



دهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران

دانشگاه سیستان و بلوچستان
۲۶ - ۲۴ آبان ماه ۱۳۸۴

بررسی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال در جریان آرام داخل لوله با دمای ثابت دیواره

سعید زینالی هریس*، سید غلامرضا اعتماد و محسن
نصر اصفهانی

دانشکده مهندسی شیمی - دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان ۸۴۱۵۴

چکیده

یکی از مسائلی که در بسیاری از صنایع و کارهای تحقیقاتی با آن مواجه می شویم نیاز به انتقال حرارت در زمان کوتاه و با شدت حرارتی بالا می باشد. مفهوم نانوسیال، سوسپانسیونهای حاوی ذرات نانو، مواد فلزی و غیرفلزی را شامل می شود که به عنوان محیط های انتقال حرارت استفاده می شوند. چنین سیالاتی پتانسیل زیادی برای افزایش نرخ انتقال حرارت از خود نشان می دهند. در این مقاله انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال در جریان آرام داخل لوله با دمای ثابت دیواره به صورت تجربی بررسی شده است و تغییرات عدد Nu و ضریب انتقال حرارت متوسط بر حسب عدد Pe در غلظتهای مختلف ذرات نانومورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی ها درصد افزایش ضریب انتقال حرارت نانوسیال نسبت به آب به صورت تجربی تعیین شده است و در مورد دلایل مغایرت نتایج تجربی با مقادیر تئوری بحث گردیده است.

کلمات کلیدی

نانوسیال؛ جریان آرام؛ انتقال حرارت جابجایی؛ سوسپانسیون

*P7930167@iut.ac.ir

مقدمه

سرمایش و گرمایش سیالات برای بسیاری از فرآیندهای صنعتی شامل منابع حرارتی، فرآیندهای تولیدی، حمل و نقل و الکترونیک نقش مهمی دارد و منابع بسیار زیادی در مورد روش های افزایش نرخ انتقال حرارت در این فرآیندها گزارش داده اند. بیشتر این روشها بر مبنای تغییرات در ساختار تجهیزات، نظیر افزایش سطوح حرارتی (پره ها)، لرزش سطوح حرارتی، تزریق یا مکش سیال و اعمال جریان الکتریکی یا مغناطیسی متمرکز می باشند [۱-۳]. این تکنیکها به سختی می توانند از عهده تقاضای روز افزون انتقال حرارت و فشرده سازی در تجهیزاتی شامل تراشه های الکترونیکی، سیستمهای لیزری و فرآیندهای با انرژی بالا بر آیند. در این میان موضوعی که کمتر به آن توجه شده است، تأثیر ضریب انتقال حرارت سیالات در توسعه تجهیزات انتقال حرارت با بازدهی بالاست. محیطهای انتقال حرارت معمولاً از سیالاتی نظیر آب، اتیلن گلیکول یا روغن تشکیل شده اند. این سیالات ضریب انتقال حرارت بسیار پایینی در مقایسه با فلزات و حتی اکسیدهای فلزی دارند. بنابراین انتظار می رود سیالاتی که شامل ذرات بسیار ریز این ترکیبات باشند در مقایسه با سیالات خالص خواص حرارتی بهتری از خود نشان دهند. به خاطر مشکلات تکنولوژیکی مطالعات انجام گرفته در این زمینه بیشتر بر روی سوسپانسیونهایی متمرکز بوده که شامل ذرات جامد معلق در حد میلی متر یا حداکثر میکرومتر هستند. ذرات در این مقیاس مشکلات جدی در تجهیزات انتقال حرارت ایجاد می کنند. به طوری که این ذرات به سرعت در سیستم ته نشین می شوند و در صورتیکه کانال از قطر کمتری برخوردار باشد مشکل جدی تر خواهد بود. بطور مثال در هنگام عبور از میکروکانالها کلوخه شده و باعث گرفتگی مسیر می گردند که در نتیجه افت فشار زیادی ایجاد می کنند، به علاوه برخورد این ذرات با یکدیگر و همچنین با دیواره سیستم و تجهیزات ایجاد سایش می کند [۴و۵].

بدون شک پیشرفتهای اخیر در تولید ذرات نانو را می توان یک تحول در روش های افزایش انتقال حرارت دانست زیرا اندازه کوچک ذرات و کسر حجمی پایین مورد استفاده مسائلی نظیر کلوخه شدن و افت فشار را حل می کند. علاوه بر این سطح نسبی بزرگ ذرات نانو، پایداری ذرات را افزایش داده و مسئله ته نشینی را کاهش می دهد و هزینه های لازم برای نگهداری و انتقال سیالات را کم می کند. همچنین به صورت تئوریک مشخص است هرچه قدر ذرات ریزتر باشند سطح نسبی انتقال حرارت آنها بیشتر می شود و در نتیجه بازده حرارتی ذرات معلق که تابعی از سطوح انتقال حرارت می باشد با کاهش اندازه ذرات افزایش می یابد.

چوی (۱۹۹۵) [۶] اولین کسی بود که در آزمایشگاه ملی آرگونه در ایالات متحده سوسپانسیون حاوی ذرات نانو در سیال پایه را نانوسیال نامید و افزایش فوق العاده در ضریب انتقال حرارت این سیالات را نشان داد.

چوی و لی [۷] گزارش کرده اند که سوسپانسیون ۴٪ حجمی ذرات ۳۵ نانومتری CuO در اتیلن کلیگول افزایش ۲۰ درصدی در ضریب هدایت حرارتی را نشان می دهد. **چوی و لاک وود [۸]** اشاره کرده اند که ضریب هدایت حرارتی روغن موتور حاوی ۱٪ حجمی ذرات نانوکربن افزایش ۶۰ درصدی را بیان می کند. یکی از آخرین بررسی های انجام گرفته توسط **کی داس** می باشد [۹] که تغییرات ضریب هدایت حرارتی نانو سیال را با دما نشان می دهد. از مجموع مطالعات تجربی و تئوریک چنین مشخص می شود که افزایش ضریب هدایت حرارتی سوسپانسیونهای حاوی ذرات نانو بسیار بیشتر از پیش بینی های مدل های تئوریک نظیر معادلات ماکسول، همیلتون-کروسر و ... می باشد [۱۰-۱۲] و نیاز به بررسی های بیشتر در زمینه هدایت حرارتی نانوسیال می باشد.

