

اولین همایش دانشجویی فناوری نانو- دانشگاه تربیت مدرس
30 بهمن الی 2 اسفند ماه 1385



بررسی انتقال حرارت نانوسیال در داخل لوله

سعید زینالی هریس، سید غلامرضا اعتماد

دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه فردوسی مشهد- صندوق پستی 53916

چکیده:

یکی از مسائلی که در بسیاری از صنایع با آن مواجه می شویم نیاز به انتقال حرارت با شدت بالا می باشد. مفهوم نانوسیال سوسپانسیون نانوذرات در سیال پایه می باشد که پتانسیل بسیار بالایی برای انتقال حرارت از خود نشان می دهند. در این مقاله انتقال حرارت سه سری نانوسیال به صورت تجربی بررسی و در مورد انتقال حرارت آنها بحث گردیده است.

بررسی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال در داخل یک لوله

سعید زینالی هریس¹، محسن نصر اصفهانی² و سید غلامرضا اعتماد²

1- گروه مهندسی شیمی - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد - مشهد

2- دانشکده مهندسی شیمی - دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان

سیالات حاوی ذرات بسیار ریز معلق با اندازه نانومتر که نانو سیال نامیده می شوند پتانسیل زیادی برای افزایش انتقال حرارت از خود نشان می دهند و به همین جهت توجه خاصی به این گروه از سیالات به عنوان محیطهای انتقال حرارت انجام می گیرد. در این مطالعه انتقال حرارت جابجایی اجباری دو سری نانوسیال در جریان آرام داخل لوله با دمای ثابت دیواره به صورت تجربی بررسی شده است و تغییرات عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت متوسط بر حسب عدد پکلت در غلظتهای مختلف ذرات نانو مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بررسی ها بیانگر افزایش فوق العاده ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت با اضافه کردن نانوذرات به داخل آب می باشد و این افزایش با کسر حجمی ذرات نانو و عدد پکلت بیشتر می شود.

کلید واژه - نانوسیال، نانوذرات، جریان آرام، انتقال حرارت جابجایی

1- مقدمه

مفهوم نانوسیال به شکل جدیدی از محیطهای انتقال حرارت اشاره می کند که از طریق معلق ساختن ذرات بسیار ریز در مقیاس نانو در سیال پایه تهیه می شوند و یکی از تلاشهای جدید برای علوم حرارتی می باشد که بوسیله فناوری نانو ایجاد شده است. در نتیجه سرمایه گذاری عظیم کشورهای پیشرفته روی فناوری نانو، تحقیقات روی خواص حرارتی نانوسیال ها مورد توجه خاصی قرار گرفته است. چوی [1] در سال (1995) اولین فردی بود که طی مجموعه ای از مطالعات در آزمایشگاه ملی آرگون در ایالات متحده سیالات حاوی ذرات نانومتری را نانوسیال نامید و با اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی این سیالات به خواص حرارتی برجسته آنها اشاره کرد. مطالعات بعدی توسط ایستمن [2] نشان داد که افزایش تقریبی 60 درصدی در ضریب هدایت حرارتی آب که حاوی 5٪ حجمی ذرات نانو CuO باشد قابل مشاهده است و استفاده از ذرات نانو یک روش مؤثر برای بهبود خواص حرارتی سیالات می باشد. لی و چوی [3] بررسی هایی روی چهار نوع نانوسیال آب/ Al_2O_3 ، آب/ CuO ، اتیلن گلیکول/ Al_2O_3 و اتیلن گلیکول/ CuO انجام دادند. در این بررسی ها حداقل افزایش 20٪ در ضریب هدایت حرارتی با افزودن 4٪ از ذرات نانو مشاهده گردید. ژوان و لی [4] روش هایی برای تهیه نانوسیال با خواص مناسب پیشنهاد کردند که قابل استفاده برای کاربردهای عملی باشد. در این بررسی ها با مد نظر قرار دادن نقش نفوذ براونی، ته نشینی و پراکندگی، مدلی برای انتقال حرارت در نانوسیال ارائه شده است. زینگ و همکاران [5] استفاده از نانوسیال در سیستمهای سرمایش روغن موتور اتومبیلها را به عنوان ایده ای نومطرخ کردند. ژوان و روتزل [6] در مطالعات تئوریک خود با استفاده از مدل پراکندگی روابطی برای بررسی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال در داخل لوله ارائه داده اند. در این معادلات نقش ذرات نانو در انتقال

