

بررسی تجربی انتقال حرارت نانوسیال آلومینا/آب داخل لوله افقی

محسن نظری^۱، محمدحسن کیهانی^۲ و حامد سلطانزاده^۳

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی شاهرود

(تاریخ دریافت: ۹۰/۰۳/۳۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۰/۲۵)

چکیده

در این مقاله، انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال آلومینا/آب، در جریان درهم درون یک لوله افقی به صورت تجربی بررسی می‌شود. آزمایش طراحی شده به صورت یک حلقه بسته بوده و شامل پمپ، منبع ذخیره نانوسیال، سیستم‌های اندازه‌گیری دما و فشار، و مسیرهای لوله جهت انتقال نانوسیال می‌باشد. حلقه جریان به گونه‌ای طراحی شده است که اختلاف فشار دو سر لوله حاوی نانوسیال با یک دستگاه اندازه‌گیر دیفرانسیلی فشار اندازه‌گیری می‌شود. ده عدد حسگر دما نیز بر روی جداره لوله نصب شده است و به صورت محلی نسبت به اندازه‌گیری دمای جداره اقدام می‌شود. شرط مرزی در نظر گرفته شده در جداره لوله، شار حرارتی ثابت است. نانوذرات آلومینا با اندازه ۴۰ نانومتر تهیه شده و به صورت معلق در آب مقطر به حالت پایدار در غلظت‌های ۱٪، ۱/۵٪ و ۲٪ تولید شده‌اند. نتایج، بیانگر افزایش انتقال حرارت با استفاده از نانوذرات در سیال پایه است. افزایش عدد ناسلت برای نانوسیال در غلظت ۲٪ حجمی در رینولدز ۱۳۵۰۰، در حدود ۲۲٪ مشاهده شده است. داده‌های تجربی به دست آمده، با نتایج حاصل از پیش‌بینی‌های انتقال حرارت تکفاز در جریان درهم نیز مقایسه می‌شود. همچنین این آزمایش برای آب به عنوان سیال پایه نیز انجام می‌شود و نتایج حاصل از آن با نتایج نانوسیال مقایسه می‌شوند. افت فشار اندازه‌گیری شده با استفاده از نانوسیالات تقریباً برابر با سیال پایه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: انتقال حرارت جابه‌جایی، نانوسیال، افت فشار، بررسی تجربی

Experimental Study of Heat Transfer of Al₂O₃/Water Nanofluid Through Horizontal Tube

M. Nazari, M.H. Kayhani and H. Soltanzadeh

Mech. Eng. Dep't

Shahrood Univ. of Tech.

(Received: 21 June, 2010; Accepted: 14 January, 2013)

ABSTRACT

In the present study, the turbulent convective heat transfer and pressure drop characteristic of alumina (Al₂O₃) nanoparticle dispersions in water is studied experimentally in a horizontal tube. The boundary condition imposed on the tube wall is that of uniform heat flux. Ten temperature sensors are also used to measure the surface temperature. One differential pressure transmitter (DPT) is employed to measure the differential pressure between inlet and outlet of the tube. A flow loop facility is constructed to conduct the experiments. To do this, Al₂O₃ nanoparticles of 40 nm size are characterized and dispersed in distilled water to form stable suspension containing 1.0%, 1.5% and 2.0% by volume concentrations of nanofluids. Results indicate that heat transfer coefficients increase with nanofluid volume concentration. The enhancement of the Nusselt number is about 22% at Re=13500 using 2% alumina nanoparticles compared to distilled water. The experimental data are also compared to predictions made by using the traditional single-phase convective heat transfer pressure drop in turbulent regime. The measured pressure loss when using nanofluids is almost equal to that of the base fluid.

