

هدات گرمایی سیالات نانو

محسن ایزدی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی سهند

چکیده

با توجه به اهمیت روزافزون ساخت وسایل حرارتی میناتور و یا مبدلهایی با راندمان بالاتر از مبدلهای موجود دانشمندان همواره در صدد تولید سیالاتی بوده‌اند که به چنین نیازهای پاسخ مناسب دهند. سیالات نانو به عنوان سیالاتی با قابلیت بالا جایگزین مناسبی برای سیالات معمول به شمار می‌روند. حرکات پیچیده و تصادفی ذرات نانو درون این سیالات امکان ارائه هرگونه مدلی را که بتواند رفتار دقیق این سیالات را پیش بینی نماید سلب می‌کنند. مادر مقاله حاضر به مطالعات و بررسیهای صورت گرفته بوسله محققان در این زمینه خواهیم پرداخت.

کلمات کلیدی: هدایت گرمایی موثر^۱، سیالات نانو^۲، سیال پایه^۳، ذرات نانو^۴

مقدمه

اغلب سیالات معمول در سیستمهای سرمایشی و گرمایشی همانند آب، اتیلن گلیکول و روغن موتور در ظرفیت و ویژگیهای حرارتی دارای محدودیتهای ذاتی هستند که موانع متعددی را به منظور کاربرد آنها در وسایل حرارتی ایجاد می‌کند. علاوه بر تحقیقات و تلاشهای شایان به عمل آمده نیاز ضروری و آشکاری برای توسعه یک راهکار جدید به منظور اصلاح رفتار حرارتی این سیالات احساس می‌شود. به عبارت دیگر اغلب جامدات بویژه فلزات دارای هدایت گرمایی بالاتر از سیالات معمول هستند. بنابراین می‌توان انتظار داشت که سیالات حاوی ذرات جامد دارای افزایش قابل توجهی در هدایت گرما باشند. کارهای صورت گرفته آزمایشگاهی و عددی در این زمینه در صد سال اخیر نشان دهنده افزایش ضریب انتقال حرارت با افزودن ذرات کوچک جامد در سیال است. چنین افزایشی تا حدودی به افزایش هدایت گرمایی موثر سیال مربوط می‌شود. همچنین کاهش ضخامت لایه مرزی گرمایی به دلیل وجود ذرات جامد در سیال

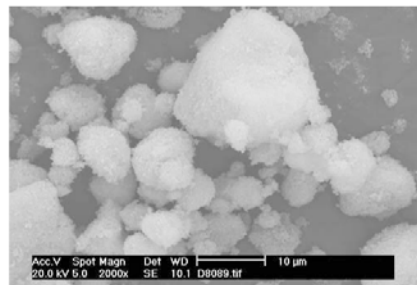
effective conductivity-1

Nanofluid-2

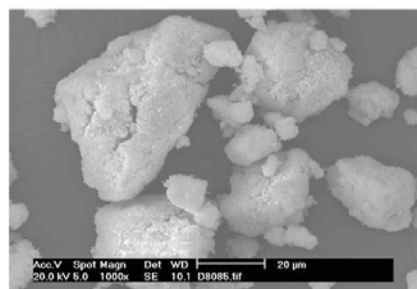
3-base fluid

4-nanoparticle

و حرکات تصادفی آنها که مکانیزم جدیدی را برای پروسه انتقال تعریف می کند نیز از عوامل پراهمیت به شمار می روند. باید توجه داشت که تمامی مطالب ذکر شده در بالا مربوط به ترکیبات حاوی ذراتی با اندازه های میلیمتر و میکرومتری باشد. متأسفانه اینگونه ترکیبات دارای مشکلات جدی از جمله افت فشار شدید، ته نشینی سریع ذرات، انسداد و خردگی مجاری جریان هستند. تمام این مشکلات محدودیتهایی را در کاربردهای عملی اینگونه ترکیبات اعمال می کند. در سالهای اخیر فن آوریهای مدرن تولید ذراتی در مقیاسهای نانو را امکانپذیر ساخته اند که سنتز نوع جدیدی از سیالات را با عنوان سیالات نانومیسر نموده اند. عبارت سیال نانو به یک ترکیب دو فازی اشاره دارد که به طور معمول شامل یک سیال اشباع و ذرات بسیار ریز جامد



