



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و هفت، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۹۱ تا ۹۹
Vol. 47, No. 1, Summer 2015, pp. 91-99



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی مکانیک)
Amirkabir Journal of Science & Research (Mechanical Engineering)
(AJSR - ME)

مقایسه نتایج تجربی انتقال حرارت نانوسیالات آب/ Al_2O_3 و آب/ CuO در کانال مثلثی متساوی الاضلاع در شار حرارتی ثابت دیواره

سعید زینالی هریس^{۱*}، زهرا عدالتی^۲، سید حسین نوعی^۳

- ۱- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
۳- استاده، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

(دریافت ۱۳۸۹/۱۲/۲۶، پذیرش ۱۳۹۳/۳/۳۱)

چکیده

بررسی انتقال حرارت جابجایی در کانال های غیر دایره ای جهت استفاده در کاربردهای گرمایشی و سرمایشی بسیار مهم است. انتقال حرارت در این کانال ها پایین بوده ولی افت فشار کمتری نسبت به کانال های دایره ای دارند. در میان کانال های غیر دایره ای، کانال های مثلثی افت فشار کمتر و البته انتقال حرارت نامناسب تری را نشان می دهند. یکی از راه های بهبود انتقال حرارت این مقاطع افزودن نانو ذرات به سیال پایه آب است. در این مقاله انتقال حرارت مقطع مثلثی متساوی الاضلاع با افزودن نانو ذرات Al_2O_3 و CuO به سیال پایه آب مقطر به صورت تجربی بررسی شده است. مطابق داده های بدست آمده ضریب انتقال حرارت تجربی نانوسیالات مورد استفاده بیشتر از ضریب انتقال حرارت تجربی آب مقطر است. جهت مقایسه انتقال حرارت نانوسیالات آب/ Al_2O_3 و آب/ CuO در کانال مثلثی نمودارهای مربوط به عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی رسم شده است که بیانگر افزایش این مقادیر با عدد پکلت و کسر حجمی نانو سیال است. در ضمن عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی برای نانو سیال آب/ CuO مقادیر بیشتری را نسبت به نانو سیال آب/ Al_2O_3 نشان می دهند.

کلمات کلیدی

نانو سیال آب/ Al_2O_3 - نانو سیال آب/ CuO - کانال مثلثی - بهبود انتقال حرارت جابجایی

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات
Email: zeinali@ferdowsi.um.ac.ir

۱- مقدمه

افزایش میزان انتقال حرارت موضوعی است که مدت ها مورد توجه محققان بوده است. روش های مختلفی جهت بهبود میزان انتقال حرارت پیشنهاد شده است که یکی از این روش ها که اخیراً تحقیقات گسترده ای بر روی آن انجام شده است استفاده از نانو سیال است. نانو سیال به صورت ذرات نانو پراکنده در داخل سیال پایه نظیر آب، روغن و اتیلن گلیکول تعریف می شود [۱]. عمده بررسی های انجام گرفته بر روی نانو سیال در مقاطع دایره ای صورت گرفته و مقطعی که دارای شکل هندسی غیر دایره ای بوده اند از گستره تحقیقات نانو سیال کنار گذاشته شده اند. یکی از علت هایی که این مقاطع مورد اقبال محققان نبوده اند انتقال حرارت بسیار کم آن ها در مقایسه با مقاطع دایره ای می باشد. اما نکته قابل تأمل در مقاطع غیر دایره ای افت فشار بسیار پایین آن ها در مقایسه با مقاطع دایره ای است. پس در صورت بهبود انتقال حرارت، این مقاطع می توانند در صنعت بسیار مورد استفاده قرار گیرند.

مقاطع مثلثی به علت فشردگی بالای این مقاطع نسبت به سایر مقاطع، شکل دهی آسان توسط فلزات نازک، مقاوت مکانیکی مناسب، افت فشار پایین و سایر موارد در موارد صنعتی مانند مبدل های حرارتی فشرده، بویلرها، کوره های صنعتی، تجهیزات بازیافت انرژی دما بالا، محفظه احتراق، موتورهای راکت، صنایع هوافضا، صنایع هسته ای، صنایع مهندسی پزشکی، الکترونیک و موتورهای پیشران ما فوق صوت کاربرد دارند. در تمام این موارد افت فشار کم بسیار حائز اهمیت است، که مقطع مثلثی این امکان را فراهم می کند.

تحقیقات متعددی بر روی انتقال حرارت آب مقطر در مقطع مثلثی انجام گرفته است. به عنوان مثال کایز و لندن [۲] در شرایط دمایی ثابت دیواره عدد ناسلت را برای کانال مثلثی متساوی الاضلاع برابر ۲/۳۵ گزارش نموده اند. همچنین کوتاتیلز [۳] همین کار را در دمایی ثابت دیواره انجام داده و عدد ناسلت متوسط را ۲/۷۰ گزارش نموده است. اشمیت و نول [۴] به صورت تجربی انتقال حرارت آب مقطر عبوری از میان کانال مثلثی متساوی الاضلاع را بررسی نمودند. آنها عدد ناسلت را ۲/۴۷ بدست آوردند. ناکامورا [۵] با روش حل عددی تفاضل محدود در شرایط

دما ثابت مقدار عدد ناسلت را ۲/۴۶ گزارش نموده است. عدد ناسلت در شرایط شار حرارتی ثابت دیواره اولین بار بوسیله کایز و کلارک [۶] با روش تفاضل محدود تعیین شد. همچنین شاه [۷] به روش عددی مقدار عدد ناسلت را در شرط مرزی شار حرارتی ثابت دیواره کانال مثلثی متساوی الاضلاع از روش حداقل مربعات ۱/۸۸۹ گزارش نمود.

