



بررسی تجربی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال آلومینیم اکسید در یک لوله‌ی عمودی با شار حرارتی غیریکنواخت (سینوسی)

جواد رشید^۱، منصور طالبی*^۲، کمال حداد^۱، جمشید خورسندی^۲
۱. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، صندوق پستی: ۷۱۳۴۵-۱۵۸۵، شیراز - ایران
۲. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۱۵۸۹-۸۱۴۶۵، اصفهان - ایران

چکیده: مطالعه‌ی آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال Al_2O_3 / آب در یک لوله‌ی حلقوی عمودی با شار حرارتی غیریکنواخت (سینوسی) در ناحیه‌ی در حال توسعه‌ی جریان با قطر متوسط ۲۰ نانومتر انجام شد. هدف اولیه‌ی این پژوهش بررسی دمای سطح لوله‌ی داخلی (منبع گرمایی) بود. مشخص شد دما در نقطه‌ای بالاتر از وسط میله برای دماهای ورودی مختلف پیشینه می‌شود و دمای سطح میله برای نانوسیال کم‌تر از سیال پایه بود هر چند که نانوسیال بر مکان نقطه‌ی پیشینه‌ی سطح اثر خاصی نداشت. سپس ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و عدد ناسلت نانوسیال بررسی و مشخص شد که با افزایش غلظت حجمی و عدد رینولدز، هر دو افزایش می‌یابند. بیش‌ترین میزان افزایش انتقال حرارت (۱۹٪) برای غلظت ۱.۵٪ و عدد رینولدز حدود ۲۱۰۰ اتفاق افتاد. اثر دمای ورودی بر انتقال حرارت نانوسیال بررسی و افزایش ضریب انتقال حرارت با افزایش دمای ورودی مشاهده شد. از بررسی اثر فشار بر انتقال حرارت نانوسیال مشخص شد که فشار، اثر محسوسی بر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال ندارد. بررسی افت فشار نسبی نانوسیال نشان داد که با افزایش غلظت حجمی، افت فشار نسبی نانوسیال افزایش می‌یابد. هم‌چنین افت فشار نسبی نانوسیال به علت رسوب بیش‌تر، در سرعت‌های پایین، بیش‌تر بود و با افزایش عدد رینولدز کاهش یافت.

کلیدواژه‌ها: نانوسیال آلومینیم اکسید، شار حرارتی سینوسی، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، افت فشار

Experimental Investigation of Al_2O_3 Nanofluid Force Convection Heat Transfer Coefficient in Vertical Tube with Cosine Heat Flux

J. Rashid¹, M. Talebi*², K. Haddad¹, J. Khorsandi²

1. Department of Mechanical Engineering, Shiraz University, P.O.Box: 1585-71345, Shiraz – Iran
2. Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.Box: 81465-1589, Isfahan – Iran

Abstract: An experimental study for the convection heat transfer coefficient in a region of nanofluid containing Al_2O_3 oxide nanoparticles of 20 nanometer diameter in water as a base fluid through circular annular tube in the cosine thermal flux boundary condition was carried out. The primary purpose of this investigation was accomplished on the surface temperature of the heat source (inner pipe) determined at the maximum upper than the middle of pipe for the whole entry temperatures and surface temperature for nanofluid which was less than that of the base fluid. However, the nanofluid did not have any effect on the location point on the maximum temperature surface. Then, the convection heat transfer coefficient and Nusselt number were scrutinized showing that both of them increase by increasing of the volume fraction and Reynolds number. The maximum value of the heat transfer coefficient of nanofluid belongs to the volume fraction of 1.5% and the Reynolds number near 2100 which is 19%, compared to that of the base-fluid. The effect of entrance temperature and pressure of nanofluid on the heat transfer coefficient was also studied. The experimental data have shown that by increasing the entrance temperature, the heat transfer coefficient improves but the pressure has a negligible effect on heat transfer. The results demonstrated that the relative pressure drop of nanofluid increased remarkably by increasing the volume fraction. Furthermore, we observed that by decreasing the Reynolds number the pressure drop increased because of more sediment of nanoparticle at lower velocities.

Keywords: Al_2O_3 Nanofluid, Cosine Heat Flux, Convection Heat Transfer Coefficient, Pressure Drop

*email: mstalebi@aeoi.org.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۳/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۲/۶/۲۶



۱. مقدمه

حرارت از ۱٫۲۴ تا ۱٫۷۸ افزایش می‌یابد. مطالعه‌ی آزمایشگاهی هریس و همکاران [۷] بر روی ضریب انتقال حرارت نانوسیال‌های مختلف نشان داد که نانوسیال حاوی ذرات فلزی مس در مقایسه با ذرات Al_2O_3 و CuO بیش‌ترین میزان انتقال حرارت را دارد. مطالعه‌ی آزمایشگاهی فتوکیان و نصر اصفهانی [۸] بر روی نانوسیال رقیق حاوی CuO در یک جریان مغشوش، افزایش ضریب انتقال حرارت به میزان ۲۵٪ را نشان داد. هم‌چنین آن‌ها نشان دادند که بیش‌ترین افت فشار در سیال نانو ۲۰٪ از سیال خالص بیش‌تر است و افت فشار با غلظت حجمی ذرات جامد افزایش می‌یابد.

این مقاله اثر نانوسیال آلومینیم اکسید بر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری در یک لوله‌ی عمودی با شار حرارتی نایکنواخت، و تغییرات خواص جریان انتقال حرارت به واسطه‌ی وجود نانوسیال را گزارش می‌کند.

۲. معادله‌های حاکم بر نانوسیال

چگالی نانوسیال می‌تواند چنین به دست آید [۹]

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_1 + \phi\rho_p \quad (1)$$

بر اساس مدل تعادل گرمایی، گرمای ویژه‌ی نانوسیال‌ها چنین به دست می‌آید [۱۰]

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_1 + \phi(\rho C_p)_p \quad (2)$$

یکی از معروف‌ترین رابطه‌های ارایه شده برای تعیین گرانروی سوسپانسیون‌های حاوی ذرات میلی‌متری و میکرومتری، رابطه‌ی انیشتین (۱۹۲۴) است که چنین نوشته می‌شود [۹، ۱۰، ۱۱]

$$\mu = \mu_1(1 + 2.5\phi) \quad (3)$$

برای ضریب انتقال حرارت نانوسیال با در نظر گرفتن حرکت براونی و قطر متوسط نانوذرات، رابطه زیر استفاده می‌شود [۱۲]

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = 1 + 64.7 * \phi^{0.766} \left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{1.369} \left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{0.766} \text{Pr}^{0.9955} \text{Re}^{1.2321} \quad (4)$$