(a) Al₂O₃



(b) CuO

تصویر ۱. کلوخه شدگی ذرات نانو

در اندازه های کمتر از ۴۰nm (ذرات نانو) می شود. تعدادی داده آزمایشگاهی موجود بویژه (ماسودا و همکارانش، ۱۹۹۳؛ چوی، ۱۹۹۵؛ لی و همکارانش، ۱۹۹۹) نشان دهنده افزایشی بالاتر از ۲۰٪ در هدایت گرما ترکیبات حتی در کسر حجمی پایین ذرات (۱-۵٪ حجمی) نسبت به سیال پایه است. میزان افزایش عمدتاً به عوامل مختلفی از جمله اندازه ذرات، شکل ذرات، غلظت ذرات، هدایت گرما ذرات و سیال پایه، میزان پایداری، چگونگی کلوخه شدن ذرات و... بستگی دارد. در حقیقت تحقیقات آزمایشگاهی اولیه بر روی این سیالات مربوط به محاسبه هدایت گرمایی موثر آنها می شود. (ماسودا و همکارانش، ۱۹۹۳؛ چوی، ۱۹۹۵؛ پک و چو،

۱۹۹۸؛ لی و همکارانش، ۱۹۹۹؛ وانگ و همکارانش، ۱۹۹۹؛ ایستمن و همکارانش، ۱۹۹۹؛ ژان ولی، ۲۰۰۰؛ ایستمن و همکارانش، ۲۰۰۱). از میان تحقیقات ذکر شده تعدادی نیز داده‌ها را در ارتباط با ویسکوزیته موثر به دست آوردند. (ماسودا و همکارانش، ۱۹۹۳؛ پک و چو، ۱۹۹۸؛ وانگ و همکارانش، ۱۹۹۹) [۱] هر چند که ایده سوسپانسیونهای مایع جامد از مدت‌ها قبل مطرح گردیده است مفهوم سیالات نانو یک ایده جدید است [۲].

نارساییهای سوسپانسیونها با ذرات بزرگ (میلیمتر و میکرومتر)
ته نشینی سریع ذرات
کلوخه شدگی و گرفتگی مجرا
خوردگی مجاری جریان

فن آوریهای مدرن تولید سیالات نانوی مختلفی را مقدور ساخته‌اند. سیالات نانو به دلیل مشخصه‌های برترشان کاربردهای گسترده‌ای (حتی در مقیاس میکرو) در زمینه افزایش نرخ انتقال حرارت دارند [۳] انتظار می‌رود که در آینده سیالات نانو به نوع جدیدی از سیالات مورد استفاده در انتقال حرارت برای کاربردهای مهندسی تبدیل شوند. در قیاس با فن آوریهای موجود در زمینه افزایش انتقال حرارت، سیالات نانو پتانسیل بالایی را به منظور افزایش نرخ انتقال حرارت با کمترین افت فشار از خود نشان می‌دهند. اگرچه سیالات نانو از پتانسیل بالایی در زمینه افزایش نرخ انتقال حرارت برخوردار هستند، کارهای تحقیقاتی روی مفهوم، مکانیزم افزایش و کاربردهای سیال نانو همچنان در مراحل اولیه قرار دارد. مقالات متعددی بر روی تکنیکهای پیشبینی و اندازه‌گیری هدایت گرمایی سیالات نانو متمرکز شده‌اند. تا به امروز مدل‌های مختلف تحلیلی، روشهای عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

فهم کاملی از عملکرد انتقال حرارتی سیالات نانو برای کاربردهای عملی به منظور افزایش نرخ انتقال حرارت لازم است. سیالات نانو در طبیعتشان سیالات چند جزئی هستند حتی اگر ذرات بسیار کوچک باشند. بسیار مشکل است که به یک تئوری فرمولبندی شده برای پیش بینی رفتار جریان مواد چند جزئی دست یافت [۴]. انتظار می‌رود که ضریب انتقال حرارت (عدد ناسلت) سیالات نانو به تعدادی از عوامل مختلف از جمله هدایت گرمایی و ظرفیت حرارتی هر دو جزء سیال پایه و ذرات نانو، الگوی جریان، ویسکوزیته سیال نانو، کسر حجمی ذرات توزیع شده، ابعاد و شکل این ذرات همچنین ساختار جریان وابسته باشد. بنابراین شکل کلی عدد ناسلت به صورت زیر است:

$$Nu_{nf} = f \left(\text{Re}, \text{Pr}, \frac{k_s}{k_f}, \frac{(\rho c_p)_s}{(\rho c_p)_f}, \phi, \text{Dimension and shape of particle, flow structure} \right)$$

