

مقایسه تجربی انتقال حرارت نانوسیال‌های آبی تیتانیا و آلومینا در شرایط شار حرارتی غیریکنواخت

منصور طالبی، یاسر عباسی، جمشید خورسندی

پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، mstalebi@aeoi.org.ir

چکیده

حرارت در این سیستم با استفاده از نانوسیال‌ها موضوعی بسیار مهم می‌باشد. افزایش برداشت انرژی در این سیستم‌ها مهندسی را قادر می‌سازد تا سیستم‌هایی کارا تر و حتی کوچکتری تولید کنند. نانوسیال‌ها محیط‌های جدید انتقال حرارت هستند که توسط پخش کردن نانوذرات با اندازه کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر درون محیط‌های انتقال حرارت مرسوم نظیر آب، روغن، اتیلن گلیکول و ... بوجود می‌آیند. عبارت نانوسیال به این محیط‌های انتقال حرارت اولین بار توسط چوی [۱] در سال ۱۹۹۵ استفاده شد. طی دو دهه نانوسیال‌ها بدلیل خواص برتر حرارتی کاربردهای بالقوه صنعتی موضوع بسیاری از تحقیقات پژوهشگران انتقال حرارت بوده‌اند. بسیاری از پژوهشگران از روابط شناخته شده برای پیش‌بینی خواص ترموفیزیکی نانوسیال‌ها استفاده کرده‌اند و عده‌ای دیگر این خواص را از طریق آزمایش و تجربه اندازه‌گیری نموده‌اند. مطالعات هم به صورت تئوری وهم به صورت تجربی انجام شده است. پژوهش‌هایی به عنوان نمونه که کاربرد نانوسیال‌ها را در انتقال حرارت نشان می‌دهند در ادامه ارائه شده است.

ون و دینگ [۲] ضریب انتقال حرارت همرفتی نانوسیال آبی Al_2O_3 -DI را برای جریان درون یک میله ساخته شده از مس و در جریان آرام به صورت تجربی اندازه‌گیری کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت در این لوله با افزایش غلظت نانوذرات افزایش می‌یابد. همچنین افزایش رینولدز باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می‌گردد.

هی و همکاران [۳] به صورت تجربی رفتار انتقال حرارتی و خواص افت فشار نانوسیال آبی TiO_2 -DI جاری در یک میله عمودی در جریان به سمت بالا در هردو رژیم آرام و مغشوش مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش آن‌ها نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت موضعی برای هردو رژیم جریان آرام و مغشوش با افزایش غلظت نانوسیال در یک رینولدز مشخص افزایش می‌یابد. همچنین نتایج این دانشمندان نشان می‌دهد که میزان افت فشار ایجاد شده در جریان نانوسیال‌ها به میزان افت فشار ایجاد شده توسط آب در هندسه بسیار نزدیک است.

پاک و چو [۴] به صورت تجربی کارایی حرارتی نانوسیال‌های آبی تیتانیا و آلومینا را در جریان درون یک لوله دایروی افقی تحت رژیم جریان مغشوش مورد بررسی قرار دادند. آنها در این مطالعه تجربی از نتایج آزمایشگاهی ماسودا [۵] برای بدست آوردن

برای مقایسه تجربی تاثیر نانوسیال‌های مختلف بر روی انتقال حرارت جریان درون یک مجرای حلقوی در شرایط شار حرارتی غیر یکنواخت، در این پژوهش، با استفاده از یک لوپ تحت فشار ترموهیدرولیکی آزمایش‌هایی صورت پذیرفته است. نانوذرات آلومینا و تیتانیا به آب دوبار یونیزه شده افزوده شدند تا نانوسیال‌های مربوطه تولید گردند. آزمایش‌ها برای هر دو رژیم جریان آرام و مغشوش انجام شدند. محفظه آزمایش عبارت است از یک مجرای حلقوی که شار حرارتی کسینوسی از طریق المان الکتریکی خاص به میله داخلی آن اعمال می‌گردد. دمای دیواره درونی حلقوی با استفاده از ۲۲ دماسنج نوع k اندازه‌گیری می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که در غلظت‌های پایین هر دو نانوسیال تاثیر چندانی بر روی انتقال حرارت ندارند ولی با افزایش غلظت انتقال حرارت به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. این بهبود انتقال حرارت توسط نانوسیال تیتانیا شدیدتر از نانوسیال آبی آلومینا می‌باشد.