حرارت به صورت ترمهای اضافی در معادله کلی انتقال حرارت ظاهر می شود. لی و ژوان [7] طی آزمایش هایی برای اندازه گیری انتقال حرارت نانوسیال آب/ Cu در داخل لوله ای با شار حرارتی ثابت دیواره نشان دادند که عدد ناسلت نانوسیال حاوی 1/0٪ حجمی ذرات مس بیش از 12٪ افزایش می یابد. همچنین نتایج تجربی بیانگر آن است که عدد ناسلت با افزایش غلظت ذرات نانو افزایش می یابد بطوریکه با تغییر غلظت ذرات از 0/5٪ به 1/2٪ حجمی نسبت عدد ناسلت نانوسیال به آب از 1/05 به 1/12 افزایش می یابد. چوی و ژانگ [8] به صورت تجربی نانوسیال روغن موتور/ نانولوله های کربن را بررسی کرده و با اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی این نانوسیال مشخص گردید که نانولوله های کربن نسبت به دیگر مواد نانو افزایش بیشتری را در ضریب هدایت حرارتی نشان می دهد. علاوه بر این افزایش ضریب هدایت حرارتی با غلظت ذرات نانو به صورت خطی نیست در حالی که اکثر مدلهای موجود افزایش خطی ضریب هدایت حرارتی با غلظت ذرات نانو را پیش بینی می کنند [10-8]. خانفر و وفایی [11] به صورت عددی انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال را در داخل یک سیستم دو بعدی بررسی کردند. نتایج حاصل بیانگر افزایش عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی ذرات نانو در اعداد گراشف مختلف می باشد. داس و پوترا [12] در ضمن مطالعات تجربی خود وابستگی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال را با دما نشان دادند. بطوریکه در دماهای بالاتر افزایش ضریب هدایت حرارتی بیشتری مشاهده می شود و این مسئله استفاده از نانوسیال را در دماهای بالاتر جذاب تر می سازد. ژوان و لی [13] به صورت تجربی انتقال حرارت جابجایی آب/ ذرات مس 100 nm را بررسی کردند. نتایج بررسی نشان دهنده افزایش فوق العاده عدد ناسلت نانوسیال نسبت به آب می باشد. بطوریکه مدلهای تئوریک مرسوم برای پیش بینی عدد ناسلت آب جوابگو نیستند و مدل پیشنهادی براساس مدل پراکندگی که توسط همین محققین [7 و 6] پیشنهاد شده است برای تطبیق با نتایج تجربی استفاده می شود.

در حال کندناس در جریان است که دمای ثابت دیواره را تشکیل می دهد. اطراف سیستم عایق کاری شده است. 10 عدد ترموکوپل (K -type) بر روی بدنه لوله داخلی با فواصل 10 cm به منظور اطمینان از ثابت بودن دمای دیواره و اندازه گیری دمای بدنه داخلی لوله نصب شده اند. 2 عدد ترموکوپل (K -type) نیز در بخش ورودی و خروجی جریان سیال نصب شده اند تا دمای بالک را اندازه گیری نمایند. جریان خروجی از بخش آزمایش در یک مبدل حرارتی در جریان آب سرد، خنک شده و سپس وارد ناحیه اندازه گیری دبی می شود. به منظور تعیین دبی جریان سیال از یک محفظه شیشه ای به حجم 300 cm^3 که در قسمت پایین آن جهت تخلیه شیری قرار دارد استفاده می گردد. سیستم اندازه گیری دبی قبل از مخزن ذخیره قرار دارد.

3- تهیه نانوسیال

تهیه نانو سیال اولین قدم کلیدی در استفاده از ذرات نانو برای استفاده در فرآیند انتقال حرارت است. تهیه نانوسیال به سادگی تهیه مخلوطهای متداول جامد-مایع نمی باشد و بعضی شرایط خاص نظیر سوسپانسیون پایدار، سوسپانسیون با دوام، چسبندگی پایین ذرات و عدم تغییر شیمیایی سیال مورد نیاز می باشد. خواص و رفتار نانوسیال ها بستگی به نوع مایع، نوع، اندازه و شکل ذرات جامد معلق و کیفیت پراکنده سازی آنها در داخل مایع دارد. در این تحقیق ذرات CuO ساخت شرکت

$\text{Nanostructured Nanoamorphous Co. U.S.A.}$ برای تولید سوسپانسیون نانوسیال به آب مقطر به عنوان سیال پایه اضافه شده اند. ذرات CuO مورد استفاده دارای اندازه متوسط $50\text{--}60\text{ nm}$ و ذرات Cu دارای ابعاد متوسط 25 nm می باشند.