اندازه‌گیری هدایت گرمایی

چون هدایت گرمایی مهمترین پارامتر موثر در افزایش انتقال حرارت است تعداد زیادی پژوهش تجربی در قالب مقاله در این زمینه گزارش شده است. روش سیم داغ گذرا [۶]، روش صفحه موازی حالت پایدار [۷] و روش ارتعاش دمایی [۸] برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی سیالات نانو به کار رفته است. از میان آنها روش سیم داغ گذرا به صورت گسترده تری مورد استفاده قرار گرفته است. چون به طور کلی سیالات نانو رسانای الکتریکی هستند مشکل است که بخواهیم از روش سیم داغ گذرای معمولی استفاده کنیم. روش سیم داغ اصلاح شده توسط ناگازا کا و ناکاشیما [۹] با پوشش سیم داغ توسط اپوکسی که عایق الکتریکی خوب و رسانای گرمایی بالایی دارد پیشنهاد شده است.

داس و همکارانش [۸] نیز به این نکته اشاره کرده‌اند که احتمالاً یونهای سیالات هادی در اطراف سیم داغ می‌تواند بر روی دقت نتایج آزمایشگاهی اثر گذار باشد. آلومین (Al_2O_3) و اکسید مس (CuO) معمولترین و ارزاترین ذرات مورد استفاده توسط محققان در تحقیقات آزمایشگاهی‌شان هستند. تمامی نتایج آزمایشگاهی، افزایش هدایت گرمایی با افزایش ذرات نانو به سیال پایه را نشان داده است.

ایستمن و همکارانش [۱۰] هدایت گرمایی سیالات نانو را که شامل ذرات نانوی Al_2O_3 ، CuO، Cu می‌باشند را با دو سیال پایه مختلف اندازه‌گیری کردند (آب و روغن HE-200). برای ۵٪ حجمی ذرات نانو یک افزایش ۶۰٪ در هدایت گرمایی در مقایسه با سیالات پایه مشابه به دست می‌آید. آنها همچنین نشان دادند که استفاده از ذرات Cu افزایش بیشتری را نسبت به CuO نشان می‌دهد.

لی و همکارانش [۱۱] ذرات CuO و Al_2O_3 (به ترتیب با اندازه‌های ۳۸/۴nm، ۲۴/۴nm، ۲۳/۶ nm و ۱۸/۶ nm) را در دو سیال پایه مختلف آب و اتیلن گلیکول معلق کردند. نتایج آزمایشگاهی‌شان نشان داد که سیال نانو در مقایسه با سیال پایه خالص رسانایی گرمایی بالاتری دارد. ترکیب CuO/EG افزایش بیشتر از ۲۰٪ را در ۴٪ حجمی ذرات نانو نشان داد. در محدوده

کسر حجمی پایین (کمتر از ۰.۰۵) نسبت هدایت گرمایی تقریباً به طور خطی با کسر حجمی افزایش می‌یابد. گرچه اندازه ذرات Al_2O_3 کوچکتر از CuO هستند اما سیالات نانوی CuO مقدار هدایت گرمایی بهتری را نسبت به سیالات نانوی Al_2O_3 نشان می‌دهند. این نتایج نشان داد که همیشه موادی با هدایت گرمایی بالا بهترین گزینه برای ذرات نانو به منظور اصلاح ویژگیهای حرارتی سیال پایه هستند. آنها پی بردند که هدایت گرمایی سیالات نانو به طور غیر خطی با کسر حجمی فاز جامد تغییر می‌کند.

هانگ و همکارانش [۱۳] همچنین تأثیر کلوخه شدگی ذرات نانوی آهن را بر روی هدایت گرمایی سیالات نانو بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که کلوخه شدگی ذرات نانوی آهن تأثیر مستقیمی بر روی هدایت گرمایی سیال نانو می‌گذارد که در نتیجه باعث غیر خطی شدن رابطه بین کسر حجمی ذرات آهن و هدایت گرمایی سیال نانو می‌شود.

