

ساخت نانوسیالات با استفاده از نانوذرات سیلیکاتی

فاطمه منصور کیانی^۱، زهره بهرامی^{۱*}، فرامرز هرمزی^۲

۱- دانشکده نانو فناوری، دانشگاه سمنان

۲- دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان

چکیده

در سال های اخیر، چگونگی بهبود بازده حرارتی در فرآیندهای انتقال حرارت به عنوان یک چالش اساسی برای صنایع مختلف وجود داشته است. معرفی نانو سیالات به عنوان جایگزینی مناسب برای سیالات معمول انتقال حرارت مانند آب، اتیلن گلیکول و روغن موجب تحولی شگرف در این حوزه شده است. با این وجود مدت زمان پایداری نانو ذرات در سیال پایه به عنوان مهم ترین عامل محدود کننده برای توسعه نانو سیال و کاربرد عملی آن در صنعت عنوان می شود. نانوذرات سیلیکاتی به دلیل سهولت فرآیند ساخت و پایداری مناسب در سیال به عنوان یکی از پرکاربردترین انواع نانوذرات برای تولید نانو سیالات به شمار می آیند. نانوذرات مزو حفره سیلیسی به عنوان نسل جدیدی از نانوذرات سیلیکاتی به دلیل وجود ویژگی های ساختاری منحصر به فردی مانند مساحت سطح و حجم حفره زیاد، قابلیت اصلاح سطح و پایداری مکانیکی و شیمیایی زیاد قابلیت کاربرد در حوزه نانوسیالات را دارا هستند. این دسته از نانومواد می توانند به عنوان میزبان برای قرار گیری سایر نانوذرات مورد استفاده قرار گیرند. توزیع نانوذرات با هدایت حرارتی خوب درون ساختار متخلخل نانوذرات مزو حفره سیلیسی تا حدی زیادی مانع از آگلومره شدن آنها خواهد شد و بدین ترتیب با افزایش پایداری نانوسیال، هدایت حرارتی نیز بهبود خواهد یافت.

واژه های کلیدی: نانوذرات سیلیکاتی، نانوسیال، مزو حفره، ساخت.

ایمیل نویسنده مسئول: bahrami.zoh@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

در صنایع مختلف ایفا می کنند. بررسی های انجام شده نشان داده اند که با اضافه نمودن ذرات جامد به صورت معلق به سیال پایه، انتقال حرارت افزایش خواهد یافت چرا که ضریب هدایت حرارتی این ذرات، صدها مرتبه بیشتر از سیالات پایه است. با این وجود استفاده از ذرات جامد با ابعاد میکرومتری مشکلاتی نیز ایجاد می نماید که از آن جمله می توان به رسوب، گرفتگی و انسداد لوله ها، خوردگی کانال ها، نیاز به قدرت زیاد برای پمپ کردن و همچنین سرعت ته نشینی بالا اشاره کرد. پیشرفت های صورت گرفته در تکنولوژی مواد، امکان غلبه بر مشکلات فوق را با استفاده از نانو ذرات فراهم کرده و موجب معرفی گروه جدیدی از سیالات تحت عنوان "نانو سیال" شده است.

اصلاح نانو سیال برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط چوی^۱ [۲] در آزمایشگاه آرگون، در ایالت متحده آمریکا مطرح شد. نانو سیال را به عنوان یک کلئوئید ترکیبی دو فازی معرفی می کنند که از افزودن مقدار ناچیز (کمتر از ۵ در صد حجمی) از انواع نانو ذرات با اندازه ای کمتر از ۱۰۰ نانومتر به سیال پایه به دست می آید. نانو سیال دارای ضریب هدایت حرارتی بسیار بالاتر از سیال پایه (عموماً افزایش ۱۵ تا ۴۰ درصدی و بیش از آن در موارد خاص) است که برخی از ویژگی های آن را می توان از تئوری های

نرخ انتقال گرما به عنوان یکی از مهم ترین فاکتورها در طراحی بسیاری از سیستم های مکانیکی و الکتریکی در صنایع مختلف محسوب می شود. در چند دهه اخیر با کوچکتر شدن تجهیزات و افزایش سرعت عملکرد آن ها، نرخ تولید گرما نیز افزایش یافته است. بنابراین انتقال گرمای تولید شده از تجهیزات و خنک کردن آن ها به عنوان یک مساله کاملاً ضروری تلقی می شود. وجود سیالات معمول انتقال حرارت مانند آب، اتیلن گلیکول و روغن دیگر پاسخگوی نیاز این سیستم ها نمی باشد. بنابراین نیاز به پیشرفت در سیستم های خنک کننده کاملاً محسوس است. در سال های اخیر با توجه به مسائل زیست محیطی و اقتصادی و با هدف صرفه جویی در انرژی، تلاش های بسیاری برای ساخت مبدل های حرارتی پر بازده صورت گرفته است. یک روش معمول برای افزایش انتقال حرارت، افزایش سطح مبدل ها با استفاده از فین ها و میکرو کانال ها است که امکان تبادل حرارتی بهتر را فراهم می کند اما این امر منجر به بزرگ تر شدن تجهیزات می گردد که در صنعت مساله ی نامطلوبی محسوب می شود. بنابراین وجود یک راهکار جدید برای افزایش قدرت خنک کنندگی ضروری است [۱].