مطالعات متعددی بر روی انتقال حرارت هدایتی نانو سیال انجام گرفته است [۸-۱۳]. به عنوان مثال مسودا و همکاران [۸] نانو ذرات TiO_2 و Al_2O_3 را با درصد حجمی ۴/۳ در سیال پایه آب پراکنده نمودند. بررسی آن ها نشان داد که هدایت حرارتی ۱۱٪ بیشتر از حالتی شده که تنها سیال پایه مورد استفاده قرار گرفته است. گریم [۹] ذرات آلومینیوم ۸۰ نانومتری را در سیال پایه پراکنده نمود و ۱۰۰٪ افزایش هدایت حرارتی سیال را برای غلظت ۰/۵ درصد حجمی نشان داد. ایستمن و چویی [۱۰] در بررسی هایشان نشان دادند که هدایت حرارتی نانو سیالات آب/Cu و آب/CNT در مقایسه با سیالات پایه بسیار بزرگتر است. همچنین ایستمن و همکاران [۱۱] نشان دادند که نانو ذرات پوشیده شده با اسید تیو گلیولیک (اتیلن گلیکول-Cu) با درصد حجمی ۰/۳٪ مقدار هدایت حرارتی را تا ۴۰٪ افزایش می دهد. اخیراً تلاشهایی در مؤسسه تحقیقاتی اتمی (Indira Gandhi Centre for Atomic Research) انجام شده است و Fe_3O_4 پوشیده شده با اسید اولئیک در سیال پایه هگزادکان در میدان مغناطیسی ساخته شده است که با این روش هدایت حرارتی تا ۳۰۰٪ افزایش پیدا کرده است [۱۲].

حمیدی و همکاران [۱۳] مدل های ریاضی ارائه شده برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات را بررسی نمودند. آنها نشان دادند که عوامل اصلی در درک ویژگی های گرمایی نانوسیالات، عوامل پرتابه ای هستند. آنها همچنین تأثیر ضریب هدایت حرارتی نانو ذره و سیال پایه، درصد حجمی نانو ذرات، ابعاد ذره و ویژگی های لایه تبادل حرارتی را در تغییرات ضریب هدایت حرارتی نانو سیال مورد بررسی قرار دادند.

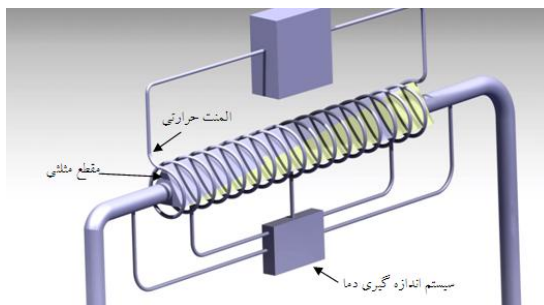
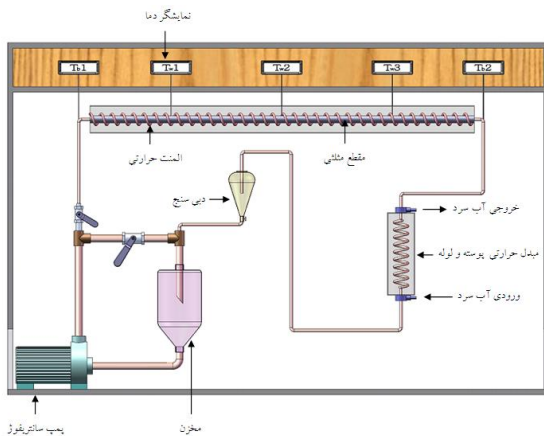
مطالعات انتقال حرارت جابجایی نانو سیال عمدتاً در مقاطع و لوله های مدور انجام گرفته است [۲۰-۱۴].

به عنوان مثال پاک و چویی [۱۴] در بررسی هایشان نانو سیالات آب/ TiO_2 و آب/ Al_2O_3 را در جریان درهم

روی سطوح انتقال حرارت و تغییر مورفولوژی سطح بستگی دارد [۲۲-۲۴]. علاوه بر این بررسی‌ها مطالعات فراوان دیگری در زمینه انتقال حرارت نانو سیال انجام گرفته است [۳۷-۲۵]. در این مطالعه، انتقال حرارت جابجایی اجباری نانو سیال های آب/ Al_2O_3 و آب/ CuO در مقطع مثلثی متساوی الاضلاع در جریان آرام با شرط مرزی بار حرارتی ثابت دیواره بررسی و مقایسه گردیده است.

