



بررسی تجربی انتقال حرارت جریان نانوسیال آب/TiO₂ در لوله افقی با نوار پیچه تحت شرایط دمایی ثابت دیواره

امیر هوشمند^۱، احمد صداقت^{۲*}، محمدرضا سلیم‌پور^۳، عابدین زرگوشی^۴ و عیسی محسنی^۵

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک

^۲ دانشیار، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک

^۳ دانشیار، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک

^۴ کارشناس ارشد هوافضا، شرکت پالایش گاز ایلام

^۵ کارشناس شیمی، شرکت پالایش گاز ایلام

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۵/۰۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۳/۰۴/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۰۵

چکیده

یکی از روش‌های افزایش انتقال حرارت، استفاده از نوار پیچه است که با افزایش سطح انتقال حرارت در حجم ثابت و همچنین اختلاط بیشتر جریان، انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد. در تحقیقات گذشته، اثر نانوسیال با نوار پیچه بررسی نشده است. در این تحقیق، به ارزیابی عملکرد نانوسیال آب/TiO₂ در مبدل حرارتی و با استفاده از نوار پیچه پرداخته شده است. عوامل بررسی شده شامل، تاثیر گام نوار پیچه، دبی و غلظت‌های مختلف نانوسیال هستند؛ همچنین بررسی‌ها برای شرط مرزی دمایی ثابت دیواره لوله انجام و محدوده عدد رینولدز ۳۰۰۰-۲۲۰۰۰ انتخاب شده است. آزمایش‌ها برای محدوده غلظت $0 \leq \phi \leq 0.5$ درصد حجمی انجام شد. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات، سبب افزایش انتقال گرما می‌شود. همچنین با کاهش گام پیچش نوار کارگذاری شده نیز نتیجه مشابهی بدست می‌آید. بیشترین مقدار این افزایش، حدود ۱۰۳/۴۵ درصد است که مربوط به غلظت ۰/۵ درصد حجمی نانوسیال و با کارگذاری نوار پیچه با گام (H/D=5) است.

کلمات کلیدی: نانوسیال؛ انتقال حرارت؛ نوار پیچه؛ شرط مرزی دمایی ثابت.

Experimental study on heat transfer of water/TiO₂ nanofluid in a straight tube with twisted tapes at constant wall temperature

A. Houshmand¹, A. Sedaghat^{2,*}, M.R. Salimpour³, A. Zargoushi⁴ and I. Mohseni⁵

¹ Master Degrees, Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

² Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

³ Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

⁴ Master Degrees in Aerospace Engineering, Ilam Gas Distillation Company, Iran

⁵ Bachelor Degrees in Chemical Engineering, Ilam Gas Distillation Company, Ilam, Iran

Abstract

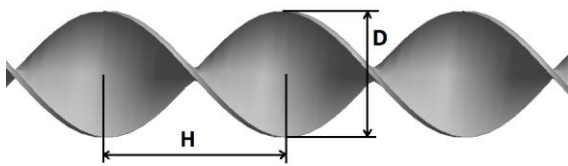
One of the methods for increasing convective heat transfer is by utilizing twisted tapes in heat exchangers which enhances heat transfer in constant volume with increasing augmentation. In the past research, the combined effects of nanofluid and twisted tapes were not studied. In this research paper, the heat transfer performance of water/TiO₂ nanofluid in a heat exchanger with twisted tape insert is evaluated. The studied parameters are pitch of twisted tape, mass flow rate, and concentration of nanofluid. The constant wall temperature is employed and the range of Reynolds number is from 3000 to 22000. Experiments were performed for the volumetric concentration range of $0 \leq \phi \leq 0.5$. The results confirm that heat transfer was enhanced by adding nano-particles. Also, the results were repeated by adding twisted tapes with lower pitches. The maximum heat transfer appraisal indicates a 103.45 percent increase for the concentration of 0.5 and the insert of the twisted tape with (H/D=5).

Keywords: nanofluid; heat transfer; twisted tape; constant temperature boundary condition.

۱- مقدمه

نانوسیال آب/اکسیدتیتانیوم پرداخته، نتیجه گرفتند که رسانندگی گرمایی نانوسیال با افزایش دما به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. از دیگر سوی، لزجت نانوسیال با غلظت آن رابطه مستقیم داشته، با افزایش دما کاهش می‌یابد.

یکی از روش‌های افزایش انتقال حرارت، استفاده از نوار پیچه^۷ در لوله مبدل‌های حرارتی است که با افزایش سطح انتقال حرارت در حجم ثابت و همچنین اختلاط بیشتر جریان، انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد (شکل ۱).



شکل ۱- طرحواره نوار کارگذاری شده در لوله

مشخصات انتقال حرارتی و افت فشار در این سیستم‌ها، کاملاً متفاوت از مشخصات مربوط به لوله افقی بدون نوار پیچه است و انتظار می‌رود این مسئله بر روند انتقال حرارت و افت فشار حاصل تأثیر بگذارد.