آب، روغن و اتیلن گلیکول جزء سیالات معمول انتقال حرارت می باشند که نقش مهمی را در بسیاری از سیستم های خنک کننده

¹ Choi

نانوذرات به سیالات انتقال حرارت علاوه بر بهبود خواص حرارتی سیال پایه، ویژگی های دیگری چون خواص موئینگی، خواص الکتریکی و مغناطیسی سیال پایه را نیز اصلاح می کند که این امر سبب می شود تا نانوسیالات در کاربردهای پیشرفته انتقال حرارت مورد استفاده قرار گیرند [۱۲].

از مهم ترین مشکلات موجود در حوزه ی نانوسیال بحث آگلومره شدن نانو ذرات و ناپایداری آنهاست که به شدت بر میزان هدایت حرارتی نانوسیال تاثیر گذار است. اگر چه نانوذراتی مانند سیلیکا پایداری خوبی را از خود نشان داده اند اما در رابطه با سایر نانوذرات، عدم پایداری به عنوان یک چالش اصلی در این حوزه مطرح است. در جدیدترین پژوهش ها استفاده از نانوذراتی پیشنهاد می شود که به دلیل ویژگی های ساختاریشان کمک شایانی به رفع این مشکل و در نتیجه افزایش پایداری نانوسیال می نمایند. در این راستا، نانوذرات مزوحفره سیلیکاتی به عنوان مناسب ترین گزینه پیشنهاد می شوند. این ترکیبات متخلخل دارای ردیف های منظمی از کانال ها و حفرات ساخته شده از واحدهای SiO_2 با اشکال هندسی متفاوت هستند. وجود ساختار متخلخل و مساحت سطح بالا موجب می شود تا مواد مزوحفره سیلیکاتی به عنوان میزبان هایی مناسب برای جایگیری نانوذراتی که نقش موثر در بهبود هدایت حرارتی دارند، عمل کنند. توزیع نانوذرات درون حفرات مانع از آگلومره شدن آنها خواهد شد و بدین ترتیب پایداری نانوسیال افزایش خواهد یافت [۱۳].

در ادامه ضمن معرفی مواد مزو حفره سیلیکاتی به کاربرد آنها و نانوذرات سیلیکاتی در ساخت نانوسیالات اشاره خواهیم کرد.

۲- مواد مزوحفره سیلیکاتی

مواد مزوحفره سیلیسی برای نخستین بار در سال ۱۹۹۲ در شرکت نفتی موبیل^۳ توسط بک^۴ و همکارانش ساخته شدند [۱۴]. این دسته از ترکیب ها تحت عنوان خانواده MCM-X نام گذاری شدند. مهم ترین اعضای این خانواده مزوحفره های MCM-41 با منافذ استوانه ای هگزاگونالی و MCM-48 با منافذ مکعبی هستند که با استفاده از پیش ماده های سیلیکاتی و مواد فعال سطحی متفاوت سنتز شده اند. شکل ۱ ساختار این دو ترکیب را نشان می دهد.



شکل ۱- ساختار مهم ترین اعضای خانواده MCM-X [۱۷].

ماکروسکوپیک پیش بینی کرد و این امر می تواند مبنایی برای نوآوری در انتقال حرارت پیشرفته در نظر گرفته شود [۳-۵]. ابعاد کوچک، مساحت سطح بزرگ، اندازه حرکت کوچک ذرات و تحرک بالا از جمله ویژگی های برجسته نانو ذرات محسوب می شود و آنها را به عنوان گزینه های مناسبی برای کاربرد به عنوان فاز پراکنده در سیال قرار می دهد [۶]. تحقیقات تجربی و تئوری بسیاری بر روی هدایت حرارتی نانو سیال انجام شده است که نتایج آن افزایش انتقال حرارت سیال را با افزودن نانو ذرات نشان می دهد [۷-۹].