با وجود این مهم است تأکید کنیم که کاربرد نانوسیال بیشتر برای مقاصد سرمایه در شرایط انتقال حرارت جابجایی می باشد بنابراین نیاز به مطالعه و بررسی در زمینه انتقال حرارت جابجایی نانوسیال وجود دارد.

لی و ژوان [۱۳] طی آزمایشی که نانوسیال آب دی یونیزه/ ذرات ۳۵ نانومتری Cu را در لوله با بار حرارتی ثابت دیواره جریان دادند نشان دادند که عدد ناسلت نانوسیال با ۱٪ حجمی ذرات مس در مقایسه با آب خالص ۱۲٪ افزایش می یابد و سپس نتیجه گیری کرده اند که نسبت عدد ناسلت برای نانوسیال در مقایسه با آب خالص با همان شدت جرمی از ۱/۰۵ تا ۱/۱۴ تغییر می کند اگر کسر حجمی ذرات نانو از ۰/۵٪ تا ۱/۲٪ افزایش یابد.

روتزل، ژوان و لی [۱۴ و ۱۵] دو حالت برای تعیین انتقال حرارت جابجایی سیالات نانو در نظر گرفته اند. در حالت اول نانوسیال را مشابه سیالات خالص بدون وجود ذرات نانو در نظر گرفته ولی ضرایب هدایت حرارتی، ویسکوزیته و گرمای مخصوص را برای مخلوط دو فاز از روی روابط موجود استفاده نموده اند و در حالت دوم مدل پراکندگی را برای بیان رفتار پراکندگی حرارتی ناشی از حرکات بدون نظم ذرات بکار برده اند. **ژوان و لی [۱۶]** طی بررسی که روی نانوسیال آب/ Cu در جریان درهم با بار حرارتی ثابت دیواره انجام دادند افزایش انتقال حرارت جابجایی نانوسیال را ناشی از افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال و وجود حرکات تصادفی و پراکندگی در جریان نانوسیال عنوان کرده و روابط جدیدی را بر مبنای مطالعات تجربی ارائه دادند. **ون و دینگ [۱۷]** در بررسی جریان نانوسیال آب/ Al_2O_3 در شرایط جریان آرام با بار حرارتی ثابت دیواره، افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال را با افزایش عدد Re و غلظت ذرات مخصوصاً در نواحی ورودی گزارش کرده اند و دلیل این مسئله را کاهش لایه مرزی حرارتی در اثر توزیع غیر یکنواخت ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی به علت حرکات براونی ذرات عنوان نموده اند. **روی و گوین [۱۸ و ۱۹]** در مطالعات عددی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آب/ Al_2O_3 و اتیلن گلیکول/ Al_2O_3 در سیستمهای جریان شعاعی افزایش قابل توجه انتقال حرارت را گزارش کرده اند. همچنین افزایش تنش

برشی دیواره را با افزایش غلظت ذرات نانو نشان داده اند. **یانگ و ژانگ** [۲۰] در بررسی حرارت جابجایی نانوسیال *Graphit / ATF* و *Graphit / base oil* در جریان آرام افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال را گزارش کرده اند. ولی نتایج حاصل کمتر از مقدار پیش بینی شده بوسیله معادلات مرسوم می باشد. **پوترا** [۲۱] در بررسی انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال آب / Al_2O_3 و آب / CuO کاهش انتقال حرارت جابجایی توسط نانوسیال را مشاهده کرد و این مسئله را ناشی از عواملی چون ته نشینی و اختلاف سرعت ذرات و سیال را بیان کرد.

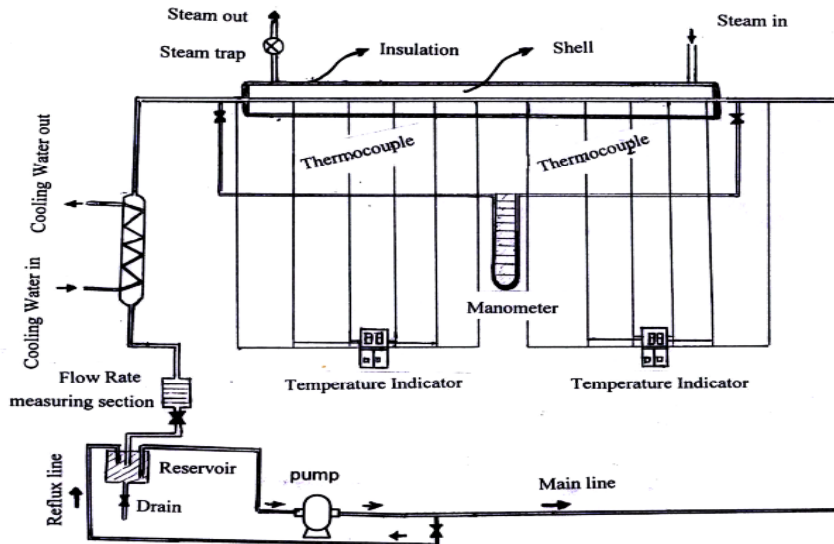
بررسی جوشش یا حالات تغییر فاز توسط **روتزل ، پوترا و داس** [۲۲ و ۲۳] انجام گرفته است که به تعویق افتادن فرآیند جوشش با افزودن ذرات نانورا مشاهده کرده و علت این مسئله را تأثیر ذرات نانو روی زبری سطح عنوان کرده اند. **ون و دینگ** [۲۴] تأثیر مهاجرت ذرات نانو به خاطر حرکات براونی را در جریان نانوسیال به صورت تئوریک بررسی کرده و افزایش انتقال حرارت را در جریان نانوسیال گزارش کرده اند.

هدف از این مطالعه بررسی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال در جریان آرام تحت شرایط مرزی دمای ثابت دیواره است. در این تحقیق غلظتهای مختلف نانوسیال آب / Al_2O_3 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.

