دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

سال هفتم، شماره‌ی ۲۵
زمستان ۱۳۹۴، صفحات ۷-۱

نانو سیالات راهی نوین بر افزایش انتقال حرارت

محمد سعید محمدی
گروه مهندسی شیمی، دانشکده‌ی فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
mohammadsaeid909@yahoo.com
عزیز باباپور
گروه مهندسی شیمی، دانشکده‌ی فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
Babapoor@uma.ac.ir
ابوذر جوزونی
گروه مهندسی شیمی، دانشکده‌ی فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
Abuzar jozuni@yahoo.com
وحید وحید فرد
گروه مهندسی شیمی، دانشکده‌ی فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
V.vahidfard@gmail.com
ساسان فولادی‌وندا
گروه مهندسی شیمی، دانشکده‌ی فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
S_fooladivanda@yahoo.com
بهمن منجزی
گروه مهندسی شیمی، دانشکده‌ی فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
bahmanmongiezi@yahoo.com

چکیده

بهینه‌سازی انتقال حرارت در همه صنایع از اولویت ویژه‌ای برخوردار است. پیش‌تر افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی و هدایت حرارتی توسط مخلوط کردن ذرات با اندازه میکرون با سیال پایه ممکن شده بود؛ اما رسوب‌گذاری، فرسایش، گرفتگی و افت فشار زیاد ایجاد شده توسط این ذرات باعث شد تا تکنولوژی آن دور از استفاده عملی بماند. مقدار کمی از نانوذرات وقتی‌که به‌طور یکنواخت و به‌صورت پایدار در سیال پایه معلق می‌شوند، خواص حرارتی سیال پایه را به‌طور چشم‌گیری توسعه می‌دهد. نانوذرات در مقایسه با ذرات با اندازه میکرون طوری

مهندسی شده‌اند که سطح ارتباطی بزرگ‌تر، مومنتم ذره کم‌تر، تحرک بیش‌تر، پایداری سوسپانسیون بهتر و افزایش هدایت حرارتی مخلوط بیش‌تری دارند. این ویژگی‌ها باعث شده تا از نانوسیالات به‌عنوان خنک‌کننده‌ها، روان کننده‌ها، سیالات هیدرولیکی استفاده شود. نانوذرات از مواد مختلفی مانند اکسید سرامیک‌ها، نیترید سرامیک‌ها، کاربید سرامیک‌ها، فلزات و مواد ترکیبی مانند نانوذرات آلیاژ و... ساخته می‌شوند. نانوسیال ترکیبی از جامد- مایع است که در آن نانو ذرات فلزی یا غیرفلزی معلق هستند. ذرات بیش از حد ریز معلق باعث تغییر ویژگی‌های جابجایی و انتقال حرارت نانوسیالات می‌شوند که قابلیت بسیاری برای افزایش انتقال حرارت نشان می‌دهند. با توجه به تحقیقات قبلی انجام شده؛ نانو سیالات به خاطر افزایش خواص ترموفیزیکی مورد توجه قرار گرفته‌اند. خواصی از قبیل ضریب رسانش گرمایی، پخش گرما ویسکوزیته و همچنین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را در مقایسه با سیالات پایه مانند آب و روغن افزایش می‌یابد. در این پژوهش، تاثیرات چندین عامل مهم از قبیل اندازه ذرات، شکل ذرات، جنس ذرات، دمای عملیاتی و تجمع ذرات در ضریب رسانش گرمایی نانوسیال به‌صورت مروری مورد بررسی قرار گرفته است.

کلید واژه‌ها: نانوسیال، انتقال حرارت، ضریب رسانش گرمایی، خواص حرارتی.