استفاده از نانو ذرات علاوه بر اصلاح انتقال حرارت، طبق تئوری استوکس^۲ پایداری بیشتری را نیز در سوسپانسیون ایجاد می کند که موجب کاهش رسوب و خوردگی تجهیزات می شود [۱۰]. بر اساس معادله استوکس (رابطه ۱)، سرعت ته نشینی ذرات در سوسپانسیون با قطر ذرات رابطه مستقیم دارد:

$$V_s = \frac{2}{9} \left(\frac{\rho_p - \rho_0}{\mu} \right) r^2 g \quad (1)$$

در این معادله ρ_p ، ρ_0 ، μ ، r و g به ترتیب دانسیته نانو ذرات، دانسیته سیال، ویسکوزیته سوسپانسیون، شعاع ذره و شتاب گرانش می باشد.

در سال های اخیر نانو سیال توانسته توجه بسیار زیادی را از سوی محققین به خود جلب کند که منجر به افزایش قابل ملاحظه گزارش های ارائه شده پیرامون خواص حرارتی نانو سیال شده است. خواص حرارتی نانو سیالات مانند هدایت حرارتی، ویسکوزیته، ظرفیت حرارتی ویژه، ضریب انتقال حرارت همرفتی و شار حرارتی به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته اند [۱۱]. در بین خواص حرارتی نانو سیالات، هدایت حرارتی بیش از بقیه خواص مورد توجه قرار گرفته است زیرا دانشمندان معتقدند که هدایت حرارتی موثرترین پارامتر در انتقال حرارت نانو سیال می باشد.

بدیهی است که نوع نانوذرات برضریب هدایت حرارتی نانوسیال بسیار تاثیرگذار است. هرچه ضریب هدایتی نانوذره بیشتر باشد، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال نیز بیشتر می شود. به طوری که بیشترین افزایش هدایت حرارتی در نانو سیال حاوی نانولوله های کربنی مشاهده شده است.

با توسعه تحقیقات در زمینه نانوسیالات، بسیاری از ترکیبات اعم از ترکیبات فلزی، اکسید فلزی و غیر فلزی برای بررسی تاثیر آنها بر هدایت حرارتی نانوسیالات مورد استفاده قرار گرفته اند. از جمله نانوذرات فلزی و اکسید فلزی پر کاربرد می توان به نانو ذرات آلومینیوم، مس، طلا، نقره، آهن، تیتانیوم دی اکسید، آلومینیوم اکسید، اکسید مس و سیلیکا اشاره کرد. افزایش

³ Mobil

⁴ Beck

² Stokes

ذره های به دست آمده از روش های مختلف مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی، با استفاده از امواج اولتراسونیک یا دستگاه های اختلاط برشی دیگر مخلوط شده و نانو سیال تولید می شود. برخی محققین معتقدند که کارایی این روش برای ساخت نانو سیال با ذرات اکسید فلزی بیشتر از کارایی آن برای ساخت نانو سیال با ذرات فلزی است [۲۰]. با این وجود این روش برای تولید صنعتی نانو سیال مورد استفاده قرار می گیرد.

نانو ذرات سرامیکی (اکسید فلزی) به دلیل داشتن ظرفیت بالای انتقال حرارت، به عنوان گزینه ای امیدوار کننده برای بهبود انتقال حرارت سیالات به شمار می آیند. با توجه به آن که سیلیس دومین عنصر از نظر فراوانی در پوسته زمین است استفاده از آن در کاربردهای صنعتی به دلیل قیمت پایین و در دسترس بودن، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است. گزارش های تئوری و تجربی مختلفی در رابطه با استفاده از نانو ذرات سیلیکا (SiO_2) در نانوسیال ارائه شده است. در سال های اخیر، این نانو ذرات به دلیل وجود ویژگی هایی مانند کم هزینه بودن، سهولت فرآیند ساخت و پایداری مناسب درسیال به عنوان یکی از پرکاربردترین نانوذرات برای تولید نانو سیال معرفی شده اند [۲۱] که در ادامه به برخی از مهم ترین پژوهش های صورت گرفته در این خصوص اشاره می شود.

تنشهر^۶ و همکارانش [۲۲] به بررسی تجربی عملکرد حرارتی نانو سیال های SiO_2 و Al_2O_3 در سیال پایه آب در یک میکروکانال پرداختند. غلظت حجمی استفاده شده از نانوذرات اکسید آلومینیوم و سیلیکا در سیال به ترتیب برابر ۰/۱ و ۰/۲۵ درصد بود. نتایج حاصل از آزمایش بهبود انتقال حرارت نانو سیال نسبت به سیال پایه را نشان داد. افزایش ضریب انتقال حرارت نانوسیال با افزایش غلظت حجمی و چشمگیر نبودن افت فشار ایجاد شده توسط نانو سیال از دیگر نتایج به دست آمده در این تحقیق است. در مقایسه ضریب انتقال حرارت و مقاومت حرارتی بین دو نانو سیال تهیه شده، نانو سیال اکسید آلومینیوم عملکرد حرارتی بهتری نسبت به نانو سیال سیلیکا از خود نشان داد.