افزایش انتقال حرارت همواره یکی از مسایل مهم و مورد بحث در صنعت بوده است. این افزایش در بسیاری از پدیده‌های انتقال حرارت مثل تراشه‌های الکترونیکی، سامانه‌های لیزری، نیروگاه‌های هسته‌ای، فضاپیماها، دستگاه‌های تهویه مطبوع، ریخته‌گری و سایر تجهیزات صنعتی کاربرد دارد. در نیروگاه‌های هسته‌ای با توجه به نحوه‌ی تولید حرارت و شرایط مرزی خاص حاکم بر میله‌های سوخت، شار حرارتی تولیدی تابع شار نوترون و از این‌رو تابعی نایکنواخت و سینوسی است. جریان سیال نقش بسیار مهمی در زمینه‌ی تبادل گرما در سرمایش یا گرمایش ایفا می‌کند. در دهه‌های اخیر با پیشرفت فن‌آوری، روش‌های جدید و مؤثرتری مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. یکی از این روش‌ها، استفاده از ذرات فلزی یا اکسیدهای آن‌ها است که دارای خواص حرارتی بسیار خوبی هستند. می‌توان با اضافه نمودن این ذرات جامد به سیال‌ها، خواص انتقال حرارتی آن‌ها را بهبود بخشید. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که مخلوط غوطه‌ور شده‌ی یک فلز یا اکسید آن، ضریب انتقال حرارت بیش‌تری نسبت به سیال پایه دارد [۱]. ماسودا نشان داد که ضریب انتقال حرارت نانوسیال با ۴٫۳ درصد حجمی ذرات Al_2O_3 به قطر ۱۳ نانومتر تا ۳۰٪ افزایش می‌یابد [۲]. مرشد و همکاران [۳] قابلیت انتقال حرارت نانوسیال آب یونیده شده-تیتانیم اکسید با ذرات کروی به قطر ۱۵ نانومتر و ذرات لوله‌ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۴۰ نانومتر را اندازه‌گیری کردند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که قابلیت انتقال حرارت سیال پایه با افزودن نانوذرات افزایش می‌یابد و برای غلظت حجمی ۵ درصد، قابلیت انتقال حرارت نانوسیال حاوی ذرات لوله‌ای و کروی، افزایشی، به ترتیب برابر با ۳۳٪ و ۳۰٪ نسبت به سیال پایه دارد. مطالعه‌ی یو و همکاران [۴] بر روی انتقال حرارت اتیلن گلیکول حاوی نانوذرات مس نشان داد که در غلظت حجمی ۵ درصد، ۴۶٪ بهبودی در ضریب انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه حاصل می‌شود. پژوهش‌های چو و همکاران [۵] نشان داد که ضریب انتقال حرارت نانوسیال با دما افزایش می‌یابد. یکی از عامل‌های مهم افزایش ضریب انتقال حرارت نانوسیال حرکت‌های کاتوره‌ای نانوذرات است. در زمینه‌ی انتقال حرارت به روش جابه‌جایی در نانوسیال‌ها، آزمایش‌های متعددی توسط افراد مختلف طراحی و اجرا شده است. مطالعه‌های ژان و لی [۶] نشان داد که با افزایش غلظت نانوذرات مس محلول آب/Cu از ۲٫۵ تا ۷٫۵٪، ضریب انتقال



که در آن، N_{TC} تعداد ترموکوپل‌ها و Δx_k فواصل بین ترموکوپل‌ها است.

که در آن، پارامترهای بدون بعد Re (رینولدز) و Pr (پرانتل) چنین تعریف می‌شوند

$$Pr = \frac{\mu_f}{\rho_f \alpha_f} \quad (5)$$

$$Re = \frac{\rho_f K_b T}{\mu \pi L_{bf}} \quad (6)$$

$$\mu = A \times 10^{\left(\frac{B}{T-C}\right)} \quad (7)$$

$$A = 2.414 \times 10^{-5} (Pa.s), \quad C = 140 K, \quad B = 247 K, \quad K_b = 1.3807 \times 10^{-23} \left(\frac{J}{K}\right)$$

۳. دستگاه آزمایش

۱.۳ کلیات

برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت نانوسیال، یک زنجیره‌ی واکنشی تحت فشار (۲۵ بار) طراحی و ساخته شد. این زنجیره شامل تجهیزهای مکانیکی (پمپ، مبدل حرارتی، گرم‌کن‌ها، لوله‌کشی و برج خنک‌کن) و تجهیزهای برقی و الکتریکی بود. فشار زنجیره، توسط یک تنظیم‌گر فشار و با تزریق گاز نیتروژن تأمین و تنظیم شد. بر روی دستگاه، ۱۸ عدد ترموکوپل نوع k نصب شد که دو تا از آن‌ها در ورودی و خروجی جریان و بقیه بر روی سطح (در ۸ مکان، در هر مکان دو ترموکوپل در دو طرف راست و چپ سطح برای افزایش دقت دمای سطح) در ۰/۸۱، ۰/۷۱، ۰/۶۱، ۰/۵۱، ۰/۴۱، ۰/۳۱، ۰/۲۱، ۰/۱۱، ۰/۰۱ نصب شد. همچنین ۵ فشارسنج در قسمت‌های مختلف دستگاه برای اندازه‌گیری فشار تعبیه شد. در شکل ۱ مدار کامل زنجیره‌ی واکنشی و همچنین کانال آزمایش به همراه ترموکوپل‌های نصب شده در طول آن نشان داده شده است.

۱.۲ محاسبه‌ی شار متوسط

با توجه به توان حرارتی کل انتقال یافته‌ی برابر ۱۰۰۰ وات از گرم‌کن به سیال، شار متوسط چنین محاسبه می‌شود

$$q_h'' = \frac{1000}{\pi(0.033)^2 * 1} = 9648 \quad (8)$$

۲.۲ شار سینوسی

$$q_h'' = 4824\pi \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \quad 0 \leq x \leq l \quad (9)$$

۲.۳ سازوکار تولید شار سینوسی

سازوکار تولید شار سینوسی مهم‌ترین بخش دستگاه آزمایش است. میله‌ی قرار گرفته در داخل محفظه‌ی آزمایش از سه قسمت اصلی تشکیل شده است. قسمت اول، لوله‌ی داخلی میله است که از جنس سرامیک بوده و دارای قطر و طول، به ترتیب، ۲۵ و ۱۰۰۰ میلی‌متر است. بر روی این لوله شیارهایی برای قرار دادن سیم‌المنت با طول گام‌های مختلف برای تولید شار سینوسی تراشیده شده است. المنتی که در این شیارها قرار می‌گیرد قسمت دوم میله را تشکیل می‌دهد که با عبور جریان الکتریسیته از آن شار حرارتی تولید می‌شود. المنت از جنس $CrAl$ ۳۰۵ است. طول المنت، ۴۳۰۰ میلی‌متر و قطر آن ۰/۶ میلی‌متر است. فاصله‌ی مابین سیم‌المنت (سطح خارجی لوله‌ی داخلی) و سطح داخلی میله از پودر منیزیم سولفات مخلوط شده با یک مایع مخصوص، که از نظر الکتریکی نارسانا است، پر شده است. نقشه‌ی لوله‌ی داخلی در شکل ۲ آورده شده است.