Keywords: Convective Heat Transfer, Nanofluids, Pressure Drop, Experimental Study

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): nazari_me@yahoo.com

۲- دانشیار: m_kayhani@yahoo.com

۳- دانشجوی کارشناسی: hamed.soltanzadeh@gmail.com

فهرست علائم

۱- مقدمه

افزایش انتقال حرارت و راندمان در صنایع همواره مورد توجه طراحان و مهندسان بوده است. سیالاتی مانند آب، روغن و اتیلن گلیکول نقش مهمی در گرمایش و سرمایش فرآیندهای صنعتی دارند. خواص ضعیف انتقال حرارت این سیالات، مانع بزرگی در افزایش انتقال حرارت و کارآمدتر شدن مبدل‌های حرارتی است. از سوی دیگر، هدایت حرارتی برخی از جامدات نظیر فلزات چند صد برابر مایعات متداول حامل انرژی است. بنابراین یکی از روش‌های افزایش انتقال حرارت سیالات متداول، پخش ذرات فلزی و یا غیرفلزی در سیال مبنا است که هدایت حرارتی بالاتری نسبت به سیال مبنا دارند. این ایده اولین بار توسط ماکسول^۱ [۱] بیان شد. اما ذراتی که ماکسول از آن استفاده نمود، درشت بود و مشکلاتی نظیر افزایش بسیار زیاد در افت فشار و انسداد و گرفتگی لوله‌ها را ایجاد کرد. با پیشرفت در تکنولوژی نانو، چوی^۲ [۲] استفاده از نانوذرات را برای معلق‌سازی درون سیال پیشنهاد کرد که سیال تولید شده را نانوسیال نامید و مشکلاتی که قبلاً به وجود آمده بود را نداشت. بر این اساس نانوسیال به صورت سیالات متداولی که ذرات معلق در اندازه نانومتری دارند، تعریف می‌شود. تا جایی که می‌دانیم، نخستین کار روی محلول‌های ذرات نانومتری در سال ۱۹۹۳ به چاپ رسید. در آن تحقیق، هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال شامل نانوذرات Al_2O_3 در آب، توسط ماسودا^۳ و همکاران [۳] بررسی شد. نتایج به دست آمده حاکی از افزایش هدایت حرارتی، با استفاده از درصد حجمی نسبتاً کم نانوذرات داشت. بررسی افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی در نانوسیالات نیز توسط پک و چو^۴ [۴] آغاز شد. افزایش تقریباً ۳۰ درصدی ضریب انتقال حرارت باعث شد تا محققان دیگری نیز به این موضوع علاقه نشان دهند. نتایج ارائه شده به وسیله زینالی^۵ و همکاران [۵-۷] بیانگر این است که افزودن نانوذرات Al_2O_3 و CuO به آب، مقدار ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و عدد ناسلت جریان آرام را به طور قابل

A	سطح مقطع لوله (m^2)
Cp_s	گرمای مخصوص ذرات نانو
Cp_w	گرمای مخصوص آب
D	قطر لوله (m^2)
f	ضریب اصطکاک
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (W/m^2K)
k_{nf}	ضریب هدایت حرارتی نانوسیال (W/mK)
k_{bf}	ضریب هدایت حرارتی آب (W/mK)
k_p	ضریب هدایت حرارتی ذرات نانو (W/mK)
Nu	عدد ناسلت
P	محیط دایره لوله (m)
Pr	عدد پراوندل
Re	عدد رینولدز
T_w	دمای جداره (K)
T_f	دمای بالک سیال (K)
T_{in}	دمای ورودی نانوسیال (K)
u	سرعت متوسط نانوسیال (K)
x	فاصله محوری از ورودی لوله (m)
φ	نسبت حجمی
ρ_{nf}	دانسیتته نانوسیال (kg/m^3)
ρ_s	دانسیتته نانوذرات (kg/m^3)

1- Maxwell

2- Choi

3- Masuda

4- Pak and Cho

5- Zeinali

نسبت حجمی و دانسیته نانوذرات در سوسپانسیون به صورت زیر تعریف می شود:

$$\varphi = \frac{V_s}{V_t}, \quad (1)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}. \quad (2)$$

سپس جرم لازم نانوذرات برای یک لیتر از سوسپانسیون نانوسیال به صورت زیر معین می شود:

$$m_s = 1 * 10^{-3} \varphi \rho_s. \quad (3)$$

پس از تعیین مقدار ماده مورد نیاز برای تهیه نانوسیال، نانوذرات با آب مقطر مخلوط می شوند. سپس به منظور شکستن ذرات به هم چسبیده درشت، به مدت ۳ الی ۵ ساعت در دستگاه آلتراسونیک قرار داده می شود. نانوسیال آلومینایی که با این روش تولید شده است، بیش از یک هفته بدون ته نشین شدن پایدار باقی می ماند.