یان^۷ و همکارانش [۲۱] هدایت حرارتی نانو سیال SiO_2 / آب را در درصد وزنی های مختلف (۱، ۵، ۳) مورد آزمایش قرار دادند و سپس با توجه به خواص نانو سیال، تغییرات دمایی را برای لوله های خلاء جمع کننده انرژی خورشیدی شبیه سازی کردند. بیشترین هدایت حرارتی نانو سیال در غلظت ۵ درصد وزنی از نانوذرات مشاهده شد. افزون بر این تاثیر گذشت زمان بر میزان هدایت حرارتی نانو سیال نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل بیانگر آن بود که با گذشت زمان میزان آگلومره شدن نانوذرات بیشتر شده و در نتیجه میزان رسوب افزایش می یابد که این امر موجب تضعیف هدایت حرارتی نانو سیال می شود. توانایی قابل توجه انتقال حرارت به وسیله نانو سیال SiO_2 / آب آن را به عنوان گزینه ای مناسب برای کاربرد در زمینه کالکتورهای

سطح ویژه مواد مزو حفره سیلیکاتی بیش از $900 \text{ m}^2/\text{g}$ و اندازه حفرات آن ها بین ۲ تا ۵۰ نانومتر متغیر است. اندازه حفره در فرآیند سنتز قابل کنترل و دیواره حفرات قابل اصلاح می باشد. این مزایا به همراه خواص برجسته دیگر مانند پایداری شیمیایی و حرارتی زیاد، زیست سازگاری و غیر سمی بودن موجب شده تا این ترکیبات به طور وسیع در صنایع مختلف به عنوان جاذب، کاتالیزور، بسترهای کاتالیزوری و حامل در سیستم های رهایش دارو مورد استفاده قرار گیرند [۱۶، ۱۵].

مواد مزو حفره سیلیکاتی به طور معمول در ابعاد میکرونی سنتز می شود. با سنتز در ابعاد نانومتری می توان هم زمان از دو ویژگی مساحت سطح بالا و اندازه نانو متری ذرات بهره برد و به همین خاطر انتظار می رود همراهی این دو ویژگی با یکدیگر تاثیر مثبتی بر نحوه عملکرد آن به عنوان میزبان داشته باشد. وجود مساحت سطح بالا امکان دوپ کردن مقادیر زیادی از نانوذرات پرکاربرد در حوزه نانوسیالات را فراهم می کند. ساختار متخلخل و قابلیت اصلاح سطح این دسته از نانومواد میزان آگلومره شدن ذرات را کاهش خواهد داد. بنابراین انتظار می رود تا با حضور چنین ترکیباتی در سیالات، میزان هدایت حرارتی افزایش یابد [۱۳].

برای سنتز نانو ذرات مزو حفره سیلیسی از دو روش سل-ژل و قالبی به طور همزمان استفاده می شود. سورفکتانت های متعددی به عنوان قالب مورد استفاده قرار گرفته اند که از آن جمله می توان به P123 ، F127 و CTAB اشاره کرد. ساختار نانو ذرات مزو حفره را می توان با انتخاب نوع سورفکتانت، اضافه کردن مواد شیمیایی آلی کمکی و تغییر پارامترهای واکنش کنترل کرد.

۳- ساخت نانوسیالات با استفاده از نانوذرات سیلیکاتی

آماده سازی نانو سیال به دو روش تک مرحله ای و دو مرحله ای صورت می گیرد. استمن^۵ [۱۸] برای اولین بار روش تک مرحله ای را برای ساخت نانو سیال به کار برد. در این روش منبع فلزی تحت شرایط خلا تبخیر شده و به این ترتیب تراکم نانو ذرات به حداقل می رسد. از معایب این فرآیند می توان به پایین بودن فشار بخار نانو سیال اشاره کرد. برای بر طرف کردن این مشکل روش های شیمیایی دیگری مانند احیای نمک فلزات مورد استفاده قرار گرفته است. هرچند داشتن کنترل مناسب بر اندازه ذرات و توزیع آن ها در سیال پایه از مزایای این روش محسوب میشود اما بالا بودن هزینه های تولید در مقیاس صنعتی، باقی ماندن بخشی از واکنش دهنده در نانو سیال تولیدی و عدم امکان جدا کردن یا کاهش غلظت آن در نانو سیال، موجب شده است که این روش آماده سازی نانو سیال مورد استقبال قرار نگیرد [۱۹].