سیستم آزمایشی

در طی این آزمایش برای بررسی انتقال حرارت جابجایی تحت شرایط مرزی دمای ثابت دیواره یک سیستم آزمایشی مطابق شکل (۱) 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 ۲ 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. بخش آزمایش شامل یک لوله تودرتوست که لوله داخلی از جنس مس با قطر داخلی 6mm و ضخامت 0.5mm و طول 1mm است و پوسته از جنس فولاد ضدزنگ با قطر 32mm و طول 1m می باشد. در داخل لوله نانوسیال در جریان بوده و در قسمت پوسته بخار در حال کندانس در جریان است که دمای ثابت دیواره را تشکیل می دهد. اطراف سیستم عایق کاری شده است. ۱۰ عدد ترموکوپل (*K - type*) بر روی بدنه لوله داخلی با فواصل 10Cm به منظور اطمینان از ثابت بودن دمای دیواره و اندازه گیری دمای بدنه داخلی لوله نصب شده اند. ۲ عدد

ترموکوپل (K -type) نیز در بخش ورودی و خروجی جریان سیال نصب شده اند تا دمای بالک را اندازه گیری نمایند.



شکل (۱) طرح شماتیک سیستم آزمایشی

به منظور تعیین افت فشار جریان در بخش آزمایش از یک مانومتر استفاده شده است که افت فشار را در طول لوله برای شدت جریان های مختلف اندازه گیری می کند. 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 300Cm^3 که در قسمت پایین آن جهت تخلیه شیری قرار دارد استفاده می گردد. سیستم اندازه گیری دبی قبل از مخزن ذخیره قرار دارد.

تهیه نانوسیال

در طی این آزمایش نانوسیال آب/ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ مورد بررسی قرار گرفته است. ابعاد ذرات مورد استفاده 20nm می باشد که در داخل آب پراکنده شده اند. به منظور عدم تغییر خواص سیستم از هیچ عامل پایدارساز یا پراکنده سازی استفاده نشده است و فقط از سیستم همزن اولتراسونیک به منظور پراکنده سازی مناسب ذرات در داخل مایع استفاده گردیده است. در این آزمایش غلظتهای 0.2% ، 0.5% ، 1.0% ، 1.5% ، 2.0% و 2.5% حجمی ذرات Al_2O_3 مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به این که خواص حرارتی و فیزیکی یک سوسپانسیون بستگی زیادی به فرآیند و کیفیت پراکنده سازی ذرات جامد در داخل مایع دارد. به منظور تهیه سوسپانسیون ابتدا وزن مناسب از پودر نانو از روی دانسیته واقعی تعیین و با آب مقطر مخلوط شده و سپس در سیستم همزن اولتراسونیک (مدل *Parsonic 3600S*) به مدت ۸-۱۶ قرار

داده می شود. بعد از این مدت هیچ گونه ته نشینی برای سوسپانسیون های ۲/۵٪ - ۰/۲٪ در مدت ۲۴ ساعت مشاهده نگردید.

نحوه محاسبات

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

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

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

که در روابط Tb_1 : دمای بالک ورودی، Tb_2 : دمای بالک خروجی، \overline{Tb} : دمای بالک متوسط در طول مسیر، Tw : دمای دیواره لوله، D : قطر لوله، L : طول لوله، A : سطح مقطع لوله، \overline{U} : سرعت متوسط جریان، ρ_{nf} : دانستینه 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 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 [۲۵]. در این رابطه افزایش انتقال حرارت جابجایی نانوسیال فقط ناشی از افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال می باشد.

$$\overline{Nu_{nf}}(\text{theory}) = 1.86 \left(\text{Re}_{nf} \text{Pr}_{nf} \frac{D}{L} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_{wnf}} \right)^{0.14} \quad (3)$$

در این رابطه μ_{nf} : ویسکوزیته سیال، μ_{wnf} : ویسکوزیته نانوسیال در دمای دیواره، Re_{nf} و Pr_{nf} به ترتیب عدد رینولدز و پراتل برای نانوسیال می باشند که به شکل زیر تعریف می گردند:

$$\text{Re}_{nf} = \frac{\rho_{nf} \cdot \overline{U} \cdot D}{\mu_{nf}} \quad (4)$$

$$\text{Pr}_{nf} = \frac{Cp_{nf} \cdot \mu_{nf}}{k_{nf}} \quad (5)$$

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.

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

در این رابطه μ_w : دانسیته آب بوده و رابطه بالا (*Einsten equation*) در غلظت کمتر از ۲٪ حجمی برای ذرات کروی قابل استفاده است [۲۶].

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

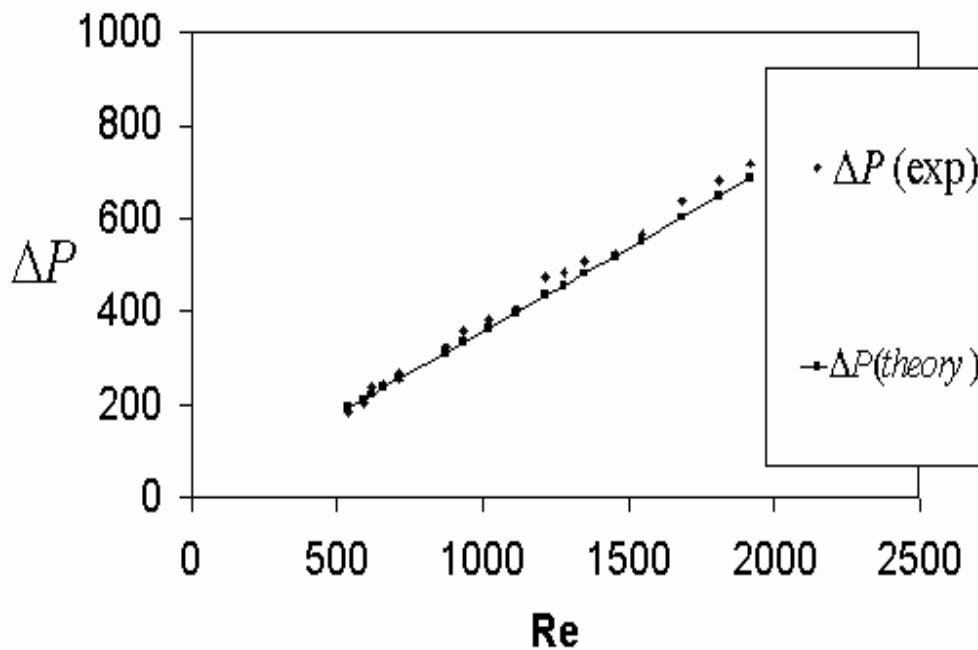
در رابطه (۸) Cp_w : گرمای مخصوص آب و Cp_s : گرمای مخصوص ذرات نانو است. در غیاب داده های تجربی برای تعیین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از رابطه همیلتون-کروسر [۲۷] به شکل زیر استفاده می گردد:

$$k_{nf} = \frac{k_s + 2k_w - 2v \cdot (k_w - k_s)}{\frac{k_s}{k_w} + 2 + v \cdot \left(\frac{k_w - k_s}{k_w} \right)} \quad (9)$$

در رابطه بالا k_w : ضریب هدایت حرارتی آب و k_s : ضریب 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 (\overline{Nu}_{nf}) و ضریب انتقال حرارت جابجایی (\overline{h}_{nf}) را برای نانوسیال در غلظت های مختلف تعیین نمود.