مقدمه

۱- نانوسیالات

نانوسیال ترکیبی از جامد- مایع است که در آن نانوذرات فلزی یا غیرفلزی معلق هستند. ذرات بیش‌ازحد ریز معلق، باعث تغییر ویژگی‌های جابجایی و انتقال حرارت نانوسیالات می‌شوند که قابلیت بسیاری برای افزایش انتقال حرارت نشان می‌دهند. با توجه به تحقیقات انجام شده؛ نانوسیالات به خاطر افزایش خواص ترموفیزیکی موردتوجه قرار گرفته‌اند. خواصی از قبیل ضریب هدایت گرمایی، پخش گرما ویسکوزیته و همچنین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را در مقایسه با سیالات پایه مانند آب و روغن افزایش می‌یابد. در اینجا تاثیرات چندین عامل مهم از قبیل اندازه ذرات، شکل ذرات، جنس ذرات، دمای عملیاتی و تجمع ذرات در ضریب رسانش گرمایی را نیز که مورد مطالعه و تحقیق پژوهشگران قرار گرفته‌اند بررسی می‌شود [۱].

۲- افزایش هدایت حرارتی

در دمای اتاق، فلزات در فاز جامد، هدایت حرارتی بیشتری نسبت به مایعات دارند. همچنین هدایت حرارتی مایعات فلزی بسیار بزرگ‌تر از مایعات غیرفلزی است؛ بنابراین انتظار می‌رود سیالاتی که شامل ذرات فلزی معلق هستند، افزایش هدایت حرارتی آشکاری نسبت به سیالات خالص داشته باشند. به‌طور مثال چویی و همکارانش نشان دادند که هدایت حرارتی آب-مس و نانوذرات آب-CNT در مقایسه با مایعات اصلی‌شان بیش‌تر است [۱].

طبق مطالعاتی که در مرکز ایندیرای گاندی انجام گرفته، اثبات شده است که خواص حرارتی برای نانوسیالات قطبی مغناطیسی که شامل سوسپانسیون کلوئیدی نانوذرات مغناطیسی هستند قابل تنظیم می‌باشد. علاوه بر این هدایت حرارتی مؤثر وابسته به مکانیزم‌های حرکتی ذره نیز می‌باشد، فیزیک توضیحات داده شده معمول به‌صورت زیر است [۱]:

۲-۱- پراکندگی ذرات معلق

مواد فعال سطحی (سورفاکتانت‌ها) می‌تواند ثبات سینتیکی امولسیون را به‌طور زیادی افزایش دهد. برخی از سورفاکتانت‌ها مانند تیول‌ها، اولئیک اسیدها و ... عملکرد خوبی داشته‌اند. PAK & CHO و XUAN & LI و دیگران

مدعی هستند که افزایش غیرنرمال هدایت حرارتی به علت پراکندگی یکنواخت نانوذرات می‌باشد [۲].

۲-۲- تشدید آشفتگی

اگر هدایت حرارتی را در نظر بگیریم که تابعی از متغیرهای ابتدایی مانند فشار ترمودینامیکی و دما باشد. در یک جریان آشفته، هدایت حرارتی به دلیل وجود تاثیرات گردابه‌های جریان درهم بیش‌تر است. به‌طور مشابه در نانوسیال‌ها نیز به دلیل اضافه شدن نانوذرات ممکن است آشفتگی تشدید شود [۲].

۲-۳- حرکت براونی

این تاثیر ناشی از حرکت نامنظم ذرات معلق درون سیال است که از برخورد نانوذرات با مولکول‌های سیال پایه به وجود می‌آید. بنابر تئوری سینتیک ذرات، حرکت براونی با افزایش دما افزایش می‌یابد. برخی محققین پیشنهاد کرده‌اند که مکانیزم بالقوه افزایش هدایت حرارتی، انتقال انرژی ناشی از تصادف ذرات با دمای بالا با ذرات با دمای پایین‌تر است و البته حرکت براونی با افزایش در ویسکوزیته، کاهش می‌یابد [۳].

۲-٤- ترموفورسیس (THERMOPHORESIS)

پدیده‌ای است که وقتی مخلوطی از دو یا چند ذره‌ی متحرک تحت نیروی گرادیان دما قرار می‌گیرند مشاهده شده است. این پدیده در فرآیند جابه‌جایی آزاد که در آن جریان براساس نیروی شناوری و دما هست بسیار با اهمیت است. ذرات در جهت کاهش دما حرکت می‌کنند و فرآیند انتقال حرارت با کاهش توده افزایش می‌یابد [۴].