برای تهیه نانو سیال باید از پراکندگی صحیح ذرات نانو در سیال و مکانیزم صحیح افزودن ذرات به سیال برای رسیدن به سوسپانسیون پایدار بدون ته نشینی آگاه بود. زمانی که پودرهای مورد نظر به آب اضافه می شوند تشکیل یک حالت غیر همگن ناپایدار داده و سوسپانسیونی با تجمع ذرات نانو مشاهده می شود و ته نشینی بعد از چند دقیقه شروع می شود. به منظور رسیدن به یک حالت پایدار دو روش استفاده می شود: افزودن مقدار کمی عوامل خارجی از جمله عوامل فعال سطحی، کنترل کننده های pH یا استفاده از همزن اولتراسونیک. در این آزمایش از هیچ ماده پایدارساز یا پراکنده سازی استفاده نشده است، زیرا ممکن است افزودن این مواد خواص سیال را تغییر دهد و فقط از سیستم همزن اولتراسونیک به منظور پراکنده سازی مناسب ذرات در داخل مایع استفاده شده است. تصویر سیستم اولتراسونیک در شکل (2) نشان داده شده است. همزن اولتراسونیک دو تأثیر مهم دارد: ذرات به هم چسبیده را می شکند و نیز ذرات را به طور یکنواخت پراکنده می سازد.

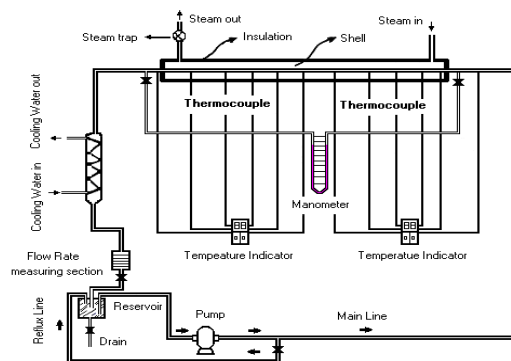
در این مطالعه دو سری نانوسیال شامل سوسپانسیون های CuO / آب و Cu / آب با غلظتهای $0/2\%$ ، $1/0\%$ و $2/0\%$ حجمی ذرات در آب تهیه شده و به منظور بررسی تأثیر نوع و غلظت ذرات در افزایش انتقال حرارت استفاده شده اند. برای تهیه نانوسیال بعد از تهیه حجم مناسب پودر جامد، ذرات نانو با آب مقطر در فلاکس مخلوط می شوند سپس به مدت 8 الی 16 ساعت در همزن اولتراسونیک (مدل Parsonic 3600S) قرار داده می شوند. بعد از این زمان

از مجموع مطالعاتی که در مورد فرآیند جوشش نانوسیال انجام گرفته است [14-16] نتایج بررسی های کی داس و پوترا [15 و 14] نشان دهنده تأثیر فوق العاده ذرات نانو در فرآیند جوشش می باشد بطوریکه با افزایش ذرات نانو فرآیند جوشش به تعویق افتاده و دمای سطح جوشش افزایش می یابد. تسای و چان [17] نانوسیال حاوی ذرات نانو طلا را در لوله حرارتی مورد استفاده قرار دادند. نتایج عملی نشان دهنده کاهش مقاومت حرارتی لوله حرارتی در اثر افزودن ذرات نانو طلا به آب می باشد. همچنین اندازه ذرات نیز تأثیر زیادی در میزان کاهش مقاومت حرارتی نشان می دهد. ون و دینگ [18] به صورت تجربی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آب/ Al_2O_3 - γ را بررسی کرده اند که نتایج حاصل بیانگر افزایش انتقال حرارت جابجایی جریان آرام با افزایش عدد رینولدز و غلظت ذرات نانو می باشد. همچنین عدد ناسلت در نواحی ورودی افزایش بیشتری را نشان می دهد.

در این مقاله انتقال حرارت جابجایی نانوسیال در جریان آرام تحت شرایط مرزی دمای ثابت دیواره بررسی گردیده است. غلظتهای مختلف نانوسیال های آب/ Al_2O_3 / آب و Cu / آب تهیه شده و تأثیر افزایش غلظت و جریان روی انتقال حرارت جابجایی بررسی شده است و با پیش بینی های تئوریک در مورد انتقال حرارت سیالات خالص مقایسه گردیده است و در مورد نتایج حاصل و عوامل مؤثر بحث شده است.