تحقیقات انجام شده تاکنون در این زمینه، قابل تقسیم به دو بخش است: ۱- مطالعات تحلیلی و عددی، ۲- مطالعات تجربی.

همان‌طور که اشاره شد، عوامل متعددی در تعیین ویژگی‌های نانوسیال نقش دارد و هر یک از محققان با بررسی یک یا چند عامل، مدل خود را ارائه داده‌اند و علیرغم تلاش بسیار آنان، هنوز رابطه جامع و گسترده‌ای ارائه نشده است.

اما در خصوص بررسی انتقال حرارت و ضریب اصطکاک با استفاده از نوار پیچه، می‌توان به تحقیقات برگلس^۸ [۶] اشاره کرد که در زمینه روش‌های منفعل^۹ و فعال^{۱۰} در مبدل‌های حرارتی گزارش شده است. در این میان منگلیک و برگلس^{۱۱} [۷ و ۸]، روی انتقال حرارت جریان آرام و مغشوش در حضور نوار پیچه کارهایی را صورت داده، در نتیجه پنج عامل زیر را در مطالعات خود مشاهده کرده‌اند: ۱- افزایش

در حدود ۱۰۰ سال پیش، استفاده از مخلوط‌های جامد-مایع در اندازه میکرومتر و میلیمتر با هدف افزایش رسانش گرمایی سیال آغاز شد، اما درستی این ذرات مشکلاتی همچون سایش لوله‌ها، پروانه پمپ‌ها، ناپایداری و ته‌نشینی سریع و در نتیجه مسدود کردن کانال‌ها را در پی داشت. در برابر این مشکلات، میزان افزایش بازده سیال جدید نسبت به سیال خالص اولیه قابل ملاحظه نبود، تا آنکه در سال ۱۹۹۵ چوی^۱ [۱] در موسسه تحقیقاتی آرگونه^۲ آمریکا، نانوسیال را کشف کرد. واژه "نانوسیال" به سوسپانسیون نانوذرات در یک سیال پایه اطلاق می‌شود. نانوذرات مورد استفاده در این سیالات، غالباً شامل ذرات فلزی، اکسیدهای فلزی، کاربیدها و نانولوله-های کربنی بوده، سیالات پایه معمول نیز نظیر، آب، روغن و اتیلن گلیکول هستند. از تئوری انتقال حرارت برای یک عدد ناسلت ثابت، ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال با رسانندگی گرمایی آن رابطه مستقیم دارد، لذا بسیاری از پژوهشگران، درصد اندازه‌گیری دقیق رسانندگی گرمایی و دیگر خواص ترموفیزیکی نانوسیالات برآمده‌اند. ماسودا^۳ و همکاران [۲]، به مطالعه خواص ترموفیزیکی اکسیدهای فلزی TiO_2 و Al_2O_3 پرداختند. آنها افزایش قابل توجه رسانندگی گرمایی را برای نانوسیال نسبت به سیال پایه گزارش کردند. به عنوان نمونه، رسانندگی گرمایی آب/ Al_2O_3 و آب/ TiO_2 با درصد حجمی ۴/۳٪ نسبت به آب خالص به ترتیب، ۳۲٪ و ۱۱٪ افزایش را نشان می‌داد. پاک و چوی^۴ [۳]، ضمن بررسی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیالات آب/ Al_2O_3 و آب/ TiO_2 در لوله افقی با شرط مرزی شار ثابت بر دیواره لوله، به مطالعه تجربی خواص این سیالات پرداخته‌اند. آنها گزارش کردند که لزجت نسبی سیالات آب/ TiO_2 و آب/ Al_2O_3 با درصد حجمی ۱۰٪، به ترتیب ۳ و ۲۰۰ است که البته این مقادیر به مراتب بزرگتر از پیش‌بینی-های معادله بچلر^۵ [۴] است. در سال ۲۰۰۹ دانگدوگسوک و وونگوایزز^۶ [۵]، به بررسی رسانندگی گرمایی و لزجت

¹ Choi

² Argone

³ Masuda

⁴ Pak, Cho

⁵ Batchelor

⁶ Duangthongsu, Wongwises

⁷ Twisted Tape

⁸ Bergles

⁹ Passive

¹⁰ Active

¹¹ Manglik RM, Bergles

راستا و در کار تجربی دیگر شارما و ساندار^{۱۰} [۱۵]، ضرایب انتقال حرارت و اصطکاک برای جریان مغشوش نانوسیال آب-آلومینا در یک لوله دایروی شار ثابت، با قرار دادن نوار پیچه در آن بررسی کردند. در نهایت در تحقیقی از سارما و همکاران [۱۶]، اثرات نوار پیچه بر انتقال حرارت و ضریب اصطکاک نانو سیال آب-اکسید آهن مغناطیسی در یک لوله افقی با شار ثابت حرارتی روی مرز آن، به صورت تجربی مطالعه و بررسی شد.