فرآیند آماده سازی دو مرحله ای به طور گسترده در تولید نانو سیال مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش سیال پایه با نانو

^۶ Thansekhar

^۷ Yan

^۵ Eastman

پنگ^۸ و همکارانش [۲۷] هدایت حرارتی نانو سیال حاوی نانوذرات SiO_2 و Al_2O_3 در متانول را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. کلیه اندازه گیری ها در دمای ثابت ۲۰ درجه سانتی گراد صورت گرفت. بیشترین میزان افزایش هدایت حرارتی دو نانو سیال اکسید آلومینیوم و سیلیکا در غلظت حجمی ۰/۵ به ترتیب برابر با ۱۰/۴۷٪ و ۱۴/۲۹٪ به دست آمد. در این آزمایش خوشه ای شدن نانو ذرات به عنوان یکی از اصلی ترین دلایل برای افزایش هدایت حرارتی نانو سیال عنوان شد. میانگین اندازه نانو ذرات آلومینیوم اکسید و سیلیکا در غلظت حجمی بهینه (۰/۵) به ترتیب برابر ۱۳۰ و ۳۴۰ نانومتر گزارش شد.

گانگ^۹ و همکارانش [۲۸] به بررسی هدایت حرارتی نانو سیال SiO_2 / آب در لوله های حرارتی پرداختند. غلظت مورد استفاده از نانو ذرات در محدوده بین ۰/۱ تا ۲ درصد حجمی و اندازه ذرات در محدوده ی ۷۰-۱۰ نانومتر قرار داشت. نتایج حاصل نشان می دهد که با افزایش غلظت نانوذرات و کاهش اندازه آنها ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد. غلظت بهینه برای دستیابی به بالاترین میزان ضریب هدایت حرارتی ۰/۵ درصد حجمی بود.

کوزنتسوف^{۱۰} و همکارانش [۲۹] هدایت حرارتی نانو سیال های دارای اکسیدهای فلزی TiO_2 ، SiO_2 ، Al_2O_3 را با استفاده از روش سیم داغ مورد بررسی قرار دادند. میزان افزایش هدایت حرارتی برای نانوسیال های اکسید آلومینیوم، تیتانیم دی اکسید و سیلیکا در یک غلظت یکسان (۷٪ حجمی)، به ترتیب برابر با ۱۵٪، ۴۰٪ و ۲۰٪ به دست آمد.

یانگ^{۱۱} و همکارانش [۳۰] پایداری نوعی از نانو سیال حاوی نانو ذرات SiO_2 اصلاح شده با گروه های اتری و الکلی را مورد بررسی قرار دادند. وجود گروه های عاملی موجب افزایش پایداری نانوذرات در آب به مدت ۶ ماه شد.

امیری و همکارانش [۳۱] هدایت حرارتی نانو سیال حاوی نانو ذرات کامپوزیتی SiO_2 -Cu را در آب و اتیلن گلیکول مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق ابتدا نانو ذرات SiO_2 با میانگین قطر ۷۵ نانومتر و مساحت سطح $67/84 \text{ m}^2/\text{g}$ سنتز و سپس برای بهبود خواص حرارتی، سطح نانوذرات سیلیکا با استفاده از نانوذرات Cu اصلاح شد. در نهایت نانو ذرات کامپوزیتی SiO_2 -Cu با مساحت سطح $31/44 \text{ m}^2/\text{g}$ به دست آمد. نانو ذرات سنتز شده با استفاده از امواج اولتراسونیک در غلظت ۱٪ وزنی به طور جداگانه در آب و اتیلن گلیکول پخش شدند. بررسی هدایت حرارتی نانو سیالات، افزایش ۱۱٪ در هدایت حرارتی نانو سیال SiO_2 -Cu / آب و افزایش ۱۱/۵٪ در هدایت حرارتی نانو سیال SiO_2 -Cu / اتیلن گلیکول را در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی گراد نشان می دهد. از نکات قابل توجه در این پژوهش آن است که نانوسیال حاوی نانوذرات کامپوزیتی SiO_2 -Cu، خواص حرارتی نزدیک به مس و دانسیته ای نزدیک به SiO_2 را از خود نشان داد. اغلب نانو سیالات

خورشیدی معرفی می کند اما رسوب نانوذرات با گذشت زمان و تاثیر منفی آن بر میزان انتقال حرارت به عنوان عاملی محدود کننده به شمار می آید.