۲-۵- دیفیوزو فورسیس (DIFFUSIOPHORESIS)

این پدیده وقتی اتفاق می‌افتد که ذرات از منطقه غلظت کم به منطقه غلظت زیادتر بروند. بونگیورنو تاکید کرده است که حرکت براونی، ترموفورسیس، دیفیوزوفورسیس در غیاب گردابه‌های توربولانت، بسیار با اهمیت است [۴].

۳- تاثیرات چند عامل بر روی هدایت حرارتی نانوسیالات

انتظار می‌رود ضریب انتقال حرارت (عدد ناسلت) نانوسیال به عواملی همچون رسانایی حرارتی و ظرفیت گرمایی سیال پایه و ذرات خالص، الگوی جریان، غلظت نانوسیال، حجم ذرات معلق، ابعاد و شکل این ذرات و همچنین ساختار جریان بستگی داشته باشد. بنابراین شکل کلی عدد ناسلت چنین به‌دست می‌آید:

نسبت افزایش هدایت حرارتی عبارت است از نسبت هدایت حرارتی نانوسیال به سیال پایه. این نسبت به جنس ذره، اندازه و شکل ذره، غلظت حجمی و دمای عملیاتی بستگی دارد. تاثیر نوع ماده در افزایش هدایت حرارتی در ذرات با هدایت حرارتی نسبتاً پایین بسیار ناچیز است، اما در ذرات با هدایت حرارتی بالا افزایش مثبتی دارند. برای مثال افزایش هدایت حرارتی ذرات فلزی بیشتر از ذرات اکسید فلزی است. اگرچه بوجودآوردن ذرات فلزی بدون اکسیدکننده ذرات در طول فرآیند، سخت است. یک مانع اصلی برای نانوسیالاتی که از ذرات فلزی تشکیل شده‌اند، حذف فرآیند اکسیداسیون در طول تولید و استفاده آن می‌باشد. پوشش ذره، یکی از تکنیک‌هایی است که برای حل این مشکل پیشنهاد شده است.

رایج‌ترین اشکال ذرات مورد استفاده استوانه‌ای و کروی هستند. در ذرات استوانه‌ای به دلیل شبکه تشکیل شده توسط ذرات کشیده که هدایت حرارتی را از میان سیال انجام می‌دهد، افزایش در هدایت حرارتی مشاهده می‌شود. این مطلب نشان می‌دهد که ذرات کشیده بهتر از ذرات کروی در هدایت حرارتی هستند.

هدایت حرارتی با غلظت حجمی ذرات افزایش یافته، افزایش می‌یابد. هدایت حرارتی نانوذرات نسبت به سیال پایه حساسیت بیش‌تری به دما دارند. در نتیجه افزایش هدایت حرارتی نانوسیالات نیز تقریباً به دما حساس بوده و به حرکت تصادفی نانوذرات وابستگی شدیدی دارد [۵].

٤- تحقیقات آزمایشگاهی

پیش‌تر افزایش انتقال حرارت به کمک ریزذرات معلق توسط آقای آحوجا (AHUJA) مورد بررسی قرار گرفت. سپس آزمایش‌ها به سمت افزایش انتقال حرارت در جریان آرام آب با استایرن میکروسایز معلق هدایت شد. نتایج افزایش چشم‌گیر در عدد ناسلت و اثرگذاری مبدل را در مقایسه با فاز مایع تنها نشان داد.

گرفتگی، اختلال در توان پمپ، تراکم، رسوب، فرسایش از عوارض جانبی ریزذراتی هستند که برای افزایش انتقال حرارت مورد استفاده قرار می‌گرفت. این مشکل با ذرات نانوسایز شده کلوئیدی حذف شده است [۶].