۳- سیستم آزمایشگاهی

تجهیزات سیستم آزمایشگاهی با شرط مرزی شار حرارتی ثابت به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. بخش آزمایش متشکل از لوله ای مسی به طول ۲ متر و قطر داخلی ۵ میلی متر و ضخامت ۰/۵ میلی متر است که دور آن المنت حرارتی برای تأمین شار حرارتی ثابت به صورت یکنواخت بسته شده است. روی المنت های حرارتی نیز عایق کاری مناسب انجام گرفته تا از افت حرارت جلوگیری شود. یک منبع تغذیه الکتریکی برای تأمین شار حرارتی به دو سر المنت وصل می شود. یک دستگاه اندازه گیر دیفرانسیلی فشار^۵ در محدوده ۰ تا ۲۵۰ کیلو پاسکال با دقت ۰/۲٪ برای ثبت افت فشار در دبی های مختلف استفاده شده که دو سر آن به ابتدا و انتهای لوله وصل می شود. برای ثبت دماهای نقاط مختلف، ۱۰ عدد سنسور دمایی نوع RTD PT 100 در جهت محوری، روی جداره لوله مسی به فواصل یکسان نصب شده است. همچنین ۲ عدد سنسور دمایی نوع RTD PT 100، در ابتدا و انتهای جریان، درون لوله معلق شده اند تا دمای بالک ورودی و خروجی جریان نانوسیال را ثبت کنند.

ملاحظه ای افزایش می دهد. علاوه بر نانوسیالات اعم از فلزی یا اکسیدی، نانولوله های کربنی نیز قادرند در صورت افزوده شدن به سیال پایه ضریب انتقال حرارت را به طور قابل توجهی افزایش دهند. نتایج تجربی مؤید این مطلب است که افزایش غلظت نانولوله های کربنی توام با افزایش مقدار انتقال حرارت جابه جایی است [۸]. لی^۱ و ژوان [۹]، ژوان و لی^۲ [۱۰]، ون و دینگ^۳ [۱۱] و یانگ^۴ و همکاران [۱۲] دیگر کسانی بودند که انتقال حرارت جابه جایی را بررسی کردند. در این مقاله ضریب انتقال حرارت جابه جایی و افت فشار نانوسیال آلومینا/آب در داخل لوله تحت شرایط مرزی شار حرارتی ثابت در جریان مغشوش بررسی می شود. مطالعات عددی و تجربی فراوانی بر روی انتقال حرارت نانوسیالات انجام شده است، در عین حال، مرور تحقیقات منتشر شده نشان می دهد که بررسی تجربی جریان مغشوش نانوسیال در داخل لوله با شارحرارتی ثابت، از جمله موضوعات مورد توجه و قابل توسعه می باشد. نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از نانوسیال با نتایج حاصل از آب خالص و روابط تک فاز مقایسه خواهد شد. نانوسیال مورد استفاده در این مطالعه آلومینا/آب با قطر ذره ۴۰ نانومتر است. ذرات آلومینا ماده ای با کاربرد وسیع است که به عنوان جاذب سطح، پوشش و کاتالیست نیز استفاده می شود. غلظت نانوسیال مورد استفاده در آزمایش ۰/۱٪، ۰/۱۵٪ و ۰/۲٪ می باشد.

۲- تهیه نانوسیال

تهیه و تولید نانوسیال نخستین گام برای بررسی خصوصیات حرارتی نانوسیالات می باشد. در طی این آزمایش نانوسیال آب-آلومینا مورد بررسی قرار گرفته است. ابعاد ذرات مورد استفاده ۴۰ نانومتر می باشد که داخل آب پراکنده شده اند. به منظور عدم تغییر خواص سیستم از هیچ عامل پایدارساز یا پراکنده سازی استفاده نشده و فقط از سیستم همزن آلتراسونیک به منظور پراکنده سازی مناسب ذرات در داخل مایع استفاده شده است. در این آزمایش نسبت های حجمی ۰/۱٪، ۰/۱۵٪ و ۰/۲٪ ذرات آلومینا بررسی و آزمایش شده است.

