

## بررسی تجربی خواص رئولوژیکی نانوسیال بر پایه روغن در لوله های بیضوی

سید امیر حسین زمزمیان<sup>\*</sup>، احسان ایمانی، محمدپازوکی

پژوهشکده انرژی، گروه پژوهشی انرژی خورشیدی، پژوهشگاه مواد و انرژی، مشکین دشت، استان البرز، ایران

دریافت: ۹۲/۱۰/۲۸ پذیرش: ۹۴/۶/۳

### چکیده

در این مقاله یک تحقیق تجربی برای مطالعه ویژگی‌های انتقال حرارت توسط جریان نانوسیال در داخل لوله‌های بیضوی تحت شار حرارتی ثابت انجام شده است. برای تهیه نانوسیال مربوطه نانوذرات مس در سیال پایه روغن انتقال حرارت پراکنده شده و سپس با استفاده از دستگاه اولتراسونیک تثبیت شده است. نانوسیال با غلظت‌های وزنی مختلف ذرات شامل ۰.۲، ۰.۵، ۱ و ۲ درصد استفاده شده است. بخش تست توسط یک کویل که با هیتر الکتریکی پیچیده شده به دور آن برای تولید شرائط شار حرارتی ثابت مورد استفاده قرار گرفته است. در این شرائط ویژگی‌های رئولوژیکی نانوسیال شامل چگالی، رسانایی حرارتی و ویسکوزیته به طور تجربی اندازه گیری می شود. بر اساس این اندازه گیری‌ها، یک سری روابط برای پیشگویی خواص رئولوژیکی نانوسیالات با غلظت وزنی مختلف ارائه شده است. نتایج حاصل از اندازه گیری‌های تجربی نشان می دهد که با اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه منجر به افزایش چگالی، رسانایی حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال می گردد. نتایج حاصل از جریان انتقال حرارت جابجائی سیالات در داخل لوله های با سطح مقطع مدور و بیضی شکل، نشان می دهد که با افزایش شار حرارتی و سرعت جریان، ضریب انتقال حرارت جابجائی افزایش می یابد. همچنین مشاهده گردید که با استفاده از جریان نانوسیالات به جای استفاده از سیال پایه یعنی روغن انتقال حرارت و استفاده از لوله های بیضی شکل به جای لوله های با سطح مقطع مدور باعث افزایش انتقال حرارت جابجائی می شود.

### کلمات کلیدی

نانوسیال، انتقال حرارت، جابجایی اجباری، روغن، هدایت حرارتی.

### نکات برجسته پژوهش

- بررسی امکان افزایش انتقال حرارت در روغن های انتقال حرارت صنعتی توسط فناوری

<sup>\*</sup>azamzamian@merc.ac.ir

### نانوسیالات

- افزایش قابل توجه در ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته روغن انتقال حرارت صنعتی در نتیجه کاربرد نانوسیالات
- افزایش ضریب انتقال حرارت جابجائی توسط نانوسیالات بر پایه روغن انتقال حرارت صنعتی به نسبت افزایش شار حرارتی، دبی جریان و نیز عدد رینولدز بر اساس نوع رژیم جریان

### مقدمه

افزایش انتقال حرارت و نیز سیال های انتقال دهنده حرارت موضوع بسیاری از تحقیقات در دهه های اخیر بوده است. نانوسیالات با برتری هایی که در زمینه انتقال حرارت جابجایی سیالات دارند، بیش تر مورد توجه قرار می گیرند. هدایت حرارتی موثر نانوسیالات معمولاً با استفاده از روش سیم داغ<sup>۱</sup> اندازه گیری می شود که یکی از دقیق ترین روش ها برای به دست آوردن هدایت حرارتی مواد است [۱]. روش های دیگر، روش دمای نوسانی<sup>۲</sup> و حالت پایدار<sup>۳</sup> هستند. اگرچه اندازه گیری ها با نانوذرات اکسیدی آغاز شد [۱ و ۲]، نانوسیالات چندان مورد توجه قرار نگرفتند تا زمانی که استمن و همکاران [۳] برای اولین بار نشان دادند که نانوسیالات مس، که با روش یک مرحله ای تولید شده اند، قابلیت بیش تری نسبت به نانوذرات اکسیدی دارند. نتایج چوی و همکاران<sup>۴</sup> [۴] نشان داد که تغییرات هدایت حرارتی با غلظت غیرخطی است. چاندراسلار و همکاران<sup>۵</sup> [۵] به صورت تجربی اثر ویسکوزیته و هدایت حرارتی نانوسیال آب - اکسید آلومینیوم را بررسی کردند. نتایج رئولوژیکی این نانوسیال نشان می دهد آب - اکسید آلومینیوم رفتار نیوتنی دارد.