لی^۸ و همکارانش [۲۳] برای افزایش پایداری نانو سیال گرافن/ آب از پوشش سیلیکا بر روی سطح گرافن به عنوان جایگزینی برای سورفکتانت سدیم دو دسیل بنزن سولفونات^۹ (SDBS) استفاده کرده و تاثیر آن را بر هدایت حرارتی و پایداری نانو سیال مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل نشان داد که پوشش سیلیکا با ایجاد خاصیت آبدوستی در گرافن سبب بهبود پایداری و هدایت حرارتی نانو سیال گرافن نسبت به حضور سورفکتانت شده است. جی یان شی^{۱۰} و همکارانش [۲۴] اثر نانو سیال را در لوله های حرارتی حاوی نانو سیال با غلظت ۰/۶ درصد حجمی از نانو ذرات سیلیکا و ۳۰ عدد مانع (فین) مستطیل شکل آلومینیومی مورد آزمایش قرار دادند. دمای دیواره لوله ها و سطح فین اندازه گیری شد. نتایج حاصل از آزمایش نشان می دهد که استفاده از نانو سیال SiO_2 /آب به جای سیال معمولی (آب دیونیزه) در لوله های رادیاتور منجر به کاهش دمای دیواره شده است که این امر مقاومت حرارتی لوله ها را به میزان ۲۳ تا ۴۰ درصد کاهش داده است.

فروریلات^{۱۱} و همکارانش [۲۵] به بررسی عملکرد هدایت حرارتی نانو ذرات SiO_2 با مورفولوژی های متفاوت در سیال پایه آب پرداختند. در این آزمایش افت فشار و ضریب انتقال حرارت نانو سیالات در دو دمای ورودی ۲۰ و ۵۰ درجه سانتی گراد هم به عنوان سیالات خنک کننده و هم به عنوان سیال گرم کننده در نرخ جریان ($200 < R_e < 1500$) اندازه گیری شد. نتایج حاصل نشان دهنده بهبود انتقال حرارت نانو سیال نسبت به سیال پایه بود. افزون بر این، افزایش هدایت حرارتی در نمونه موزی شکل^{۱۲} نسبت به نمونه کروی بیشتر بوده است.

همت^{۱۳} و همکارانش [۲۶] اندازه گیری و بهینه سازی هدایت حرارتی نانو سیال هیبریدی SiO_2 -MWCNT را مورد بررسی قرار دادند. نانو ذرات سیلیکا مورد استفاده قطری حدود ۲۰-۳۰ نانومتر و نانو لوله های کربنی قطر داخلی حدود ۲ نانومتر و قطر خارجی حدود ۶ نانومتر داشتند. در این مطالعه از سیال پایه اتیلن گلیکول استفاده شد. هدایت حرارتی نانو سیال در غلظت حجمی بین ۰/۵ - ۱/۹۵ درصد در دمای ۳۰ تا ۵۰ درجه سانتی گراد اندازه گیری شد. نتایج حاصل از آزمایش نشان داد که هدایت حرارتی نانو سیال هیبریدی به طور خطی با دما و غلظت افزایش می یابد. بیشترین مقدار افزایش در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد و غلظت ۱/۹۴ برابر ۲۲/۲٪ به دست آمد.

⁸ Xing Li

⁹ Sodium dodecylbenzenesulfonates

¹⁰ Jiyuan Shi

¹¹ Ferrouillat

¹² Banana shaped

¹³ Hemmat

¹⁴ Pang

¹⁵ Gong

¹⁶ Kuznetsov

¹⁷ Yang

استفاده کردند. هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانو سیال به عنوان تابعی از دما در غلظت های مختلف نانو ذرات $mSiO_2$ و $Ag/mSiO_2$ مورد بررسی قرار گرفت. هدایت حرارتی نانو سیال با استفاده از روش پلاسمای دوتایی القایی^{۲۱} (ICP) اندازه گیری شد که نتایج حاصل افزایش ۹/۲۴٪ هدایت حرارتی در غلظت ۴ درصد وزنی از نانو ذرات $mSiO_2$ را نشان داد. همچنین افزودن ۲/۹۸ درصد نقره به نانو ذرات مزو حفره سیلیسی موجب افزایش ۱۰/۹۵٪ هدایت حرارتی سیال پایه شد. افزون بر این، نتایج حاصل نشان دهنده رفتار نیوتونی نانوسیال در غلظت های مختلف نانو ذرات در محدوده ی دمایی مورد بررسی بود.