- 1- Li
- 2- Xuan
- 3- Wen and Ding
- 4- Yang

5- Differential Pressure Transmitter

آزمایشات اولیه با آب مقطر انجام می‌شود تا صحت سیستم آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گیرد. به عبارت دیگر نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از معادلات گنیلینسکی^۲ [۱۳] و دیتوس-بولتر^۳ [۱۴] مقایسه می‌شود تا صحت نتایج بررسی شود. این معادلات به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Nu(x) = \frac{f / 8(Re-1000)Pr}{1 + 12.7\sqrt{f / 8(Pr^{2/3} - 1)}} \quad (۴)$$

$$\times [1 + (d/L)^{2/3}]$$

$$\text{for } f = \frac{1}{(1.82 \log_{10} Re - 1.64)^2},$$

$$Nu(x) = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}. \quad (۵)$$

داده‌های مورد نیاز برای محاسبه ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک در رینولدزهای مختلف از ۴۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ ثبت می‌شود.

۴- تحلیل داده‌ها

عملکرد انتقال حرارت نانوسیال به وسیله ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (h) و عدد ناسلت (Nu) بیان می‌شود:

$$h(x) = q / (T_w(x) - T_f(x)), \quad (۶)$$

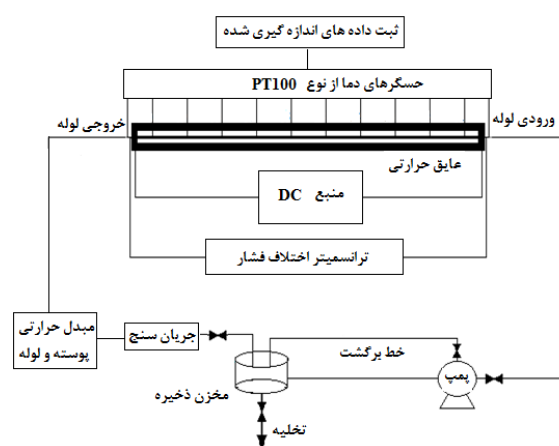
$$Nu(x) = h(x)D / k_{nf}, \quad (۷)$$

که q شار حرارتی، T_w و T_f به ترتیب دمای جداره و دمای بالک، D قطر لوله، k_{nf} ضریب هدایت حرارتی نانوسیال و x بیانگر فاصله محوری از ورودی بخش آزمایش است. T_f از طریق بالانس انرژی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$T_f(x) = T_{in} + qPx / (\rho_{nf} Cp_{nf} uA), \quad (۸)$$

که Cp_{nf} ظرفیت حرارتی نانوسیال، ρ_{nf} دانسیته نانوسیال، A و P به ترتیب سطح مقطع لوله و محیط دایره لوله، u سرعت متوسط نانوسیال و T_{in} دمای ورودی نانوسیال می‌باشد. معادله (۶) بر مبنای این فرض است که افت حرارت از عایق صفر باشد. مقدار خطای این فرض، با مقایسه اختلاف دمای اندازه‌گیری شده‌ی سیال ورودی و خروجی لوله، با مقدار محاسبه شده به وسیله معادله (۶) به دست می‌آید.