با محاسبه‌ی شار میانگین در فاصله‌ی بین دو ترموکوپل، دمای توده‌ی سیال در مکان نصب هر ترموکوپل چنین به دست می‌آید

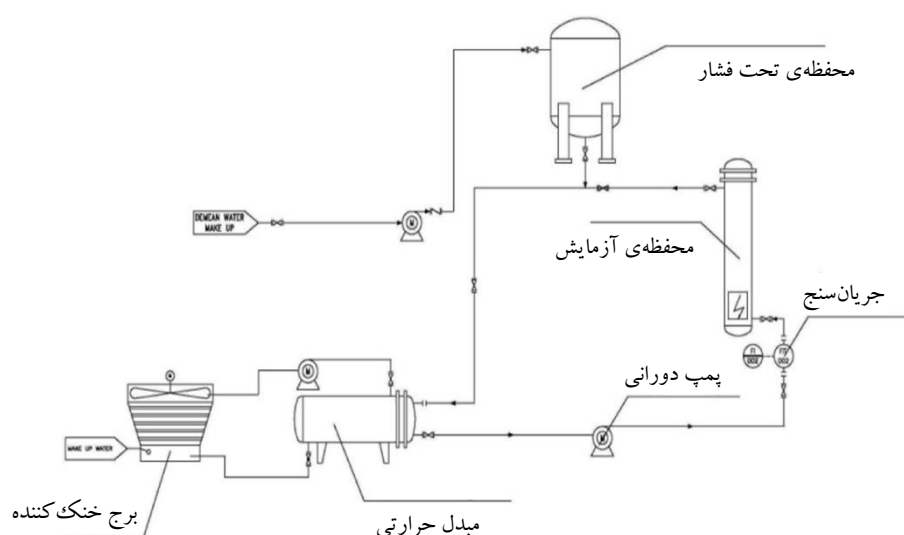
$$Q^x = m.C_p(T_b^x - T_i) \quad (10)$$

که در آن، Q^x گرمای منتقل شده به سیال از ابتدای لوله تا محل ترموکوپل (نقطه‌ی x) و T_b^x دمای توده‌ی سیال نظیر نقطه‌ی x است.

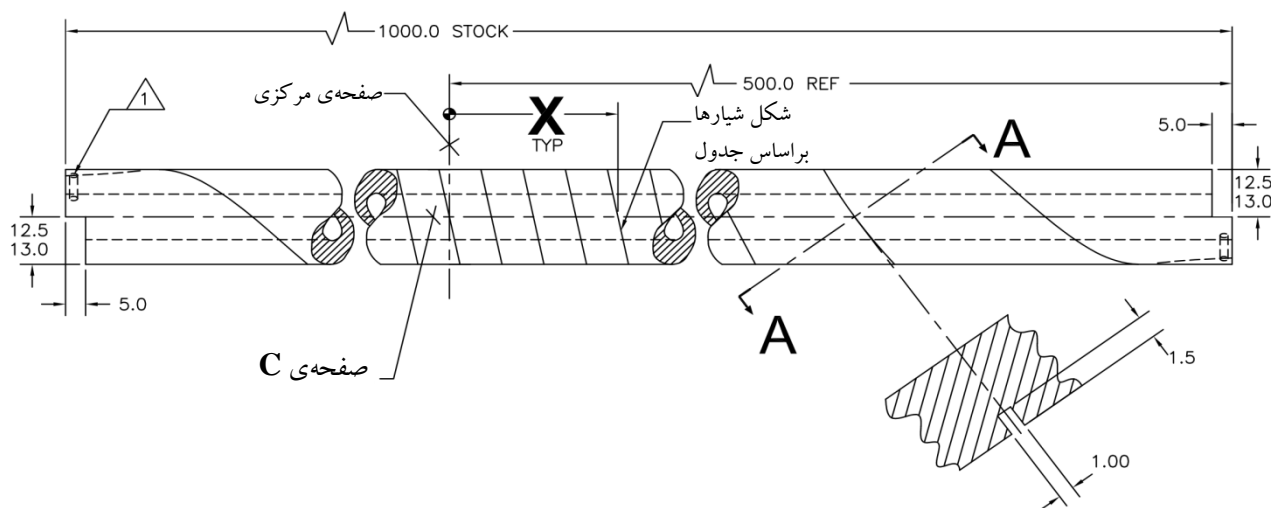
حرارت موضعی متوسط در هر بازه از رابطه‌ی (۱۰) به دست می‌آید و در نهایت، ضریب انتقال حرارت متوسط چنین محاسبه می‌شود

$$h = \frac{q''}{T_s - T_b} \quad (11)$$

$$\bar{h} = \frac{1}{L} \int h dx = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^{N_{TC}} h_k \Delta x_k \quad (12)$$



شکل ۱. تصویر کانال آزمایش (راست)، مدار کامل و دیگر تجهیزهای زنجیره‌ی واکنشی تحت فشار (چپ).



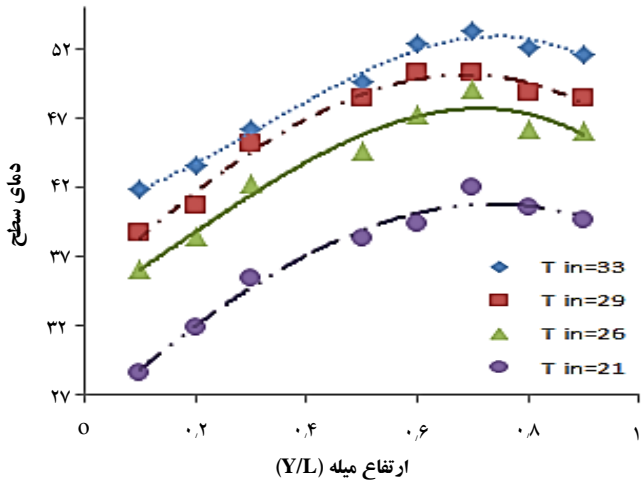
شکل ۲. نقشه‌ی لوله‌ی داخلی میله و سیم قرار گرفته در آن.