امراهی و همکارانش [۳۵] از نانو ذرات MCM-41 برای تولید نانو سیال استفاده کردند. در این تحقیق دستگاه مورد نیاز برای بررسی هدایت حرارتی نانو سیال، ساخته و کالیبره شد. نتایج به دست آمده نشان داد که زمان آماده سازی نانو سیال با استفاده از امواج اولتراسونیک بر هدایت حرارتی نانو سیال تاثیر گذار است. استفاده از اولتراسونیک به مدت ۲۴ ساعت برای آماده سازی نانو سیال در غلظت ۲/۵ درصد حجمی از نانو ذرات، موجب افزایش هدایت حرارتی به میزان ۷٪ شد.

۴. نتیجه گیری

با توجه به اهمیت و ضرورت استفاده از نانوسیالات در صنایع مختلف، تلاش های بسیاری برای بهبود پایداری آنها صورت گرفته است. نتایج حاصل از بررسی های متعدد در این رابطه حاکی از آن است که نانوذرات سیلیکاتی به دلیل وجود ویژگی هایی مانند کم هزینه بودن، سهولت فرآیند ساخت و پایداری مناسب درسیال به عنوان یکی از پرکاربردترین انواع نانوذرات برای تولید نانو سیالات به شمار می آیند. افزون بر این، نانوذرات مزو حفره سیلیسی به عنوان نسل جدیدی از نانوذرات سیلیکاتی به دلیل وجود ویژگی های ساختاری منحصر به فردی مانند مساحت سطح و حجم حفره زیاد، قابلیت اصلاح سطح، پایداری مکانیکی و شیمیایی زیاد و غیر سمی بودن گزینه ای مناسب برای کاربرد در این حوزه خواهند بود. اگر چه گزارش های محدودی در رابطه با ساخت نانوسیالات با استفاده از نانوذرات مزو حفره سیلیسی وجود دارد اما نتایج به دست آمده نشان می دهد که حضور این نوع از نانوذرات در سیالات ضمن بهبود هدایت حرارتی، می تواند مشکل ناپایداری را نیز تا حد زیادی مرتفع می سازد. از این رو به نظر می رسد سهم نانوذرات مزو حفره سیلیکاتی در ساخت نانوسیالات در آینده نزدیک به شدت افزایش یابد.

۵. منابع

1. P. Keblinski, JA, Eastman, DG, Cahill, Materials today, 8, 36-44, (2005).
2. S, Choi, ASME-Publications-Fed, 231, 99-106, (1995).
3. KL, Hsiao, Computers & Fluids, 104, 1-8, (2014).

شامل نانوذرات فلزی مانند Cu هنگامی که در مجاورت هوا قرار می گیرند تمایل بسیاری برای اکسید شدن از خود نشان می دهند که در نانو سیال جدید تولید شده این مشکل تا حد زیادی برطرف شده است.

فررویلات^{۱۸} و همکارانش [۳۲] انتقال گرمای نانوسیال SiO_2 / آب جاری در یک لوله افقی با دمای معین دیواره را در غلظت های مختلف (۵ تا ۳۴ درصد وزنی) مورد بررسی قرار دادند. آزمایش در دماهای ورودی مختلف (۲۰،۵۰،۷۰ درجه سانتی گراد) و در دبی جرمی متفاوت (۱۰۰۰۰ < R_e < ۲۰۰) که از رژیم جریان آرام تا جریان آشفته متغیر است، اندازه گیری شد. نتایج حاصل از آزمایش، افزایش ۱۰ تا ۶۰ درصدی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال را متناسب با افزایش غلظت نانو سیال در مقایسه با آب خالص نشان می دهد. حضور نانو ذرات در جریان آشفته به شکل قابل ملاحظه ای موجب افزایش ضریب هدایت حرارتی نانو سیال شد. افزون بر این، بررسی پایداری نانو سیال نشان داد که نانو سیال در دمای بالا ناپایدار است.

کولکاری^{۱۹} و همکارانش [۳۳] به بررسی ضریب انتقال حرارت ذرات SiO_2 (۲۰،۵۰،۱۰۰ نانومتر) در غلظت های مختلف در مخلوطی از آب و اتیلن گلیکول (به نسبت وزنی ۴۰:۶۰) پرداختند. نتایج حاصل از آزمایش افزایش ضریب هدایت حرارتی نانو سیال را با افزایش غلظت حجمی نشان داد. در این تحقیق تاثیر اندازه ذرات بر ضریب انتقال حرارت نانو سیال نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان می دهد که در یک رینولدز ثابت، ضریب انتقال حرارت نانوسیال با افزایش اندازه ذرات افزایش می یابد.