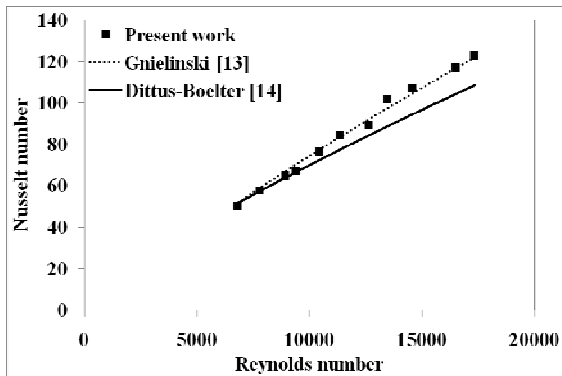
ترموکوپل‌ها نیز به دستگاه ثبت اطلاعات^۱ وصل می‌شوند که داده‌های اندازه‌گیری شده را به کامپیوتر منتقل می‌کند. بخش اندازه‌گیری دبی جریان، از یک مخزن شیشه‌ای مدرج ۱ لیتری که مجهز به شیر تخلیه می‌باشد، تشکیل شده است. به علاوه از یک بشر ۲ لیتری به عنوان مخزن نانوسیال استفاده شده است که نانوسیال توسط یک دستگاه پمپ با توان ۱ اسب بخار به سیستم تزریق می‌شود. در ضمن قبل از ورود جریان به بخش آزمایش، نانوسیال وارد یک مبدل حرارتی می‌شود که از آب به عنوان سیال خنک‌کننده استفاده می‌شود. پس از تکمیل سیستم آزمایشگاهی، نانوسیال مربوطه در مخزن ریخته و پمپ روشن می‌شود تا جریان نانوسیال در خط لوله برقرار گردد. سپس می‌بایست المنت مربوط به برقراری شار حرارتی را روشن کرد تا بخش آزمایش شروع به گرم شدن کند. برای شروع آزمایش در هر مرحله می‌بایست ابتدا نرخ جریان سیال را تعیین کنیم تا سرعت جریان و به دنبال آن عدد رینولدز مشخص شود. در هر دبی جریان، سیستم پس از ۲۰ الی ۳۰ دقیقه به حالت پایدار می‌رسد. پس از گذشت این زمان، می‌توان دمای ترموکوپل‌های متصل به بدنه و نیز معلق در بخش‌های ورود و خروج جریان و همچنین افت فشار نانوسیال را ثبت کرد.



شکل (۱): شماتیک سیستم آزمایشگاهی.

2- Gnielinski
3- Dittus-Boelter

1- Data Acquisition



شکل (۲): مقایسه عدد ناسلت تجربی و روابط موجود برای آب خالص.

نتایج به دست آمده از این تحقیق، تأییدی بر ادعای ژوان و لی [۹ و ۱۰] است که گفته بودند رابطه دیتوس-بولتر، ضرایب انتقال حرارت در نانوسیالات را کوچکتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند.

نانوسیال در سه غلظت مختلف (۰.۱٪، ۰.۱۵٪ و ۰.۲٪) مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۳ مقادیر عدد ناسلت را برای همه آزمایشات نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، عدد ناسلت نانوسیال با افزایش غلظت حجمی افزایش می‌یابد. اعداد ناسلت پیش‌بینی شده از رابطه گنیلینسکی [۱۳] نیز در شکل ۳ رسم شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، معادله گنیلینسکی اعداد ناسلت نانوسیال را کوچکتر از مقادیر تجربی پیش‌بینی می‌کند. نتایج تجربی بیان می‌کند که افزودن مقدار کمی نانوذرات به آب خالص، به‌روشنی موجب بهبود عملکرد انتقال حرارت می‌شود. این افزایش می‌تواند به‌علت بیشتر بودن ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در مقایسه با آب، در دمای یکسان باشد. همچنین افزایش غلظت نانوذرات تأثیر مستقیم روی افزایش انتقال حرارت دارد.

همان‌گونه که ویلیام^۲ و همکاران [۱۶] نیز پیشنهاد کرده‌اند، ضریب انتقال حرارت در جریان درهم را می‌توان با جایگذاری خواص نانوسیال در مدل‌های موجود (معادلات ۹-۱۲) پیش‌بینی کرد.

خواص فیزیکی مورد استفاده برای نانوسیال شامل دانسیته، ویسکوزیته، حرارت مخصوص و ضریب هدایت حرارتی از روابط زیر با توجه به خواص آب و ذرات نانو در دمای متوسط بالک تعیین می‌شوند [۱۱].

$$\rho_{nf} = \phi \rho_s + (1 - \phi) \rho_w, \quad (9)$$

که ϕ نسبت حجمی ذرات نانو، ρ_s دانسیته ذرات نانو و ρ_w دانسیته آب می‌باشد.

$$\mu_{nf} = \mu_w (1 + 2.5\phi). \quad (10)$$

در این رابطه، μ_w دانسیته آب بوده و رابطه بالا در غلظت کمتر از ۲٪ حجمی برای ذرات کروی قابل استفاده است.