### چگالی، گرمای ویژه، ویسکوزیته و هدایت حرارتی نانوسیالات

چگالی نانوسیال معمولاً از طریق رابطه پاک و چو<sup>۶</sup> [۶] به دست می آید:

$$\rho_{nf} = \phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_f \quad (1)$$

که در آن  $\phi$  درصد حجمی نانوذرات،  $\rho_p$  چگالی نانوذرات و  $\rho_f$  چگالی سیال پایه است. همچنین برای محاسبه گرمای ویژه نانوسیالات از رابطه پاک و چو [۶] به صورت رابطه ۲ می توان استفاده کرد.

$$Cp_{nf} = \phi Cp_p + (1 - \phi) Cp_f \quad (2)$$

<sup>1</sup>Transient Hot Wire

<sup>2</sup>Oscillating Temperature

<sup>3</sup>Steady-State

<sup>4</sup>Choi et al.

<sup>5</sup>Chandraselar et al.

<sup>6</sup>Pak and Cho

در روابط بالا زیرنویس های  $p$  و  $f$  به ترتیب مربوط به نانوسیال، نانوذره و سیال پایه هستند. در و پاسمن<sup>۱</sup> [۷] معادله معروف انیشتین را برای محاسبه ویسکوزیته نانوسیالات پیشنهاد کرد که برای نانوذرات کروی و غلظت های حجمی کم تر از ۵٪ قابل کاربرد است.

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\phi)\mu_f \quad (3)$$

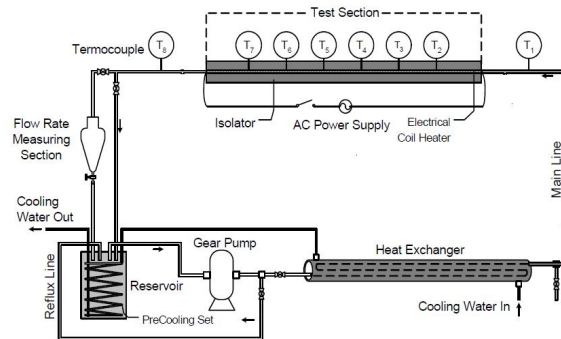
برای ترکیب سیال و ذره، تحقیقات بیشماری از روی مدل کلاسیک ماکسول<sup>۲</sup> [۸] الهام گرفته شده است. مدل ماکسول برای هدایت حرارتی ترکیب جامد-مایع و ترجیحاً ذرات با سایز میکرو و میلی متر در غلظت های پایین ذرات جامد نتایج خوبی می دهد. هدایت حرارتی موثر توسط رابطه ۴ داده می شود.

$$K_{eff, Maxwell} = \left[ \frac{K_p + 2K_f + 2\phi(K_f - K_p)}{K_p + 2K_f - \phi(K_p - K_f)} \right] K_f \quad (4)$$

که  $k_p$  هدایت حرارتی ذره و  $k_f$  هدایت حرارتی سیال پایه و درصد حجمی سوسپانسیون می باشد.