نانوذرات تشکیل شده از اکسیدات فلزی، فلزات و گرافیت‌ها به‌طور گسترده‌ای در سیال پایه آب، اتیلن گلیکول، استون و ...مورد تحقیق قرار گرفته است. LEE & CHOI از نانوسیالات به‌عنوان خنک‌کننده در میکرو کانال‌های مبدل حرارتی استفاده کردند و افزایش سرعت سرد شدن را با میکروکانال‌های متداول (میکروکانال با آب و نیتروژن مایع سرد شده) مقایسه کردند. تشدید توربولانس یا گرادیه، حذف لایه مرزی، پراکندگی ذرات معلق علاوه بر افزایش هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی سیال دلایل ممکن برای افزایش انتقال حرارت پیشنهاد شده بودند [۶].

PAK & CHO تحقیقاتی درباره انتقال حرارت جابه‌جایی توربولانت با خاصیت نانو سیالات ($Al_2O_3 - water$ & $water - TiO_2$) با $\varphi = 1 - 3\%$ انجام دادند. عدد ناسلت برای نانوسیالات با افزایش غلظت حجمی و عدد رینولدز افزایش یافت. HERIS افزایش انتقال حرارت نانوسیالات ($Water - CuO$, $Water - Al_2O_3$) را در شرایط دما ثابت در لوله با جریان آرام آزمایش کرد. شبیه آن را نیز ESFAHANY انتقال حرارت جابه‌جایی جریان آرام برای ($Water - Al_2O_3$) در دمای ثابت با $\varphi = 0.2 - 2.5\%$، برای اعداد رینولدز بین ۷۰۰ تا ۲۰۵۰ آزمایش کرد [۷]. عدد ناسلت برای نانوسیالات بیش‌تر از سیالات پایه به دست آمد و ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت ذرات افزایش یافت.

JUNG آزمایش‌ها انتقال حرارت جابه‌جایی برای نانوسیال ($Water - Al_2O_3$) در میکروکانال مثلثی تحت شرایط جریان آرام انجام داد. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بیش از ۳۲٪ برای $\varphi = 1.8\%$، افزایش یافت. عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز در رژیم جریان آرام ($5<RE<300$) افزایش یافت [۷].

از منابع گوناگون رابطه‌های گوناگونی برای انتقال جابجایی گرما در جریان تک فازی و در کارکردهای مختلف می‌توان به‌دست آورد. بحث بر سر احتمال کارآیی این رابطه‌ها برای پیش‌بینی کارکرد نانوسیالات در انتقال گرما برای محققین جالب توجه است. اگر پاسخ مثبت باشد می‌توان رابطه‌های موجود برای سیالات تک فازی مادی را گسترش داد تا کاربردهای نانوسیالات مربوطه را در برگیرند چرا که برای کارکرد نانوسیالات هیچ رابطه‌ای به‌طور مجزا در دست نیست. با در نظر داشتن برخی فرضیه-ها چنین گسترشی می‌تواند ممکن باشد. نانوسیالاتی که برای افزایش انتقال حرارت به‌کار گرفته می‌شوند؛ اغلب ترکیب‌های جامد- مایع رقیق هستند. از آنجا که ذرات جامد بیش‌ازحد ریز هستند (کم‌تر از ۱۰۰ نانومتر) و به‌راحتی به سیال تبدیل می‌شوند، برای این ذرات می‌توان با احتمال خوبی کارکرد سیال را در نظر گرفت. با فرض این

مسئله که هیچ خطایی در جنبش میان فاز منقطع ذرات خالص تجزیه شده و مایع یکنواخت صورت نمی‌گیرد و با فرض توازن حرارت پیرامونی میان نانوذرات و سیال، می‌توان نانوسیال را به‌عنوان سیال خالص معمولی در نظر گرفت. در این صورت تمامی معادلات پیوستگی، جنبشی و انرژی برای سیال خالص را می‌توان در نظر گرفت. برای مثال چنان‌چه ویژگی‌های حرارتی ثابت را در نظر داشته باشیم، معادله‌ی انرژی برای جریان تراکم ناپذیری از سیال خالص صرف‌نظر از اتلافات ویسکوزیته‌ای از رابطه (۱) به‌دست می‌آید:

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\nabla.uT=\nabla.(\alpha_f\nabla T) \qquad (۱)$$

برای توصیف روند انتقال گرمای نانوسیال هم مناسب است. به این معنی که راهکارهای مورد استفاده برای سیال تک فازی در شرایط کاربردی مشابه، برای نانوسیال هم معتبر هستند. با این وجود باید تاکید کرد که ویژگی‌های حرارتی معادله (۱) به خصوصیات نانوسیال اشاره دارند [۸].