در کار حاضر، از نانوسیال آب/TiO₂ در حضور نوار پیچه استفاده و با شرط مرزی دما ثابت برای نخستین بار مطالعه و بررسی شده است.

۲- آماده سازی نانوسیال

نانوسیال به دو صورت یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای تهیه می‌شود. در روش تک مرحله‌ای ذرات موردنظر به طور مستقیم درون سیال پراکنده می‌شود. در روش دو مرحله‌ای، ابتدا نانوذره مورد نظر تهیه گردیده، سپس به سیال پایه افزوده می‌شود. در این پژوهش، از روش دومرحله‌ای برای تهیه نانوسیال استفاده شده است. برای تهیه نانوسیال با یک غلظت مشخص، مقدار موردنیاز از نانوذره با آب مقطر مخلوط شد. برای اختلاط نانوذرات با سیال پایه از همزن مکانیکی با ۱۰۰۰ دور در دقیقه استفاده شد و سپس به مدت ۱ ساعت تحت نوسانات دستگاه همزن فراصوت قرار گرفت. دستگاه همزن فراصوت مورد استفاده مدل UP200 از شرکت هیلشر آلمان است. متوسط زمان پایداری مشاهده شده برای غلظت‌های مختلف نانوسیال پس از کاربری این همزن، حدود هشت ساعت است.

۳- سیستم آزمایشگاهی

شکل ۲، طرحواره دستگاه آزمایش را برای بررسی انتقال حرارت نشان می‌دهد. دستگاه آزمایش برای مطالعه ویژگی‌های انتقال حرارت جریان سیال در لوله‌ای افقی با و بدون نوار پیچه تحت شرایط دمای ثابت دیواره، طراحی و ساخته

سرعت جریان به دلیل تقسیم شدن مقطع لوله به وسیله نوار پیچه ۲- کاهش قطر هیدرولیکی^۱ که موجب افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود ۳- افزایش طول مسیر جریان به دلیل مارپیچی بودن آن ۴- بهبود ضریب انتقال حرارت به دلیل حرکت ثانویه تولید شده توسط نوار پیچه ۵- اثرات پره^۲ اگر که نوار کارگذاری شده در لوله دارای اتصال کامل با دیواره لوله باشد. بزرگترین عامل موثر در این بهبود را می‌توان در تمایل به اختلاط عرضی در جریان، به دلیل وجود نیروهای جانب مرکز جستجو کرد.

در کار تحلیلی که توسط سارما^۳ و همکاران [۹] انجام شد، از تئوری ون درایست برای انتقال حرارت در رژیم جریان مغشوش با حضور نوار پیچه در لوله استفاده شده است. اسمیتبرگ و لندیس^۴ [۱۰]، لوپینا و برگلس^۵ [۱۱]، منگلیک و برگلس [۸] و سارما و همکاران [۹ و ۱۲]، هرکدام گزارش‌هایی مبنی بر بهبود انتقال حرارت با قرار دادن نوار پیچه برای جریان تکفاز^۶ ارائه کردند.

در بحث اندازه‌گیری تجربی انتقال حرارت در جریان نانو سیال در لوله با کارگذاری نوار پیچه، تاکنون تحقیقات انگشت شماری گزارش شده است که تمامی آن‌ها به شرط مرزی شار ثابت روی دیواره پرداخته‌اند.

پاتیپالکا و سیواشنموگام^۷ [۱۳]، به صورت عددی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آب-آلومینا را در یک لوله با شرط مرزی شار حرارتی ثابت و با نوار پیچه و با گام پیچش ۲/۹۳ انجام داده و ۳۱/۲۹٪ بهبود انتقال گرما در Re=2039 با ۱/۵٪ حجمی نانوسیال را گزارش کردند. در کار دیگر از شارما^۸ و همکاران [۱۴]، به صورت تجربی ضرایب انتقال حرارت و افت فشار در رژیم گذار^۹ برای غلظت حجمی اندک نانو سیال آب-آلومینا در لوله با شار حرارتی ثابت و با نوار پیچه، تخمین زده و رابطه‌ای برای آن ارائه کردند. در همین

¹ Hydraulic Diameter

² Fin effects

³ Sarma

⁴ Smithberg, Landis

⁵ Lopina, Bergles

⁶ Single Phase Flow

⁷ Pathipakka G, Sivashanmugam

⁸ Sharma

⁹ Transition Regime

¹⁰ Sundar, Sharma

حرارتی جریان مخالف می‌شود. سیال خنک‌کننده این مبدل نیز، آب شهری است.

