 113, 1555-1560 (2005).
86. L.E. Lundgaard, W. Hansen, D. Linhjell, T.J. Painter, IEEE Trans. Power Syst., 19 230-239(2004).



Nanofluids in transformer insulation: synthesis, performance and future prospects

Majid Mirzaee*, Majid Rezaei Abadchi, Alimorad Rashidi

Non-metallic Group, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran

Abstract: With the increase in voltage levels in power transmission, the need to ensure the insulating performance of transformers has significantly increased. Mineral oil and paper are the main insulating components in oil-filled transformers. Given the growing demand for superior insulations, several researchers have conducted experimental studies to demonstrate the effectiveness and capabilities of transformer oils. To enhance the insulating level of ultra-high voltage transformers and reduce their weight and dimensions, it is essential to increase the dielectric strength of transformer oil and the cellulose impregnated. Recently, an innovative project has been implemented in the application of nanotechnology in the liquid insulations of transformers, with results indicating a significant improvement in the insulating properties of transformer oils. The field of oil-based transformer nanofluids has recently attracted considerable attention from both theoretical and practical perspectives. Nanofluids can be used as a potential replacement for mineral oils in the near future. This article reviews a collection of research conducted in this area, divided into three main sections. The first section focuses on the preparation of nanofluids, including various types of nanomaterials and synthetic methods for producing stable and suspended nanofluids. The second section thoroughly examines and compares the performance of nanofluids, concentrating on the thermal, electrical, and physicochemical properties of transformer oil. The third section addresses the advantages and limitations of nanofluids. The significance of this article lies in its compilation of previous studies, categorization of research nature, motivations, and predictions of future trends. Additionally, several recommendations for future research and applications of nanofluids are provided.

Keywords: Transformer, Oil, Nanofluid, Nanomaterials.