۴. انجام آزمایش و نتایج

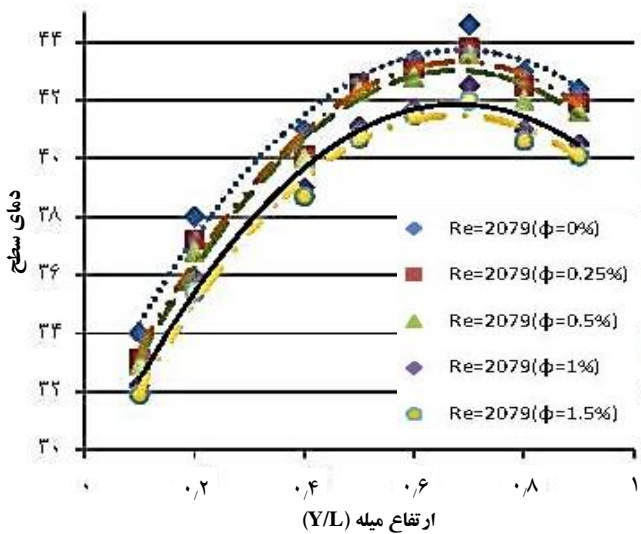
در این مطالعه، جریان در بین دو لوله‌ی هم محور بررسی شد؛

در لوله‌ی داخلی به قطر D_i ، برای تولید شار متغیر (شار سینوسی) یک المنت حرارتی قرار داشت. از لوله‌ی خارجی به قطر D_o نانوسیال از پایین به بالا عبور داده می‌شد. با مجموعه‌ای که ساخته شد، اثر نانوذرات Al_2O_3 بر ضریب انتقال حرارت چنین مطالعه شد - ابتدا ضریب انتقال حرارت اجباری برای آب خالص محاسبه شد. سپس با تزریق نانوسیال به مجموعه، ضریب انتقال حرارت برای غلظت‌های حجمی مختلف نانوسیال Al_2O_3 / آب محاسبه و با آب خالص مقایسه شد.

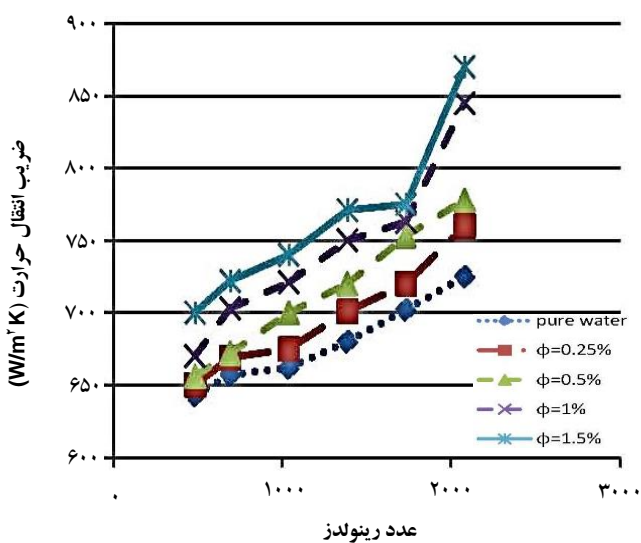
برای تولید نانوسیال، ذرات Al_2O_3 به قطر ۲۰ نانومتر، ساخت یک شرکت آمریکایی^(۱)، به آب مقطر به عنوان سیال پایه اضافه شد. تولید نانوسیال، بدون استفاده از فعال‌کننده‌ی سطحی و تنها با استفاده از دستگاه هم‌زن فراآوایی مدل پارسونیک ۳۰۱ انجام شد زیرا فعال‌کننده ممکن بود انتقال حرارت را تحت تأثیر قرار دهد. از آن‌جا که کار فراتر از مقیاس آزمایشگاهی و در یک مقیاس تقریباً نیمه صنعتی انجام می‌شد و به دلیل بزرگ بودن حجم آب، که تقریباً نزدیک به ۳۰ لیتر بود، برای بررسی اثر غلظت و سرعت جریان، نانوسیال با غلظت‌های حجمی ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۱ و ۱/۵٪ تهیه شد.



شکل ۳. دمای سطح میله بر حسب ارتفاع میله در رینولدز ۲۰۷۹ برای آب مقطر.



شکل ۴. تغییرات دمای سطح میله با ارتفاع میله برای نانوسیال با غلظت‌های متفاوت.



شکل ۵. رابطه بین ضریب انتقال حرارت نانوسیال و عدد رینولدز در غلظت‌های مختلف.

- در ادامه، نانوسیال با نرخ جریان‌های مختلف آزمایش و ضریب انتقال حرارت در نقاط مختلف و افت فشار در مسیر جریان، اندازه‌گیری و با سیال پایه مقایسه شد.

۱.۴ بررسی دمای سطح لوله برای نانوسیال و سیال پایه

برای انجام آزمایش‌های نانوسیال و مقایسه‌ی آن با سیال پایه، ابتدا آزمایش‌ها با آب مقطر خالص انجام شد. در شکل ۳ تغییرات دمای سطح میله، بر حسب ارتفاع میله برای دماهای ورودی مختلف رسم شده است.

از آن‌جا که شار به صورت سینوسی است، انتظار می‌رود که حداکثر دما در نقطه‌ای بالاتر از وسط میله رخ دهد؛ نتایج حاصل از اندازه‌گیری در شکل ۳ مؤید این مطلب است. دمای بیشینه در نقطه‌ی Y/L برابر ۰.۷ مشاهده شد. مشاهده می‌شود که قله‌ی منحنی برای دماهای ورودی مختلف، تغییر چندانی نداشته و مکان دمای بیشینه‌ی سطح میله مستقل از دمای ورودی سیال است. در شکل ۴ تغییرات دمای سطح میله با ارتفاع میله برای نانوسیال و سیال پایه رسم شده است.

تغییرات دمای سطح میله برای سیال و نانوسیال تقریباً یکسان، ولی دمای سطح میله برای نانوسیال نسبت به سیال پایه کم‌تر است و از آن‌جا که شار حرارتی لوله ثابت است این کاهش ناشی از انتقال حرارت بهتر نانوسیال نسبت به سیال پایه است. هم‌چنین با افزایش غلظت نانوذرات، کاهش دمای سطح لوله بیش‌تر می‌شود که ناشی از افزایش انتقال حرارت در غلظت‌های بالاتر است. بر پایه‌ی نتایج، بیشینه دمای سطح مستقل از نانوذرات است.