یک شیر تخلیه پس از بخش آزمایش و قبل از شیر اصلی جریان (که قبل از منبع اصلی قرار دارد) تعبیه شده که با باز کردن آن و بستن شیر اصلی، قادر به تخلیه جریان خواهیم بود. به منظور تخلیه کامل در مرحله پایانی، سیستم را تحت فشار باد، قرار می‌دهیم که به مدار وصل می‌شود. همچنین بایستی افزود که لوله‌های مدار به عنوان رگ‌های اصلی این چرخه، غالباً شیلنگ چهارلایه بوده، در جایی که نیاز ضروری بود، از لوله گالوانیزه استفاده شد.

۴- ارزیابی خواص ترموفیزیکی سیال آزمایش

در پژوهش حاضر از نانوذرات TiO_2 با خلوص ۹۹٪ از شرکت تکنان اسپانیا تهیه شده است. شکل نانوذرات کروی بوده، قطر متوسط آنها ۱۵nm گزارش شده است. به دلیل پایداری بالای این نانوذرات در آب و با استفاده از دستگاه همزن فراصوت، از هرگونه عامل فعال‌ساز سطحی برای پایدار سازی نانوسیال اجتناب کردیم.

بررسی ضریب انتقال حرارت جریان، نیازمند آگاهی از خواص ترموفیزیکی سیال است. در کار حاضر، از روابط تجربی معروفی که کارایی آنها بارها به اثبات رسیده برای ارزیابی خواص ترموفیزیکی نانوسیال، نظیر چگالی، گرمای ویژه، لزجت و رسانندگی گرمایی استفاده شده است.

چگالی و گرمای ویژه مخلوط نانوذرات در سیال، به وسیله قوانین ابداعی پاک و چو [۱۷] و به صورت روابط (۱) و (۲) ارزیابی می‌شود:

$$\rho_{nanofluid} = (1 - \phi)\rho_{water} + \phi\rho_{TiO_2} \quad (1)$$

$$C_{nanofluid} = (1 - \phi)C_{water} + \phi C_{TiO_2} \quad (2)$$

برای تخمین رسانندگی حرارتی نانوسیال از رابطه ماکسول [۱۸] به صورت رابطه (۳) استفاده می‌کنیم:

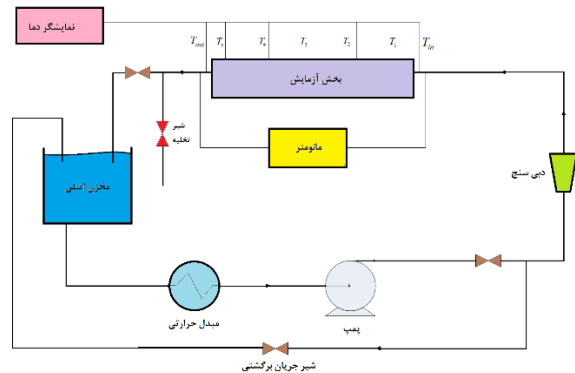
$$\frac{k_{nf}}{k_w} = \frac{k_{np} + 2k_w + 2\phi(k_{np} - k_w)}{k_{np} + 2k_w - \phi(k_{np} - k_w)} \quad (3)$$

و در نهایت برای محاسبه لزجت نانوسیال، معادله اینشتاین [۱۹] را به کار می‌بریم:

$$\mu_{nf} = \mu_w (1 + 2.5\phi) \quad (4)$$

که در این رابطه، مقدار ۲/۵ برای مدل گوی صلب برای نانوذره است.

شد. این دستگاه آزمایشی، متشکل از یک مدار برای جریان سیال است که از بخش‌های متفاوتی تشکیل شده است.