تعیین دقت سیستم آزمایشی

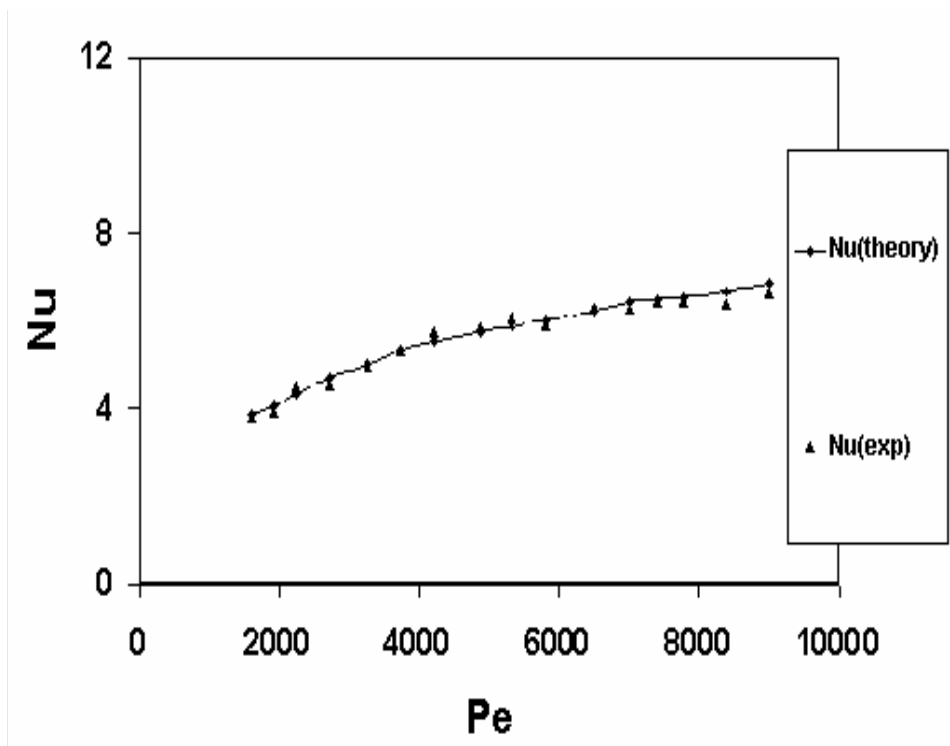
به منظور بررسی جریان سیال، افت فشار جریان آب در داخل لوله اندازه گیری شده و با مقادیر حاصل از روابط تئوریک مقایسه گردیده است. نتایج حاصل از افت فشار آب بر حسب عدد Re در شکل (۲) ارائه شده است.



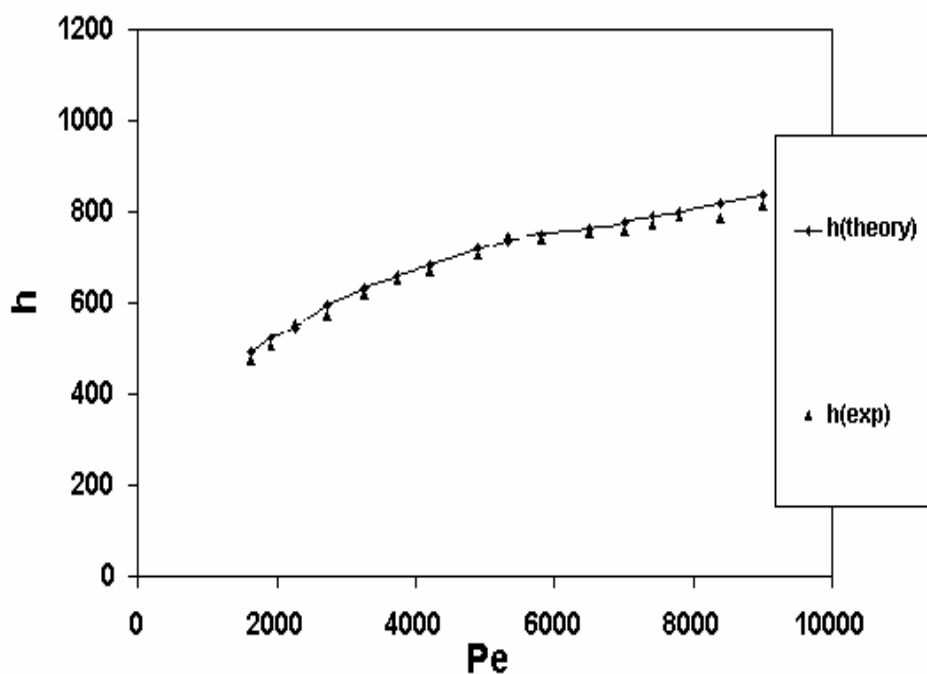
شکل (۲) افت فشار آب مقطر بر حسب عدد رینولدز در طول سیستم آزمایشی

مقادیر تطابق خوبی با هم دارند و حداکثر اختلاف $\pm 7\%$ بین مقادیر قابل مشاهده است. به منظور توانایی سیستم در تعیین دقیق و صحیح ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آزمایش هایی با آب مقطر به عنوان سیال عامل انجام گرفته است. نتایج تجربی بدست آمده با مقادیر حاصل از رابطه (Seider - Tate) معادله (۳) برای جریان آرام با شرایط مرزی دمای ثابت دیواره مقایسه گردیده است.