واژه‌های کلیدی

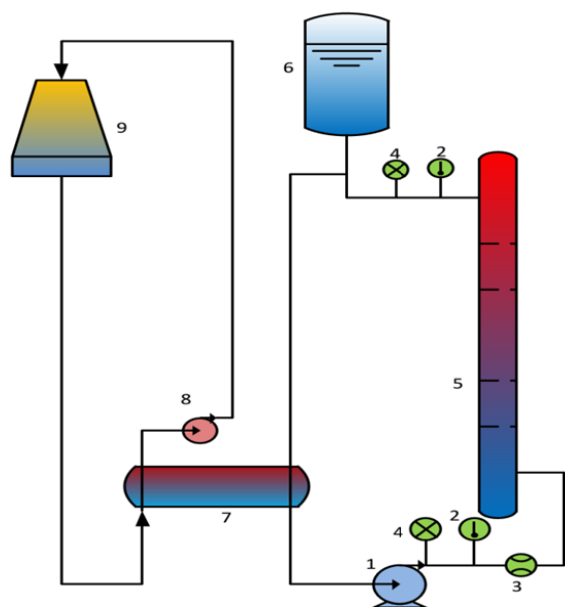
انتقال حرارت، نانوسیال‌های آبی تیتانیا و آلومینا، شار حرارت کسینوسی، لوپ تحت فشار.

مقدمه

برای کوچک کردن و افزایش سرعت کار سیستم‌های صنعتی نیاز به شرایط جدید در خنک‌سازی و کارایی بهتر ضروری می‌باشد. رسانندگی حرارتی پایین سیال‌هایی چون آب مانعی جدی برای بهبود کارایی و کوچک کردن تجهیزات مهندسی می‌باشد. کنترل انتقال حرارت در بسیاری از سیستم‌های انرژی بسیار حیاتی است زیرا باعث افزایش قیمت انرژی می‌گردد. در سالهای اخیر، فناوری نانوسیال‌ها توسط محققین بسیاری معرفی و جهت بررسی انتقال حرارت در تجهیزات مهندسی به صورت تجربی و تئوری مورد مطالعه قرار گرفته است. نانوسیال‌ها در مسائل مهندسی زیادی از قبیل مبدل‌های حرارتی، خنک‌سازی تجهیزات الکترونیکی و خنک‌سازی تجهیزات مربوط به فرآیندهای شیمیایی بکار رفته‌اند. برخی از این تجهیزات از یک مجرای حلقوی تشکیل شده‌اند که حرارت را از یک میله داغ به سیال خنک‌کننده اطراف آن انتقال می‌دهد. بهبود انتقال

است. این سیستم به صورت کلی از دو لوپ اولیه و ثانویه ساخته شده است. لوپ اولیه شامل، محفظه آزمایش، محفظه فشار (فشارنده) که علاوه بر نگهداری نانوسیال وظیفه اعمال فشار بر سیستم را دارد، پمپ دور متغیر و یک مبدل حرارتی می باشد. لوپ ثانویه شامل مبدل حرارتی، پمپ و یک برج خنک کن می باشد.

محفظه آزمایش حلقوی به طول ۱/۵ متر است که شار حرارتی به میله داخلی آن از طریق یک المان الکتریکی مارپیچی با گام متغیر جهت تولید شار کسینوسی اعمال می گردد. حلقوی از فولاد ضد زنگ به قطر داخلی ۳۳ میلیمتر قطر خارجی ۵۵ میلیمتر ساخته شده است. محفظه آزمایش از نظر حرارتی عایق است تا از افت حرارت در امتداد محور آن جلوگیری شود. در هنگام انجام تستها، دمای دیواره داخلی محفظه آزمایش و دبی جریان اندازه گیری و ثبت می شود.