رویکردی مشابه از سوی نیلد و بژم معرفی شد که به مقایسه‌ی عبارات بدون بعد انتقال گرمای کاملاً پیشرفته در یک کانال با وجود ماتریکس متخلخل یا بدون آن پرداخت. با این حال، می‌بایست در انتخاب ویژگی‌های حرارتی مناسب و خصوصیات جابجایی دقت کرد. هنگام به‌کارگیری روابط بدون بعد فعلی برای سیالات خالص در رابطه با نانوسیالات می بایست ویژگی‌های خواص این مواد را در نظر گرفت. سه پارامتر اصلی در محاسبه‌ی میزان انتقال گرمای نانوسیالات عبارتند از: ظرفیت گرمایی، ویسکوزیته و رسانایی گرمایی که ممکن است کاملاً با همین ویژگی‌ها در سیال خالص اولیه متفاوت باشند. برای سوسپانسیون‌های مایع بدون ذرات مصنوعی پارامتر $\left(\rho c_p\right)_{nf}$ نانوسیال به این صورت نشان داده می‌شود [۹]:

$$(\rho c_p)_{nf}=(1-\phi)(\rho c_p)_f+\phi(\rho c_p)_s \qquad (۲)$$

ویسکوزیته نانوسیال را می‌توان با رابطه‌های موجود برای ترکیب‌های دوفازی محاسبه نمود. درو و پاسمن بودند که فرمول معروف انیشتن را برای برآورد ویسکوزیته مؤثر μ_{eff} در سیال با ویسکوزیته خطی با ویسکوزیته μ_f شامل سوسپانسیون رقیقی از ذرات ریز سخت کروی معرفی کردند. این فرمول از این قرار است [۹].

$$\mu_{eff}=\mu_f(1+2.5\phi) \qquad (۳)$$

این رابطه محدود است به غلظت حجمی کم $(\phi<\%5)$ معادله انیشتن را برینکمن گسترش داد:

$$\mu_{eff}=\mu_f\frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} \qquad (۴)$$

در میان دیگر آثار می‌توان روابط دیگری درباره‌ی ویسکوزیته موثر ترکیبات دوفازی مشاهده کرد. هر رابطه‌ای محدودیت‌های کاربردی خود را دارد. دسترسی مستقیم و مطمئن به میزان ویسکوزیته مشهود نانوسیال از طریق آزمایش است. خوان ولی از این طریق ویسکوزیته مشهود نانوسیال نفت-آب تغییر شکل یافته و نانوسیال آب– مس را در محدوده‌ی حرارت ۲۰ تا ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد را محاسبه کرده‌اند. نتایج این آزمایش‌ها نسبتاً به‌طور کامل با نظریه‌ی برینمکن مطابقت داشتند.

رسانایی حرارتی مشهود مهم‌ترین پارامتر برای شناسایی پتانسیل سوسپانسیون مایع–نانوذرات برای افزایش است. بررسی‌ها نشان می‌دهند که رسانایی حرارتی نانوسیالات نتیجه‌ی رسانایی گرمای سیال پایه و نانوذرات، میزان حجم، سطح، شکل نانوذرات معلق در مایع و چگونگی پخش ذرات است. با این حال هیچ فرمول نظری برای پیش‌بینی رسانایی گرما در نانوسیالات وجود ندارد. برخی مدل‌های نظری موجود برای رسانایی گرما در ارتباط با ترکیب‌های جامد– مایع با ذرات نسبتاً بزرگ به اندازه‌های میکرومتر و میلی‌متر معرفی شده‌اند که در آن‌ها رسانایی گرمای مشهود سوسپانسیون‌ها به حجم و شکل ذرات معلق بستگی دارند و

اندازه و توزیع ذرات تاثیری ندارد. به‌کارگیری این مدل‌ها برای نانوسیالات محدود است. می‌بایست رسانایی حرارتی نانوسیالات را با آزمایش معین کرد. برای این هدف می‌توان از روش مفتول گرم ناپایدار استفاده کرد [۱۰].

