



## مروری بر افزایش کارایی و کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های تبرید خانگی با استفاده از نانومبردها

مجید جلیلیان<sup>۱\*</sup>، محمدحسن کامیاب<sup>۲</sup>، حامد شریفی دوست<sup>۱</sup>

۱. کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشکده عمران، آب و انرژی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

۲. مدرس و پژوهشگر، مهندسی مکانیک، دانشکده عمران، آب و انرژی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

\*نویسنده مسئول: majid.jalilian9412@ihu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰

### چکیده

این مطالعه مروری به بررسی نقش نانومبردها با ویژگی‌های ترموفیزیکی و انتقال حرارت منحصربه‌فرد در بهبود عملکرد سیستم‌های تبرید خانگی می‌پردازد. یافته‌ها نشان می‌دهند که افزودن نانوذرات به مبردها می‌تواند با افزایش ظرفیت خنک‌کنندگی و کاهش نیاز به توان ورودی کمپرسور، کارایی انرژی را افزایش دهد. با این حال، چالش‌هایی مانند پایداری، توزیع یکنواخت و جلوگیری از تجمع نانوذرات، از عوامل مهمی هستند که در بهبود عملکرد سیستم تأثیرگذارند. نتایج حاکی از آن است که نانوسیالات با بهبود هدایت حرارتی و کاهش زمان کارکرد کمپرسور، مصرف انرژی را کاهش می‌دهند؛ به‌ویژه در یخچال‌هایی که نیازمند کارکرد مداوم هستند. در این تحقیق همچنین بیان می‌گردد که هدایت حرارتی نانومبردها با کاهش اندازه ذرات و افزایش دما افزایش یافته و ویسکوزیته آن‌ها با افزایش دما کاهش می‌یابد. برای نمونه، در نانو مبرد SWCNT/R-134a، افزایش هدایت حرارتی در دمای ۳۲۵ درجه کلوین و غلظت حجمی ۵ درصد، حدود ۴۳ درصد بوده است. به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از نانومبردها می‌تواند رویکردی موثر در کاهش مصرف انرژی و افزایش کارایی سیستم‌های تبرید خانگی باشد.

**کلمات کلیدی:** نانومبردها، مصرف انرژی، سیستم‌های تبرید خانگی، انتقال حرارت

### مقدمه

تبرید فرآیندی است که در آن گرما از یک فضای بسته یا از یک ماده به منظور کاهش دمای آن خارج می‌شود. همچنین تبرید بخش مهمی از زندگی مدرن است و در خانه‌ها، مشاغل و محیط‌های صنعتی برای حفظ غذا، خنک کردن ساختمان‌ها و فعال کردن بسیاری از کاربردهای دیگر استفاده می‌شود. مبرد یک ماده سیال است که اساساً در حالت مایع یا گاز است که اثر تبرید را نشان می‌دهد. این مواد در یک مکان در سطح دمای پایین گرما را جذب می‌کنند و در جایی که دما و فشار بالاتری دارند گرما را دفع می‌کنند. مبردها معمولاً مولکول‌های کوچکی هستند که نقطه جوش نرمال پایین‌تری دارند. با این حال، سایر خواص مربوط به ایمنی (اشتعال پذیری یا دمای اشتعال خودکار)، اثرات زیست محیطی (تخریب لایه ازن یا گرم شدن کره زمین) و همچنین مجموعه‌ای از خواص مربوط به فرآیند (خواص تعادل فاز، آنتالپی فاز و گرمای تبخیر) بر نیز بر انتخاب آنها تأثیر می‌گذارد [۱ و ۲]. مبردهای رایج، هیدروکربن‌ها و هیدروفلوئوروکربن‌ها هستند. بهبودهای انجام شده بر روی مبردها و کمپرسور به همین ترتیب در طول سال‌ها به استفاده گسترده‌تر از سیستم‌های تبرید همراه با توسعه سیستم‌ها و اجزای سیستم‌های تبرید و تهویه مطبوع کمک کرده است [۳]. اولین مبرد مورد استفاده در یک سیستم بسته محصول تقطیر مخرب لاستیک، اتیل‌اتر بود که بسیار خطرناک و سمی است، اما این مبرد بیش از یک دهه قبل از سایر مواد طبیعی، مانند دی‌اکسید کربن، آمونیاک و هوا مورد استفاده قرار گرفت. دانشمندان مختلف همچنین دی‌اکسید کربن را آزمایش کردند. با استفاده از طرح‌های دانشمندان دیگر یخچال‌های دریایی ساخته شد. در دهه ۱۹۰۰، سیستم تبرید R744 برای تهویه مطبوع تولید شد. بحث تبرید که شامل بسیاری از محصولات مختلف است، یک چالش علمی حیاتی در مراکز صنعتی است [۴ و ۵]. با مطالعات انجام شده در حوزه انرژی، مشخص شده است که مصرف انرژی با رشد اقتصادی یک کشور مرتبط است [۶]. کاربردهای تبرید و تهویه مطبوع تقریباً ۱۵ درصد از کل مصرف انرژی جهان را تشکیل می‌دهند [۷]. کاهش نرخ مصرف انرژی در یک کشور از