۲- سیستم آزمایشگاهی

نانو ذرات Al_2O_3 و CuO مورد استفاده در این تحقیق از شرکت آمریکایی Nanostructured Amorphous Materials, Inc. خریداری شده است. نانو سیال بدست آمده حاصل از سوسپانسیون نانو ذرات مذکور در سیستم آزمایشگاهی که با شرط مرزی شار حرارتی ثابت دیواره کار می کند، مورد بررسی قرار می گیرند. تصویر شماتیک سیستم آزمایشی و مقطع مثلثی در شکل (۱) رسم شده است.



شکل (۱): تصویر شماتیک سیستم آزمایشگاهی

در محدوده کسر حجمی ۰.۳-۰.۱٪ بررسی نمودند و افزایش عدد ناسلت را با کسر حجمی و عدد رینولدز نشان دادند.

همچنین ون و دینگ [۱۵] از نانو سیال آب/ Al_2O_3 در جریان آرام برای غلظت های ۰.۰۶٪ و ۰.۱٪ و ۰.۱۶٪ نانو سیال استفاده کردند. آنها نشان دادند برای درصد حجمی ۰.۱۶٪ مقدار انتقال حرارت ۰.۴۱٪ بیشتر از سیال پایه است.

زینالی هریس و همکارانش [۱۶] آزمایشات متعددی روی نانو سیال آب/ Al_2O_3 در جریان آرام و برای غلظت های ۰.۰۲٪ تا ۰.۳٪ انجام دادند. آنها نشان دادند که انتقال حرارت جابجایی نانو سیال با افزایش درصد حجمی زیاد می شود.

اکبری نیا و لائور [۱۷] از روش مخلوط دوفازی برای بررسی اثر قطر نانوذرات بر نانو سیال آب/ Al_2O_3 با ۰.۱٪ حجمی استفاده کردند. آن ها نشان دادند عدد ناسلت با افزایش قطر نانو ذرات کاهش می یابد.

زینالی هریس [۱۸] به بررسی اثر نانو سیال در بهبود عملکرد سیستم های وسایل نقلیه پرداخته است. مطالعات وی بیانگر کاهش ۱۱ درصدی مصرف سوخت و کاهش بیشتر ضریب اصطکاک با افزودن نانو ذرات به سیال پایه موجود در رادیاتور و روغن موتور است.

زینالی هریس و محمدی فرد [۱۹] به بررسی پتانسیل نانو سیال به عنوان سیال عامل خنک کننده در نیروگاه های هسته ای پرداخته اند. آن ها نشان دادند استفاده از نانو سیال در بخش های مختلف تأسیسات هسته ای نه تنها فرایند های انتقال حرارت را بهبود می بخشد بلکه از لحاظ اقتصادی نیز به صرفه هستند.

زینالی هریس و شیخی [۲۰] استفاده از نانو سیالات را جهت خنک سازی تراشه های رایانه ای مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه روش های خنک سازی تجهیزات الکترونیکی بررسی شده و نتیجه گیری شده است که نانوسیالات عملکرد مناسب و مقرون به صرفه ای را در این حوزه از خود بروز داده اند.

نعسان [۲۱] برای اولین بار اثر نانو سیال آب/ Al_2O_3 را بر روی انتقال حرارت جابجایی مقطع مربعی بررسی کرد. نتایج نشان داد که در جریان آرام انتقال حرارت جابجایی با غلظت نانو سیال در دبی های بالا زیاد می شود.

نتایج بسیاری از بررسی ها نشان می دهند که با افزایش نانو ذرات به سیال پایه انتقال حرارت بهبود می یابد. البته در مواردی نتایج متضاد و متناقضی نیز گزارش گردیده است که به عواملی همچون افزایش ویسکوزیته و یا گیر افتادن نانو ذرات بر

آزمایش های نانو سیال سه بار تکرار می شوند. هر آزمایش برای پایدار شدن به حدود یک ساعت زمان نیاز دارد. با مشاهده تغییرات اندک در دمای ترموکوپل های نصب شده بر روی مقطع، ثبت دماها و اندازه گیری دبی آغاز می شود.

۳- نحوه انجام محاسبات

عدد بدون بعد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی دو پارامتر قابل توجه در بیان ویژگی های حرارتی نانو سیال هستند. این دو پارامتر به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\overline{Nu}_{nf}(\text{exp}) = \frac{\overline{h}_{nf}(\text{exp})D_h}{k_{nf}} \quad (1)$$

$$\overline{h}_{nf}(\text{exp}) = \frac{q}{A.(T_w - T_b)_M} \quad (2)$$

که $(T_w - T_b)_M$ اختلاف دمای متوسط خطی نانوسیال است.