$$Cp_{nf} = \frac{\phi(\rho_s Cp_s) + (1 - \phi)(\rho_w Cp_w)}{\rho_{nf}}. \quad (11)$$

در رابطه بالا، Cp_s گرمای مخصوص ذرات نانو و Cp_w گرمای مخصوص آب است. همچنین در غیاب داده‌های تجربی برای تعیین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از رابطه یو و چوی^۱ [۱۵] به‌شکل زیر استفاده می‌کنیم:

$$k = \left[\frac{k_p + 2k_{bf} + 2(k_p - k_{bf})(1 + \beta)^3 \phi}{k_p + 2k_{bf} - (k_p - k_{bf})(1 + \beta)^3 \phi} \right] k_{bf}. \quad (12)$$

در رابطه بالا، k_{bf} ضریب هدایت حرارتی آب و k_p ضریب هدایت حرارتی ذرات نانو می‌باشد. مطابق پیشنهاد یو و چوی [۱۵]، مقدار $\beta = 0.1$ قرار داده می‌شود.

۵- نتایج و بحث

به‌منظور تعیین درستی سیستم آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت، ابتدا آزمایشات برای آب مقطر به اجرا درآمد. نتایج این آزمایشات تحت شرایط مرزی شار حرارتی ثابت با روابط پیش‌بینی شده توسط گنیلینسکی [۱۳] و دیتوس-بولتر [۱۴] برای جریان درهم مقایسه شده است. شکل ۲ این مقایسه را نشان می‌دهد و بیان می‌کند که توافق خوبی بین نتایج تجربی و رابطه‌ی گنیلینسکی [۱۳] وجود دارد که بر صحت و اطمینان نتایج تأکید دارد. رابطه‌ی گنیلینسکی [۱۳] مقادیر ناسلت را بهتر از معادله دیتوس-بولتر پیش‌بینی می‌کند.

۶- افت فشار نانوسیالات

به منظور به کار بردن نانوسیال در کاربردهای صنعتی، افت فشار نانوسیال باید مورد بررسی قرار گیرد. برای ارزیابی صحت اندازه‌گیری‌های جریان سیال درون لوله، افت فشار اندازه‌گیری شده با مقادیر حاصل از روابط تئوری (برای آب مقطر) مقایسه می‌شود.

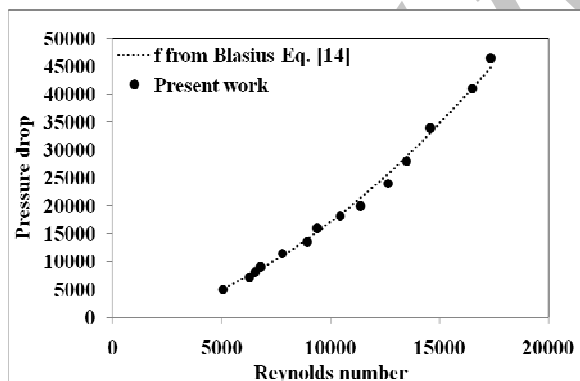
$$\Delta P = f \frac{L}{D} (\rho V^2 / 2), \quad (13)$$

که ضریب اصطکاک از رابطه بلازیوس به دست می‌آید:

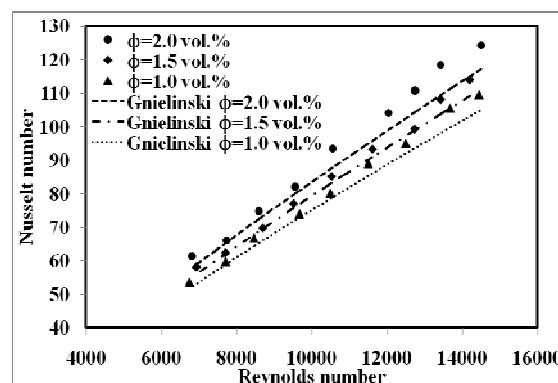
$$f = 0.316 Re^{-0.25}. \quad (14)$$

شکل ۵ افت فشار آب مقطر را به صورت تابعی از عدد رینولدز نشان می‌دهد. مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی افت فشار (برای آب مقطر) و پیش‌بینی‌های تجربی (با استفاده از معادله (۱۳))، در توافق خوبی با یکدیگر هستند.