شکل ۱: شماتیک تجهیزات آزمایشگاه

جدول ۱: تجهیزات موجود در لوپ تحت فشار

ردیف	وسیله	لوپ اولیه	لوپ ثانویه
۱	پمپ دور متغیر	*	
۲	دماسنج	*	
۳	دبی سنج	*	
۴	فشار سنج	*	
۵	محفظه آزمایش	*	
۶	فشارنده	*	
۷	مبدل حرارتی	*	*
۸	پمپ	*	
۹	برج خنک کن	*	

رسانندگی حرارتی نانوسیالها استفاده کردند و با استفاده از لزجت سنج ویسکوزیته نانوسیالها را اندازه گیری نموده اند. نتایج آنها نشان می دهد که عدد ناسلت مربوط به جریان نانوسیالها با افزایش عدد رینولدز و همچنین غلظت نانوذرات افزایش می یابد.

دوانگ تونگ سوک و وانگوايسز [۶] به صورت تجربی انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال آبی تیتانیا را در جریان درون یک مبدل حرارتی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داده است که ضریب انتقال حرارت نانوسال با غلظ حجمی ۰/۲٪ به میزان نزدیک به ۶ الی ۱۱ درصد بیشتر از آب خالص است. به هر حال نتایج همچنین نشان داده اند که استفاده از نانوسیالها افزایش کمی در افت فشار ایجاد می کند.

فیلیپ و شیما [۷] مروری بر پیشرفت های ایجاد شده اخیر در زمینه نانوسیالها ارائه کردند. تمرکز آنها بر روی خواص مهم نانوذرات که خواص حرارتی نانوسیال را تغییر می دهد می باشد. آنها همچنین راه های جدیدی برای رسیدن به بالاترین رسانندگی نانوسیالها معرفی نمودند.

در کار حاضر سعی بر آن شده است که اثر دو نانوسیال مختلف بر روی انتقال حرارت درون یک مجرای حلقوی با شار حرارتی غیر یکنواخت به صورت تجربی مطالعه شود. در آزمایش های اشاره شده، نانوذرات TiO_2 و Al_2O_3 به آب دوبار یونیزه شده افزوده و بترتیب نانوسیال های آبی تیتانیا و آلومینا با غلظت های حجمی مورد نظر تولید می گردد. بدلیل مقیاس بزرگ محفظه آزمایش و تجهیزات لوپ مربوطه تنها غلظت های حجمی کوچک تولید و آزمایش شده اند. محفظه آزمایش حلقوی است که شار حرارتی کسینوسی از طریق المان الکتریکی مارپیچ با دور متغیر به میله داخلی آن اعمال می گردد. دمای دیواره درونی حلقوی با استفاده از ۲۲ دماسنج نوع k اندازه گیری می گردد.

تولید نانوسیال

در این آزمایش، نانوسیالها به روش دو مرحله ای تولید شده اند. برای تولید نانوسیالها نانوذرات Al_2O_3 با قطر متوسط ۲۵ نانومتر و نانوذرات TiO_2 با قطر متوسط ۱۰ نانومتر به صورت جداگانه در ۴۰ لیتر آب دوبار یونیزه شده پخش شدند. نانوسیال های تولید شده به مدت چهار ساعت در دستگاه التراسونیک قرار داده شده اند تا از کلوخه شدن نانو ذرات جلوگیری شود. بیشترین غلظت حجمی تولید شده برای هر نانوسیال ۱/۵٪ وزنی بوده است. برای تولید دیگر غلظت های موجود در آزمایشها، رقیق سازی با افزودن آب دوبار یونیزه شده انجام شده است. غلظت های تولید شده در این مطالعه برابر ۰/۲۵٪، ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪ (درصد وزنی) می باشند. یک میکروسکوپ الکترونیکی (TEM) برای تقریب اندازه نانوذرات بکار رفته است.