کوچکترین واحد یعنی خانه شروع می‌شود [۸]. راه‌های مختلف کاهش مصرف برق در یخچال‌ها را می‌توان با اصلاح مواد در بدنه با استفاده از پلی فوم یا فایبرگلاس، افزایش انتقال حرارت کندانسورها و اواپراتورها با وارد کردن هواکش‌ها یا افزایش سطح و افزایش راندمان انجام داد. بهبود راندمان کمپرسور در سیکل تبرید از کاهش اصطکاک شروع می‌شود که با استفاده از روان کننده مناسب می‌توان آن را کاهش داد [۹]. اخیراً توجه قابل توجهی به نانوسیال‌ها، محلول‌های کلئیدی در مقیاس نانو، متشکل از نانوذرات (با اندازه‌های ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) پراکنده در یک سیال پایه شده است [۱۰-۱۲]. این سیال با ذرات معلق اولین بار توسط ماسودا و همکاران [۱۳] به عنوان "نانوسیال" نامیده شد. چوی و همکاران [۱۴] استفاده از ذرات نانومتری در سیالات را برای افزایش انتقال حرارت و به حداقل رساندن مسائل انسداد و رسوب در مخلوط‌های متشکل از ذرات میلی‌متری و میکرومتری پیشنهاد نمودند. پراکندگی نانوذرات مواد جامد به پدیده‌ای رایج برای افزایش ویژگی‌های حرارتی سیال عامل در سیستم‌های ترمودینامیک تبدیل شده است [۱۵ و ۱۶].

در این مطالعه، ابتدا به بررسی اصول و عملکرد سیستم‌های تبرید پرداخته می‌شود تا درک بهتری از فرآیندهای سرمایش و عوامل مؤثر بر کارایی آن‌ها حاصل گردد. سپس، خواص ترموفیزیکی نانو مبردها، از جمله هدایت حرارتی و ویسکوزیته، به تفصیل مورد تحلیل قرار می‌گیرد. این خواص به عنوان عوامل کلیدی در بهبود عملکرد سیستم‌های تبرید شناخته می‌شوند و تاثیر مستقیم آن‌ها بر کارایی و مصرف انرژی یخچال‌های خانگی بررسی خواهد شد. در نهایت، نتایج به دست آمده از این تحلیل‌ها می‌تواند به توسعه راهکارهای نوین در طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های تبرید کمک کند و به کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری در یخچال‌های خانگی منجر شود.

### سیستم‌های تبرید

سیستم‌های تبرید به‌طور کلی به سه دسته تقسیم می‌شوند: ۱- سیستم جذب بخار که از انرژی گرمایی برای راه اندازی سیستم استفاده می‌کند. در اینجا به جای کمپرسور از پمپ استفاده می‌شود. این سیستم از یک ژنراتور، یک کندانسور، یک تبخیرکننده، یک پمپ و یک جاذب تشکیل شده است [۱۷]. ۲- سیستم‌های تبرید هوایی که در این نوع سیستم‌ها از هوای فشرده به عنوان سیال عامل استفاده می‌شود. این سیستم‌ها بیشتر در کاربردهایی نظیر صنایع حمل و نقل هوایی و برخی تجهیزات نظامی مورد استفاده قرار می‌گیرند و به دلیل عدم نیاز به سیالات تبریدی مصنوعی، از مزایای زیست‌محیطی برخوردارند. ۳- سیستم تبرید تراکمی بخار در میان مهم‌ترین چرخه‌ها رتبه بندی می‌شود زیرا دارای طیف گسترده‌ای از دماهای گرمایش و سرمایش و همچنین فشار است [۱۸]. در این سیستم دما و فشار بخار مبرد با استفاده از کمپرسور تقویت می‌شود. یک یخچال تراکمی بخار معمولاً از یک اواپراتور، یک کمپرسور، یک کندانسور و یک شیر مویرگی یا انبساط تشکیل شده است. گاهی اوقات شامل اجزای کمکی است [۱۹]. این چرخه با جذب بخار با فشار اتمسفر پایین از محیط اطراف یا از محفظه بسته در طول فرایند فشرده‌سازی به نام ضربه مکش کار می‌کند. سپس کمپرسور مبرد را فشرده می‌کند در حین فرایند فشرده‌سازی به یک سیال کاری با دمای بالا و فشار بالا می‌رسد و سپس به کندانسور منتقل می‌شود که فشار و دما را کاهش می‌دهد و گرما را از طریق اواپراتور به مایع خنک‌کننده منتقل می‌کند. شیر انبساط بخار با دمای پایین را به اواپراتور در محفظه ذخیره می‌دهد که بخار خشک را جذب کرده و از آن برای خنک کردن اجسام اطراف استفاده می‌کند، سپس بخار خشک باز یافت می‌شود [۲۰].

### نانوسیال

#### تهیه نانو سیال

روش‌های تهیه نانو سیالات به طور کلی به دو نوع روش یک مرحله‌ای و روش دو مرحله‌ای تقسیم می‌شوند. در روش یک مرحله‌ای، نانوذرات به طور همزمان در یک سیال پایه ساخته و پراکنده می‌شوند. در فرآیند دو مرحله‌ای ابتدا باید نانوذرات مورد نظر را ساخته شود و سپس در محیط پایه پخش کنیم تا نانو سیال تهیه شود [۲۱]. برای تهیه نانو سیال‌ها روش دو مرحله‌ای می‌باشد. این روش برای نانو سیال‌های حاوی نانوذرات اکسیدی و نانولوله‌های کربنی، به‌ویژه برای مسائل صنعتی به دلیل روش تهیه ساده، مناسب است. از آنجایی که برای افزایش انتقال حرارت به غلظت‌های بالا نیاز است، افزایش هزینه اجتناب



ناپذیر است. این تکنیک برای کاربردهایی با غلظت ذرات بیش از ۲۰ درصد حجمی مناسب است، در حالی که نانوذرات فلزی برای غلظت‌های پایین‌تر پیشنهاد می‌شوند [۲۲ و ۴].