در این مقاله، عدد ناسلت تجربی حاصل از رابطه (۳) با عدد ناسلت تئوری رابطه *Seider - Tate* که به صورت زیر تعریف می شود، مقایسه می گردد [۳۸]:

$$\overline{Nu}_{nf}(\text{th}) = 1.86 \left(1.86 \text{Re}_{nf} \text{Pr}_{nf} \frac{D_h}{L} \right)^{1/3} \times \left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_{wnf}} \right)^{0.14} \quad \text{if } \text{Re}_{nf} \text{Pr}_{nf} \frac{D_h}{L} > 10 \quad (3)$$

مشخصات نانوسیال توسط روابط زیر در دمای متوسط بالک نانوسیال محاسبه شده است [۳۹]:

$$\rho_{nf} = \phi \rho_s + (1 - \phi) \rho_w \quad (4)$$

$$\mu_{nf} = \mu_w (1 + 2.5\phi) \quad (5)$$

$$Cp_{nf} = \frac{\phi(\rho_s Cp_s) + (1 - \phi)(\rho_w Cp_w)}{\rho_{nf}} \quad (6)$$

$$k_{nf} = \left[\frac{k_s + 2k_w + 2(k_s - k_w)(1 + \beta)^3 \phi}{k_s + 2k_w - (k_s - k_w)(1 + \beta)^3 \phi} \right] k_w \quad (7)$$

که β نسبت ضخامت لایه مشترک سیال و ذرات نانو به شعاع ذرات نانو می باشد. در محاسبات انجام گرفته $\beta = 0.1$ در نظر گرفته شده است [۴۰].

مقطع مثلثی مورد استفاده در این بررسی دارای طول ۱/۴ متر و قطر هیدرولیکی ۴/۲ میلی متر است. ضخامت دیواره این مقطع ۱ میلی متر است. سه المنت حرارتی استوانه ای روی سه ضلع کانال مثلثی مسی در سرتاسر لوله قرار داده شده است. جهت کاهش اتلاف حرارتی کانال مثلثی عایق شده است. در ابتدا و انتهای مقطع مثلثی دو عدد ترموکوپل به ترتیب دمای بالک ورودی و خروجی سیال را اندازه گیری می کنند. در طول لوله مورد آزمایش همچنین سه عدد ترموکوپل بر روی دیواره جهت اندازه گیری دمای دیواره نصب شده است. موقعیت ترموکوپل ها روی مقطع در شکل (۱) نشان داده شده است.

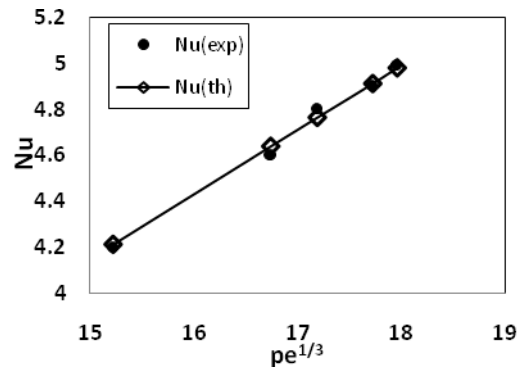
دقت اندازه گیری دما در این آزمایش $\pm 0.1^\circ\text{C}$ است. مبدل حرارتی از نوع پوسته-لوله جهت خنک کردن سیال خروجی از کانال مورد استفاده قرار می گیرد. این مبدل بوسیله سیال سرد ساز آب، دمای نانو سیال را به حدود دمای محیط آزمایش می رساند. پس از اندازه گیری دبی در خروجی مبدل، نانوسیال دوباره به مخزن بر می گردد. اندازه گیری دبی توسط دکانتور مدرج بصورت اندازه گیری مستقیم انجام می شود.

نانو سیالات $\text{CuO}/\text{ آب}$ و $\text{Al}_2\text{O}_3 - \gamma/\text{ آب}$ در غلظت پایین به ترتیب با قطر نانو ذرات ۲۰ و ۳۰ نانومتر در سیال پایه آب مقطر استفاده می شود. برای آماده سازی نانو سیال ابتدا نانو ذرات به تدریج به سیال پایه اضافه شده و بوسیله همزنی در سیال پایه توزیع می شوند سپس توسط همزن اولتراسونیک به مدت ۴۵ دقیقه مخلوط می شود. این همزن از نوع Hielscher UP 200S ساخت کشور آلمان می باشد.

پس از آماده سازی نانو سیال و تزریق به مخزن، نانوسیال توسط پمپ به دو بخش تقسیم می شود، بخشی از نانو سیال پس از عبور از پمپ به مخزن برگشت داده می شود و بخشی وارد مقطع مثلثی می شود. در کانال در پنج موضع دمای دیواره و نیز دمای بالک سیال اندازه گیری شده و توسط نمایشگرهای دما که بر روی دستگاه نصب شده است نشان داده می شود. سپس نانو سیال وارد مبدل حرارتی شده و با جریان آب سرد خنک می شود. نانو سیال همدما با محیط، پس از اندازه گیری دبی توسط دکانتور به مخزن برگشت داده می شود.