### جریان نانوسیالات در لوله های بیضوی با تشریح دستگاه آزمایش

تاکنون مطالعات بسیار کمی بر تأثیر بیضوی کردن لوله در افزایش انتقال حرارت به ویژه در مورد جریان های تک فاز صورت گرفته است. ویلسون و همکاران [۹] مطالعه خود را روی انتقال حرارت چگالشی دو سیال  $R134a$  و  $R410a$  و در لوله صاف و میکروفین دار بیضوی انجام دادند. در این تحقیق رفتاری مشابه آن چه در لوله های دایروی اتفاق می افتد، برای لوله های بیضوی مشاهده شده است. بدین معنی که با افزایش کیفیت و سرعت جرمی، ضریب انتقال حرارت چگالشی افزایش می یابد. برای بررسی انتقال حرارت جابجایی تحت شرایط مرزی شار ثابت یک سیستم آزمایشی مطابق شکل ۱ طراحی و ساخته شد. سیستم آزمایشی متشکل از یک مدار برای جریان روغن انتقال حرارت و یا نانوسیال مربوطه می باشد که از بخش های متفاوتی برای اندازه گیری دما، دبی و نیز واحدهای سرمایش و تنظیم دبی جریان سیال تشکیل شده است. نانوسیال ها در غلظت های وزنی ۰/۲، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد تهیه شدند. برای هر نمونه آماده شده، آزمایشات در پنج دبی مختلف و برای هر دبی در دو شار حرارتی انجام شد.



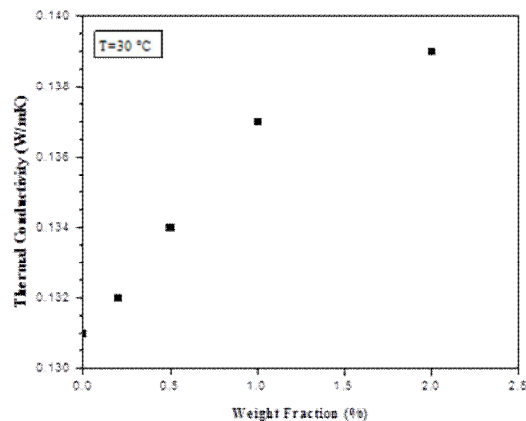
شکل ۱. طرح شماتیک سیستم آزمایشی

<sup>1</sup>Drew and Passman

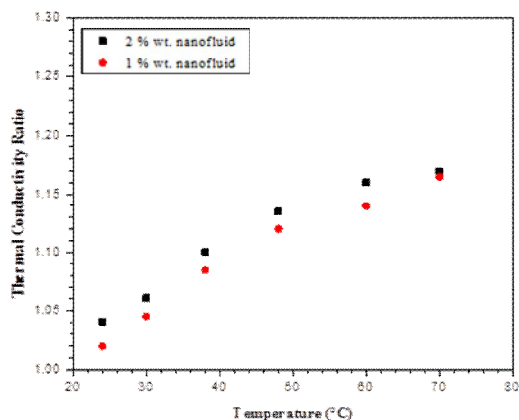
<sup>2</sup>Maxwell

### بررسی رفتار و خواص نانوسیال

به منظور محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت، خواص ترموفیزیکی و رئولوژیکی سیالات مورد آزمایش نیاز است. در شکل ۲ نمودار مقادیر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال روغن انتقال حرارت - مس برای غلظت های جرمی مختلف در دمای محیط ( $30^{\circ}C$ ) نمایش داده شده است. همچنین دیده می شود که نرخ افزایش هدایت حرارتی در درصد های جرمی پائین تر از درصد های جرمی بالاتر می باشد. این مسئله ممکن است به دلیل افزایش بیش تر ویسکوزیته نانوسیال نسبت به افزایش هدایت حرارتی در درصد های جرمی بالاتر باشد. اثر دما بر افزایش هدایت حرارتی نانوسیال نیز با اندازه گیری نسبت ضریب هدایت حرارتی نانوسیال به سیال پایه با درصد های جرمی ۱ و ۲ درصد در دما های مختلف بین  $24^{\circ}C$  تا  $70^{\circ}C$  در شکل ۳ آورده شده است.