شکل (۳) نشان دهنده مقادیر عدد ناسلت بر حسب عدد Pe برای جریان آرام آب در داخل لوله با دمای ثابت دیواره می باشد. همانطوری که از شکل مشخص است تطابق خوبی بین نتایج تجربی حاصل و نتایج تئوریک محاسبه شده از معادله وجود دارد و حداکثر اختلاف $\pm 4\%$ بین نتایج موجود است. همچنین شکل (۴) ضریب انتقال حرارت جابجایی تجربی و محاسباتی آب را بر حسب عدد Pe نشان می دهد



شکل ۳) تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد پکلت برای آب مقطر



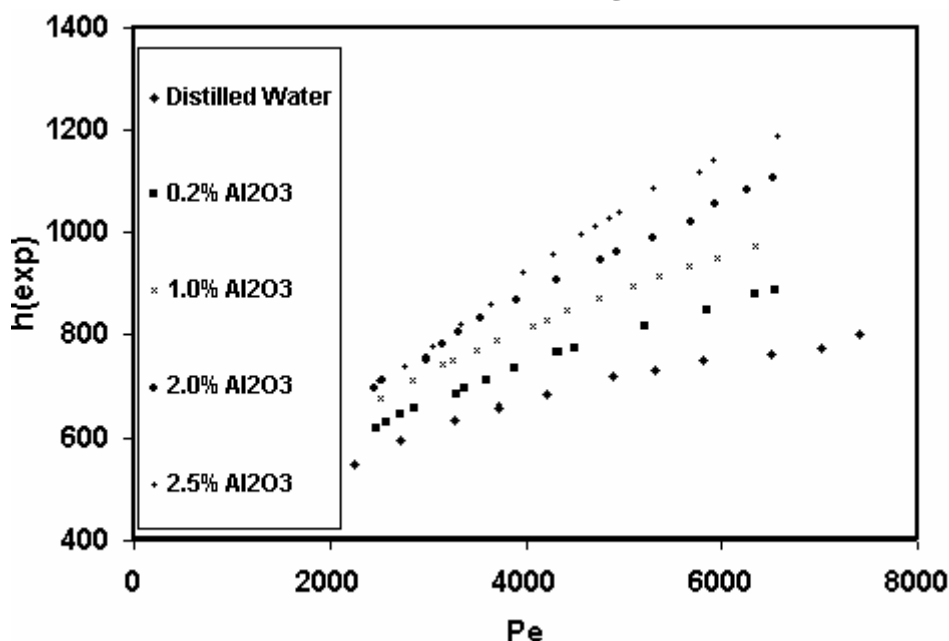
شکل ۴) تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی بر حسب عدد پکلت برای آب مقطر

دلایل اختلاف بین مقادیر محاسباتی و مقادیر اندازه گیری شده ممکن است در نتیجه خطای اندازه گیری دما و شدت جریان سیال باشد. ترموکوپل های مورد استفاده دارای دقت $0.1^{\circ}C$

بوده و به کمک ترموستات با استفاده از حمام آب جوش کالیبره می شوند. خطای ایجاد شده در اثر اندازه گیری دما حداکثر ۱٪ می باشد. شدت جریان سیال بوسیلهٔ اندازه گیری زمان پر شدن مخزن تعیین می گردد. حداکثر خطای این اندازه گیری ۲٪ است.

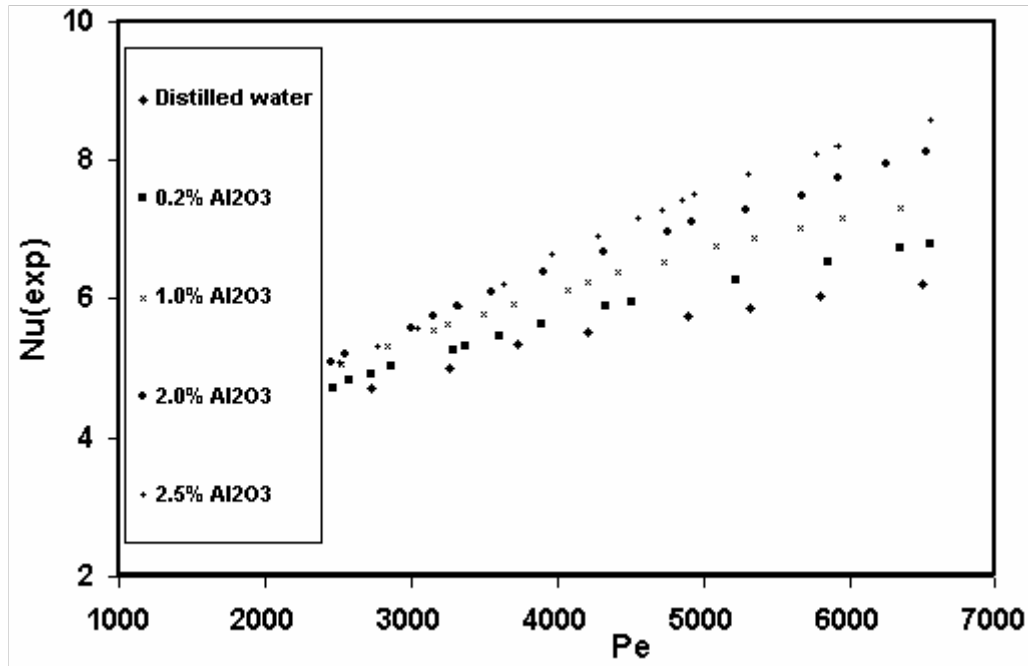
نتایج تجربی

در این مطالعه نانوسیال با غلظتهای ۰/۲٪، ۰/۱۵٪، ۱/۰٪، ۱/۱۵٪، ۲/۰٪ و ۲/۵٪ حجمی ذرات Al_2O_3 به منظور بررسی تأثیر غلظت ذرات نانو روی انتقال حرارت جابجایی مورد استفاده قرار گرفته است. محدوده بررسی عدد رینولدز ۲۰۵۰-۷۰۰ می باشد. در این بخش نتایج حاصل از اندازه گیری ها نشان داده می شود.