۲.۴ بررسی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال

ضریب انتقال حرارت ($W/m^2 K$) جریان آرام نانوسیال بر حسب رینولدز در غلظت‌های مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. این ضریب با افزایش عدد رینولدز و غلظت نانوذره افزایش می‌یابد البته شیب تغییرات در غلظت و سرعت‌های بالا بیش‌تر است. با افزایش عدد رینولدز از حدود ۴۰۰ به ۲۰۰۰ ضریب‌های انتقال حرارت سیال پایه و نانوسیال دچار تغییرات چشم‌گیری می‌شود. با توجه به این که ضریب انتقال حرارت با عدد رینولدز و پراتنل نسبت مستقیم دارد، افزایش ضریب انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز غیرمنتظره نیست.

۳.۴ عدد ناسلت نانوسیال

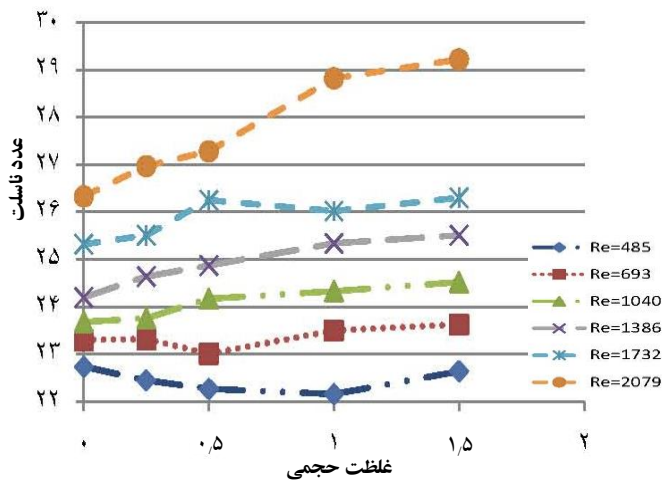
عدد ناسلت نانوسیال برحسب غلظت در عدد رینولدزهای مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. از این شکل مشاهده می‌شود که به طور کلی، عدد ناسلت با افزایش غلظت نانوذرات و عدد رینولدز افزایش می‌یابد ولی با شبیهی متفاوت. حتی در برخی از شرایط (نظیر رینولدز ۴۸۵) کاهش عدد ناسلت با وجود افزایش ناچیز انتقال حرارت مشاهده می‌شود که ناشی از افزایش بیش‌تر ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت حجمی در مقایسه با افزایش انتقال حرارت است. بنابراین با افزایش غلظت و سرعت، عدد ناسلت نیز افزایش می‌یابد.

۴.۴ بررسی ضریب انتقال حرارت نسبی نانوسیال

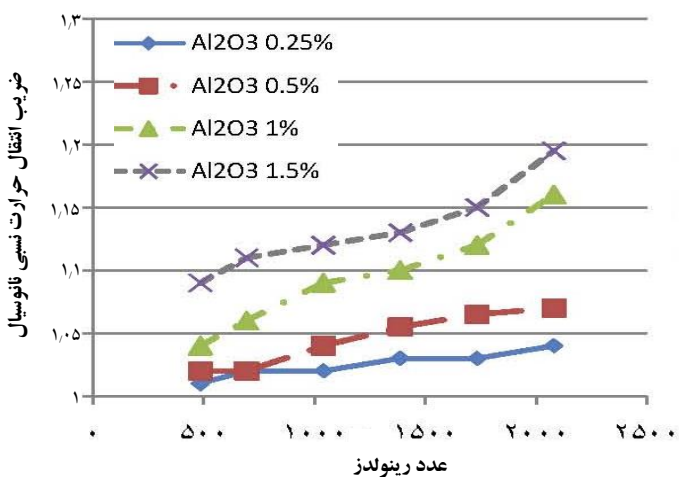
شکل ۷ تغییرات ضریب انتقال حرارت نسبی نانوسیال با عدد رینولدز را در غلظت‌های مختلف نشان می‌دهد. با افزایش عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت نسبی افزایش می‌یابد؛ البته این افزایش در غلظت‌های مختلف متفاوت است. به عنوان مثال برای غلظت ۰٫۲۵٪، با افزایش عدد رینولدز از ۴۸۶ به ۲۰۷۰ تنها ۳ درصد بهبودی مشاهده می‌شود در حالی که در غلظت ۰٫۵٪، ۵ درصد بهبودی و در غلظت ۱٪ حجمی، شاهد ۱۲ درصد بهبودی هستیم.

۵.۴ اثر دما بر ضریب انتقال حرارت نانوسیال

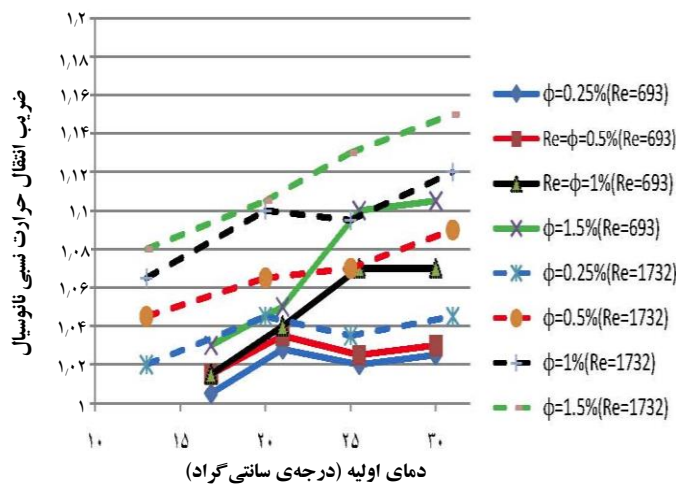
ضریب انتقال حرارت نسبی نانوسیال در گستره‌ی دمایی ۱۳ تا ۳۱ درجه، در دو عدد رینولدز ۶۹۳ و ۱۷۹۳ و غلظت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است. افزایش غلظت در تمام دماهای ورودی، افزایش انتقال حرارت را به دنبال داشت، ولی این افزایش، تحت تأثیر غلظت و سرعت جریان قرار دارد. به عنوان مثال تغییر دمای ورودی از ۱۶ درجه تا ۳۰ درجه در رینولدز ۶۹۳ و غلظت ۰٫۲۵٪ افزایش ۱٫۵ درصدی انتقال حرارت را به دنبال داشت در حالی که برای همین گستره‌ی دمایی در همین عدد رینولدز، ولی در غلظت ۱٫۵ درصد ۷ درصد افزایش مشاهده شد، در حالی که درصد افزایش انتقال حرارت در عدد رینولدز ۱۷۳۲، در گستره‌ی دمایی ۱۳ تا ۳۱ درجه و در غلظت ۰٫۲۵٪، ۲٫۵ و در غلظت ۱٫۵ درصد ۹ بود. دلایل متعددی برای افزایش انتقال حرارت نانوسیال با افزایش دما وجود دارد. افزایش ضریب انتقال حرارت نانوسیال با افزایش دما [۱۳، ۱۴، ۱۵] یکی از مهم‌ترین آن‌ها است. به عنوان مثال، افزایش دما از ۲۰ تا ۳۵ درجه در غلظت حجمی ۰٫۲۵٪، باعث افزایش ۳ درصد در ضریب انتقال حرارت نانوسیال می‌شود در حالی که در همین محدوده‌ی دمایی