شکل ۲- طرحواره دستگاه آزمایش

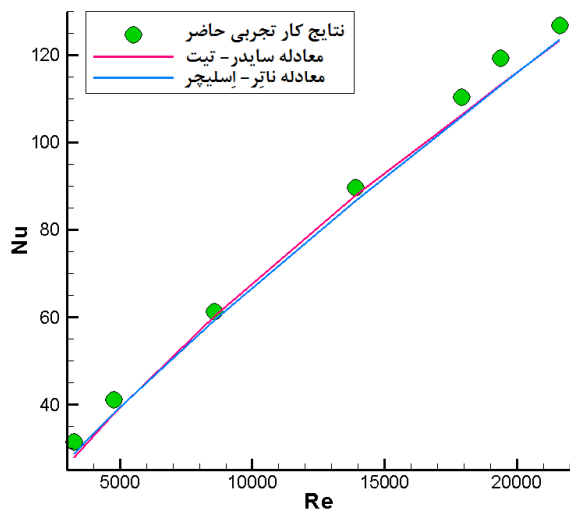
حلقه جریان متشکل از بخش آزمایش، مبدل حرارتی، دستگاه اندازه‌گیری دبی، پیش‌خنک‌کننده، مخزن و پمپ سیرکولاسیون است. برای کنترل دبی جریان از یک شیر برگشتی با خط برگشت به مخزن استفاده شد. بخش آزمایش از یک لوله صاف مسی که نوارها در آن قرار می‌گرفتند، به طول ۰/۹۳۵ متر و قطر داخلی ۸ میلی‌متر و قطر خارجی ۱۰ میلی‌متر تشکیل شده است. سیال جاری درون لوله توسط بخار آب موجود در مخزن گرم می‌شد که اطراف لوله را احاطه کرده بود. بخار درون مخزن توسط المنت‌های حرارتی تولید می‌شد. در این حلقه جریان، با پمپاژ سیال خنک‌کاری شده و عبور آن از شیرهای جریان اصلی و جریان برگشتی، قادر به کنترل دبی خواهیم بود. پمپ مورد استفاده، یک پمپ سانتریفیوژ مدل یاینجی، نیم اسب بخار است. با عبور از دبی‌سنج پس از پمپاژ جریان، دبی مزبور رصد می‌شود و مقدار مطلوب با توجه به دبی‌سنج تنظیم می‌شود. بعد از این مرحله، جریان وارد بخش آزمایش می‌شود، جایی که دو ترموکوپل وظیفه نشان دادن دمای حجمی سیال در ورودی و خروجی را داشته، پنج ترموکوپل دمای سطح لوله را نمایش می‌دهند. ترموکوپل‌ها همگی از نوع K بوده و با یک دسته پایانه‌های نری و مادگی به یک نمایش‌گر دمایی متناوباً و به صورت دستی متصل می‌شوند.

جریان پس از عبور از بخش آزمایش، وارد منبع اصلی می‌شود. سیال از پایین منبع اصلی جریان توسط مکش پمپ به داخل لوله حلقه اصلی هدایت می‌شود و متعاقباً وارد مبدل

نوار پیچه‌ها، یک میلی‌متر کمتر از قطر داخلی لوله است. نوارپیچه‌های استفاده شده در این آزمایش، از جنس ورق استیل بودند که مشخصات هندسی آن‌ها در جدول ۱ آمده است.

H (mm)	۳۵	۷۰	۱۰۵
D (mm)	۷	۷	۷
H/D (mm)	۵	۱۰	۱۵

شکل ۳، عدد ناسلت تجربی آب در لوله صاف را برحسب رینولدز در مقایسه با روابط (۷) و (۸) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که داده‌های آزمایش، تطابق خوبی با روابط تئوری دارند؛ اگرچه می‌توان گفت که محدوده عدد رینولدز برای روابط (۷) و (۸) بازه آزمایش‌ها در این پژوهش را به دو ناحیه افزایش می‌دهد، اما با این وجود تطابق خوب و منطقی روابط ارائه شده حتی در بازه خارج از محدوده تعریف آنها در شکل ۳ کاملاً مشهود است. این نکته هنگامی که حداکثر خطا ۵/۳۷٪ برای معادله سایدر و تیت و ۵/۵۳٪ برای معادله نایر و اسلیچر است، بیشتر خود را نشان می‌دهد.



شکل ۳- مقایسه نتایج تئوری و تجربی داده‌ها برای عدد ناسلت جریان آب در لوله صاف
نتایج عدد ناسلت برای غلظت‌های مختلف نانوسیال و برای هندسه‌های مختلف نوار پیچه کارگذاری شده در شکل-های ۴ تا ۷ به نمایش درآمده است.

۵- نتایج انتقال حرارت

هدف از انجام آزمایش‌ها در این قسمت، بدست آوردن ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت میانگین جریان سیال در لوله صاف با و بدون نوارپیچه است. آزمایش‌های انتقال حرارت تحت شرایط دمایی ثابت دیواره، ابتدا در لوله صاف انجام گرفت و سپس با جاسازی نوارپیچه در همان لوله، آزمایش‌ها ادامه یافت. همان‌طور که اشاره شد، محدوده رینولدز آزمایش ۳۰۰۰ تا ۲۲۰۰۰ بود. آزمایش‌ها در لوله صاف در رژیم جریان گذار و مغشوش انجام شد. در تمامی طول لوله، جریان از نظر هیدرودینامیکی و حرارتی کاملاً توسعه یافته بود. برای بدست آوردن ضریب انتقال حرارت کلی h در این حالت، از رابطه رابطه (۵) استفاده می‌کنیم:

$$h = \frac{\dot{m}C_p(T_{out} - T_{in})}{\pi D L \Delta T_{LMTD}} \quad (5)$$

که ΔT_{LMTD} اختلاف دمایی میانگین لگاریتمی سیال است. طول بخش آزمایش (l) برای ضریب انتقال حرارت به میزان ۰/۹۳۵ متر است و برای محاسبه عدد ناسلت نیز از رابطه (۶) استفاده می‌شود:

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (6)$$

برای ارزیابی حرارتی دستگاه آزمایش، داده‌های بدست آمده از آزمایش با رابطه (۶) و (۷) که مقدار ناسلت میانگین جریان مغشوش برای شرایط دمایی دیواره ثابت است، با تئوری‌های زیر مقایسه و ارزیابی شدند. این روابط برای شرایط ($0.7 < Pr < 16$, $700 < Re < 10000$, $L/D \geq 10$) و ($0 < Pr < 10^4$, $10^4 < Re < 10^5$) تیت^۱ [۲۰] و نایر و اسلیچر^۲ [۲۱] ارائه شده‌اند:

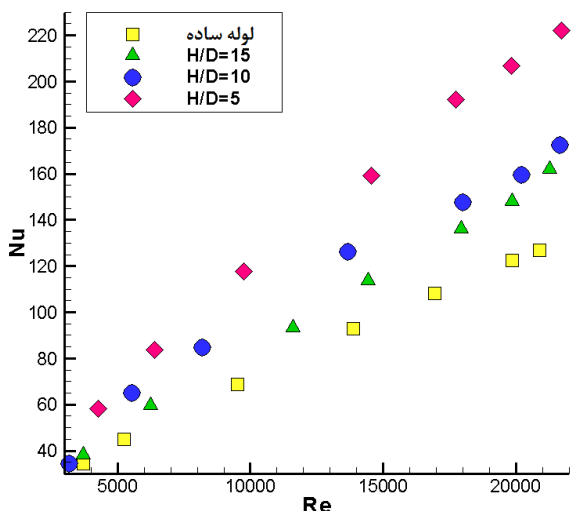
$$Nu = 0.27 Re^{1/8} Pr^{1/4} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{1/4} \quad (7)$$

$$Nu = 5 + 0.15 Re^{1/4} Pr^{1/3} \quad (8)$$

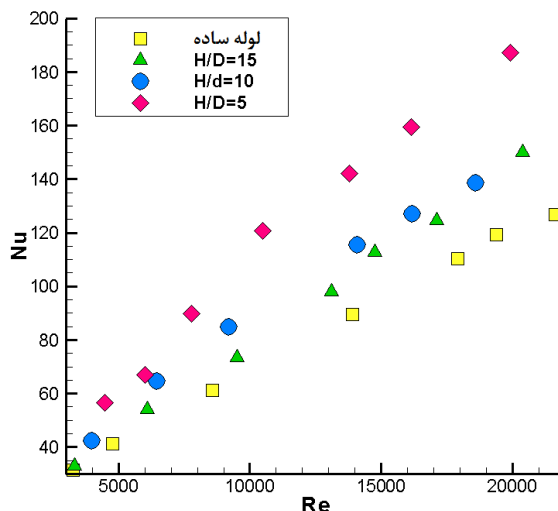
بعد از انجام آزمایش در لوله صاف، نوارپیچه درون همان لوله قرار گرفت و آزمایش‌ها ادامه یافت. شکل ۱، طرح هندسی نوارپیچه داخل لوله را نشان می‌دهد که در آن H طول گام و D عرض نوار پیچه است. توجه داریم که عرض

¹ Sieder, Tate

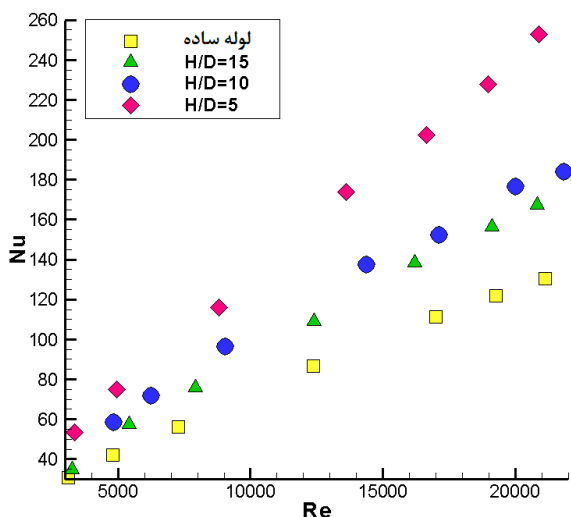
² Notter, Sleicher



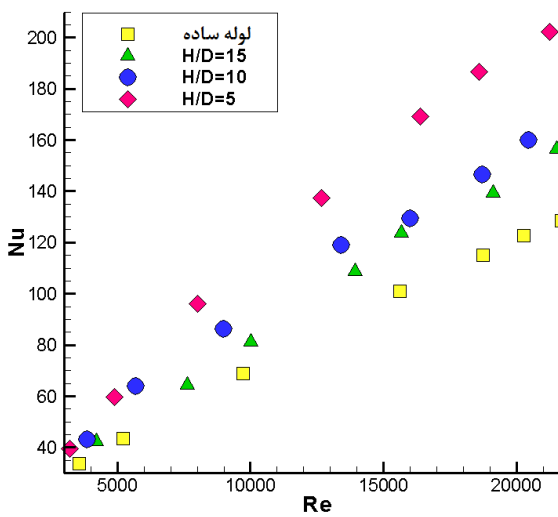
شکل ۶- عدد ناسلت برای هندسه‌های مختلف نوار پیچه برای جریان نانوسیال با غلظت ۰/۲٪ حجمی در لوله