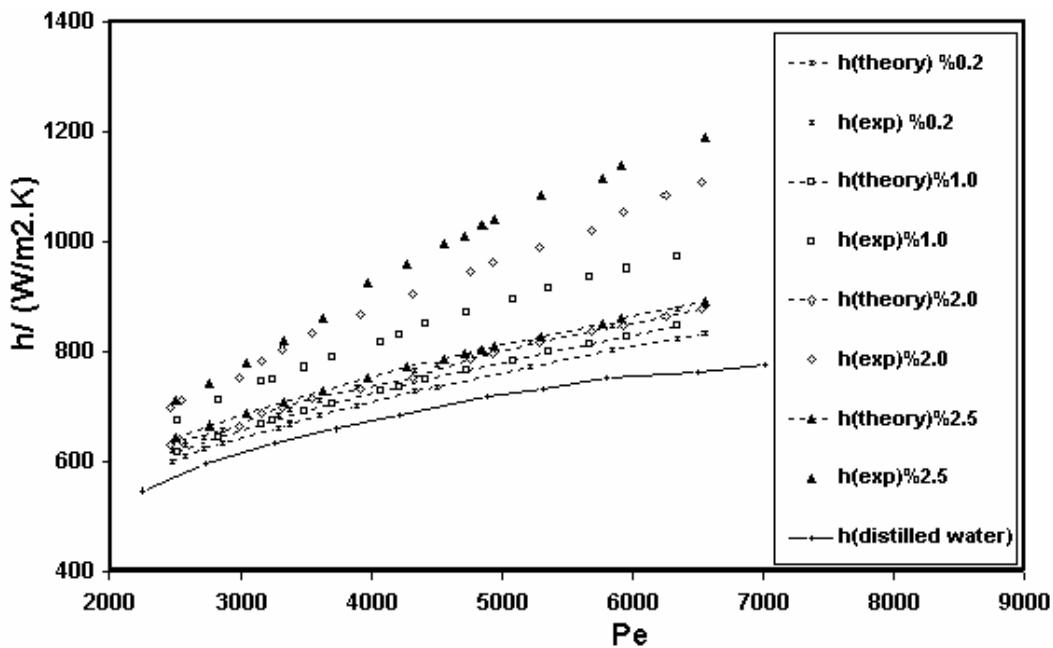


شکل ۵) تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی برای آب و نانوسیال Al_2O_3 بر حسب عدد پکلت

شکل ۵) ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال را در غلظتهای مختلف بر حسب عدد Pe نشان می دهد. همانطوری که از شکل مشخص است افزایش غلظت ذرات نانو منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی در یک عدد Pe ثابت می گردد. همچنین در غلظتهای یکسان افزایش عدد Pe باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی شده است. تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد Pe در غلظتهای مختلف نانوسیال در شکل ۶) ارائه شده است.



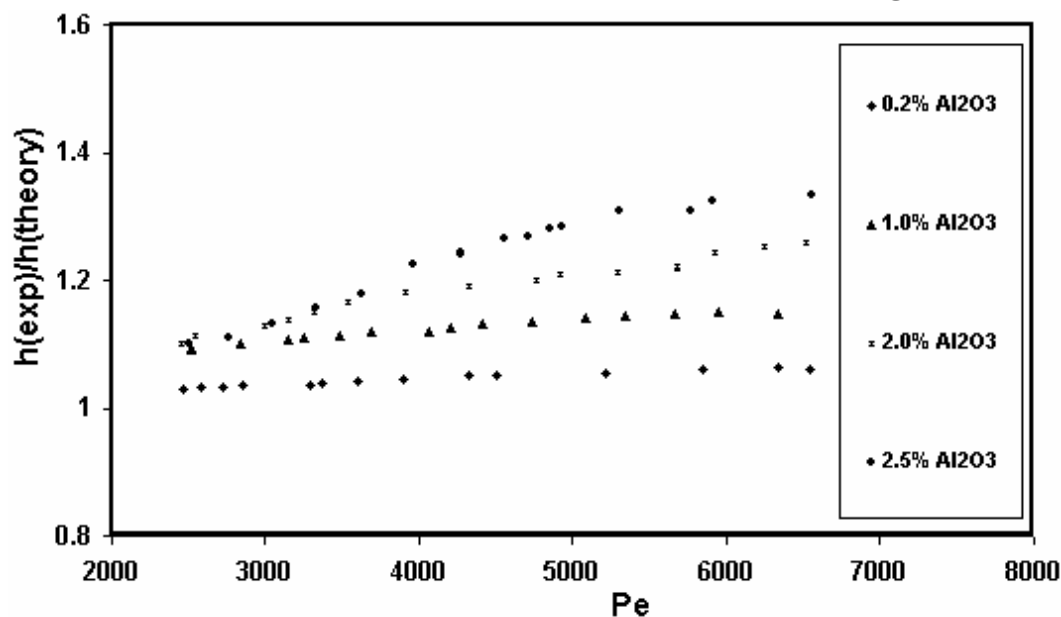
شکل ۶) تغییرات عدد ناسلت برای آب و نانوسیال Al_2O_3 بر حسب عدد پکلت



شکل ۷) مقایسه عدد ناسلت تجربی با مقدر محاسبه شده از معادله *Seider – Tate* برای نانوسیال Al_2O_3 بر حسب عدد پکلت

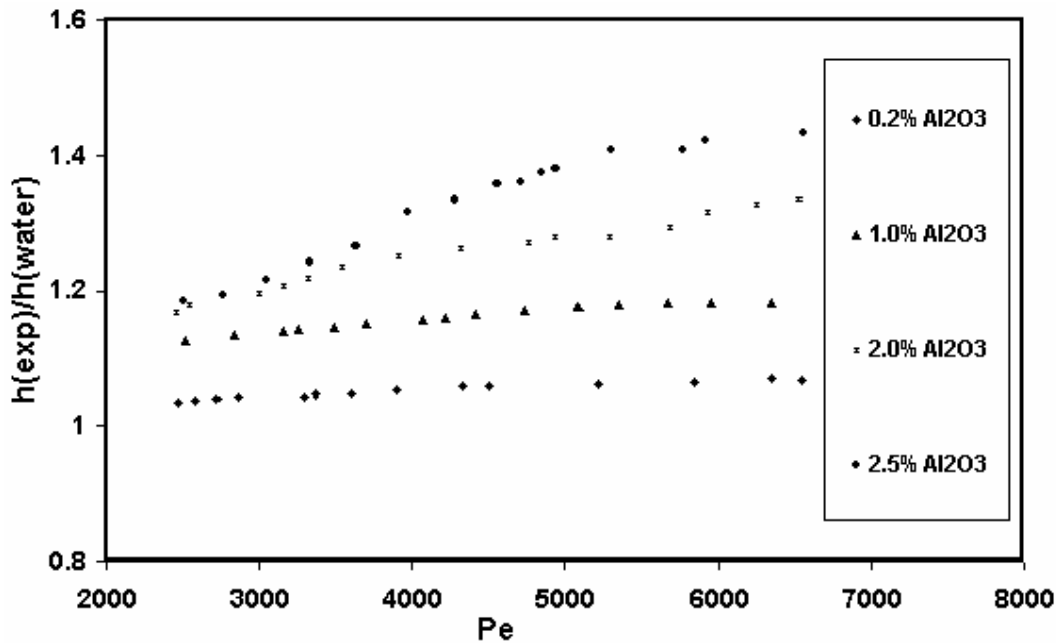
همانطوری که مشخص است افزایش قابل توجهی در عدد ناسلت برای نانوسیال نسبت به آب وجود دارد و این افزایش در غلظتهای بالا بیشتر دیده می شود