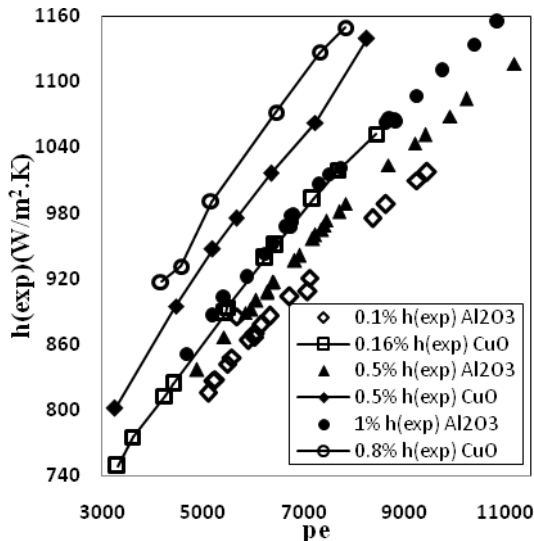
۴- نتایج تجربی

برای بررسی دقت سیستم آزمایشگاهی ابتدا آزمایشات توسط آب مقطر انجام شده است، سپس نتایج تجربی با نتایج تئوری رابطه ۳ مقایسه شده است. مطابق شکل (۲) حداکثر خطای موجود بین نتایج حاصل $\pm 3\%$ است که بیانگر دقت بالای سیستم و صحت داده های آزمایشی است.



شکل (۲): عدد ناسلت تجربی و تئوری آب مقطر در اعداد پکلت مختلف

به میزان $2/48\%$ رشد می کند. در صورتی که در نانو سیال آب/ CuO ، این میزان رشد به $3/365\%$ می رسد.



شکل (۳): مقایسه ضریب انتقال حرارت تجربی نانو سیالات آب/ Al_2O_3 و آب/ CuO بر حسب عدد پکلت در غلظت های مختلف

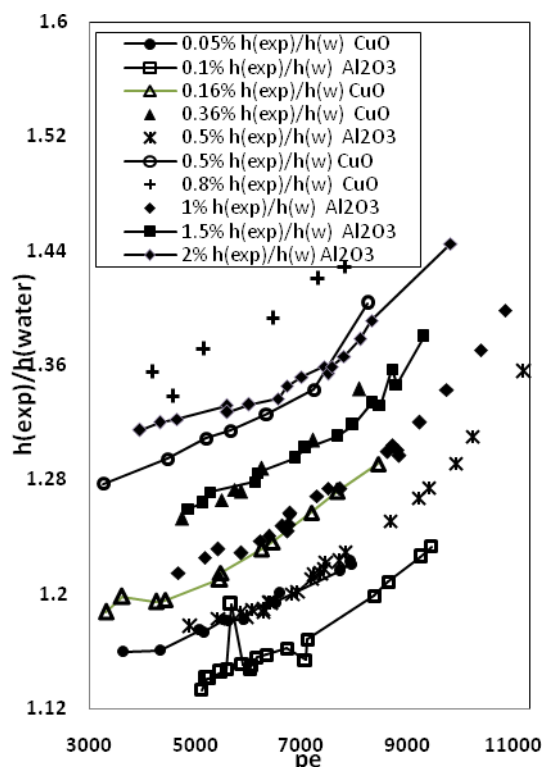
همچنین مطابق نمودار ۳ مشخص است که هر چه عدد پکلت بزرگتر و غلظت نانو سیال بیشتر می شود، میزان رشد ضریب انتقال حرارت جابجایی بیشتر می شود. با توجه به نتایج مشخص می گردد که با افزودن ذرات نانو به ساختار سیالات، علاوه بر افزایش هدایت حرارتی سیستم، حرکات براونی، جابجایی و پراکندگی ذرات نانو مخصوصاً در کنار دیوارها منجر به افزایش شدت انتقال انرژی شده و مقدار حرارت مبادله شده بین نانو سیال و دیواره لوله افزایش می یابد. همچنین در شدت جریان های بالا با تغییر توزیع دمایی سیستم به توزیعی شبیه جریان درهم منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی می گردد. ولی در در جریان های پایین نانو سیال احتمال به هم چسبیدن و تجمع ذرات وجود دارد بطوریکه افزایش انتقال حرارت کمتری در اعداد پکلت پایین مشاهده می شود. همچنین افزایش کسر حجمی ذرات نانو، برخوردها و کنش متقابل ذرات را که عامل اصلی انتقال حرارت در سیستم نانو سیال می باشد افزایش می دهد و نیز نفوذ و حرکات تصادفی این ذرات در کنار دیواره منجر به افزایش سریع انتقال حرارت از دیواره به توده

در این مطالعه نانو ذرات Al_2O_3 با درصد های 0.1% ، 0.5% ، 1% و 1.5% و نیز نانو ذرات CuO با در صد های 0.16% ، 0.5% و 0.8% حجمی 0.1% و 0.5% و 1% و 1.5% و 3.6% به آب مقطر به عنوان سیال پایه اضافه شده و در سیستم تحت شار حرارتی ثابت دیواره مورد استفاده قرار گرفته اند. آزمایش ها در محدوده رینولدز 700 تا 1900 انجام می شود.

شکل (۳) جهت مقایسه توانایی انتقال حرارت جابجایی نانو سیال های حاوی ذرات نانو اکسید فلزی Al_2O_3 و CuO در غلظت های مختلف (0.1% ، 0.5% و 1%) رسم شده است.

همانطور که در شکل (۳) نمایان است مقادیر ضریب انتقال حرارت تجربی نانو سیال آب/ CuO نسبت به نانو سیال آب/ Al_2O_3 در غلظت های مشابه بیشتر است.