مرشد و همکارانش [۱۲] ذرات نانوی TiO_2 در شکلهای میله‌ای ($10 \times 40 \mu m$) و کروی ($15 \mu m$) که در آب یون زدوده شده توزیع شده بودند را بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که به ترتیب افزایش ۳۳٪ و ۳۰٪ در هدایت گرمایی موثر به خاطر وجود ذرات TiO_2 میله‌ای و کروی اتفاق می‌افتد. نتایج نشان داد که هر دو عامل شکل و اندازه ذرات بر روی هدایت گرمایی سیالات نانو موثرند.

ژی و همکارانش [۱۴ و ۱۵] هدایت گرمایی سوسپانسیون SiC با اندازه‌های 26 nm و $0.16 \mu m$ را در آب واتیلن گلیکول با استفاده از روش سیم داغ گذرا اندازه‌گیری و مورد تحلیل قرار دادند. آنها متوجه شدند که سیالات نانو با ذرات جامد یکسان در سیالات پایه متفاوت اصلاح یکسانی را در هدایت گرمایی موثر موجب می‌شوند.

داس و همکارانش [۸] تأثیر دما را روی افزایش هدایت گرمایی سیالات نانو شامل Al_2O_3 با اندازه $38/4 \text{ nm}$ و Cu با اندازه $28/6 \text{ nm}$ از طریق یک بررسی آزمایشگاهی با استفاده از روش ارتعاش دمایی مورد آزمایش قرار دادند. آنها مشاهده کردند که یک افزایش ۲ تا ۴ برابری در هدایت گرمایی در محدوده دمایی ۲۱ تا ۵۲ درجه سانتیگراد میتواند اتفاق بیفتد.

نتایج نشان می‌داد که کاربرد سیالات نانو به عنوان سیال کولینگ که در دمایی بالاتر از دمای اتاق هستند مناسبتر هستند. آنها همچنین عنوان کردند که حرکتهای شدید و تصادفی ذرات نانو می‌تواند به عنوان توجیه احتمالی افزایش هدایت گرمایی سیالات نانو در نظر گرفته شود زیرا که

ذرات کوچکتر افزایش بیشتری را در هدایت گرمایی با تغییر دما نسبت به ذرات بزرگتر نشان می دهند.

لی و پترسون [۱۶] یک بررسی آزمایشگاهی را برای آزمون تأثیر تغییرات دمایی و کسر حجمی روی هدایت گرمایی موثر سوسپانسیون آب با Al_2O_3 با اندازه ذرات ۳۶ nm و CuO با اندازه ذرات ۲۹ nm انجام دادند. نتایج نشان داد که ماده تشکیل دهنده ذرات نانو، قطر ذرات، کسر حجمی و دمای بالکی تأثیرات مهمی روی هدایت گرمایی سیالات نانو دارند. به عنوان مثال برای سوسپانسیون آب / Al_2O_3 افزایش در دمای متوسط از ۲۷ به ۳۴/۷ درجه سانتیگراد یک افزایش سه برابری در هدایت گرمایی دارد.

آنها همچنین دو فرمول بازگشتی دو عاملی ساده را در ارتباط با سیالات نانو ارائه کردند.

$$\frac{k_{eff} - k_b}{k_b} = 0.76\phi + 0.0187(T - 273.15) - 0.462 \quad \text{برای آب-آلومین}$$

$$\frac{k_{eff} - k_b}{k_b} = 3.761\phi + 0.0179(T - 273.15) - 0.307 \quad \text{برای آب-CuO}$$

پاتل و همکارانش [۱۷] ذرات طلا و نقره را در آب و تولوئنس به عنوان سیال پایه به کار بردند. آنها متوجه افزایش ۵٪ تا ۲۱٪ هدایت گرمایی سیالات نانو برای آب در محدوده دمایی ۳۰-۶۰ درجه سانتیگراد با بارگذاری بسیار پایین ۰/۰۰۰۲۶ درصد حجمی ذرات نقره شدند. برای یک بارگذاری متفاوت ۰/۰۱۱ ذرات طلا اصلاح هدایت گرمایی در حدود ۷ تا ۱۴ درصد بود. چنین پدیده جالبی دال بر اینست که علاوه بر اندازه ذرات عوامل مهم دیگری در ارتباط با حرکت ذرات وجود دارد. همچنین افزایش هدایت گرمایی سیالات نانو با دما غیر خطی و با درصد حجمی خطی تغییر می کرد.