در شکل ۶، مقدار پیش‌بینی شده‌ی افت فشار با مقادیر تجربی اندازه‌گیری شده (برای نانوسیال)، مقایسه شده است. افزودن نانوذرات به سیال مبنای در غلظت‌های پایین تأثیر قابل توجهی روی افت فشار برجا نمی‌گذارد. این نتیجه با نتایج ژوان و لی [۹، ۱۰] مطابقت دارد.

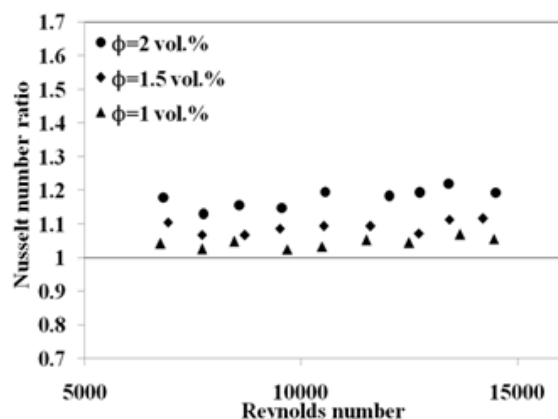


شکل (۵): مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده با رابطه بلازیوس برای افت فشار آب خالص درون لوله.



شکل (۳): مقایسه عدد ناسلت تجربی و روابط پیش‌بینی برای نانوسیال.

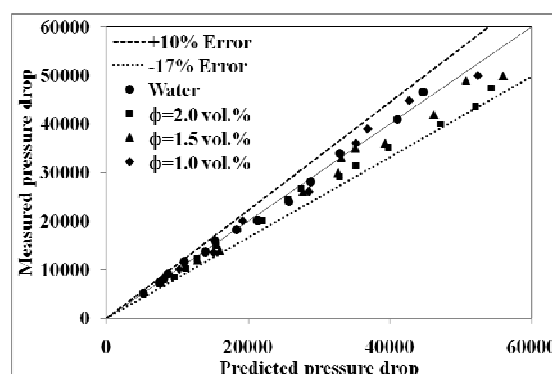
شکل ۴ نسبت عدد ناسلت نانوسیال به آب خالص را به صورت تابعی از عدد رینولدز نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، افزایش قابل توجه انتقال حرارت با تعلیق ذرات نانومتری Al_2O_3 در آب حاصل می‌شود. در آزمایشات انجام شده، نسبت Nu_{nf}/Nu_w برای غلظت ۲٪ نانوذرات آلومینا در آب در رینولدز ۱۳۵۰۰ برابر با ۱/۲۲ به دست آمد. این مقدار، بالاترین مقدار ثبت شده بهبود انتقال حرارت، در آزمایش طراحی شده است. همچنین، مطابق با ادعاهای پک و چو و ژوان و لی [۴، ۹ و ۱۰]، این نسبت مستقل از عدد رینولدز می‌باشد. در این تحقیق نیز دیده می‌شود که نسبت Nu_{nf}/Nu_w با افزایش عدد رینولدز تغییر چندانی نمی‌کند.



شکل (۴): نسبت افزایش عدد ناسلت (Nu_{nf}/Nu_w) در مقابل عدد رینولدز.