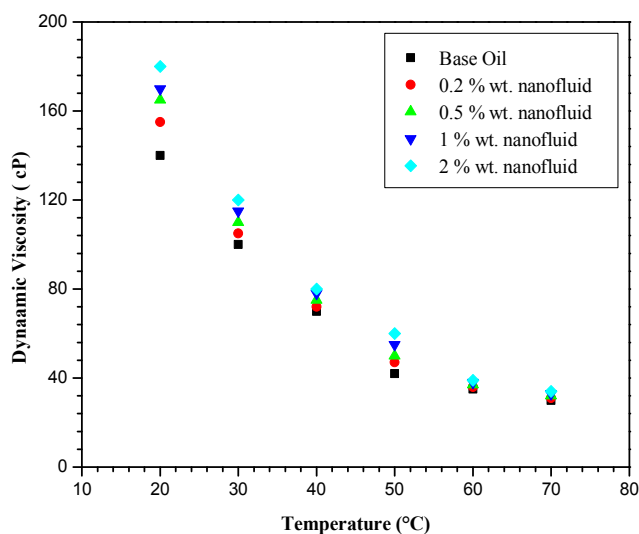
شکل ۲. نمودار ضریب هدایت حرارتی بر حسب غلظت جرمی نانوسیال در دمای  $30^{\circ}C$



شکل ۳. نمودار نسبت ضرایب هدایت حرارتی نانوسیال به سیال پایه بر حسب دما برای غلظت های جرمی ۱ و ۲ درصد

### رفتار رئولوژیکی نانوسیال و اندازه گیری ویسکوزیته

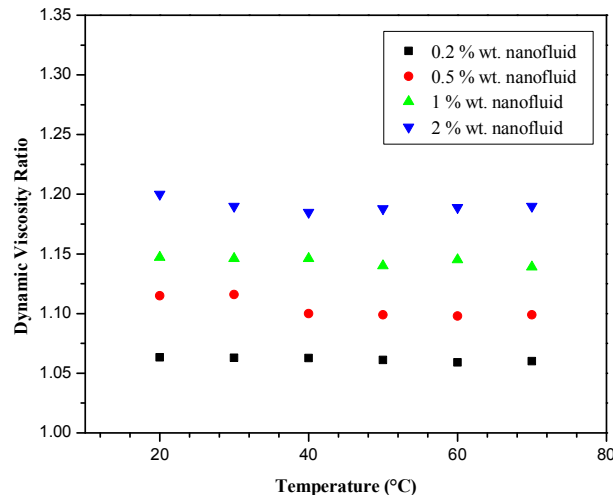
برای بررسی رفتار رئولوژیکی نانوسیال و ویسکوزیته (دینامیکی) نانوسیال، نمونه‌ها با جهت تست از هر غلظت و همچنین از خود روغن انتقال حرارت (بدون نانوذرات) تهیه و آماده شد و آزمایشات مربوطه توسط دستگاه ویسکومتر چرخشی-نوسانی آنتوان پار در دماهای مختلف روی نمونه‌ها انجام شد. تغییرات ویسکوزیته اندازه گیری شده روغن انتقال حرارت و نانوسیال با غلظت‌های مختلف در دماهای مختلف در شکل ۴ آورده شده است. دما بین ۲۰ تا  $70^{\circ}C$  با فاصله دمایی  $10^{\circ}C$  و غلظت جرمی نانوسیال بین ۰/۲ تا ۲ درصد تغییر می‌کند. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود ویسکوزیته همه نمونه‌ها روندی نزولی با افزایش دما داشته و به طور لگاریتمی و یکسان کاهش می‌یابند و نشان می‌دهند که نانوسیال با درصد جرمی بالا، بیش‌تر در مقابل حرکت سیال مقاومت می‌کند. این در حالی است که با افزایش دما، این فاصله کم‌تر می‌شود به نحوی که در دمای  $70^{\circ}C$  ویسکوزیته نانوسیال ۲ درصد جرمی ۱۸٪ بیش از سیال انتقال حرارت می‌باشد. در دماهای بین ۲۰ تا  $40^{\circ}C$ ، ویسکوزیته نانوسیال به سرعت با افزایش دما کاهش می‌یابد. در شکل ۵ نیز تغییرات نسبت ویسکوزیته نانوسیال به سیال انتقال حرارت بر حسب دما آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، میزان کاهش نسبت‌های ویسکوزیته نانوسیال‌ها در غلظت‌های مختلف قدری متفاوت است.