### نانوسیالات به‌عنوان سیال ثانویه

سیال ثانویه در سیستم‌های تبرید و پمپ حرارتی برای انتقال مؤثر گرما بین جزء سیستم و منبع گرما استفاده می‌شود. آب به طور گسترده‌ای به‌عنوان خنک‌کننده (مایع ثانویه) برای دفع گرما از اجزای مختلف سیستم تبرید (کندانسور، جاذب، انتهای داغ خنک‌کننده ترموالکتریک و غیره) به هوای محیط برج خنک‌کننده، رودخانه، اقیانوس و غیره به کار برده می‌شود. به طور مشابه، آب و آب نمک‌های مختلف برای انتقال اثر خنک‌کننده از اواپراتور به پروتکل‌های کاربردی (کابین‌های نمایش در سوپرمارکت، صنایع غذایی یا کولرهای هوا برای سیستم‌های تهویه مطبوع و غیره) استفاده می‌گردند. از آنجایی که رسانایی حرارتی سیالات ثانویه نسبت به نانوذرات به طور قابل توجهی پایین است، استفاده از نانوسیالات پراکنده نانوذرات مبتنی بر سیال ثانویه (با بهبود خواص ترموفیزیکی و انتقال در مقایسه با سیال پایه) می‌تواند عملکرد سیستم تبرید را بهبود بخشد. خواص ترموفیزیکی و انتقال (به ویژه هدایت حرارتی) به شدت بر ویژگی‌های حرارتی دستگاه‌های مبادله حرارتی (مقابل، تبخیرکننده، ژنراتور، جاذب و غیره) استفاده شده در دستگاه تبرید تأثیر می‌گذارد و از این رو دمای عملیاتی مبرد برای یک منبع معین و دمای سینک را تحت تأثیر قرار می‌دهد، در نهایت بر عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارد [۲۳]. مهم‌ترین و اساسی‌ترین مسئله نانوسیالات مونو و هیبریدی فرآیند سنتز آنها برای استفاده در سیستم تبرید است، زیرا پایداری نانوسیالات تهیه شده تحت تأثیر آن قرار می‌گیرد. سنتز نانوسیالات نیازمند تکنیک‌های خاصی برای محلولی پایدار و همگن است که کمترین مشکلات رسوبی و تجمعی را داشته باشد.

### تأثیر نانوسیال در عملکرد سیستم تبرید

واسکونسلوس و همکاران [۲۴] قابلیت خنک‌کنندگی و ضریب عملکرد سیستم را با استفاده از نانو لوله‌های کربنی نانوسیال آب به‌عنوان مبرد ثانویه بیان نمودند. استفاده از نانوسیال قدرت کمپرسور را کاهش می‌دهد اما در نتیجه قدرت پمپ افزایش می‌یابد. راگوالو و همکاران [۲۵] تحقیقاتی را در مورد بهبود ضریب عملکرد با نانوسیال انجام دادند اما مطالعه خود را به بررسی روانکار پایه بهتر برای نانو روان‌کننده‌ها برای مخلوط کردن، محدود کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که روغن معدنی به دلیل سازگاری با مبردهای کلروفلوروکربن<sup>۳</sup> بهتر از روغن پلی‌استر است. اشاره شد که تحقیقات پایه و کاربردی بیشتری باید مورد بررسی قرار گیرد تا بینش بیشتری در این زمینه به دست آید. آجایی و همکاران [۲۶] با استفاده از نانو مبرد اکسید تیتانیوم که منجر به کاهش دمای اواپراتور شد، آزمایش کردند. آجایی و همکاران [۲۷] از نانولوبریکانت الماس برای کمپرسور استفاده کرد و منجر به ضریب عملکرد و ظرفیت خنک‌کنندگی بالاتر شد. تحقیقات بیشتری وجود دارد که نشان می‌دهد نانوسیال عملکرد یخچال‌ها را بهبود می‌بخشد.

### خواص ترموفیزیکی نانوسیالات

#### هدایت گرمایی

رسانایی گرمایی یکی از ویژگی‌های مهم نانوسیالات به‌عنوان نانو مبرد یا سیال ثانویه در سیستم تبرید برای افزایش عملکرد انتقال حرارت است. ضریب انتقال حرارت و سرعت انتقال حرارت به شدت به هدایت حرارتی بستگی دارد. این واقعیت ثابت شده است که هدایت حرارتی با استفاده از نانوسیال‌ها افزایش می‌یابد و به پارامترهای زیادی از جمله کسر حجمی، دما، اندازه ذرات، شکل ذرات، مقدار pH، مواد افزودنی و روش آماده‌سازی وابسته است [۲۸ و ۲۹]. باین‌حال، بهبود رسانایی حرارتی برای نانوسیال‌های مبتنی بر گرافن بسیار مهم‌تر است [۳۰]. برای نانو مبرد، رسانایی حرارتی عمدتاً بر جوش و میعان تأثیر می‌گذارد.