2- دستگاه آزمایشی

در طی این آزمایش برای بررسی انتقال حرارت جابجایی تحت شرایط مرزی دمای ثابت دیواره یک سیستم آزمایشی مطابق شکل (1) ساخته شده است. سیستم آزمایشی شامل یک مدار برای جریان نانوسیال می باشد که دارای بخش های گرمایش با جریان بخار، سرمایش با آب سرد، سیستمهای اندازه گیری دما، فشار و تنظیم جریان سیال است. یک مخزن شیشه ای با حجم 2 لیتر مجهز به یک شیر تخلیه به عنوان مخزن ذخیره سیال بکار می رود. به منظور تنظیم دبی جریان عبوری از یک خط برگشتی جریان به مخزن استفاده می گردد و با تنظیم شیر موجود بر روی خط برگشتی، دبی مورد نظر به بخش آزمایش ارسال می گردد.



شکل 1: طرح شماتیک سیستم آزمایشی

بخش آزمایش شامل یک لوله تودرتوست که لوله داخلی از جنس مس با قطر داخلی 6 mm و ضخامت $0/5\text{ mm}$ و طول 1 m است و پوسته از جنس فولاد ضدزنگ با قطر 32 mm و طول 1 m می باشد. در داخل لوله نانوسیال در جریان بوده و در قسمت پوسته بخار

در دمای دیواره، Re_{nf} و Pr_{nf} به ترتیب عدد رینولدز و پرانتل برای نانوسیال می باشد که به شکل زیر تعریف می گردند:

$$Re_{nf} = \frac{\rho_{nf} \cdot \bar{U} \cdot D}{\mu_{nf}} \quad (4)$$

$$Pr_{nf} = \frac{Cp_{nf} \cdot \mu_{nf}}{k_{nf}} \quad (5)$$

خواص فیزیکی مورد استفاده برای نانوسیال شامل دانسیته، ویسکوزیته، گرمای مخصوص و ضریب هدایت حرارتی از روابط زیر با توجه خواص آب و ذرات نانو دردمای متوسط بالک تعیین می شوند.

$$\rho_{nf} = v \cdot \rho_s + (1-v) \cdot \rho_w \quad (6)$$

که v : کسر حجمی ذرات نانو، ρ_s : دانسیته ذرات نانو و ρ_w : دانسیته آب می باشد.

$$\mu_{nf} = \mu_w (1 + 2.5v) \quad (7)$$

در این رابطه μ_w : دانسیته آب بوده و رابطه بالا

(*Einsten equation*) در غلظت کمتر از 2٪ حجمی برای ذرات کروی قابل استفاده است [20-21].

$$Cp_{nf} = \frac{v \cdot (\rho_s \cdot Cp_s) + (1-v) \cdot (\rho_w \cdot Cp_w)}{\rho_{nf}} \quad (8)$$

در رابطه (8) Cp_w : گرمای مخصوص آب و Cp_s : گرمای مخصوص ذرات نانو است.

در بررسی های انجام گرفته معادله جوی- یو [22] تطابق خوبی را با نتایج تجربی برای ضریب هدایت حرارتی نانوسیال نشان داده است. این معادله علاوه بر ضریب هدایت حرارتی سیال و ذرات نانو و کسر حجمی ذرات نانو، تأثیر سطح مشترک سیال و ذرات جامد نانو را نیز برآورد ضریب هدایت حرارتی مد نظر قرار داده است:

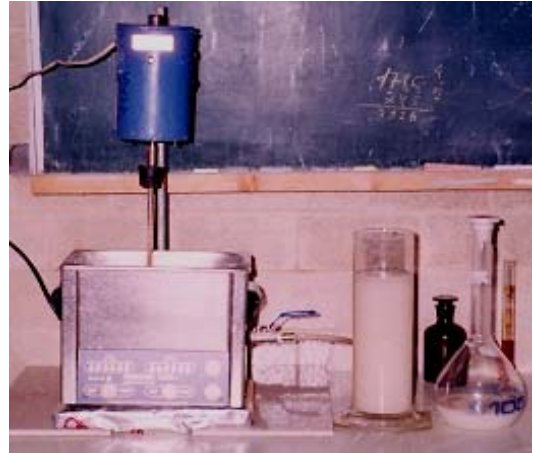
$$k_{nf} = \left[\frac{k_s + 2k_w + 2(k_s - k_w)(1 + \beta)^3 v}{k_s + 2k_w - (k_s - k_w)(1 + \beta)^3 v} \right] k_w \quad (8)$$

در این رابطه k_w : ضریب هدایت حرارتی آب، k_s : ضریب هدایت حرارتی ذرات نانو و 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 [22]. هدایت حرارتی ذرات نانو می باشد. در طی آزمایش با اندازه گیری دمای ورودی و خروجی نانوسیال، دمای بدنه لوله، دبی جرمی سیال عبوری و محاسبات خواص رئولوژیکی و فیزیکی جریان نانو سیال می توان عدد ناسلت (Nu_{nf}) و ضریب انتقال حرارت جابجایی (h_{nf}) را برای نانوسیال در غلظت های مختلف تعیین نمود.