شکل ۴- عدد ناسلت برای هندسه‌های مختلف نوار پیچه برای جریان آب در لوله



شکل ۷- عدد ناسلت برای هندسه‌های مختلف نوار پیچه برای جریان نانوسیال با غلظت ۰/۵٪ حجمی در لوله



شکل ۵- عدد ناسلت برای هندسه‌های مختلف نوار پیچه برای جریان نانوسیال با غلظت ۰/۱٪ حجمی در لوله

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق از نانوسیال آب/TiO₂ و نوار پیچه به منظور بررسی انتقال حرارت استفاده شده است که به عنوان نتیجه گیری می‌توان به موارد زیر، به صورت خلاصه اشاره کرد:

- ۱- با افزایش عدد رینولدز، انتقال حرارت (اعم از آب با نانوسیال یا و بدون استفاده از نوار پیچه) افزایش چشمگیری دارد.

اختلاف عدد ناسلت برای غلظت‌ها و هندسه‌های مختلف با افزایش عدد رینولدز افزایش چشمگیری دارد که با کاهش عدد رینولدز این تفاوت تقلیل می‌یابد. این افزایش به گونه‌ای با غلظت نانوسیال تغییر می‌کند که به ازای غلظت‌های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد حجمی بیشترین افزایش، نسبت به جریان آب خالص در لوله بدون کارگذاری نوار پیچه به ترتیب برابر ۴/۱۲٪، ۵/۱۵٪ و ۷/۲۲٪ است.

Nu	عدد ناسلت
Nu_{TT}	عدد ناسلت با کاربری نوار پیچه
Nu_{PT}	عدد ناسلت بدون استفاده از نوار پیچه
Pr	عدد پراتل
Q	دبی حجمی سیال $m^3 s^{-1}$
Re	عدد رینولدز
T_{out}	دمای خروجی سیال K
T_{in}	دمای ورودی سیال K
ΔT_{LMTD}	اختلاف دمای لگاریتمی
ϕ	کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه
μ_s	لزجت سیال در دیواره $kgm^{-1}s^{-1}$
μ_w	لزجت دینامیکی آب $kgm^{-1}s^{-1}$
μ_{nf}	لزجت دینامیکی نانوسیال $kgm^{-1}s^{-1}$
ρ_{water}	چگالی آب kgm^{-3}
ρ_{TiO_2}	چگالی نانوذرات kgm^{-3}
$\rho_{nanofluid}$	چگالی نانوسیال kgm^{-3}

۸- مراجع

- [1] Choi SUS (1995) Developments and applications of non-Newtonian flows. ASME FED, 66, 99-105.
- [2] Masuda H, Ebata A, Teramae K, Hishinuma N (1993) Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersions of $\gamma-Al_2O_3$, SiO_2 , and TiO_2 ultra-fine particles). Netsu Bussei: Japan, 4(4), 227.
- [3] Pak BC, Cho YI (1998) Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. Exp. Heat Trans. an Int. J., 11(2), 151-170.
- [4] Batchelor GK (1977) The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. J. of Fluid Mech., 83(01), 97-117.
- [5] Duangthongsu W, Wongwises S (2009) Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO_2 -water nanofluids, Exp. Thermal and Fluid Sci., 33, 706-714.
- [6] Bergles AE (1993) Techniques to augment heat transfer, in: W.M. Rohsnow et al. (Eds.), Hand Book of Heat Transfer Applications, 2nd Edition.
- [7] Manglik RM, Bergles AE (1993) Heat transfer and pressure drop correlations for twisted tape inserts in isothermal tubes: Part I—Laminar flows, J. Heat Trans. T. ASME 115 (1993) 881-889.