در صورتیکه افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال فقط ناشی از افزایش ضریب هدایت حرارتی باشد در این صورت معادلات جریان تک فازی که خواص فیزیکی نانوسیال در معادله بکار رفته است می تواند ضرایب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال را پیش بینی کند. شکل (۷) ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال را در غلظتهای مختلف بر حسب عدد Pe نشان می دهد و نتایج با مقادیر حاصل از پیش بینی معادله (۳) مقایسه می گردد همانطوری که از شکل مشخص است افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی فقط ناشی از افزایش ضریب هدایت حرارتی نبوده و ناشی از عوامل دیگری مثل ایجاد مؤلفه های سرعت در جهات مختلف نیز می باشد که باید مدنظر قرار گیرد. دلایل اصلی افزایش ضریب انتقال حرارت در قسمت بحث در رابطه با نتایج آورده شده است.



شکل ۸) نسبت ضریب انتقال حرارت جابجایی تجربی نانوسیال Al_2O_3 به مقادیر تئوریک حاصل از معادله $Seider - Tate$ بر حسب عدد پکلت

شکل (۸) نسبت ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال در حالت تجربی به نتایج حاصل از معادلات تئوریک را نشان می دهد. این نسبت با افزایش عدد Pe و نیز کسر حجمی ذرات Al_2O_3 افزایش می یابد به طوری که از $1/1.03$ در $Pe = 2509$ به $1/3.35$ در $Pe = 6558$ برای غلظت $2/5\%$ حجمی می رسد. همچنین در عدد Pe حدود $Pe = 6500$ با تغییر غلظت از $2/5\%$ به $2/5\%$ این نسبت از $1/0.61$ به $1/3.35$ افزایش داده می شود. افزایش نسبت ضریب انتقال حرارت تجربی به مقادیر محاسباتی در اعداد Pe پایین کمتر است. به عنوان مثال در $Pe = 2500$ با تغییر غلظت از $2/5\%$ به $2/5\%$ محدود تغییرات نسبی بین $1/0.32$ تا $1/1.03$ است



شکل ۹) نسبت ضریب انتقال حرارت جابجایی تجربی نانوسیال Al_2O_3 به ضریب انتقال حرارت جابجایی آب بر حسب عدد پکلت

شکل (۹) نشان دهنده افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال در غلظتهای مختلف نسبت به آب می باشد. همانطوری که از شکل مشخص است افزایش عدد Pe منجر به افزایش این نسبت می شود. بطوری که در غلظت ۰/۲٪ با افزایش عدد Pe از ۲۴۷۱ به ۶۵۴۸ نسبت ضریب انتقال حرارت نانوسیال به ضریب انتقال حرارت آب از ۱/۰۳۵ به ۱/۰۶۸ می رسد. این افزایش در غلظت ۲/۵٪ حجمی بیشتر است و با تغییر عدد Pe از ۲۵۰۹ به ۶۵۵۸ نسبت ضرایب انتقال حرارت از ۱/۱۸۴ به ۱/۴۳۴ ارتقاء می یابد. همچنین تغییر غلظت نانوسیال از ۰/۲٪ به ۲/۵٪ حجمی در $Pe = ۶۵۰۰$ منجر به تغییر نسبت ضرایب انتقال حرارت از ۱/۰۶۸ به ۱/۴۳۴ می گردد.

بحث در رابطه با نتایج

مقایسه بین نتایج تجربی و نتایج حاصل از معادله (Seider-Tate) که در آن از خواص رئولوژیکی و فیزیکی نانوسیال شامل دانسیته، ویسکوزیته، گرمای مخصوص و ضریب هدایت حرارتی استفاده شده است نشان می دهد که انتقال حرارت جریان نانوسیال قابل پیش بینی بوسیله روابط جریان تک فازی نمی باشد و انحراف بین نتایج حاصل با افزایش عدد Pe و کسر حجمی ذرات نانو افزایش می یابد.

با توجه به نتایج تجربی حاصل مشاهده گردید که ضرایب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال بسیار بیشتر از سیال خالص می باشد و این افزایش ضرایب انتقال حرارت بستگی به غلظت

ذرات نانو و عدد Pe دارد. بطوری که در اعداد Pe بالا افزایش بیشتری مشاهده می شود. عدد پکلت برای جریان نانوسیال به شکل زیر محاسبه می شود:

$$Pe_{nf} = Re_{nf} \cdot Pr_{nf} = \frac{Cp_{nf} \cdot \rho_{nf} \cdot \bar{U}}{k_{nf}} \quad (10)$$

با توجه به رابطه (۱۰) افزایش شدت جریان نانوسیال منجر به افزایش عدد Pe برای نانوسیال می شود و بنابراین عامل اصلی افزایش ضریب انتقال حرارت در اعداد Pe بالا، افزایش شدت جریان سیال می باشد.