تجهیزات آزمایشگاه

دستگاه آزمایش بکار رفته در این مطالعه به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. نام تجهیزات مختلف در جدول ۱ ارائه شده

تولید نانوسیال

برای بدست آوردن پارامترهای انتقال حرارتی، خواص نانوسیال از قبیل چگالی، گرمای ویژه، لزجت و رسانندگی حرارتی نانوسیال‌ها یا باید اندازه‌گیری شود و یا باید توسط روابط نیمه تجربی موجود محاسبه شود. در این مقاله از روابط نیمه تجربی [۸] استفاده می‌گردد.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + (\phi)\rho_{np} \quad (۱)$$

$$(C_p)_{nf} = \frac{(1-\phi)(\rho_{bf}C_{p,bf}) + (\phi)(\rho_{np}C_{p,np})}{(1-\phi)\rho_{bf} + (\phi)\rho_{np}} \quad (۲)$$

$$\mu_{nf} = \frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} \mu_{bf} \quad (۳)$$

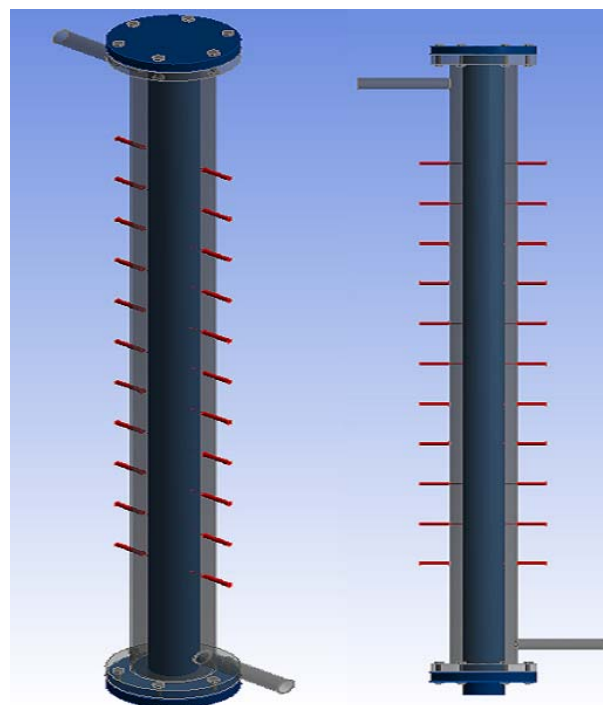
$$k_{nf} = k_{bf} \left[1 + 64.7\phi^{0.746} \left(\frac{d_{bf}}{d_{np}} \right)^{0.369} \times \left(\frac{k_{np}}{k_{bf}} \right)^{0.7476} Pr^{0.9955} Re^{1.2321} \right] \quad (۴)$$

جدول ۲ خواص نانوذرات را که برای استفاده از روابط ۱ تا ۴ مورد نیاز می‌باشند را ارائه کرده است.

جدول ۲: خواص نانوذرات

ردیف	نانوذره	چگالی (ρ)	گرمای ویژه (C_p)	رسانندگی (k)
۱	تیتانیا	۴۲۶۰	۶۸۰	۱۲
۲	آلومینا	۳۹۵۰	۹۳۰	۴۰

محفظه آزمایش به صورتی طراحی شده است که شار حرارتی ایجاد شده در میله داخلی آن به تقریباً کسینوسی باشد. توان کلی اعمال شده برابر یک کیلووات می‌باشد. در این مطالعه فرض شده است که تولید حرارت به صرت کاملاً کسینوسی و با نقطه پیک شار حرارتی در مرکز میله می‌باشد.