- ۲- افزودن نانوذرات به سیال پایه، سبب بهبود نه چندان چشمگیر انتقال حرارت می‌شود. این موضوع هنگامی که میانگین تغییر عدد ناسلت برای لوله صاف و در غلظت‌های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد، به ترتیب برابر ۱/۵۷، ۲/۳ و ۳/۴۹ درصد است، بیشتر نمود پیدا می‌کند.
- ۳- افزودن نانوذرات با کاربری نوار پیچه بیشتر خود را نشان داده، موجب بهبود انتقال حرارت می‌شود، که می‌توان دلیل آن را در اختلاط سیال به صورت همزمان با نوار پیچه و نانوذرات یافت.
- ۴- با کاهش گام نوار پیچه، انتقال حرارت افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که میانگین افزایش عدد ناسلت برای گام‌های ۱۵، ۱۰ و ۵ و برای جریان آب به ترتیب برابر، ۶/۸۶، ۲۵/۵ و ۳۷/۶۷ درصد است.
- ۵- استفاده توام از نانوسیال و نوار پیچه، موجب بهبود انتقال حرارت می‌شود.
- ۶- بیشترین میزان افزایش عدد ناسلت طی آزمایش‌ها برای ۰/۵ درصد حجمی نانوسیال و با کارگذاری نوار پیچه با گام پیچش $H/D=5$ بوده که این افزایش در عدد رینولدز ۲۰۸۹۳ اتفاق افتاده و نسبت به آب و بدون نوار پیچه برابر ۱۰۳/۴۵ درصد است.

۷- علائم

C_{water}	گرمای ویژه آب $Jkg^{-1}K^{-1}$
C_{TiO_2}	گرمای ویژه نانوذرات $Jkg^{-1}K^{-1}$
$C_{nanofluid}$	گرمای ویژه نانوسیال $Jkg^{-1}K^{-1}$
D	عرض نوار پیچه m
D_i	قطر داخلی لوله m
H	طول گام نوار پیچه m
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی $Wm^{-2}K^{-1}$
k_w	ضریب هدایت حرارتی آب $Wm^{-1}K^{-1}$
k_{np}	ضریب هدایت حرارتی نانوذرات $Wm^{-1}K^{-1}$
k_{nf}	ضریب هدایت حرارتی نانوسیال $Wm^{-1}K^{-1}$
l	طول بخش آزمایش m
\dot{m}	دبی جرمی سیال $kg s^{-1}$

- concentration of Al_2O_3 nanofluid flowing in a circular tube and with twisted tape insert. *Int. Comm. in Heat and Mass Trans.*, 36(5), 503-507.
- [15] Sundar LS, Sharma KV (2010) Turbulent heat transfer and friction factor of Al_2O_3 Nanofluid in circular tube with twisted tape inserts. *Int. J. of Heat and Mass Trans.*, 53(7), 1409-1416.
- [16] Sundar LS, Kumar NR, Naik MT, Sharma KV (2012) Effect of full length twisted tape inserts on heat transfer and friction factor enhancement with Fe_3O_4 magnetic nanofluid inside a plain tube: An experimental study. *Int. J. of Heat and Mass Trans.*, 55(11-12), 2761-2768.
- [17] Pak BC, Cho YI (1998) Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Exp. Heat Trans. an Int. J.*, 11(2), 151-170.
- [18] Maxwell JC (1881) *A treatise on electricity and magnetism* (Vol. 1). Clarendon press.
- [19] Einstein A (1911) *Berichtigung zu meiner Arbeit: Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen*. *Annalen der Physik*, 339(3), 591-592.
- [20] Sieder EN, Tate GE (1936) Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes. *Industrial & Engineering Chemistry*, 28(12), 1429-1435.
- [21] Notter RH, Sleicher CA (1972) A solution to the turbulent Graetz problem—III Fully developed and entry region heat transfer rates. *Chemical Engineering Science*, 27(11), 2073-2093.
- [8] Manglik RM, Bergles AE (1993) Heat transfer and pressure drop correlations for twisted tape inserts in isothermal tubes: Part II—Transition and turbulent flows. *J. Heat Trans. T. ASME* 115 (1993) 890–896.
- [9] Sarma PK, Subramanyam T, Kishore PS, Rao VD, Kakac S (2002) A new method to predict convective heat transfer in a tube with twisted tape inserts for turbulent flow. *Int. J. of thermal sci.*, 41(10), 955-960.
- [10] Smithberg E, Landis F (1964) Friction and forced convection heat-transfer characteristics in tubes with twisted tape swirl generators. *J. of Heat Trans.*, 86, 39.
- [11] Lopina RF, Bergles AE (1969) Heat transfer and pressure drop in tape-generated swirl flow of single-phase water. *J. of Heat Trans.*, 91, 434.
- [12] Sarma PK, Subramanyam T, Kishore PS, Rao VD, Kakac S (2003) Laminar convective heat transfer with twisted tape inserts in a tube. *Int. J. of Thermal Sci.*, 42(9), 821-828.
- [13] Pathipakka G, Sivashanmugam P (2010) Heat transfer behaviour of nanofluids in a uniformly heated circular tube fitted with helical inserts in laminar flow. *Superlattices and Microstructures*, 47(2), 349-360.
- [14] Sharma KV, Sundar LS, Sarma PK (2009) Estimation of heat transfer coefficient and friction factor in the transition flow with low volume