شکل ۴. تغییرات ویسکوزیته دینامیکی روغن انتقال حرارت و نانوسیال‌ها بر حسب دما

روند کاهش این نسبت‌ها در غلظت‌های ۰/۲، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی تقریباً مشابه یکدیگر است اما در غلظت ۲ درصد مقداری متفاوت می‌باشد. چنین روندی در سه غلظت اول به این معنی است که نانوسیال‌های روغن انتقال حرارت - مس در بازه‌های دمایی یکسان نسبت به سیال پایه خود بیش‌تر کاهش ویسکوزیته داشته‌اند اما در غلظت چهارم چنین روندی مشاهده نمی‌شود. دلیل این چنین کاهش را می‌توان در اثر

افزایش دما روی سست شدن نیروهای بین ذره یا بین مولکولی دانست.



شکل ۵. تغییرات نسبت ویسکوزیته نانوسیال ها به سیال پایه بر حسب دما

### نتیجه گیری

ضریب هدایت حرارتی روغن انتقال حرارت - مس به صورت غیرخطی با افزایش غلظت نانوسیال افزایش پیدا می کند. بیشترین مقدار افزایش هدایت حرارتی ۶/۲٪ می باشد که مربوط به نانوسیال با غلظت ۲ درصد جرمی می باشد. همچنین نرخ افزایش ضریب هدایت حرارتی در غلظت های پائین بیش تر از غلظت های بالا می باشد.

نانوسیال روغن انتقال حرارت - مس برای تمامی غلظت ها و دماها رفتار نیوتنی دارد. همچنین دما تأثیر زیادی بر ویسکوزیته نانوسیال می گذارد و با افزایش دما به طور قابل توجهی کاهش می یابد؛ در حالی که میزان ویسکوزیته برشی مستقل از دما است.

### منابع

1. Lee, S., Choi, S.U.S., Li, S., Eastman, J.A., "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles," J. Heat Transfer, vol. 121, pp. 280-289, 1999.
2. Hong, T. K., Yang, H. S. and Choi, C. J., "Study of the enhanced thermal conductivity of Fe nanofluids," J. Appl. Phys., vol. 97, 2005.
3. Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., Yu, W. and Thomson, L. J., "Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol based nanofluids containing copper nanoparticles," Appl. Phys. Lett., vol. 78, pp. 718-720, 2001.
4. Choi, S. U. S., Zhang, Z.G., Yu, W., Lockwood, F.E. and Grulke Anomalous, E.A., "thermal conductivity enhancement in nano-tube suspensions," Appl. Phys. Lett., vol. 79, pp.2252-2254, 2001.
5. Chandrasekar, M., Suresh, S. and Chandra Bose, A., "Experimental investigations and



- theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of  $Al_2O_3$ /water nanofluid," J. Experimental Thermal and Fluid Science 2009.
6. Pak, B. and Cho, Y., "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles," Experimental Heat Transfer, vol. 11 (2), pp. 151-170, 1998.
  7. Drew, D.A. and Passman, D.A., "Theory of Multi component Fluids," Springer, Berlin, pp. 121-128, 1999.
  8. Maxwell, J.C., "A Treatise on Electricity and Magnetism," second edition, Clarendon Press, Oxford, UK.
  9. Wilson, M.J., Newell, T.A., Chato, J.C. and Infante Ferreira, C.A., "Refrigerant charge, pressure drop, and condensation heat transfer in flattened tubes," International journal of refrigeration, vol. 26, pp. 442-451, 2003.