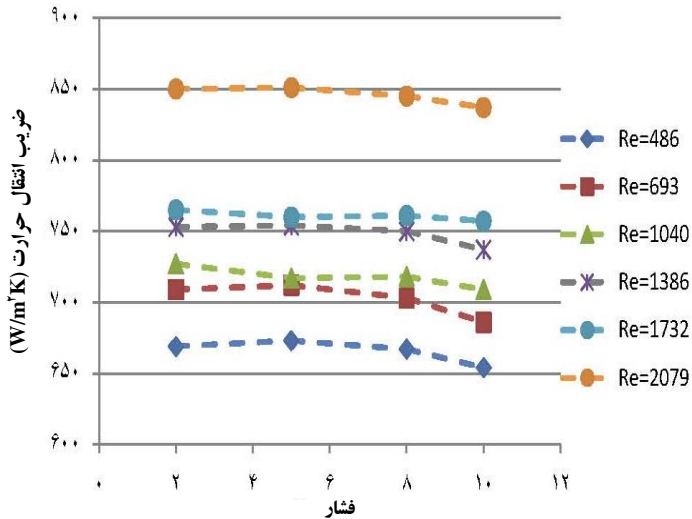
شکل ۶. رابطه بین عدد ناسلت و غلظت حجمی نانوسیال در عدد رینولدزهای مختلف.



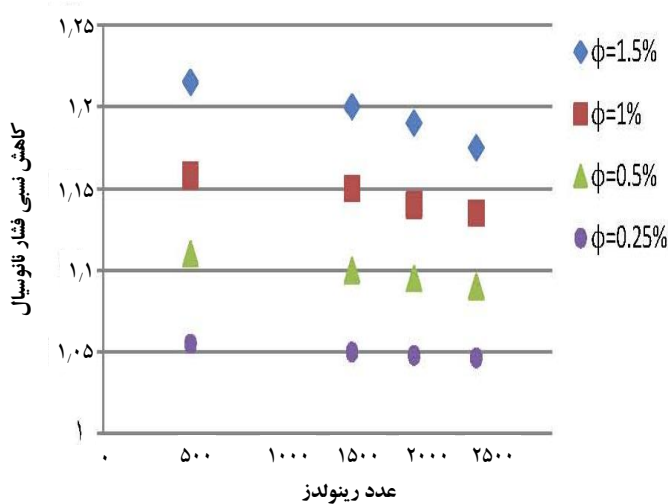
شکل ۷. رابطه بین ضریب انتقال حرارت نسبی نانوسیال و عدد رینولدز در غلظت‌های مختلف.



شکل ۸. تغییرات ضریب انتقال حرارت نسبی نانوسیال با دمای ورودی، در دو عدد رینولدز ۱۷۹۳ و ۶۹۳ و غلظت‌های مختلف.



شکل ۹. تغییرات ضریب انتقال حرارت نانوسیال با فشار در غلظت حجمی ۱٪ و در رینولدزهای مختلف.



شکل ۱۰. اثر غلظت بر کاهش فشار نانوسیال.

۸.۴ بررسی نتایج حاصل از روابط موجود برای توزیع دما

هرچند که شرایط کار حاضر دقیقاً مشابه رابطه‌های موجود در مرجع‌ها نیست، برای ارزیابی، ولی در این قسمت نتایج حاصل از رابطه‌های موجود در مرجع [۱۹] ارایه می‌شود. برای توزیع دما بر روی غلاف میله‌ی سوختی که تحت شار حرارتی کسینوسی قرار دارد، این رابطه ارایه شده است

$$t_c(Z) = t_{r1} + q_c''' A_c \left[\frac{H_e}{\mu C_p \dot{m}} \left(\sin \frac{\pi Z}{H_e} + \sin \frac{\pi H}{\nu H_e} \right) + \frac{1}{hC} \cos \frac{\pi Z}{H_e} \right] \quad (13)$$

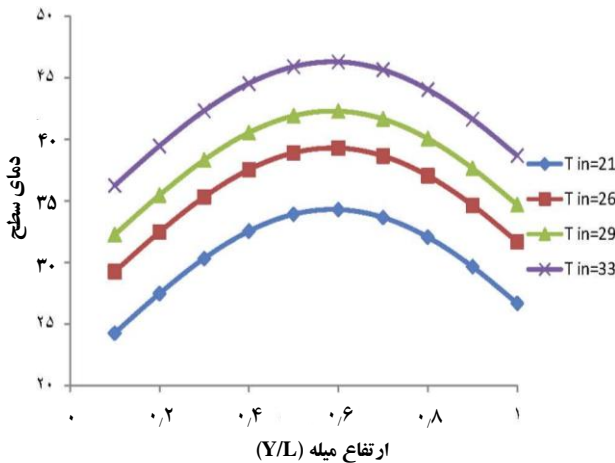
و در غلظت ۱/۵٪، ۶/۵ درصد افزایش در ضریب انتقال حرارت مشاهده می‌شود، به همین علت افزایش انتقال حرارت در محدوده‌ی دمایی ذکر شده در شکل ۴ در غلظت ۱/۵٪ بیش‌تر از غلظت ۰/۲۵٪ است. از جمله‌ی دیگر دلایل افزایش انتقال حرارت با افزایش دما ورودی، افزایش بیش‌تر اغتشاش در درون نانوسیال با افزایش دما است به گونه‌ای که با افزایش دمای ورودی، حرکت‌های کاتوره‌ای (حرکت براونی) نانوذرات در داخل سیال افزایش یافته و اغتشاش بیش‌تری در درون سیستم ایجاد می‌شود که این عامل انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد.