در غیاب داده‌های آزمایشی و نظری مناسب برای رسانایی حرارتی نانوسیالات، برخی فرمول‌های موجود برای پیش‌بینی رسانایی حرارتی سوسپانسیون‌های جامد–مایع با ذرات نسبتاً بزرگ را می‌توان به‌تقریب طولی برای برآورد نانوسیالات به‌کار بست. برای ترکیب‌های جامد–مایع که در آن‌ها نسبتاً رسانایی هر یک از دو فاز ۱۰۰ است، همیلتون و کراسر مدل زیر را پیشنهاد کرده‌اند:

$$\frac{k_{eff}}{k_f}=\frac{k_p+(n-1)k_f-(n-1)\phi(k_f-k_p)}{k_p+(n-1)k_f+\phi(k_f-k_p)} \qquad (۵)$$

که در آن فاکتور تجربی شکل از طریق فرمول زیر به‌دست می‌آید:

$$n=\frac{3}{\psi} \qquad (۶)$$

در این فرمول ψ میزان کرویت است که به‌صورت نسبت مساحت یک کره با حجمی معادل هر ذره به مساحت هر ذره به‌دست می‌آید. نتایج این فرمول‌ها در آزمایش هماهنگی مطلوبی میان پیش‌بینی‌های نظری و داده‌های آزمایشگاهی برای ذرات کروی تا حجم ۳۰٪ نشان دادند [۱۱].

شیوه‌ای دیگر برای محاسبه‌ی رسانایی گرمای موثر ترکیب‌های جامد–مایع را وسپ معرفی کرده است:

$$\frac{k_{eff}}{k_f}=\frac{k_p+2k_f+2\phi(k_f-k_p)}{k_p+2k_f+\phi(k_f-k_p)} \qquad (۷)$$

مدل همیلتون–کراسر را خوان ولی برای به‌دست آوردن برآوردی کلی از رسانایی حرارتی نانوسیالات باارزش‌های مختلف ψ از ۰/۵ تا ۱ به‌کار گرفتند و نتایج این مدل برای $\psi=0.7$ به داده‌های آزمایشی آن‌ها نزدیک است. لی و دیگران به این نکته اشاره کردند که رسانایی گرمای پیش‌بینی شده برای ذرات کروی ($\psi=1$) از این مدل با نتایج تحقیقاتشان بر روی نانوسیالات AL_2O_3 نزدیکی خوبی دارد. بنابراین این مدل را می‌توان برای تخمین زدن به کاربرد. با این وجود باید براین نکته تأکید کرد که چنین برآورد اولیه‌ای هیچ تضمینی نمی‌دهد و فرمول‌های دقیق و مطمئن در کنار داده‌های آزمایشی می‌بایستی در دست داشت تا بتوان رسانایی حرارتی موثر نانوسیالات را تعیین کرد.

با توجه به توضیحات بالا، چنین دریافت می‌شود که رویکرد عادی، پیدا کردن ضریب انتقال گرمای نانوسیالات از طریق شیوه‌ای است که در آن رابطه‌های موجود برای ضریب انتقال گرما در سیال خالص را برای نانوسیالات گسترش می‌دهند و در این راه ویژگی گرمایی و پارامترهای جابجایی نانوسیالات را با سیالات خالص جایگزین می‌نمایند. در این مورد نتیجه سطحی به‌دست آمده این است که افزایش انتقال حرارت نانوسیالات از طریق افزایش رسانایی حرارتی موثر نانوسیالات محقق می‌گردد. تاثیر افزایش انتقال حرارت را می‌توان به‌تقریب با نسبت زیر نشان داد:

$$\frac{h_{nf}\,(nanofluid)}{h_f\,(basefluid)}\approx\left(\frac{k_{nf}}{k_f}\right)^c \qquad (۸)$$