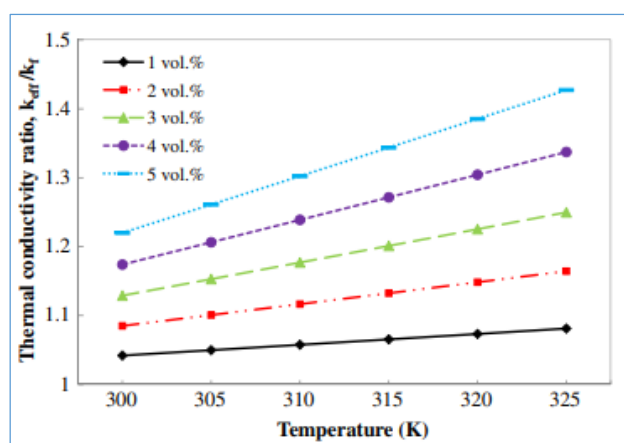
<sup>1</sup> Coefficient of performance (COP)

<sup>2</sup> Carbon nanotube (CNT)

<sup>3</sup> Chlorofluorocarbons (CFC)



جیانگ و همکاران [۳۱] هدایت حرارتی نانو میردهای مختلف را اندازه‌گیری نموده و نشان دادند که این بهبود به شدت تحت تاثیر تجمع نانوذرات و تشکیل خوشه‌های نانوذرات است. آنها همچنین مدلی را برای پیش‌بینی رسانایی حرارتی نانو میرد توسعه دادند. از طریق مطالعه دیگری، جیانگ و همکاران [۳۲] همچنین نشان دادند که رسانایی حرارتی نانومیردهای با نانو لوله کربنی بسیار بالاتر از نانوسیالات آب با نانو لوله کربنی یا نانومیردهای کروی نانوذرات R113 است. جیانگ و همکاران [۳۱ و ۳۲] و محبوب و همکاران [۳۳ و ۳۴] مدل‌های مناسب از مطالعات موجود برای تعیین هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانو میردها را برای غلظت‌های نانوذرات ۱ تا ۵ درصد ارائه نمودند. افت فشار، قدرت پمپاژ و ضرایب انتقال حرارت نانو میرد در یک لوله صاف افقی نیز با همان غلظت ذرات در سرعت ثابت ۵ متر بر ثانیه و شار جرمی یکنواخت ۱۰۰ کیلوگرم بر متر مربع بر ثانیه بررسی شده است. در این مطالعه، هدایت حرارتی نانو میرد آلومینا R-134a با افزایش غلظت ذرات و دما، افزایش یافت، اما با تشدید اندازه ذرات مقدار آن کم گردید. علاوه بر این، نتایج ویسکوزیته، افت فشار و ضرایب انتقال حرارت نانو میرد افزایش قابل توجهی را با افزایش کسر حجمی نشان داد. اثرات دما بر رسانایی حرارتی نانو میرد با تغییر دما از ۳۰۰ به ۳۲۵ درجه کلونین مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۱) نشان می‌دهد که افزایش هدایت حرارتی در دمای ۳۲۵ درجه کلونین حدود ۴۳ درصد با ۵ درصد کسر حجمی نانوذرات است. برای دمای ۳۰۰ درجه کلونین و غلظت ذرات ۱ درصد، نتیجه به دست آمده نشان می‌دهد که کمترین هدایت حرارتی تنها حدود ۴ درصد افزایش یافته است. این شکل نشان می‌دهد که هدایت حرارتی نانومیرد متناسب با دما است و افزایش رسانایی حرارتی را می‌توان با افزایش دمای ۵ درجه کلونین برای غلظت کم نانوذرات در نظر گرفت. دمای بالای نانو میرد، حرکت براونی نانوذرات را تشدید می‌کند و ویسکوزیته نانو میرد را کاهش می‌دهد. با تشدید حرکت براونی، سهم میکرو همرفت در انتقال گرما نیز می‌تواند افزایش یابد. به وضوح نشان داده شده است که هدایت حرارتی نانو میرد را می‌توان با افزایش دما، افزایش داد.



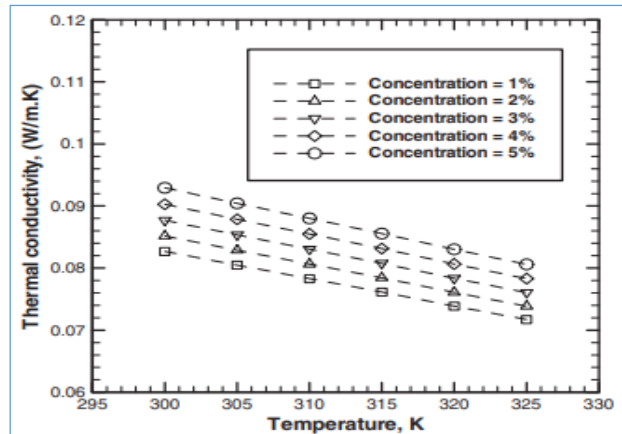
شکل ۱: نسبت هدایت حرارتی به عنوان تابعی از دما [۳۴]

علوی و همکاران [۳۵] در مطالعه‌ای به بررسی خواص ترموفیزیکی و عملکرد انتقال حرارت نانو ذرات نانو لوله کربنی تک جداره<sup>۱</sup>معلق در تترا فلئورواتان (R-134a) می‌پردازد. مدل‌های مناسب از مطالعات موجود برای تعیین رسانایی حرارتی و ویسکوزیته نانو میردها برای غلظت‌های نانوذرات (۱ تا ۵ درصد حجمی) در دمای (۳۰۰ تا ۳۲۰ درجه کلونین) مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج مشاهدات نشان می‌دهد که هدایت حرارتی و گرمای ویژه این نانو میرد با افزایش کسر حجمی ذرات و دما، افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نتایج ویسکوزیته و چگالی نانومیرد با افزایش کسر حجمی افزایش معنی داری را نشان می‌دهد. باین حال، این پارامترها متناسب با افزایش دما کاهش یافت. بنابراین، کسر حجمی ذرات بهینه در تولید نانو میردهایی که می‌توانند عملکرد سیستم‌های تبرید را افزایش دهند مهم است. اثرات دما بر رسانایی حرارتی نانو میرد با تغییر دما از (۳۰۰ تا ۳۲۵ درجه کلونین)