۶.۴ اثر فشار بر ضریب انتقال حرارت نانوسیال

اثر فشار بر ضریب انتقال حرارت نانوسیال در غلظت حجمی ۱٪ و در رینولدزهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در شکل ۹ داده شده است. آزمایش‌ها در چهار فشار ۲، ۵، ۸ و ۱۰ بار انجام شدند. همان‌طور که از شکل ۹ پیدا است با افزایش فشار تا ۸ بار اثر محسوسی بر ضریب انتقال حرارت نانوسیال مشاهده نشد ولی در فشار ۱۰ بار کاهش جزئی در ضریب انتقال حرارت مشاهده شد. بیش‌ترین میزان کاهش در غلظت حجمی حدود ۲٪ و در رینولدز ۴۸۶ بود هر چند که با افزایش رینولدز میزان کاهش نیز به سمت صفر درصد میل کرد. به نظر می‌رسد با افزایش فشار سیستم، ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد چرا که احتمال انباشته شدن نانوذرات بیش‌تر می‌شود هر چند که در این پژوهش تا فشار ۱۰ بار، میزان انباشت نانوذرات چندان چشم‌گیر نبود.

۷.۴ اثر غلظت بر کاهش فشار نانوسیال

در شکل ۱۰ اثر غلظت بر کاهش نسبی فشار در رینولدزهای مختلف نشان داده شده است. کاهش فشار نانوسیال با کاهش فشار در کسر حجمی ۱٪ بی‌بعد شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت نانوذرات، کاهش فشار سیستم افزایش یافته است. دلیل این امر، افزایش گرانروی نانوسیال با افزایش غلظت آن است [۱۶، ۱۷، ۱۸]. هر چند که در یک غلظت مشخص با افزایش عدد رینولدز، کاهش فشار به دلیل اغتشاش بیش‌تر افزایش می‌یابد ولی کاهش فشار نسبی با افزایش رینولدز کاهش می‌یابد. به دلیل بالا بودن احتمال رسوب نانوذرات در مجاری عبوری سیال در رینولدزهای کم، کاهش فشار نسبی هم بیش‌تر است. البته شیب این کاهش در غلظت‌های بالا که تعداد ذرات بیش‌تر است قدری بزرگ‌تر از غلظت‌های کم است که تأییدی دوباره بر احتمال رسوب ذرات در مجاری عبوری نانوسیال است.



شکل ۱۱. توزیع دمای سطح محاسبه شده با استفاده از رابطه‌های مرجع [۱۹].

در نتیجه، قله‌ی دما برای مسئله‌ی بالا، که با فرض ثابت بودن ضریب انتقال حرارت حل شد، بالاتر از مرکز قرار دارد. با مقایسه‌ی نتایج شکل ۱۱ با شکل ۳ ملاحظه می‌شود که نحوه‌ی تغییرات دما و محل دمای بیشینه محاسبه شده از رابطه‌های مرجع [۱۹] مشابه نتایج تجربی است. البته اختلاف موجود می‌تواند به دلیل فرض ثابت بودن ضریب انتقال حرارت باشد.

۵. نتیجه‌گیری

آزمایش‌ها در ۴ غلظت حجمی ۰٫۲۵، ۰٫۵، ۱ و ۱٫۵ درصد در رینولدزهای مختلف در جریان آرام انجام شدند. مشخص شد که برای یک شار سینوسی، دمای سطح نیز تقریباً سینوسی است و در نقطه‌ی نزدیک به $Y/L=0.7$ ، به بیشینه مقدار خود می‌رسد. هم‌چنین مشخص شد که نانوسیال اثری بر مکان دمای بیشینه سطح ندارد ولی دمای سطح را به علت بهبودی انتقال حرارت کاهش می‌دهد. علاوه بر این، مشاهده شد که ضریب انتقال حرارت نانوسیال و عدد ناسلت با افزایش غلظت افزایش می‌یابند هر چند که میزان افزایش عدد ناسلت به علت افزایش ضریب انتقال حرارت نانوسیال دارای شیب کم‌تری است. از جمله دلایل افزایش این پارامترها، می‌توان بهبودی ضریب انتقال حرارت سیال، ایجاد اغتشاش بیش‌تر در سیستم را عنوان کرد. اثر دمای ورودی نانوسیال بر ضریب انتقال حرارت بررسی و مشاهده شد که افزایش دمای ورودی نانوسیال، باعث بهبودی ضریب انتقال حرارت می‌شود دلیل این امر را می‌توان بهبودی ضریب انتقال حرارت نانوسیال با افزایش دما و هم‌چنین افزایش سرعت براونی نانوذره دانست. مشاهده شد که فشار، اثر خاصی بر ضریب انتقال حرارت نانوسیال ندارد و تنها در فشارهای بالا، اندکی کاهش در ضریب انتقال حرارت مشاهده شد. کاهش فشار در سیستم به علت افزایش گرانروی نانوسیال و

که در آن، t_c دمای غلاف، t_{f1} دمای ورودی سیال، q_c''' قدرت چشمه‌ی حرارتی در مرکز میله، A_c سطح مقطع یک عنصر سوخت، H_e گام نمایه‌ی چشمه‌ی حرارتی، C_p گرمای ویژه‌ی سیال، \dot{m} نرخ جریان جرمی، H ارتفاع میله، h ضریب انتقال حرارت بین غلاف و سیال خنک‌کننده و C محیط میله‌ی سوخت است. در رابطه‌ی (۱۳) ضریب انتقال حرارت ثابت است و هم‌چنین $H_e=H$ که در این صورت معادله‌ی (۱۳) چنین ساده می‌شود

$$t_c(z) = t_{f1} + q_c''' A_c \left[\frac{H}{\pi C_p \dot{m}} \left(\sin \frac{\pi z}{H} + 1 \right) + \frac{1}{hC} \cos \frac{\pi z}{H} \right] \quad (14)$$

ضریب انتقال حرارت برای عدد رینولدزهای مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. طول قسمت حرارتی محافظه‌ی آزمایش برابر ۱ متر است. هم‌چنین با استفاده از عدد رینولدز، نرخ جریان جرمی به دست می‌آید. با توجه به این که توان حرارتی کل انتقال یافته برابر ۱۰۰۰ وات است و با توجه به کسینوسی بودن چشمه‌ی حرارتی، با انتگرال‌گیری از نمایه‌ی توان، مقدار قدرت چشمه‌ی حرارتی در مرکز میله به دست می‌آید

$$q_c''' = \frac{q_{tot} \times \pi}{2 \times H \times A_c} = \frac{1000 [\text{watt}] \times \pi}{2 \times 1 [\text{m}] \times 1.55 \times 10^{-2} [\text{m}^2]} \quad (15)$$