شکل ۲: نحوه قرار گیری ترموکوپل‌ها

حرارت در یک متر مرکزی از قسمت مسانی حلقوی تولید می‌گردد. برای تولید شار حرارت کسینوسی از یک المان حرارتی که به صورت مارپیچ با طول گام متغیر درون حلقوی قرار گرفته است استفاده شده است. گام در مرکز میله در کمترین حالت می‌باشد و با فاصله گرفتن از مرکز میله به سمت بالا و پایین گام این مارپیچ زیاد می‌گردد. اگر گرمای ایجاد شده در هر گام از مارپیچ بر مساحت پوشش داده شده تقسیم گردد، پروفایل حقیقی شار حرارتی که بسیار شبیه پروفایل کسینوسی است بدست می‌آید. ۲۲ ترموکوپل نوع k وظیفه خواندن داده‌ها را بر عهده دارند. شماتیک محفظه آزمایش و نحوه قرار گرفتن ترموکوپل‌ها در شکل ۲ آورده شده است. ترموکوپل‌ها با فاصله مساوی ۱۰ سانتیمتر از یکدیگر در یک متر مرکزی حلقوی قرار گرفته‌اند. برای دقت بیشتر در هر ارتفاع از دو ترموکوپل استفاده شده است. ضریب انتقال حرارت توسط معادله ۵ محاسبه می‌گردد.

$$h = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n (h(i)\Delta y) \quad (۵)$$

مقادیر عدم قطعیت‌ها با استفاده از رابطه ۶ محاسبه شده است.

$$\frac{\delta(\bar{h})}{\bar{h}} = \left[\left(\frac{\partial(P)}{P} \right)^2 + \left(\frac{\partial(\Delta T)}{\Delta T} \right)^2 + \left(\frac{\partial(\Delta y)}{\Delta y} \right)^2 \right] \quad (۶)$$

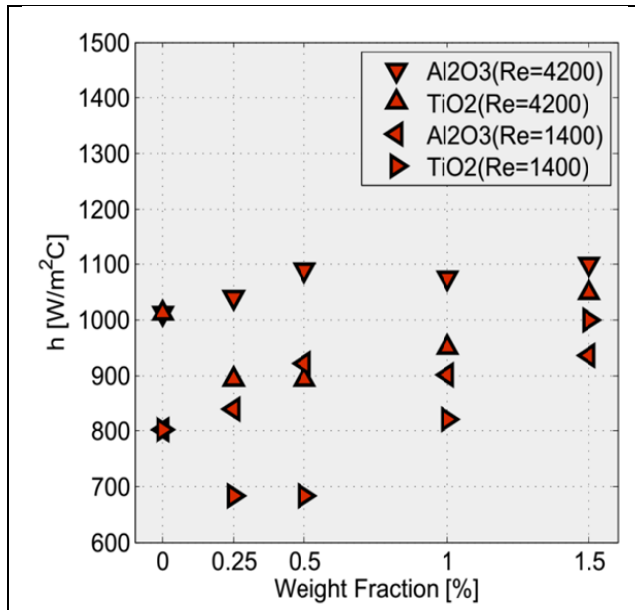
مقادیر عدم قطعیت‌ها با توجه به خطا در دستگاه‌های اندازه‌گیری محاسبه شده است. بیشینه مقدار عدم قطعیت در مقادیر ضریب انتقال حرارت متوسط برای عددهای رینولدز مختلف برابر ۴/۹٪ محاسبه شده است.

نتایج

در این قسمت با توجه به رابطه‌های ارائه شده در بخش قبل و با استفاده از دماها و دبی‌های اندازه‌گیری شده پارامترهای انتقال حرارتی محاسبه و نتایج ارائه می‌گردد. جهت مشاهده روند تغییرات داده‌های آزمایشگاهی از برآزش درجه سه استفاده شده است. پارامترهایی که در این مقاله گزارش می‌شوند عبارتند از: دمای میله داخلی و ضریب انتقال حرارت.