<sup>1</sup> Single walled carbon nanotube(SWCNT)



مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۲) نشان می‌دهد که افزایش هدایت حرارتی در دمای ۳۲۵ درجه کلوین حدود ۴۳ درصد با ۵ درصد حجمی است. نتیجه به دست آمده نشان می‌دهد برای دمای ۳۰۰ درجه کلوین و غلظت ذرات ۱ درصد، که کمترین هدایت حرارتی تنها حدود ۴ درصد افزایش یافته است. همچنین این شکل نشان می‌دهد که هدایت حرارتی نانو میرد با دما نسبت معکوس دارد و افزایش رسانایی حرارتی را می‌توان با افزایش دمای ۵ درجه کلوین برای غلظت کم، نانوذرات کم در نظر گرفت. دمای بالای نانو میرد، حرکت براونی نانوذرات را تشدید می‌کند و ویسکوزیته نانو میرد را کاهش می‌دهد. با تشدید حرکت براونی، سهم میکرو همرفت در انتقال گرما نیز می‌تواند، افزایش یابد. به وضوح نشان داده شده است که هدایت حرارتی نانو میرد را می‌توان با افزایش دما، افزایش داد.



شکل ۲: هدایت حرارتی SWCNT/R134a نسبت به دما [۳۵]

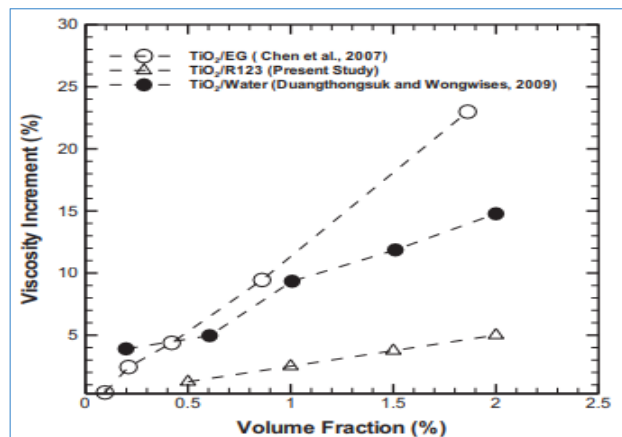
علوی و همکاران [۳۷-۳۵] اثرات پارامترهای مختلف بر رسانایی حرارتی نانو میردهای مبتنی بر R113, R141b و R134a پراکنده شده با مس، آلومینیوم، نیکل، اکسید مس، آلومینا و نانولوله کربنی را بررسی کردند و دریافتند که هدایت حرارتی نانو میرد با افزایش کسر حجمی ذرات و هدایت حرارتی نانو میرد با کاهش اندازه ذرات (یا افزایش نسبت ابعاد برای نانولوله کربنی) افزایش می‌یابد، همچنین هدایت حرارتی نانو میرد با افزایش دما افزایش می‌یابد. بسیاری از محققان به این نتیجه رسیدند که برای افزایش عملکرد سیستم‌های تبرید، غلظت حجم ذرات بهینه مورد نیاز است.

#### ویسکوزیته

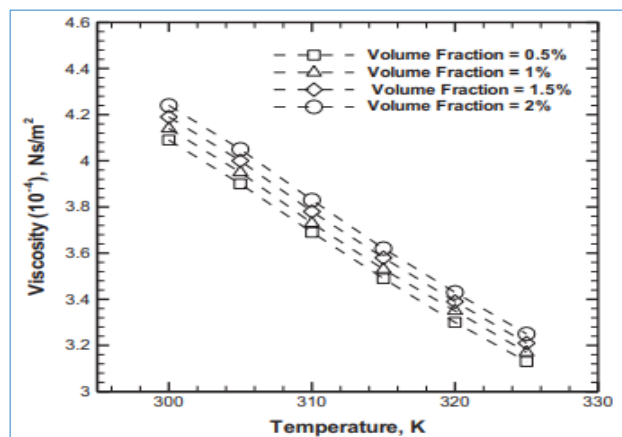
ویسکوزیته یکی از خواص ترموفیزیکی مهم است که بر هر دو افت فشار انتقال حرارت نانوسیال تاثیر می‌گذارد. با افزایش ویسکوزیته دینامیکی، ضریب انتقال حرارت همرفتی کاهش و افت فشار اصطکاکی و در نتیجه قدرت پمپاژ افزایش می‌یابد. تحقیقات روی نانوسیال‌های مبتنی بر آب/آب‌نمک و روان‌کننده توسط بسیاری از نویسندگان بررسی شده است [۳۸ و ۳۹]. محبول و همکاران [۳۴ و ۴۰] برای مشاهده تاثیر کسر حجمی و دما بر ویسکوزیته نانو میردهای مبتنی بر R134a, R141b و R123 تحقیقاتی انجام دادند و نتایج نشان داد که ویسکوزیته نانو میردهای تهیه شده با غلظت نانوذرات افزایش و با افزایش دما کاهش می‌یابد. آنها همچنین دریافتند که ویسکوزیته نانو میرد در مقایسه با همان دما ۱۳/۶۸ درصد افزایش یافته است. علوی و همکاران [۳۶ و ۳۷] اثر غلظت حجمی و دما بر خواص ترموفیزیکی نانومیرد اکسید مس و آلومینا R134a را بررسی کردند و مشاهده گردید که ویسکوزیته نانو میرد با افزایش کسر حجمی و کاهش دما، افزایش می‌یابد. علوی و همکاران [۴۱] اثر کسر حجمی و دما بر ویسکوزیته نانو میرد تیتانیوم دی اکسید R123 را بررسی کردند. شرایط عددی شامل دما از ۳۰۰ تا ۳۲۵ درجه کلوین، غلظت نانوذرات از ۰/۵ درصد تا ۲ درصد، شار جرمی از ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم در مترمربع بر ثانیه، کیفیت بخار ورودی از ۰/۲ تا ۰/۷ و قطر لوله از ۶ تا ۱۰ میلی‌متر است. اثر افت فشار با افزایش ویسکوزیته نیز بررسی شده است. علاوه بر این، افت فشار به طور قابل توجهی با تشدید کسر حجمی و کیفیت بخار افزایش یافت؛ بنابراین، کسر حجمی‌های کم حجم نانو میرد برای عملکرد بهتر یک سیستم تبرید پیشنهاد می‌شود. افزایش ویسکوزیته برای این نوع نانومیردها با توجه به کسر حجمی در شکل