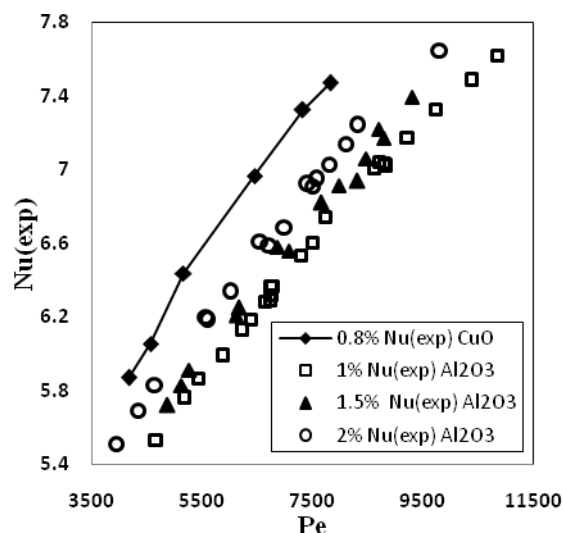
مطابق نمودار در عدد پکلت 8000 با تغییر غلظت از 0.1% به 0.5% مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی در نانو سیال آب/ Al_2O_3 ، رشد $3/78\%$ را نشان می دهد. در صورتی که در نانو سیال آب/ CuO ، رشد $7/44\%$ را دارد یا مثلاً در عدد پکلت 6500 با تغییر غلظت از 0.5% به 1% ضریب انتقال حرارت جابجایی در نانو سیال آب/ Al_2O_3 ،



شکل (۵): نسبت $\frac{h(exp)}{h(water)}$ برای نانو سیالات آب/ Al_2O_3 و آب/ CuO بر حسب عدد پکلت در غلظت های مختلف

نانوسیال می گردد. به عبارت دیگر افزایش غلظت ذرات، ضریب انتقال حرارت را افزایش می دهد.

شکل (۴) جهت مقایسه اعداد ناسلت نانو سیال های آب/ Al_2O_3 و آب/ CuO در غلظت های بالا بر حسب عدد پکلت رسم شده است.



شکل (۴): اعداد ناسلت تجربی نانو سیالات آب/ Al_2O_3 و آب/ CuO در غلظت های بالا

با وجود اینکه قطر متوسط نانو ذرات Al_2O_3 ، ۲۰ نانومتر بوده و نسبت به قطر نانو ذرات CuO که ۳۰ نانومتر است کوچکتر می باشد اما به علت ضریب هدایت حرارتی بالای نانو ذرات CuO ($69 W/m.K$) در مقایسه با ضریب هدایت حرارتی نانو ذرات Al_2O_3 ($46 W/m.K$) می توان نتیجه گرفت نانو سیال آب/ CuO عملکرد حرارتی بهتری را در کلیه اعداد پکلت نشان می دهد. این رویداد در شکل (۵) کاملاً مشهود است.

نتایج تجربی بیانگر افزایش ضرایب انتقال حرارت جابجایی آب بر اثر افزودن ذرات نانو به آب می باشد. همچنین نتایج نشان دهنده افزایش ضرایب انتقال حرارت تمامی نانو سیال های مورد بررسی با افزایش غلظت ذرات نانو و عدد پکلت می باشند. بطوریکه در اعداد پکلت بالا افزایش بیشتری مشاهده می گردد. عدد پکلت برای جریان نانو سیال با سرعت، چگالی و گرمای مخصوص نانو سیال متناسب بوده و با ضریب هدایت حرارتی آن نسبت عکس دارد. پس می توان گفت افزایش شدت جریان نانو سیال منجر به افزایش عدد پکلت آن می گردد و بنابراین عامل اصلی افزایش ضریب انتقال حرارت در اعداد پکلت بالا، افزایش شدت جریان سیال می باشد.

مطابق شکل (۴) مشخص است که در کلیه اعداد پکلت، اعداد ناسلت نانو سیال اکسید مس در غلظت ۰/۸٪ حتی بالاتر از نانو سیال اکسید آلومینیوم در غلظت های ۱٪ و ۱/۵٪ و ۲/۰٪ است.

به منظور مقایسه میزان افزایش انتقال حرارت سیالات با افزودن ذرات نانو اکسید فلزی Al_2O_3 و CuO نسبت ضرایب انتقال حرارت جابجایی نانو سیال های آب/ Al_2O_3 و آب/ CuO به آب مقطر در شکل (۵) بر حسب عدد پکلت در غلظت های مختلف ارائه شده است. نتایج حاصل نشان می دهد که استفاده از ذرات نانو ضرایب انتقال حرارت آب را در جریان آرام افزایش می دهد و افزایش بیشتری در اعداد پکلت بالا قابل مشاهده است.

طبق شکل (۵) معلوم است که نسبت $\frac{h(exp)}{h(water)}$ برای نانو سیال آب/ CuO حتی در غلظت ۰/۸٪ بالاتر از این نسبت برای نانو سیال آب/ Al_2O_3 در غلظت ۲٪ می باشد.

- 5- نتیجه و جمع بندی
- مطابق آزمایش های انجام گرفته بر روی نانو سیالات آب/ Al_2O_3 و آب/ CuO افزایش نانو ذرات به سیال پایه جبران انتقال حرارت نامناسب مقطع مثلثی را می کند و همچنین افزایش بیشتر ضریب انتقال حرارت در اعداد پکلت بالا قابل مشاهده است.
- بررسی های انجام شده نشان می دهد، ضریب انتقال حرارت نانوسیال با افزایش عدد پکلت و غلظت ذرات نانو افزایش می یابد، ولی نتایج تجربی افزایش بیشتری را برای نانو سیال آب/ CuO نشان می دهند. همچنین نتایج بیانگر افزایش بیشتر ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت در اعداد پکلت بالاتر نسبت به اعداد پکلت پایین است. این افزایش در نانو سیال آب/ CuO بیشتر از نانوسیال آب/ Al_2O_3 است. نتایج بررسی انجام شده نمایانگر بهبود انتقال حرارت مقاطع مثلثی با استفاده از نانوسیال است. بدین ترتیب می توان گسترش استفاده از کانال های مثلثی را با توجه به افت فشار پایین این مقاطع نسبت به سایر کانال ها در تحقیقات و کاربردهای صنعتی توجیه نمود.
- 6- مراجع
- [۱] S.U. S. Choi, "Enhancing thermal conductivity of fluid with nanoparticles", *Developments and Applications of Non-Newtonian flows*, D.A. Siginer and H.P. Wang eds., FED, V. 231/MD, Vol. 66, pp. 99, 1995.
- [۲] W.M. Kays, A.L. London, "Compact Heat Exchangers", third ed., McGraw-Hill, New York, 1984.
- [۳] S.S. Kutateladze, "Fundamentals of Heat Transfer", Academic Press, New York, 1963.
- [۴] F.W. Schmidt, M.E. Newell, "Heat transfer in fully developed laminar flow through rectangular and isosceles triangular ducts", *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 10, pp.1121-1123, 1967.
- [۵] H. Nakamura, S. Hiraoka, I. Yamada, "Laminar forced convection flow and heat transfer in arbitrary triangular ducts", *Heat Transfer—Japanese Research*, vol. 1, pp. 120-122, 1972.
- [۶] S.H. Clark, W.M. Kays, "Laminar flow forced convection in rectangular tubes", *Trans. ASME*, vol. 75, pp. 859-866, 1953.
- [۷] R. K. Shah, "Laminar flow friction and forced convection heat transfer in ducts of arbitrary geometry", *Heat Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 849-862, 1975.
- [۸] Masuda H, Ebata A, Teramae K, Hishinuma N. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of $\gamma-Al_2O_3$, SiO_2 and TiO_2 ultra-fine particles). *Netsu Bussei (Japan)*, vol. 4, pp. 227-33, 1993.
- [۹] Grimm A., "Powdered aluminum-containing heat transfer fluids", German Patent DE 4131516 A1 (1993).
- [۱۰] S.U.S., Choi, J.A., Eastman, U.S. Patent 6, 221, 275 (April 2001).
- [۱۱] Eastman JA, Choi SUS, Li S, Yu W, Thomson LJ., "Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol based nanofluids containing copper nanoparticles", *Applied Physics Letters*, vol. 78, pp. 718-20, 2001.
- [۱۲] Philip J, Laskar JM, Raj B., "Magnetic field induced extinction of light in a suspension of Fe_3O_4 nanoparticles", *Applied Physics Letters*, vol. 92, 2008.
- [۱۳] علی اصغر حمیدی، آزاده امراللهی، علیمراد رشیدی، عبدالرضا مقدسی، سیدمسعود حسینی، "بررسی مدل های ریاضی ارائه شده برای محاسبه ضریب رسانش گرمایی نانوسیالات"، مجله مهندسی شیمی ایران، سال هشتم، شماره چهارم.
- [۱۴] Pak BC, Cho IY., "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with sub-micron metallic oxide particles", *Experimental Heat Transfer*, vol. 11, pp. 151-70, 1998.
- [۱۵] Wen D, Ding Y., "Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, pp. 5181-5188, 2004.
- [۱۶] Zeinali Heris Z, Etemad SGh, Nasr Esfahany M., "Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer", *International Communication in Heat and Mass Transfer*, vol. 33(4), pp. 529-