نتیجه گیری:

همان طور که عنوان شد ارائه یک رابطه دقیق که بتواند هدایت گرمایی سیالات نانو را پیشبینی نماید دور از ذهن به نظر می رسد. این امر ناشی از تأثیر عوامل متعدد در شکلدهی هدایت گرمایی این سیالات است که به نظر می رسد تعدادی از آنها همچنان ناشناخته مانده است. روشهای آزمایشگاهی نیز به دلیل آنکه در شرایط خاص و با نانوذرات و سیال پایه خاصی (سیال نانو) انجام می گیرند امکان ارائه یک رابطه فراگیر را ندارند.

به هر شکل آنچه مشخص است قابلیت بالای این سیالات در مقایسه با سوسپانسیونهایی با

ذرات بزرگتر است که میتوانند در آینده تحول چشمگیری را در مبدلها و وسایل حرارتی ایجاد نمایند.

مراجع

- [1]Samy joseph Palm; Cong Tam Nguyen; Gilles Roy; Nicolas Galanis (2005) Heat transfer enhancement by using nanofluid in forced convection flows ,International journal of heat and fluid flow 26 (2005) 530-546
- [2]S. U. S. choi, Enhancing thermal conductivity fluids with nano particle, Developments and applications of non-Newtonian flows, ASME FED 231/MD 66 (1995) 99-103
- [3]S. Lee, S. U. S Choi, Application of Metallic nanoparticle in Advanced cooling systems ,in: Recent Advances in Solids/Structures and Application of Metallic Materials, ASME PVP 342/MD 72 (1996) 227-234
- [4]D. A. Drew,S. L>F,Theory of Multicomponent Fluids, Springer,Berlin,1999 .
- [5]Yimin Xuan,Wilfried Roetzel; Conceptions for heat transfer correlation of nanofluid , International journal of Heat and Mass transfer 43 (2000) 3701-3707
- [6]J. Kestin, W. A Wakeham, A contribution to the theory of transient hot-wire thecnique for thermal conductivity measurements, physica A 92 (1978) 102-116
- [7]X. Wang,X. Xu,S. U. SChoi, Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture, Journal of Themophysics and Heat Transfer 13 (4) (1999) 474-480
- [8]S. K. Das,N. Putta, p Thiesen, W. Roetzel,Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluid. ASME trans,J. heat transfer 125 (2003) 567-574
- [9] Y. Nagasaka, A. Nagashima, Absolute measurement of the thermal conductivity of electrically conducting liquids by the transient hot-wire method, Journal of Physics E: Scientific Instruments 14 (1981) 1435–1440 .
- [10] J. A. Eastman, U. S. Choi, S. Li, L. J. Thompson, S. Lee, Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids, Materials Research Society Symposium – Proceedings, vol. 457, Materials Research Society, Pittsburgh, PA, USA, Boston, MA, USA, 1997, pp. 3–11 .
- [11] S. Lee, S. U. S. Choi, S. Li, J. A. Eastman, Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, Journal of Heat Transfer 121 (1999) 280–289 .
- [12] H. , A. Ebata, K. Teramae, N. Hishinuma, Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of 7-Al₂O₃, SiO₂,and TiO₂ ultra-fine particles) , Netsu Bus-sei (Japan) 7 (4) (1993) 227–233 .
- [13] K. Hong, T. -K. Hong, H. -S. Yang, Thermal conductivity of fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles, Applied Physics Letters 88 (3) (2006) 31901
- [14]. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, Study on the thermal conductivity of sic nanofluids, Journal of the Chinese Ceramic Society 29 (4) (2001) 361– 364 .
- [15] H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, Thermal conductivity of suspensions containing nanosized SiC particles, International Journal of Thermophysics 23 (2) (2002) 571–580 .
- [16] C. H. Li, G. P. Peterson, Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids) , Journal of Applied Physics 99 (8) (2006) 084314 .
- [17] R. L. Hamilton. O. K. Crosser, Thermal conductivity of heterogeneous two-componens systems. I&Ec Fundamentals 1 (1962) 182-191 .