(۳) نشان داده شده است. همچنین دو کار تجربی دیگر در مورد ویسکوزیته نانوسیال با این نتیجه مقایسه شده است. شکل (۴) اثر دما بر ویسکوزیته نانو مبردها را نشان می‌دهد. به طور معمول ویسکوزیته سیال ترمو با افزایش دما، کاهش می‌یابد. در این مطالعه مشاهده شد که ویسکوزیته نانو مبرد نیز با تشدید دما کاهش می‌یابد. همین روند برای کاهش ویسکوزیته با افزایش دما توسط برخی دیگر از محققین از جمله [۴۲ و ۴۳] مشاهده گردید. دمای بالای نانو مبرد، حرکت براونی نانوذرات را تشدید می‌کند و ویسکوزیته نانو مبرد را کاهش می‌دهد. بیشترین ویسکوزیته در دمای ۳۰۰ درجه کلوین و کسر حجمی ۲ درصد ذرات مشاهده شد.



شکل ۳: اثر افزایش کسر حجمی ذرات بر ویسکوزیته نانو مبردها [۴۱]



شکل ۴: اثر دما بر ویسکوزیته نانو مبردها [۴۱]

### مروری بر نتایج

تحقیقات معمولاً بر روی تاثیر نانوذرات مختلف بر روی خواص حرارتی و عملکرد سیستم‌های تبرید متمرکز است. بر اساس بررسی مطالعات انجام شده، نتایج نشان داد که نانوسیال‌ها جایگزین بسیار کارآمدی برای سیالات سنتی هستند.

#### افزایش انتقال حرارت:

- نانوذرات باعث بهبود انتقال حرارت در سیستم می‌شوند که به افزایش کارایی یخچال کمک می‌کند.
- نانوذرات به دلیل اندازه کوچک و سطح بالای خود، می‌توانند جریان‌های میکروسکوپی را در مایع مبرد ایجاد کنند و در نتیجه انتقال حرارت را افزایش دهند.
- همچنین نتایج نشان داد که هدایت حرارتی نانو مبرد را می‌توان با افزایش دما، افزایش داد که سبب افزایش انتقال حرارت می‌شود. در نانو مبرد نانو لوله کربنی تک جداره 134a، افزایش هدایت حرارتی در دمای ۳۲۵ درجه کلوین حدود ۴۳ درصد با



۵ درصد حجمی بوده است. در حالی که در دمای ۳۰ درجه کلوین و غلظت ذرات ۱ درصد، کمترین افزایش هدایت حرارتی حدود ۴ درصد مشاهده شده است.

#### کاهش ویسکوزیته:

○ برخی از نانوذرات می‌توانند ویسکوزیته مبرد را کاهش دهند که منجر به کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد کمپرسور می‌شود.

○ مشخص شد که ویسکوزیته نانو مبرد با افزایش کسر حجمی نانوذرات، افزایش یافته و با افزایش دما کاهش می‌یابد. بنابراین، کسر حجمی‌های کم حجم نانو مبرد برای عملکرد بهتر یک سیستم تبرید پیشنهاد می‌شود.

○ در نانو مبرد تیتانیوم دی اکسید R123، بیشترین ویسکوزیته در دمای ۳۰ درجه کلوین و کسر حجمی ۲ درصد ذرات مشاهده شده است.

#### توزیع یکنواخت دما:

○ نانوذرات می‌توانند به توزیع یکنواخت دما در داخل یخچال کمک کنند که باعث بهبود کیفیت نگهداری مواد غذایی می‌شود.

#### کاهش مصرف انرژی:

○ بسیاری از مطالعات نشان دادند که استفاده از نانو مبردها می‌تواند منجر به کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های تبرید شود.

○ این کاهش مصرف انرژی به دلیل بهبود کارایی حرارتی و کاهش بار بر روی کمپرسور است.

#### نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست آمده، نانو مبردها سیالات برتری هستند که حاوی ذرات با اندازه نانو هستند و می‌توانند بهبود قابل توجهی در کارایی سیستم‌های تبرید ایجاد کنند. این نانو مبردها شامل افزودن نانوذرات به مبردها هستند که می‌توانند از مواد مختلفی مانند اکسیدهای فلزی، نانوکربن یا سایر مواد نانوساختار تشکیل شوند. هنگام افزودن این نانوذرات به مبرد، تغییراتی در خواص فیزیکی و حرارتی مبرد ایجاد می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها عبارت هستند از افزایش انتقال حرارت، کاهش ویسکوزیته، توزیع یکنواخت دما و کاهش مصرف انرژی.

استفاده از نانو مبردها به‌عنوان یک فناوری نوین می‌تواند راه‌حلی مؤثر برای افزایش کارایی و کاهش اثرات زیست محیطی سیستم‌های تبرید باشد.

#### مراجع

- [1] Kuprasertwong, N., Padungwatanaroj, O., Robin, A., Udomwong, K., Tula, A., Zhu, L., Zhou, L., Wang, B., Wang, S., Gani, R., (2021). Computer-Aided Refrigerant Design: New Developments. In Computer Aided Chemical Engineering. 50, pp 19-24. Elsevier.
- [2] Fenton, D.L., Callahan, C.W., Elansari, A.M., (2019). Refrigeration. In Postharvest Technology of Perishable Horticultural Commodities. pp 209-270. Woodhead Publishing.
- [3] Ajayi, O.O., Aba-Onukaogu, C.C., Salawu, E.Y., Owoeye, F.T., Akinlabu, D.K., Popoola, A.P.I., Afolalu, S.A., Abioye, A.A., (2019). Effect of biomaterial (Citrullus Lanatus Peels) nanolubricant on the thermal performance and energy consumption of R600a in refrigeration system. In Energy Technology 2019: Carbon Dioxide Management and Other Technologies . pp. 91-102. Springer International Publishing.
- [4] Malik, M.I., Hussain, D., Shah, M.R., Guo, D.S. eds., (2024). Handbook of Nanomaterials, Volume 1: Electronics, Information Technology, Energy, Transportation, and Consumer Products. Elsevier.
- [5] Afolalu, S.A., Abioye, A.A., Udo, M.O., Adetunji, O.R., Ikumapayi, O.M., Adejuyigbe, S.B., (2018). Data showing the effects of temperature and time variances on nano-additives treatment of mild steel during machining. Data in brief, 19, pp 456-461.
- [6] Eggoh, J.C., Bangake, C., Rault, C., (2011). Energy consumption and economic growth revisited in African countries. Energy policy, 39(11), pp 7408-7421.



- [7] Nair, V., Parekh, A.D., Tailor, P.R., (2022). Experimental investigation of a vapour compression refrigeration system using R134a/Nano-oil mixture. *International Journal of Refrigeration*, 112, pp 21-36.
- [8] Fontana, L., Atella, V., Kammen, D.M., (2013). Energy efficiency as a unifying principle for human, environmental, and global health. *F1000Research*, 2.
- [9] Ajayi, O.O., Okolo, T.I., Salawu, E.Y., Owoeye, F.T., Akinlabu, D.K., Akinlabi, E.T., Akinlabi, S.T., Afolalu, S.A., (2019). Performance and energy consumption analyses of R290/Bio-based nanolubricant as a replacement for R22 refrigerant in air-conditioning system. In *Energy Technology 2019: Carbon Dioxide Management and Other Technologies*. pp. 103-112. Springer International Publishing.
- [10] Singh, A.K., (2008). Thermal conductivity of nanofluids. *Defence Science Journal*, 58(5), p.600.
- [11] Zinatloo-Ajabshir, S., Rashidi, M.M., (2024). Nanofluids at a glance. In *Nanofluids*. pp. 1-8. Elsevier.
- [12] Esfe, M.H., Alidoust, S., Tamrabad, S.N.H., Toghraie, D., Hatami, H., (2023). Thermal conductivity of MWCNT-TiO<sub>2</sub>/Water-EG hybrid nanofluids: Calculating the price performance factor (PPF) using statistical and experimental methods (RSM). *Case Studies in Thermal Engineering*, 48, p 103094.
- [13] Masuda, H., Ebata, A., Teramae, K., (1993). Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles. Dispersion of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> ultra-fine particles.
- [14] Choi, S.U., Eastman, J.A., (1995). Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles (No. ANL/MSD/CP-84938; CONF-951135-29). Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States).
- [15] Dincer, I., (2017). Refrigeration systems and applications. John Wiley & Sons.
- [16] Udo, M., Akinkunmi, S.O., Afolalu, S.A., Noiki, A.A., Yusuf, O.O., Emetere, M.E., Samuel, O.D., (2022). Necessity for Nanofluids in Refrigeration Systems: An Overview. *Bioenergy and Biochemical Processing Technologies: Recent Advances and Future Demands*, pp 355-363.
- [17] Maina, P., Huan, Z., (2015). A review of carbon dioxide as a refrigerant in refrigeration technology. *South african journal of science*, 111(9-10), pp 01-10.
- [18] Sonnenrein, G., Elsner, A., Baumhögger, E., Morbach, A., Fieback, K., Vrabec, J., (2015). Reducing the power consumption of household refrigerators through the integration of latent heat storage elements in wire-and-tube condensers. *International Journal of Refrigeration*, 51, pp 154-160.
- [19] Prasad, T.H., Reddy, K.P., Reddy, D.R.R., (2009). Exergy analysis of vapour compression refrigeration. *International journal of applied engineering research*, 4(12), pp 2505-2526.
- [20] Mariappan, V., Udayakumar, M., Shrestha, P.L., Suresh, S., (2012). Thermodynamic analysis of R134a-DMAC vapor absorption refrigeration (VAR) system. *International Journal of Computational Engineering Research*, 2(1), pp 86-96.
- [21] Kumar, D.D., Arasu, A.V., (2018). A comprehensive review of preparation, characterization, properties and stability of hybrid nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, pp 1669-1689.
- [22] Devendiran, D.K., Amirtham, V.A., (2016). A review on preparation, characterization, properties and applications of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, pp 21-40.
- [23] Sarkar, J., (2024). Applications of nanofluids in refrigeration and air-conditioning. In *Advanced Materials-Based Fluids for Thermal Systems*. pp 35-60. Elsevier.
- [24] Vasconcelos, A.A., Gómez, A.O.C., Bandarra Filho, E.P., Parise, J.A.R., (2017). Experimental evaluation of SWCNT-water nanofluid as a secondary fluid in a refrigeration system. *Applied Thermal Engineering*, 111, pp 1487-1492.
- [25] Raghavalu, K.V., Rasu, N.G., (2018), March. Review on applications of nanoFluids used in vapour compression refrigeration system for cop enhancement. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.330(1), p 012112. IOP Publishing.
- [26] Ajayi, O.O., Omowa, O.F., Omotosho, O.A., Abioye, O.P., Akinlabi, E.T., Akinlabi, S.A., Abioye, A.A., Owoeye, F.T., Afolalu, S.A., (2018). Experimental investigation of the effect of ZnO-Citrus sinensis nano-additive on the electrokinetic deposition of zinc on mild steel in acid chloride. In