5- آزمایش اولیه با آب مقطر

قبل از شروع آزمایش های عملی با نانوسیال به منظور تعیین توانایی

هیچ ته نشینی برای سوسپانسیون های 0/2-2/0٪ حجمی هیچ کدام از نانوسیال ها در طول 24 ساعت مشاهده نگردید. قابل ذکر است برای نانوسیال آب/Cu هیچ ته نشینی حتی در مدت یک ماه بعد از اختلاط هم قابل مشاهده نبود.



شکل 2: تصویر سیستم همزن اولتراسونیک

4- تهیه نانوسیال

به منظور تعیین ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت متوسط نانوسیال در داخل لوله از روابط زیر استفاده می کنیم:

$$\overline{h_{nf}}(\text{exp}) = \frac{Cp_{nf} \cdot \rho_{nf} \cdot \bar{U} \cdot A \cdot (Tb_2 - Tb_1)}{\pi \cdot D \cdot L \cdot (Tw - Tb)} \quad (1)$$

$$\overline{Nu_{nf}}(\text{exp}) = \frac{\overline{h_{nf}}(\text{exp}) \cdot D}{k_{nf}} \quad (2)$$

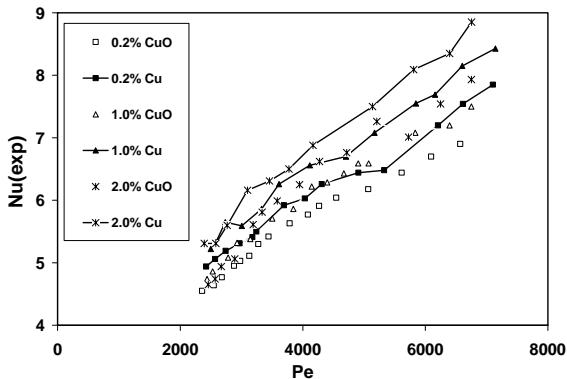
که در روابط Tb_1 : دمای بالک ورودی، Tb_2 : دمای بالک خروجی، Tb : دمای بالک متوسط در طول مسیر، Tw : دمای دیواره لوله، D : قطر لوله، L : طول لوله، A : سطح مقطع لوله، \bar{U} : سرعت متوسط جریان، ρ_{nf} : دانسیته نانوسیال، Cp_{nf} : گرمای مخصوص نانوسیال، $\overline{h_{nf}}(\text{exp})$: ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط نانوسیال، k_{nf} : ضریب هدایت حرارتی نانوسیال و $\overline{Nu_{nf}}(\text{exp})$: عدد ناسلت متوسط تجربی نانوسیال می باشد.

نتایج تجربی حاصل از معادلات بالا با پیش بینی روابط موجود برای جریان سیال تک فازی داخل لوله با دمای ثابت دیواره (معادله *Seider - Tate*) مقایسه می گردد [19]. در این رابطه افزایش انتقال حرارت جابجایی نانوسیال فقط ناشی از افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال می باشد.

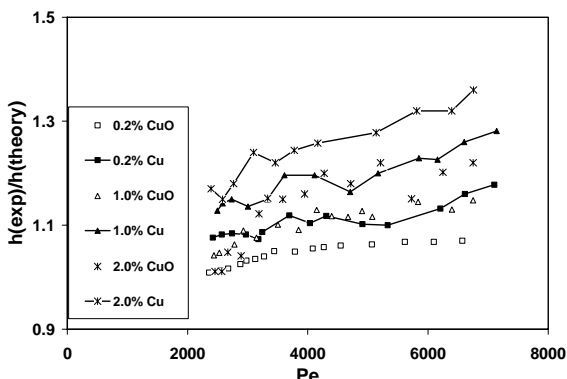
$$\overline{Nu_{nf}}(\text{theory}) = 1.86 (Re_{nf} Pr_{nf} \frac{D}{L})^{1/3} \cdot (\frac{\mu_{nf}}{\mu_{Wnf}})^{0.14} \quad (3)$$