با جای‌گذاری q_c''' از رابطه‌ی (۱۵) در رابطه‌ی (۱۴)، رابطه‌ی نهایی دمای غلاف چنین به دست می‌آید

$$t_c(z) = t_{f1} + 1570.8 \left[\frac{\text{watt}}{\text{m}} \right] \times \left[\frac{1 [\text{m}]}{\pi \times 420 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right] \times 0.4 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]} \left(1 + \sin \frac{\pi z}{H} \right) + \frac{1}{725 \left[\frac{\text{watt}}{\text{m}^\circ\text{C}} \right] \times 0.104 [\text{m}]} \cos \frac{\pi z}{H} \right] \quad (16)$$

در شکل ۱۱ برای دماهای ورودی مختلف و برای عدد رینولدز ۲۰۷۹ نمودار دمای غلاف طبق رابطه‌ی (۱۶) رسم شده است هم‌چنین می‌توان با مشتق‌گیری از رابطه‌ی بالا موقعیت قله‌ی دما (فاصله از مرکز میله) را به دست آورد

$$z_c = \frac{H_e}{\pi} \tan^{-1} \frac{hCH_e}{\pi C_p \dot{m}} \quad (17)$$

در نتیجه برای مسئله‌ی بالا داریم

$$z_c = \frac{1 [\text{m}]}{\pi} \tan^{-1} \frac{725 \left[\frac{\text{watt}}{\text{m}^\circ\text{C}} \right] \times 0.104 [\text{m}] \times 1 [\text{m}]}{\pi \times 420 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right] \times 0.4 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]} = 0.073 \quad (18)$$



هم‌چنین برخورد ذرات به دیواره‌ی لوله نسبت به سیال پایه بیش‌تر است. که می‌توان آن را ناشی از خطاهای اندازه‌گیری و هم‌چنین فرض ثابت بودن مقدار ضریب انتقال حرارت دانست. البته روند تغییرات

دما در هر دو حالت مشابه است. هم‌چنین ملاحظه شد که نتایج حاصل از رابطه‌های مرجع [۱۹]

با نتایج تجربی به دست آمده تطابق خوبی دارد. به عنوان مثال در عدد رینولدز ۲۰۷۹ توزیع دمای سطح در طول میله حدود ۱۵ درصد بیش‌تر از نتایج به دست آمده از رابطه‌های مرجع [۱۹] بود. نتایج حاصل، در بررسی رفتار نانوسیال در قلب رآکتورهای هسته‌ای و هم‌چنین اصلاح کدهای کاربردی در زمینه‌ی ترموهیدرولیک رآکتور کاربرد خواهد داشت.

علامت‌گذاری‌ها

علائم		زیرنویس‌ها		علائم یونانی	
Cp(J/kg.K)	گرمای ویژه	nf	نانوسیال	$\rho(\text{kg/m}^3)$	چگالی
K(W/m.K)	ضریب انتقال حرارت	l	سیال پایه	$\mu(\text{n.s/m}^2)$	گران‌روی
$q'(W/m^2.K)$	شار حرارتی	P	نانوذره	α	ضریب پخش حرارتی
Q(W)	گرمای منتقل شده	in	ورودی	γ	شبکه‌ی بلوری آلومینیم
T(k)	دما	Eff	مؤثر	ϕ	غلظت حجمی
P(pa)	فشار	i	داخلی		
D(m)	قطر لوله	o	خارجی		
d	قطر ذرات	b	توده‌ی سیال		
Nu	ناسلت				
L(m)	طول				

پی‌نوشت

۱. US Research Nanomaterials, Inc



1. A.B. Duncan, G.P. Peterson, Review of Micro scale Heat Transfer, *Appl. Mech. Rev*, 9 (1994) 397-428.
2. S.U.S. Chio, Enhancing thermal conductivity of fluid with nanoparticles, *Developments and applications of non-newtonian flow*, D.A. Siginer and H.P. Wang eds., *FED*, V 231/MD, 66 (1995) 99.
3. S.M.S. Murshed, K.C. Leong, C. Yang, Enhanced thermal conductivity of TiO₂. Water basednanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, 44 (2005) 367-373.
4. W. Yu, H. Xie, L. Chen, Y. Li, Investigation on the thermal transport properties of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, *Powder Technology*, 197 (3) (2010) 218–221.
5. W. Yu, S.U.S. Choi, The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nano fluids a renovated Hamilton-Crosser model, *Journal of Nanoparticle Research*, 6 (2004) 355-361.
6. Y. Xuan, Q. Li, Heat transfer enhancement of nanofluids, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 21 (2000) 58-64.
7. S. ZeinaliHeris, S.Gh. Etemad, M. Nasr Esfahany, Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 33 (2006) 529-535.
8. 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, *Int. Comm. Heat and Mass Transfer*, 37 (2009) 214-219.
9. I.C. Bang, S.H. Chang, Boiling heat transfer performance and phenomena of AL₂O₃-water nanofluid from a plain surface in a pool, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 48 (2005) 2407-2419.
10. Y. Xuan, W. Roetzel, Conception for heat transfer correlation of nanofluid, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 43 (2000) 3701-3707.
11. S. Mirmasoumi, A. Behzadmehr Effect of nanoparticles mean diameter on mixed convection heat transfer of a nanofluid in a horizontal tube, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 29 (2008) 557-556.
12. N. Masoumi, N. Sohrabi, A. Behzadmehr, A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids, *Journal of Physics, D: Applied Physics*, 42 (2009) 1-6.
13. W. Yu, S.U.S. Choi, The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nano fluids a renovated Hamilton-Crosser model, *Journal of Nanoparticle Research*, 6 (2004) 355-361.
14. Clement Kleinstreuer, Yu Feng, Experimental and theoretical studies of nanofluid thermal conductivity enhancement: a review, *Kleinstreuer and FengNanoscale Research Letters* (2011) 229.
15. H.E. Patel, T. Sundararajan, T. Pradeep, A micro-convection model for thermal conductivity of nanofluids, *Indian Academy of Sciences*, 65 (2005) 863-869.
16. D. Weerapun, W. Somchai, Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO₂-water nanofluids, *International Journal of Experimental Thermal and Fluid Science*, 33 (2009) 706-714.
17. S.M.S. Murshed, K.C. Leong, C. Yang, Investigatiton of thermal conductivity and viscosity of nano fluid, *International Journal of Thermal Science*, 47 (2008) 560-568.
18. MadhursreeKole, Dey, T.K., Effect of aggregation on the viscosity of cooper oxide-gear oil naonfluids, *International Journal of Thermal Science*, 50 (2011) 1741-1747.
19. M.M. EL-Wakil, *Nuclear Heat Transport*, The American Nuclear Society La Grange Park, ILLinois (1993).