که در آن توان c ضریب ثابتی است که به الگوی جریان بستگی دارد. برای مثال $c=2/3$ برای جریان درهم از طریق این فرمول، می‌توان به‌تقریب افزایش انتقال گرما نانوسیالات را از طریق بالابردن رسانایی گرما در آن‌ها برآورد کرد [۱۲–۱۳].

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده از کارهای انجام شده برروی عملکرد انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیالات به‌وضوح نشان می‌دهد که ذرات معلق به‌طور چشم‌گیری عملکرد انتقال حرارت را افزایش می‌دهند. همچنین نانوسیالات ضرایب انتقال حرارت بیش‌تری نسبت به سیالات پایه در اعداد رینولدز یکسان دارند. در بسیاری از مراجع نشان داده شده که رفتار انتقال حرارت نانوسیالات وکاربردهای نانوسیالات برای افزایش انتقال حرارت توسط خواص ترموفیزیکی مؤثر نانوسیالات و بسیاری از فاکتورهای دیگر مانند اندازه ذرات، شکل و توزیع آن‌ها، حرکت براونی و اثر متقابل سیال و ذره تحت تاثیر قرار می‌گیرند.

منابع

[1] Godson, L., Raja, B., Lal, D.M., Wongwises, S., Enhancement of heat transfer using nanofluids—an overview. Renewable and sustainable energy reviews, 2010. 14 (2): p. 629-641.

[2] Breidenich, C., Magraw, D., Rowley., A., Rubin, J.W., The Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change. The American Journal of International Law, 1998. 92 (2): 315-331.

[3] Wu, X., Yang, J., Chan, K., Energy savings with energy-efficient HVAC systems in commercial buildings of Hong Kong. 2006.

[4] Hernon, D., T. Salamon, R., Kempers, S., Krishnan, A., Lyons, M., Hodes, P., Kolodner, J., Mullins, L., McGarry, Thermal management: Enabling enhanced functionality and reduced carbon footprint. Bell Labs Technical Journal, 2009. 14 (3): 7-19.

[5] Hwang, Y., Y. Ahn, H., Shin, C., Lee, G., Kim, H., Park, J., Lee, Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids. Current Applied Physics, 2006. 6 (6): 1068-1071.

[6] Eastman, J.A., S., Phillpot, S., Choi, P., Keblinski, Thermal transport in nanofluids 1. Annu. Rev. Mater. Res., 2004. 34: 219-246.

[7] Keblinski, P., Eastman, J.A., Cahill, D.G., Nanofluids for thermal transport. Materials today, 2005. 8 (6): 36-44.

[8] Fissan, H.J., Schoonman, J., Vapor-phase synthesis and processing of nanoparticle materials (NANO). Advanced Materials, 1996. 8 (7): 559-560.

[9] Akoh, H., Tsukasaki, Y., Yatsuya, S., Tasaki, A., Magnetic properties of ferromagnetic ultrafine particles prepared by vacuum evaporation on running oil substrate. Journal of Crystal Growth, 1978. 45: 495-500.

[10] Fendler, J.H., Nanoparticles and nanostructured films: preparation, characterization, and applications. 2008: John Wiley & Sons.

[11] Cheong, J.N., Tan, C.P., Man, Y.B.C., Misran, M., α-Tocopherol nanodispersions: Preparation, characterization and stability evaluation. Journal of Food Engineering, 2008. 89 (2):

2] Bang, I.C., Chang, S.H., Baek, W. P., Direct observation of a liquid film under a vapor environment in a pool boiling using a nanofluid. Applied Physics Letters, 2005. 86 (13): 134107.

[13] Xuan, Y., Li, Q., Heat transfer enhancement of nanofluids. International Journal of heat and fluid flow, 2000. 21 (1): 58-64.