در این رابطه μ_{nf} : ویسکوزیته سیال، μ_{Wnf} : ویسکوزیته نانوسیال

باشد. همچنین شکل نشان دهنده افزایش بیشتر این نسبت در اعداد پکلت بالا می باشد. به عنوان مثال در عدد پکلت 6500 نسبت ضرایب انتقال حرارت تجربی به مقادیر تئوریک در کسر حجمی 2/0٪ برای نانوسیال های آب/Cu و آب/CuO به ترتیب برابر 1/33 و 1/19 می باشد. با توجه به شکل (5) مشخص می گردد که مدل همگن موفقیت کمتری در پیش بینی ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آب/Cu دارد ولی برای سوسپانسیون حاوی ذرات CuO در اعداد پکلت کمتر از 4500 مقادیری که پیش بینی می کند حداکثر 10٪ خطا خواهد داشت.



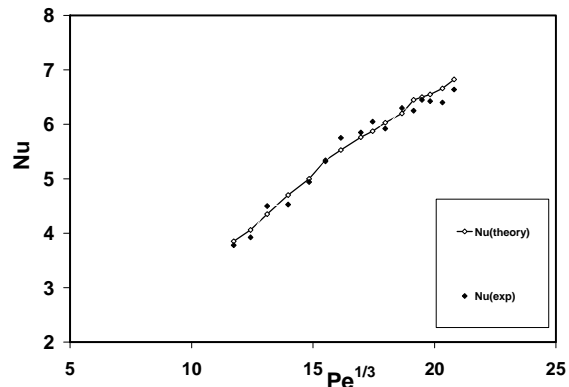
شکل 4: تغییرات عدد ناسلت برای نانوسیال های آب/CuO و آب/Cu بر حسب عدد پکلت



شکل 5: نسبت ضریب انتقال حرارت جابجایی تجربی نانوسیال های آب/CuO و آب/Cu به مقادیر تئوریک حاصل از معادله Seider - Tate بر حسب عدد پکلت

به منظور مقایسه میزان افزایش انتقال حرارت سیالات با افزودن ذرات نانو اکسید فلزی CuO و ذرات فلزی Cu نسبت ضرایب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال های آب/CuO و آب/Cu به آب خالص در شکل (6) بر حسب پکلت در غلظتهای مختلف ارائه شده است. نتایج حاصل نشان می دهند 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. به عنوان مثال در عدد پکلت 2500 برای نانوسیال آب/CuO تغییر غلظت از 0/5٪ به 2/0٪ حجمی منجر به افزایش نسبت ضریب انتقال حرارت از 1/08 به 1/14 می شود در حالی که برای نانوسیال آب/Cu تغییرات نسبت ضرایب انتقال حرارت جابجایی بین 1/15 تا 1/32 خواهد بود. بهبود انتقال

سیستم آزمایشی در تعیین دقیق و صحیح ضریب انتقال حرارت جابجایی، آزمایش هایی با آب مقطر به عنوان سیال عامل انجام گرفته است. نتایج تجربی بدست آمده با مقادیر حاصل از رابطه (Seider - Tate) معادله (3) برای جریان آرام با شرایط مرزی دمای ثابت دیواره مقایسه گردیده است. شکل (3) نشان دهنده مقادیر عدد ناسلت بر حسب $Pe^{1/3}$ برای جریان آرام آب در داخل لوله با دمای ثابت دیواره می باشد. همانطوری که از شکل (3) مشخص است تطابق خوبی بین مقادیر تجربی و نتایج تئوریک حاصل از معادله (Seider - Tate) وجود دارد و حداکثر خطای موجود بین نتایج حاصل 6٪ ± است که بیانگر صحت ودقت بالای داده های آزمایشی می باشد.



شکل 3: تغییرات عدد ناسلت بر حسب $Pe^{1/3}$ برای آب مقطر

6- نتایج آزمایش با نانوسیال

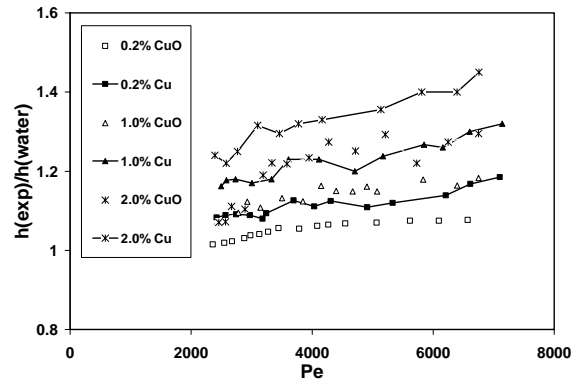
در این مطالعه نانوسیال با غلظتهای 0/2، 1/0، 2/0٪ حجمی ذرات CuO و Cu به منظور بررسی تأثیر غلظت ذرات نانو روی انتقال حرارت جابجایی مورد استفاده قرار گرفته است. محدوده بررسی عدد رینولدز 700-2050 می باشد. در این بخش نتایج حاصل از اندازه گیری ها نشان داده می شود