مراجع

1. Maxwell J.C. "A Treatise on Electricity and Magnetism", Clarendon Press, Oxford, 1873.
2. Choi, U.S. "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles", ASME FED, 231, PP. 99–103, 1995.
3. Masuda, H., Ebata, A., Teramae, K., and Hishinuma, N. "Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-fine Particles (Dispersion of Al₂O₃, SiO₂, and TiO₂ Ultra-fine Particles)", Netsu Bussei, Vol. 4, pp. 227, 1993.
4. Pak, B. and Cho, Y.I. "Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles", Experimental Heat Transfer, Vol. 11, No. 2, pp. 151–170, 1998.
5. Zeinali Heris, S., Nasr Esfahany, M., and Etemad, S.G. "Experimental Investigation of Convective Heat Transfer of Al₂O₃/Water Nanofluid in Circular Tube", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 28, No. 2, pp. 203–210, 2007.
6. Zeinali Heris, S., Etemad, S.G., and Esfahany, M.N. "Experimental Investigation of Oxide Nanofluids Laminar Flow Convective Heat Transfer", Int. Communication in Heat and Mass Transfer, Vol. 33, No. 4, pp. 529–535, 2006.
7. Nassan, T.H., Zeinali Heris, S., and Noie, S.H. "A Comparison of Experimental Heat Transfer Characteristics for Al₂O₃/Water and CuO/Water Nanofluids in Square Cross-section Duct", Int. Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 37, No.7, pp. 924–928, 2010.
8. Ding, Y., Alias, H., Wen, D., and Williams, R.A. "Heat Transfer of Aqueous Suspension of Carbon Nanotubes (CNT Nanofluids)", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 49, No.1-2, pp. 240, 2006.
9. Li, Q. and Xuan Y. "Experimental Investigation on Transport Properties of Nanofluids", Buxuan W. (ed.), Heat Transfer Sci. and Tech., Beijing: Higher Education Press, pp. 757–762, 2000.
10. Xuan, Y., Li, Q., and Hu, W. "Aggregation Structure and Thermal Conductivity of Nanofluids", AIChE J., Vol. 49, No. 4, pp.1038–1043, 2003.
11. Wen, D. and Ding, Y. "Experimental Investigation into Convective Heat Transfer of Nanofluids at the Entrance Region under Laminar Flow Conditions", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 47, No. 24, pp. 5181–5188, 2004.
12. Yang, Y., Zhang, Z.G., Grulke, E.A., Anderson, W.B., and Wu, G., "Heat Transfer Properties of Nanoparticle-in-Fluid Dispersions (Nanofluids) in Laminar Flow", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 48, No. 6, pp. 1107–16, 2005.



شکل (۶): مقایسه افت فشار اندازه‌گیری شده نانوسیال و مقادیر پیش‌بینی شده برای آب مقطر.

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال آلومینا-آب در داخل لوله‌ای به طول ۲ متر با شرط مرزی شار حرارتی ثابت در جداره در جریان درهم مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر غلظت ذرات روی انتقال حرارت جابه‌جایی و افت فشار در جریان درهم بوده است. داده‌های تجربی نشان داده‌اند که افزودن نانوذرات به سیال مبنا باعث افزایش ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت در جریان‌های درهم می‌شود. در حقیقت، درصد ذرات معلق عامل کلیدی برای افزایش انتقال حرارت می‌باشد. برای نانوسیال آلومینا/آب در غلظت ۲٪ حجمی، عدد ناسلت تا ۲۲٪ در رینولدز ۱۳۵۰۰ افزایش داشته است. مقایسه میان داده‌های تجربی به‌دست آمده از این تحقیق، با روابط موجود برای ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی و افت فشار نانوسیالات، نشان از صحت روش تجربی ارائه شده دارد. افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی تنها به‌دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال نسبت به سیال مبنا نبوده، بلکه عوامل دیگری همچون مهاجرت ذرات، حرکات براونی و بی‌نظم نانوذرات و نیز برخورد ذرات با یکدیگر در این مورد تأثیرگذار هستند که باید مد نظر قرار گیرند. تحقیقات تجربی بیشتری برای فهم مشخصه‌های انتقال حرارت و افت فشار در نانوسیالات متفاوت، ضروری است.

۸- تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت پژوهشکده فناوری‌های نوین دانشگاه صنعتی شاهرود انجام گرفته است.

15. 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, No.1-2, pp. 167–171, 2003.
16. Williams, W.C., Buongiorno, J., and 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", J. Heat Transfer, Vol. 130, No. 4, pp. 042412, 2008.
13. Gnielinski, V. "New Equations for Heat and Mass Transfer in Turbulent Pipe and Channel Flow", Int. Chemical Eng., Vol. 16, pp.359–368, 1976.
14. Incropera, F.P. and DeWitt, D.P. "Introduction to Heat Transfer", fourth ed. John Wiley & Sons, New York, pp. 459–463, 2002.

Archive of SID