داده‌های آزمایشگاهی به صورت مستقیم دمای دیواره داخلی را نشان می‌دهند. دمای خنک کننده در نزدیکی دیواره داخلی برای رینولدزهای $Re=1400$ و $Re=4200$ به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است. با افزایش غلظت نانوذرات دمای دیواره داخلی کاهش می‌یابد. دلیل این امر رسانندگی حرارتی بالاتر نانوسیال‌ها نسبت به آب خالص می‌باشد. با افزودن نانوذرات به آب خالص، رسانندگی حرارتی سیال تولید شده و همچنین اغتشاشات جریان افزایش می‌یابد و در نتیجه برداشت گرما بهتر صورت می‌پذیرد. غلظت نانوذرات تاثیر چندانی بر روی شکل پروفایل دمای دیواره ندارد و در عدد رینولدز ۴۲۰۰ برای هر دو نانوسیال تیتانیا و آلومینا نقطه پیک حرارتی در ارتفاع $y/L=0.6$ اتفاق می‌افتد. با توجه

نظیر ضریب انتقال حرارت تغییر چندانی داشته باشد. مورد دیگری که مشاهده می‌شود این است که با افزایش غلظت نانوسیال تا ۱/۵٪ تقریباً ضریب انتقال حرارت برای هردو نانوسیال تغییر می‌کند. میزان این تغییرات به عدد رینولدز و نوع نانوذرات استفاده شده در تولید نانوسیال بستگی دارد. در هر عدد رینولدز انتقال حرارت توسط نانوسیال آبی آلومینا بهتر صورت می‌گیرد و آزمایش‌ها ضریب انتقال حرارت بزرگتری را نشان می‌دهند. از طرف دیگر تغییرات ضریب انتقال حرارت ناشی از افزایش غلظت نانوذرات برای نانوسیال تیتانیا بیشتر است.



شکل ۵: ضریب انتقال حرارت متوسط بر حسب غلظت نانوذرات

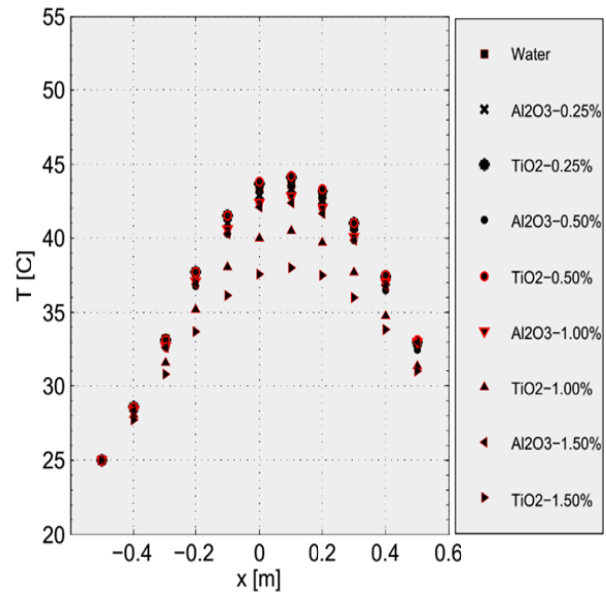
نتیجه گیری

نانوسیال‌ها مخلوطی ابداعی از نانوذرات با کاربرد بالقوه بسیار وسیع می‌باشند. این مطالعه بر روی مقایسه تاثیرات نانوسیال‌های آبی تیتانیا و آلومینا بر روی انتقال حرارت درون یک مجرای حلقوی عمودی با شار حرارتی غیر یکنواخت متمرکز می‌باشد. آزمایش‌های انجام شده نتایج زیر را در بر داشت:

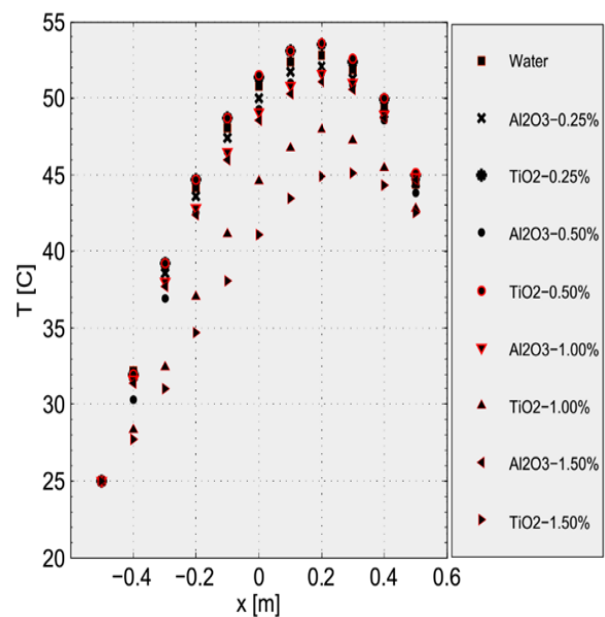
برای غلظت‌های پایین نانوذرات در سیال پایه (کمتر از ۰/۵ درصد وزنی) تغییر چندانی در دمای دیواره و ضریب انتقال حرارت مشاهده نشده است. این امر مهندسان را قادر می‌سازد تا از دیگر خواص نانوسیال‌ها نظیر افزایش ترکنندگی و همچنین افزایش شار حرارت بحرانی بدون تغییر در طراحی سیستم استفاده کنند.

با افزایش غلظت، دمای دیواره داخلی مجرای حلقوی کاهش می‌یابد و در نتیجه ضریب انتقال حرارت بیشتر می‌شود. این امر برای هر دو مورد نانوذرات اتفاق می‌افتد. ولی کارایی نانوذرات آلومینا در این زمینه بهتر می‌باشد. نوع رژیم جریان نیز بر روی این کاهش دمای دیواره و نحوه تغییرات آن بسیار موثر است.

به شکل ۴ مشهود است که در رینولدزهای پایین تر ارتفاع نقطه پیک حرارتی افزایش می‌یابد. برای رینولدزهای پایین تر نقطه پیک حرارتی در نزدیکی انتهای بخش انتقال حرارت حلقوی رخ میدهد و با افزایش عدد رینولدز این ارتفاع به سمت مرکز حلقوی متمایل می‌گردد.



شکل ۳: دمای دیواره برای رینولدز ۴۲۰۰



شکل ۴: دمای دیواره برای رینولدز ۱۴۰۰

ضریب انتقال حرارت محاسبه شده در این آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که غلظت پایین نانوذرات تاثیر چندانی بر روی ضریب انتقال حرارت متوسط برای هردو نانوذره تیتانیا و آلومینا ندارد. این واقعیت مهندسان را قادر می‌سازد تا با استفاده از غلظت کم نانوذرات از دیگر خواص نانوسیال‌ها نظیر شار حرارت بحرانی استفاده کنند بدون اینکه پارامترهای انتقال حرارت

- metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer* 11 (1998) 151–170.
- [5] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, N. Hishinuma, Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of Al₂O₃, SiO₂ and TiO₂ ultra-fine particles), *NetsuBussei (Japan)* 7 (4) (1993) 227–233.
- [6] W. Duangthongsuk, S. Wongwises, Heat transfer enhancement and pressure drop characteristics of TiO₂-water nanofluid in a double-tube counter flow heat exchanger, *International Journal of Heat Mass Transfer* 52 (2009) 2059–2067.
- [7] J. Philip, P.D. Shima, Thermal properties of nanofluids, *Advances in Colloid and Interface Science* 183–184 (2012) 30–45.
- [8] Wang, X.-Q. and A.S. Mujumdar, Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. *International Journal of Thermal Sciences*, 2007. 46(1): p. 1-19.
- [1] S.U.S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticle, *ASME Fluids Engineering Division (FED)* 231 (1995) 99-105.
- [2] D. Wen, Y. Ding, Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions, *International Journal of Heat Mass Transfer* 47 (2004) 5181–5188.
- [3] Y. He, Y. Jin, H. Chen, Y. Ding, D. Cang, H. Lu, Heat transfer and flow behavior of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe, *International Journal Heat Mass Transfer* 50 (2007) 2272–2281.
- [4] B.C. Pak, Y.I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron

↑ تا حد امکان دو ستون موجود در صفحه آخر را تراز کنید. ↑