۱-۳ - نانوسیالات ساخته شده با استفاده از نانوذرات مزو حفره سیلیسی

علی رغم پژوهش های متعدد صورت گرفته مبنی بر استفاده از نانو ذرات سیلیکا در حوزه نانو سیال، گزارش های بسیار محدودی پیرامون استفاده از نانو ذرات مزو حفره سیلیسی در این زمینه وجود دارد که در ادامه به مهم ترین نتایج به دست آمده از این مطالعات اشاره خواهیم کرد.

نیکام و همکارانش [۳۴] به بررسی تجربی تاثیر نانو ذرات مزو حفره سیلیسی بر هدایت حرارتی سیال پایه آب پرداختند. در این تحقیق از دو روش تنظیم pH و استفاده از امواج اولتراسونیک برای پخش نانو ذرات در آب استفاده شد. بررسی هدایت حرارتی نانو سیال با روش منبع صفحه گذرا^{۲۰} (TPS) در دو غلظت مختلف ۱ و ۶ درصد وزنی از نانو ذرات صورت گرفت. نتایج حاصل نشان دهنده بالاتر بودن هدایت حرارتی نانو سیال در هر دو غلظت نسبت به سیال پایه است.

تجردی و همکارانش [۱۳] از نانو ذرات مزو حفره سیلیسی همراه با نانو ذرات نقره ($Ag/mSiO_2$) در گلیسرول به عنوان سیال پایه

¹⁸ Ferrouillat

¹⁹ P. KULKARNI

²⁰ Transient Plane Source

²¹ inductively coupled plasma



27. C, Pang, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55, 5597-5602, (2012).
28. YY, Gong, Heat transfer enhancement of the heat pipe using SiO₂-water nanofluid. in Advanced Materials Research. Trans Tech Publ. (2013).
29. D, Kuznetsov, Journal of engineering thermophysics, 19, 138-143, (2010).
30. X,Yang, ZH, Liu, Nanoscale research letters, 5, 1324, (2010).
31. M, Amiri, S, Movahedirad, F, Manteghi, Applied Thermal Engineering, 108, 48-53, (2016).
32. S, Ferrouillat, International Journal of Heat and Fluid Flow, 32, 424-439, (2011).
33. DP, Kulkarni, Heat Transfer Engineering, 29, 1027-1035, (2008).
34. N, Nikkam, Journal of nanoparticle research, 13, 6201-6206, (2011).
35. A, Amrollahi, A, Hamidi, A, Rashidi, International Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 3, 13-20, (2007).
4. MS, Patil, Energies, 9, 840, (2016).
5. W, Rashmi, Materials Research Express, 1, 032001, (2014).
6. L, Wang, B, Sunden, International Communications in Heat and Mass Transfer, 29, 45-56, (2002).
7. L, Chen, H, Xie, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 352, 136-140, (2009).
8. X, Wei, International Journal of Heat and Mass Transfer, 52, 4371-4374, (2009).
9. W, Yu, Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects, 355(1): 109-113, (2010).
10. EV, Timofeeva, Nanoscale research letters, 6, 182, (2011).
11. XQ, Wang, AS, Mujumdar, International journal of thermal sciences, 46, 1-19, (2007).
12. J, Fan, L, Wang, Journal of Heat Transfer, 133, 040801, (2011).
13. A, Tadjarodi, F, Zabihi, Materials Research Bulletin, 48, 4150-4156, (2013).
14. JS, Beck, Synthesis of mesoporous crystalline material. 1992, Google Patents.
15. Z, Bahrami, Materials Science and Engineering: C, 49, 66-74, (2015).
16. H, Wanyika, Journal of nanoparticle research, 15, 1-9, (2013).
17. ZA, Alothman, Materials, 5, 2874-2902, (2012).
18. J, Eastman, Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids. in MRS proceedings. Cambridge Univ Press. (1996).
19. H, Akoh, Journal of Crystal Growth, 45, 495-500, (1978).
20. JA, Eastman, Applied physics letters, 78, 718-720, (2001).
21. S, Yan, Applied Thermal Engineering, 118, 385-391, (2017).
22. M, Thansekhar, C, Anbumeenakshi, Experimental Techniques, 1-8, (2017)
23. X, Li, Thermochimica Acta, 595, 6-10, (2014).
24. J, Shi, Heat Transfer Performance of Heat Pipe Radiator with SiO₂/Water Nanofluids. Heat Transfer—Asian Research, 2017.
25. S, Ferrouillat, Applied thermal engineering, 51, 839-851, (2013).
26. MH, Esfe, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 128, 249-258, (2017).