- TMS 2018 147th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings. pp. 35-40. Springer International Publishing.
- [27] Ajayi, O.O., Ukasoanya, D.E., Ogbonnaya, M., Salawu, E.Y., Okokpujie, I.P., Akinlabi, S.A., Akinlabi, E.T., Owoeye, F.T., (2019). Investigation of the effect of R134a/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-nanofluid on the performance of a domestic vapour compression refrigeration system. *Procedia Manufacturing*, 35, pp 112-117.
- [28] Azmi, W.H., Sharma, K.V., Mamat, R., Najafi, G., Mohamad, M.S., (2016). The enhancement of effective thermal conductivity and effective dynamic viscosity of nanofluids-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, pp 1046-1058.
- [29] Bhattad, A., Sarkar, J., Ghosh, P., (2018). Improving the performance of refrigeration systems by using nanofluids: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, pp 3656-3669.
- [30] Rasheed, A.K., Khalid, M., Rashmi, W., Gupta, T.C.S.M., Chan, A., (2016). Graphene based nanofluids and nanolubricants-Review of recent developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 63, pp 346-362.
- [31] Jiang, W., Ding, G., Peng, H., Gao, Y., Wang, K., (2009). Experimental and model research on nanorefrigerant thermal conductivity. *HVAC&R Research*, 15(3), pp 651-669.
- [32] Jiang, W., Ding, G., Peng, H., (2009). Measurement and model on thermal conductivities of carbon nanotube nanorefrigerants. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(6), pp 1108-1115.
- [33] Mahbulbul, I.M., Saidur, R., Amalina, M.A., (2013). Thermal conductivity, viscosity and density of R141b refrigerant based nanofluid. *Procedia Engineering*, 56, pp 310-315.
- [34] Mahbulbul, I.M., Fadhilah, S.A., Saidur, R., Leong, K.Y., Amalina, M.A., (2013). Thermophysical properties and heat transfer performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/R-134a nanorefrigerants. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 57(1), pp 100-108.
- [35] Alawi, O.A., Sidik, N.A.C., (2015). The effect of temperature and particles concentration on the determination of thermo and physical properties of SWCNT-nanorefrigerant. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 67, pp 8-13.
- [36] Alawi, O.A., Sidik, N.A.C., (2014). Influence of particle concentration and temperature on the thermophysical properties of CuO/R134a nanorefrigerant. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 58, pp 79-84.
- [37] Alawi, O.A., Sidik, N.A.C., (2014). Mathematical correlations on factors affecting the thermal conductivity and dynamic viscosity of nanorefrigerants. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 58, pp 125-131.
- [38] Sharma, A.K., Tiwari, A.K., Dixit, A.R., (2016). Rheological behaviour of nanofluids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, pp 779-791.
- [39] Meyer, J.P., Adio, S.A., Sharifpur, M., Nwosu, P.N., (2016). The viscosity of nanofluids: a review of the theoretical, empirical, and numerical models. *Heat Transfer Engineering*, 37(5), pp 387-421.
- [40] Mahbulbul, I.M., Saadah, A., Saidur, R., Khairul, M.A., Kamyar, A., (2015). Thermal performance analysis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/R-134a nanorefrigerant. *International Journal of heat and Mass transfer*, 85, pp 1034-1040.
- [41] Alawi, O.A., Sidik, N.A.C., Kherbeet, A.S., (2015). Measurements and correlations of frictional pressure drop of TiO<sub>2</sub>/R123 flow boiling inside a horizontal smooth tube. *International communications in heat and mass transfer*, 61, pp 42-48.
- [42] Namburu, P.K., Kulkarni, D.P., Misra, D., Das, D.K., (2007). Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32(2), pp 397-402.
- [43] Kulkarni, D.P., Das, D.K., Chukwu, G.A., (2006). Temperature dependent rheological property of copper oxide nanoparticles suspension (nanofluid). *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 6(4), pp 1150-1154.