با توجه به نتایج بررسی بدست آمده و بررسی های انجام گرفته مشخص می گردد که افزودن ذرات نانو ساختار جریان سیال را تغییر می دهد بطوری که علاوه بر افزایش ضریب هدایت حرارتی سیستم، حرکات نامنظم، جابجایی و پراکندگی ذرات نانو مخصوصاً در کنار دیواره ها منجر به کاهش لایه مرزی حرارتی شده و طول توسعه یافتگی را افزایش می دهد. همچنین با تغییر پروفیل دمایی سیستم در شدت جریان های بالا منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی می گردد. ولی در شدت جریان های پایین نانوسیال احتمال به هم چسبیدن ذرات وجود دارد بطوریکه افزایش انتقال حرارت کمتری را در اعداد پکلت پایین مشاهده می کنیم. همچنین افزایش کسر حجمی ذرات نانو بر خوردها و کنش متقابل ذرات نانو را که عامل اصلی انتقال حرارت در سیستم نانوسیال می باشد افزایش می دهد. همچنین نفوذ و حرکات نسبی این ذرات در کنار دیواره منجر به افزایش سریع انتقال حرارت از دیواره به توده نانوسیال می گردد. معادلات جریان تک فازی (معادله Seider - Tate) که در آن خواص نانوسیال جایگذاری شده است به دلیل عدم توجه به نوع، ابعاد و غلظت ذرات نانو و حرکات و برخوردهای این ذرات و نقشی که در انتقال حرارت دارند در پیش بینی ضرایب انتقال حرارت نانوسیال موفق نیستند. بنابراین مدل های جدیدی که نقش ذرات نانو را در ساختار جریان و انتقال حرارت بیان می کند باید ارائه گردد که این کار مستلزم مطالعات تجربی و تئوریک بیشتر در زمینه نانوسیال می باشد.

نتیجه گیری

انتقال حرارت جابجایی نانوسیال در داخل لوله ای با دمای ثابت دیواره در جریان آرام مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تجربی حاصل بیانگر افزایش انتقال حرارت جابجایی 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. همچنین نفوذ و پراکندگی ذرات نانو در کنار دیواره منجر به افزایش سریع انتقال حرارت از دیواره به توده سیال می شود. برای مد نظر قرار دادن عواملی نظیر نوع، ابعاد، غلظت و شکل ذرات نانو و نیز تأثیر جابجایی، نفوذ، پراکندگی و برخورد ذرات نانو در انتقال حرارت نیاز به مطالعات بیشتر در زمینه ساختار جریان و انتقال حرارت جابجایی نانوسیال می باشد.

منابع

1. A.S. Ahuja, " Augmentation of heat transport in laminar flow of polystyrene suspension, I. Experimental and results " , J. Applied Physics, V. 46, No. 8, P. 3408, 1975.
2. A.E. Bergles and R.L. Web, " Augmentation of convective heat and mass transfer " , ASME, NewYork, 1970.
3. A.E. Bergles, " Recent development in convective heat transfer augmentation " , Applied Mechanics Reviews, V. 26, P. 675, 1973.
4. K. Khanafer, K. Vafai and M. Lightstone, " Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids " , Int. J. Heat & Mass Transfer, V. 46, P. 3639, 2003.
5. D.W. Zhou, " Heat transfer enhancement of copper nanofluid with acoustic cavitations " , Int. J. heat & Mass Transfer, Article in press, 2004.
6. 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, V. 66, P. 99, 1995.
7. S. Lee, S.U.S. Choi, S. Li and J.A. Eastman, " Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles " , J. Heat Transfer, V.121, P. 280, 1999.
8. S.U.S. Choi, Z.G. Zhang, W. Yu, F.E. Lockwood and E.A. Grulke, " Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions " , Applied Physics Letter, V. 79, No. 14, P. 2252, 2001.
9. S.K. Das, N. Putra, P. Theisen and W. Roetzel, " Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluid " , J. Heat Transfer, V. 125, P. 567, 2003.
10. P. Kebliski, S.R. Phillpot, S.U.S. Choi and J.A. Eastman, " Mechanism of heat flow in suspension of nano-sized particle (nanofluids) " , Int. J. Heat & Mass Transfer, V. 45, P. 855, 2002.
11. Q. Xue and W.M. Xu, " A model of thermal conductivity of nanofluids with interfacial shells " , Material Chemistry and Physics, Article in press, 2004.
12. J.A. Eastman, S.U.S. Choi, S. Li, W. Yu and L.J. Thompson, " Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene

- glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles " , Applied Physics letters, V. 78, No. 6, P.718, 2001.
13. Q. Li and Y. Xuan, " Experimental investigation of transport properties of nanofluids " , Heat Transfer Science & Technology, Wang Buxan eds., Higher Education Press, P. 757, 2000.
 14. Y. Xuan and Q. Li, " Heat transfer enhancement of nanofluids " , Int. J. Heat & Fluid Flow, V. 21, P. 58, 2000.
 15. Y. Xuan and W. Roetzel, " Conception for heat transfer correlation of nanofluid " , Int. J. Heat & Mass Transfer, V. 43, P. 3701, 2000.
 16. Y. Xuan and Q. Li, " Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids " , J. heat transfer, V. 125, P. 151, 2003.
 17. D. Wen and Y. Ding, " Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluid at the entrance rejoin under laminar flow conditions " , Int. J. Heat & Transfer, V. 47, P. 5181, 2004.
 18. S.J. Palm, G. Roy and C.T. Nguyen, " Heat transfer enhancement in radial flow cooling system using nanofluid " , ICHMT Inter. Symp. Advance Comp. Heat Transfer, Proceeding of CHT-04-121, Norway, 2004.
 19. G. Roy, C.T. Nguyen and P.R. Lajoie, " Numerical investigation of laminar flow and heat transfer in a radial flow cooling system with the use of nanofluids " , Superlattices and Microstructures, V. 35, P. 497, 2004.
 20. Y. Yang, Z.G. Zhang, E.A. Grulke, W.B. Andersen and G. Wu, " Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow " , Int. J. Heat & Mass Transfer, Article in Press, 2004.
 21. N. Putra, W. Roetzel and S.K. Das, " Natural convection of nanofluids " , Heat & Mass Transfer, V. 39, P. 775, 2003.
 22. S.K. Das, N. Putra and W. Roetzel, " Pool boiling of nano-fluids on horizontal narrow tubes " , Int. J. Multi Phase Flow, V. 29, P. 237, 2003.
 23. S.K. Das, N. Putra and W. Roetzel, " Pool boiling characteristics of nano-fluids " , Int. J. Heat & Mass Transfer, V. 46, P. 851, 2003.
 24. Y. Ding and D. Wen, " Particle migration in a flow of nanoparticle suspensions " , Powder Technology, V. 149, P. 84, 2005.
 25. E.N. Seider and G.E. Tater, " Heat transfer and pressure drop of liquid in tubes " , Ind. Eng. Chem., V. 28, No.12, P. 1429, 1936.
 26. D.A. Drew and S.L. Passman, " Theory of multi component fluids " , Springer, Berlin, 1999.
 27. R.L. Hamilton and O.K. Crosser, " Thermal conductivity of heterogeneous two component systems " , I & Ec Fundamentals, V.1, P.182, 1962.