نتایج حاصل از اندازه گیری های تجربی عدد ناسلت نانوسیال های حاوی ذرات فلزی Cu و ذرات اکسید فلزی CuO در غلظتهای مختلف به منظور مقایسه در شکل (4) نشان داده شده اند. شکل نشان می دهد که ذرات فلزی Cu افزایش بیشتری را در عدد ناسلت نسبت به ذرات اکسید فلزی CuO در عدد ناسلت نشان می دهند. دلیل ممکن برای این موضوع اندازه کوچک ذرات Cu (25 nm) و نیز ضریب هدایت حرارتی بالای ذرات فلزی Cu (397/5 W / m.K) در مقایسه با ذرات اکسید فلزی CuO با ضریب هدایت حرارتی (69 W / m.K) و ابعاد متوسط (50-60 nm) می باشد.

نسبت ضریب انتقال حرارت تجربی به نتایج حاصل از معادله Seider - Tate برای نانوسیال های حاوی ذرات نانو اکسید فلزی CuO و ذرات فلزی Cu در شکل (5) نشان داده شده است. با توجه به شکل این نسبت برای تمامی نانوسیال ها با افزایش عدد پکلت و غلظت ذرات نانو افزایش می یابد ولی نتایج تجربی افزایش بیشتری را برای نانوسیال آب/Cu نشان می دهند. بطوریکه برای کسر حجمی 2/0٪ ذرات نانو در عدد پکلت 2500 این نسبت برای نانوسیال آب/Cu برابر 1/15 و برای آب/CuO برابر 1/01 است می

- nanoparticles", **J. Heat Transfer**, Vol. 121, pp. 280-289, 1999.
- [4] Xuan, Y. and Li, Q., "Heat transfer enhancement of nanofluids", **Int. J. Heat Fluid Flow**, Vol. 21, pp. 58-64, 2000.
- [5] Tzeng, S. C., Lin, C. W. and Huang, K.D., "Heat transfer enhancement of nanofluids in rotary blade coupling of four wheel drive vehicles", **Acta Mechanica**, Vol. 179, pp.11-23, 2005.
- [6] Xuan, Y. and Roetzel, W., "Conception for heat transfer correlation of nanofluid", **Int. J. Heat Mass Transfer**, Vol. 43, pp. 3701-3707, 2000.
- [7] Li, Q. and Xuan, Y., "Experimental investigation of transport properties of nanofluids", **Heat Transfer Science Technology**, Wang Bu-Xuan eds., Higher Education Press, pp. 757-762, 2000.
- [8] Choi, S. U. S., Zhang, Z. G., Yu, W., Lockwood, F.E. and E.A. Grulke, "Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions", **Applied Physics Letter**, Vol. 79, No. 14, pp. 2252-2254, 2001.
- [9] Maxwell, J. C., "A treatise on electricity and magnetism", Second ed., Oxford University Press, Cambridge, UK, 1904.
- [10] [Hamilton, R.L. and Crosser, O.K., "Thermal conductivity of heterogeneous two component systems", **I & Ec Fundamentals**, Vol. 1, pp. 182-186, 1962.
- [11] [21] Khanafer, K., Vafai, K. and Lightstone, M. "Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids", **Int. J. Heat Mass Transfer**, Vol. 46, pp. 3639-3653, 2003.
- [12] Das, S.K., Putra, N., Theisen P. and Roetzel, W., "Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluid", **J. Heat Transfer**, Vol. 125, pp. 567-574, 2003.
- [13] Xuan, Y. and Li, Q., "Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids", **J. Heat Transfer**, Vol. 125, pp. 151-155, 2003.
- [14] Das, S.K., Putra, N. and Roetzel, W. "Pool boiling of nanofluids on horizontal narrow tubes", **Int. J. Multi Phase Flow**, Vol. 29, pp. 1237-1247, 2003.
- [15] [28] Das, S.K., Putra, N. and Roetzel W., "Pool boiling characteristics of nano-fluids", **Int. J. Heat Mass Transfer**, Vol. 46, pp. 851-862, 2003.
- [16] Vassallo, P., Kumar, R. and Amico, S.D., "Pool boiling heat transfer experiments in Silica-water nanofluids", **Int. J. Heat Mass Transfer**, Vol. 47, pp. 407-411, 2004.
- [17] Tsai, C.Y., Chien, H.T. Ding, P.P., Chan, B. Luh, T.Y. and Chen, P.H., "Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance", **Materials Letters**, Vol. 58, No. 9, pp. 1461-1465, 2004.
- [18] Wen, D. and Ding, Y., "Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based alumina nanofluids", **J. Nanoparticle Research**, Vol. 7, pp. 265-274, 2005.
- [19] 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.
- [20] Zeinali Heris, S., Nasr Esfahany, M. and Etemad, S. Gh. "CuO / water Nanofluid laminar convective heat transfer investigation through circular tube, **J. Enhanced Heat Transfer**, accepted, 2006.
- [21] Ding, Y. and Wen, D., "Particle migration in a flow of nanoparticle suspensions", **Powder Technology**, Vol. 149, pp. 84-92, 2005.
- [22] Yu, W., and Choi, S. U. S., "The role of international layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Hamilton-Crosser model", **Journal on Nanoparticle Research**, Vol. 6, pp. 355-361, 2004.