- [۲۶] M. Jahanshahi, S.F. Hosseinizadeh, M. Alipanah, A. Dehghani, G.R. Vakilinejad, "Numerical simulation of free convection based on experimental measured conductivity in a square cavity using water/SiO₂ nanofluid", International communications in heat and mass transfer, vol 37, pp. 687- 694, 2010.
- [۲۷] S. Soltani, S.GH. Etemad, J. Thibault, "Pool boiling heat transfer of non-Newtonian nanofluid", International communications in heat and mass transfer, vol 37, pp. 29- 33, 2010.
- [۲۸] Lazarus Godson, B. Raja, D. Mohan Lal, S. Wongwises., "Enhancement of heat transfer using nanofluids—An overview", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 14, pp. 629– 641, 2010.
- [۲۹] S. Zeinali Heris, Esfahany MN, Etemad SGH., "Experimental investigation of convective heat transfer of Al₂O₃/water nanofluid in circular tube", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 28, No. 2, pp. 203– 210, 2007.
- [۳۰] Williams W, Buongiorno J, Hu L-W., "Experimental investigation of turbulent convective heat transfer and pressure loss of alumina/water and zirconia/ water nanoparticle colloids (nanofluids) in horizontal tubes", ASME Journal of Heat Transfer, vol. 130, pp. 1– 6, 2008.
- [۳۱] He, Y., Y. Men, Y. Zhao, H. Lu, Y. Ding, "Numerical investigation into the convective heat transfer of TiO₂ nanofluids flowing through a straight tube under the laminar flow conditions", Applied Thermal, vol. 29, No. 10, pp. 1965– 1972 , 2009.
- [۳۲] Yu, W., France, M. D., Smith, S. D., Singh, D., Timofeeva, V. E., Routbort, L. J., "Heat transfer to a silicon carbide/water nanofluid", Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 52, pp. 3606- 3612, 2009.
- [۳۳] Kim SJ, Bang IC, Buongiorno J, Hu LW, "Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 50, pp. 4105– 4116, 2007.
- [۳۴] Azodi, M. Abadi, M.M., Rashidi, F. Investigation on enhancement of forced convective heat transfer coefficient of MWCNT/water nanofluid in double-pipe 35, 2006.
- [۱۷] A. Akbarinia , R. Laur, "Investigating the diameter of solid particles effects on a laminar nanofluid flow in a curved tube using a two phase approach", International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 30 pp. 706– 714, 2009.
- [۱۸] سعید زینالی هریس، "مطالعه اثر نانو سیال در بهبود عملکرد سیستم های وسایل نقلیه"، مجله مهندسی شیمی ایران، سال هفتم، شماره سی و هفتم، ۱۳۸۷.
- [۱۹] سعید زینالی هریس و کمال محمدی فرد، "بررسی پتانسیل نانوسیال به عنوان سیال عامل خنک کننده در نیروگاه های هسته ای"، مجله مهندسی مکانیک / شماره ۶۷ / سال هجدهم، ۱۳۸۸.
- [۲۰] سعید زینالی هریس، امیر شیخی، "بررسی نانوسیالات جهت خنک سازی تراشه های رایانه ای"، مجله مهندسی مکانیک / شماره ۶۶ / سال هجدهم، ۱۳۸۸.
- [۲۱] Taofik H. Nassan, S. Zeinali Heris' and S.H. Noie, "A comparison of experimental heat transfer characteristics for Al₂O₃/water and CuO/water nanofluid in square cross-section duct", International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 37, issue 7, pp. 924-928, 2010.
- [۲۲] S.H. Noie, S. Zeinali Heris, M. Kahani, S.M. Nowee, "Heat transfer enhancement using Al₂O₃/water nanofluid in a two-phase closed thermosyphon", International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 30 , pp. 700– 705, 2009.
- [۲۳] Eiyad Abu-Nada, "Effects of variable viscosity and thermal conductivity of Al₂O₃-water nanofluid on heat transfer enhancement in natural convection", International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 30 679– 690, 2009.
- [۲۴] Jie Li, Clement Kleinstreuer, "Thermal performance of nanofluid flow in microchannels", International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 29, pp. 1221– 1232 , 2008.
- [۲۵] S.M. Fotukian, M.Nasr Esfahany, "Experimental study of turbulent convective heat transfer and pressure drop of dilute CuO/water nanofluid inside a circular tube", International communications in heat and mass transfer, vol 37, pp. 214- 219, 2010.

Seider, E. N. and Tater G. E., "Heat transfer and pressure drop of liquid in tubes", Ind. Eng. Chem., Vol. 28, pp. 1429- 1435, 1936. [۳۸]

Mosavian, H.T., Zeinali Heris, S. Etemad, S.Gh., Nasr Esfahany, M., "Heat transfer enhancement by application of nano-powder", Journal of Nanoparticle Research, Vol.12, pp.2611- 2619, 2010. [۳۹]

Yu, W. and Choi, S.U.S., "The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Maxwell model", J. Nanoparticle Research, Vol. 5, pp. 167- 171, 2003. [۴۰]

heat-exchanger, 6th International Congress on Chemical Engineering, 1388

Mokmeli, A., Saffar-Avval, M. Behzadmehr, A. Numerical Modeling of Nanofluid Heat Transfer, 15th Annual International Conference on Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Iran, May 2007. [۳۵]

Behzadmehr, A. Saffar-Avval, M. Galanis, N., "Prediction of Turbulent Forced of a nanofluid in a tube with uniform heat flux using a two phase flow approach", International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 28, pp. 211- 219, 2007. [۳۶]

Kalteh, M., Abbassi, A., Saffar-Avval, M., Harting, J., "Nanoparticle size effect on the convective heat transfer of a nanofluid flow inside a microchannel", XXVIII Congresso UIT sulla Trasmissione del Calore Brescia, pp. 21- 23, Giugno 2010. [۳۷]