حرارت جابجایی در اعداد پکلت بالا بهتر است به طور مثال در عدد پکلت 6500 برای غلظت 2/5٪ این نسبت برای نانوسیال آب / CuO برابر 1/41 و برای نانوسیال آب / Cu برابر 1/56 می باشد. با توجه به شکل (6) مشخص می شود که استفاده از نانوسیال آب / Cu در محدوده اعداد پکلت 2500 تا 6500 بیشترین افزایش را در ضرایب انتقال حرارت جابجایی آب مقطر ایجاد می کند.



شکل 6: نسبت ضریب انتقال حرارت جابجایی تجربی نانوسیال های آب / CuO و آب / Cu به ضریب انتقال حرارت جابجایی آب بر حسب عدد پکلت

7- نتیجه گیری

نتایج تجربی حاصل بیانگر افزایش انتقال حرارت جابجایی نانوسیال با افزایش عدد پکلت و غلظت ذرات نانو در محدوده مورد مطالعه می باشد. مقدار افزایش در مقایسه با پیش بینی روابط موجود برای انتقال حرارت تک فازی که در آن خواص نانوسیال بکاررفته است بسیار بیشتر می باشد. این افزایش نشان دهنده این است که افزایش انتقال حرارت جابجایی نانوسیال فقط ناشی از افزایش ضریب هدایت حرارتی نبوده بلکه عوامل دیگری در این مورد تأثیر گذار هستند که باید مدنظر قرار گیرند. به نظر می رسد حرکات و جابجایی و برخورد ذرات نانو مخصوصاً در اعداد پکلت بالا ساختار جریان را تغییر داده و منجر به تغییر پروفیل دمایی می شود. نانوسیال حاوی ذرات فلزی Cu افزایش بیشتری را در ضریب انتقال حرارت جابجایی در مقایسه با نانوسیال حاوی ذرات اکسید فلزی CuO نشان می دهد. دلیل ممکن برای این موضوع اندازه کوچک ذرات Cu (25 nm) و نیز ضریب هدایت حرارتی بالای ذرات فلزی Cu (397/5 W / m.K) در مقایسه با ذرات اکسید فلزی CuO با ضریب هدایت حرارتی (69 W / m.K) و ابعاد متوسط (50-60 nm) می باشد.

مراجع

- [1] Choi, S. U. S., "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.
- [2] Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., Thompson, L. J. and Lee, S., "Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids", **Nanophase and Nanocomposite Materials II**, MRS, Pittsburg, 1997.
- [3] Lee, S., Choi, S. U. S., Li, S. and Eastman, J. A., "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide

Investigation of Convective Heat Transfer of Nanofluid

Saeed Zeinali Heris¹, M. Nasr Esfahany² and S. Gh. Etemad²

1-Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad

2-Department of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan

The fluids with nanometer-sized solid particles suspended in them are called nanofluids. These fluids can be employed to increase the heat transfer rate in various applications. In this study the convective heat transfer for, CuO/water and Cu/water nanofluids through a circular tube was investigated experimentally. The flow was laminar and constant wall temperature was used as thermal boundary condition. The Nusselt number of nanofluids for different nanoparticles concentrations as well as various Peclet numbers were obtained. Results emphasize the enhancement of heat transfer, which is due to the nanoparticles present in the fluid.

Keywords: nanofluid, nanopowder, convective heat transfer, laminar flow

PACSNo: