

مطالعه آزمایشگاهی تاثیرات نانو سیال نانو لوله‌های کربنی چند دیواره-آب بر انتقال حرارت مبدل حرارتی دو لوله‌ای با پوسته غیر فلزی

در این پژوهش تاثیرات افزودن نانو لوله‌های کربنی چند دیواره با قطر ۱۵-۵ نانومتر معلق در آب با درصد وزنی (۰/۲۵-۰/۴) بر ضریب انتقال حرارت بررسی شده است. این کار توسط یک مبدل حرارتی دولوله‌ای با پوسته غیر فلزی PVDF در حالت جریان غیر همسو انجام شده و به این منظور ابتدا ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در دماهای (۳۵°C و ۵۰°C) به صورت آزمایشگاهی تعیین شد. با افزایش دما، غلظت و سرعت جریان نانو سیال، مشخصه‌های انتقال حرارت مبدل حرارتی بهبود می‌یابد. نتایج به دست آمده بیانگر آن است که با استفاده از این نانوسیال می‌توان ضریب انتقال حرارت را تا ۷۵٪ افزایش داد.

علی حسینیان^۱

دانشجوی کارشناسی ارشد

امیرهمایون مقدادی

اصفهانی^۲

استادیار

واژه های راهنما: انتقال حرارت، نانو سیال، مبدل حرارتی پلیمری، نانو لوله های کربنی

۱-مقدمه

امروزه با رشد و توسعه تکنولوژی‌های نوین، انتقال حرارت، کاهش زمان انتقال حرارت، کوچکسازی اندازه مبدل‌های حرارتی و در نهایت افزایش راندمان تجهیزات حرارتی مورد توجه است. کشف و یا ساخت یک سیال حامل انرژی با ضریب هدایت گرمایی بالا در کنار تغییر هندسه، جنس لوله و ... برای بهبود و افزایش میزان انتقال حرارت، همواره یکی از دغدغه‌ها و زمینه‌هایی بوده است که متخصصان و مهندسان را به خود مشغول کرده است. طرح‌ها و روش‌های گوناگونی برای نیل به این منظور پیشنهاد شده است، که از آن جمله افزودن ذرات میکرو یا بزرگ‌تر، به سیالات بوده است. چوی [۱] با توجه به پیشرفت تکنولوژی، افزودن مواد فلزی با ابعاد نانو برای پخش در سیالات عامل معمولی مانند آب، اتیلن گلیکول و روغن صنعتی را پیشنهاد کرد. وی مخلوطی از سیال پایه و ذرات با ابعاد نانو را نانو سیال نامید، که در منابع علمی نیز عموماً به همین نام خوانده می‌شود. بیشتر مطالعات و تحقیقات صورت گرفته، در مورد بررسی خواص مختلف نانو سیالات از جمله هدایت حرارتی آن‌ها می‌باشد.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

ali_hsn@pmc.iaun.ac.ir

^۲ نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

amir_meghdadi@pmc.iaun.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۱/۲۳، تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۵/۲۳

اکسید آلومینیوم و اکسید مس بیشترین نانو ذرات مورد استفاده محققان در آزمایش‌های تحقیقاتی آنها هستند. همه آزمایش‌ها دارای نتایجی است که افزایش هدایت حرارتی با اضافه کردن نانو ذرات را نشان می‌دهد. ماسودا و همکاران [۲] اولین محققینی بودند که ضریب هدایت نانو سیال را اندازه‌گیری کردند. آنها از روش دو مرحله‌ای برای تولید نانو ذرات استفاده کردند. نتایج آنها بیانگر بهبود ۳۲٪ در ضریب هدایت گرمایی با ۴٪ کسر حجمی نانو سیال آب- اکسید آلومینیوم در دمای ۳۱ درجه سانتیگراد بود. آنها نتیجه گرفتند که ضریب هدایت به صورت خطی با افزایش کسر حجمی افزایش می‌یابد. ونگ و همکاران [۳] نیز نانوسیال‌های حاوی نانو ذرات اکسید آلومینیوم و اکسید مس را مورد آزمایش قرار دادند.

نتایج آنها بیانگر بهبود ۴۰٪ در ضریب هدایت گرمایی با ۸٪ کسر حجمی نانوسیال بود. بزرگان و همکاران [۴] از نانوسیال اکسید آلومینیوم-اتیلن گلیکول به عنوان سیال خنک کننده در مبدل حرارتی دو لوله ای استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که بیشترین افزایش انتقال حرارت مربوط به نانوذرات میله‌ای شکل اکسید آلومینیوم است، زیرا افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال پایه با ذرات استوانه‌ای شکل به دلیل کشیدگی این ذرات و همچنین افزایش سطح انتقال حرارت در مقایسه با ذرات کروی بیشتر است.

نانو لوله‌های کربنی نسبت به نانو ذرات فلزی دارای ضریب هدایت حرارتی بسیار بالاتری هستند. به همین علت در سال‌های اخیر، سیالات حاوی نانو لوله‌های کربنی^۱، توجه بسیاری از محققان را برای مطالعه نظری و آزمایشگاهی به خود جلب کرده است [۵-۷]. زای و همکاران [۸] در سال (۲۰۰۳) یک روش برای تولید مخلوط یکنواخت و همگن و پایدار نانولوله‌های کربنی در آب دیونیزه شده و اتیلن گلیکول ارائه دادند.

نتایج آنها نشان داد که هدایت حرارتی نانوسیال با افزایش مقدار نانولوله‌های کربنی افزایش می‌یابد. دینگ و همکاران [۹] نیز رفتار انتقال حرارتی سوسپانسیون نانو لوله‌های کربنی چند دیواره در یک لوله افقی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها افزایش قابل ملاحظه‌ای در ضریب انتقال حرارت جابجایی مشاهده کردند و نشان دادند این بهبود به مقدار دبی، غلظت CNT و PH بستگی دارد. تمامی مطالعات انجام شده در این زمینه نیز بیانگر آن است که استفاده از نانوذرات باعث بهبود خواص حرارتی سیال می‌شوند و همچنین میزان انتقال حرارت در مبدل‌های فلزی را به دلیل افزایش هدایت حرارتی و ضریب انتقال حرارت، افزایش می‌دهند. به عنوان مثال می‌توان به تحقیق حسینی پور و همکاران [۱۰] اشاره کرد. آنها انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال نانولوله‌های کربنی بر پایه آب دیونیزه را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که با افزودن مقدار کمی نانو ذرات کربنی به آب، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین آنها دریافتند که در غلظت‌های پایین نانولوله‌های کربنی، مقدار افت فشار در نانوسیالات محتوی نانولوله‌های کربنی و سیالات پایه تقریباً برابر است و اختلاف بین آنها قابل چشم‌پوشی است. در نتیجه توان اضافی برای پمپ نانوسیال نانولوله کربنی/ آب در غلظت‌های پایین مورد نیاز نیست. بیشترین میزان افزایش ضریب انتقال حرارت ۸/۴۲٪ بوده است که در عدد رینولدز ۲۰۲۷ و غلظت ۲٪ وزنی رخ داده است. در تحقیقی دیگر لطفی و همکاران [۱۱] در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله افقی فلزی، افزایش انتقال حرارت نانوسیال نانولوله‌های کربنی چند جداره^۲ در آب را مورد بررسی قرار دادند.

¹ Carbon Nano Tube

² Multi Wall Carbon Nano Tube

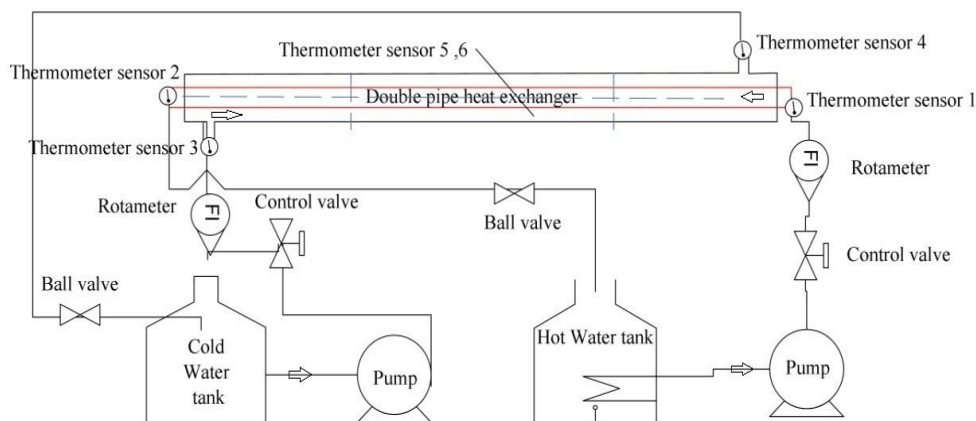
نتایج آنها نشان داد که انتقال حرارت در حضور نانولوله‌های چندجداره در مقایسه با سیال پایه افزایش یافته است. پور جعفر قلی و همکاران [۱۲] جریان نانوسیالات حاوی نانو لوله‌های کربنی تک جداره با سیال پایه آب را درون مبدل حرارتی دو لوله‌ای بررسی کردند. نانوسیالات به عنوان خنک کننده در لوله داخلی و آب خالص گرم در ناحیه حلقوی مبدل حرارتی با عدد رینولدز ۸۰۰۰ جریان داشتند. نتایج نشان دادند که استفاده از نانولوله کربنی تک جداره، شار حرارتی را ۲۵٪ نسبت به آب خالص افزایش می‌دهد. در سالهای اخیر استفاده از مبدل‌های حرارتی پلیمری به دلیل عایق بودن و مقاومت بالای آنها در برابر خوردگی افزایش یافته است [۱۳-۱۴]. همچنین مقاومت حرارتی زیاد این پلیمرها باعث می‌شود که استفاده از آنها به عنوان پوسته مبدل‌های حرارتی به عایق بودن پوسته کمک کرده و اتلاف حرارت را کاهش دهد. در این مقاله برای اولین مرتبه تاثیر استفاده از نانو سیال بر عملکرد مبدل‌های حرارتی پلیمری مورد مطالعه قرار گرفته است. پلیمر مورد استفاده از PVDF^۱ ساخته شده است.

از آنجا که خواص نانوسیال نانولوله کربنی بشدت تابع نحوه ساخت و ابعاد نانولوله‌های کربنی می‌باشد علیرغم وجود تحقیقات متعدد در این زمینه، هنوز تحقیقات زیادی در حال انجام است و نتایج این تحقیقات در بسیاری از موارد با یکدیگر تطابق ندارد. به همین علت، در این تحقیق ابتدا خواص ترموفیزیکی نانو سیال جدید و پر کاربرد نانو لوله‌های کربنی چند دیواره-آب با سه درصد وزنی ۰/۰۴٪، ۰/۱۷٪ و ۰/۲۵٪ در دماهای مختلف بررسی شده و سپس به مقایسه انتقال حرارت سیال آب دیونیزه و نانو سیال در یک مبدل حرارتی دولوله ای در حالت جریان غیر همسو پرداخته می‌شود. از جمله نوآوری‌های این مقاله، پایداری نانوسیال نانولوله کربنی با درصد وزنی ۰/۲۵٪ است که بوسیله سورفکتانت کاتیونی CTAB انجام گرفته است. همچنین تاثیر افزایش غلظت نانوذرات بر روی مشخصه‌های انتقال حرارت بررسی شده است.

۲-تجهیزات و نحوه آزمایش

در این تحقیق از مبدل حرارتی دولوله‌ای با لوله داخلی از جنس آلایژ مس و لوله بیرونی از جنس PVDF استفاده شد. شکل (۱) شماتیکی از مبدل حرارتی مورد بحث را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده مبدل شامل لوله داخلی و خارجی می‌باشد که جدا کننده سیال ورودی و خروجی است. دیواره داخلی با هر دو سیال گرم و سرد در ارتباط است. دو دبی سنج برای جریانهای گرم و سرد، چهار دماسنج برای اندازه گیری دماهای ورودی و خروجی هر دو جریان گرم و سرد و دو دماسنج برای اندازه گیری دمای سطح لوله داخلی استفاده شده است. یک گرمکن مجهز به ترموستات دیجیتالی برای تنظیم دمای مخزن سیال گرم در دمای دلخواه در نظر گرفته شده است. دمای نانوسیال به عنوان سیال گرم در مقادیر ۳۵°C تا ۵۰°C و دبی نانوسیال درون لوله داخلی در مقادیر ۱۰۰-۳۰۰ (L/h) و برای جریان آب سرد درون پوسته بر روی ۱۰۰ (L/h) تنظیم شد. سمت خارجی پوسته مبدل عایق شده است تا از اتلاف حرارت جلوگیری شود. آزمایش ابتدا با استفاده از جریان آب خالص انجام و سپس از جریان نانوسیال نانولوله کربن/ آب استفاده شد. برای دقت هر چه بیشتر، هر آزمایش سه مرتبه انجام شده است.

^۱ Polyvinlidene Fluoride



شکل ۱- شماتیک مبدل حرارتی

جدول ۱- حساسیت تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده

تجهیزات	مدل	حساسیت
روتامتر	Glass tube Teflon	2%
RTDs	PT-100 resistance sensor	0.1 °C
ترموکوپل	Type k	0.1 °C
هیتر	1200 W, 100mm×10 mm (L×D)	±2%
پمپ	Centrifugal, stainless steel impeller	-

در جدول (۱) حساسیت تجهیزات مورد استفاده نشان داده شده است.

۳- معادلات حاکم

۳-۱- روابط مورد استفاده برای محاسبه ضریب انتقال حرارت در این آزمایش

در پژوهش حاضر از مبدل حرارتی دو لوله‌ای جریان غیر همسو استفاده شده است. انتقال حرارت سیال گرم از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$Q_h = \dot{m}_h \times C_{p,h}(T_{hi} - T_{ho}) \quad (1)$$

که \dot{m}_h دبی جرمی سیال گرم $C_{p,h}$ ظرفیت گرمایی ویژه سیال گرم و T_{hi} و T_{ho} به ترتیب دمای ورودی و دمای خروجی سیال گرم هستند. انتقال حرارت سیال سرد نیز از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$Q_c = \dot{m}_c \times C_{p,c}(T_{co} - T_{ci}) \quad (2)$$

که \dot{m}_c دبی جرمی سیال سرد و $C_{p,c}$ ظرفیت گرمایی ویژه سیال سرد و T_{co} و T_{ci} به ترتیب دمای ورودی و دمای خروجی سیال سرد هستند. انتقال حرارت میانگین از رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$Q_{avg} = \frac{Q_h + Q_c}{2} \quad (3)$$

لازم به ذکر است که به علت عایق بودن پوسته مبدل، در بسیاری از موارد Q_h و Q_c با هم برابرند اما در برخی از موارد به علت وجود اتلافات جزئی Q_h و Q_c به مقدار بسیار جزئی با هم متفاوتند. انتقال حرارت جابجایی برای لوله داخلی از رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$Q_{convection} = h_i \times A_{is,ip} (T_w - T_{avg,h}) \quad (۴)$$

که T_w میانگین دمای سطح در ورودی و خروجی لوله داخلی و $T_{avg,h}$ دمای میانگین سیال گرم و $A_{is,ip}$ سطح داخلی لوله داخلی می‌باشد. برای محاسبه ضریب انتقال حرارت h_i و عدد ناسلت Nu_h از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$h_i = \frac{Q_h}{A_{is,ip} \times (T_w - T_{avg,h})} \quad (۵)$$

$$Nu_h = \frac{h_i \times D_h}{K_h} \quad (۶)$$

که در اینجا $D_h = d_{i,ip}$ و K_h ضریب هدایت سیال گرم در نظر گرفته می‌شود. دمای لگاریتمی میانگین برای مبدل حرارتی دولوله ای جریان غیر همسو از رابطه (۷) بدست می‌آید.

$$LMTD = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln \left(\frac{(T_{hi} - T_{co})}{(T_{ho} - T_{ci})} \right)} \quad (۷)$$

ضریب انتقال حرارت کلی تجربی لوله داخلی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$U_{i,exp} = \frac{Q_{avg}}{A_{is,ip} \times LMTD} \quad (۸)$$

۳-۲- روابط مورد استفاده برای صحت سنجی نتایج

برای محاسبه عدد رینولدز جریان آب سرد از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$Re_c = \frac{\rho_c \times V_c \times D_c}{\mu_c} \quad (۹)$$

که در آن ρ_c چگالی سیال سرد و V_c سرعت سیال سرد و D_c قطر هیدرودینامیکی و μ_c لزجت سیال سرد می‌باشد. عدد ناسلت سیال سرد برای $Re_{c} > 2300$ از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$Nu_c = 3.657 + \frac{0.0677 \times (Re_c \times Pr_c \times \frac{D_c}{L})^{1.33}}{1 + (0.1 \times Pr_c) \times (Re_c \times \frac{D_c}{L})^{0.33}} \quad (۱۰)$$

برای محاسبه عدد رینولدز جریان آب گرم از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$Re_h = \frac{\rho_h \times V_h \times D_h}{\mu_h} \quad (۱۱)$$

که در آن چگالی سیال گرم و V_h سرعت سیال گرم و μ_h لزجت سیال گرم می‌باشد. در این مقاله که در آن $D_h = d_{i,ip}$ در نظر گرفته می‌شود. عدد ناسلت سیال گرم برای $Re_h > 2300$ از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$Nu_h = \frac{\frac{f}{8} \times (Re_h - 1000) \times Pr_h}{1 + 12.7 \times \left\{ \frac{f}{8} \right\}^{0.5} \times \{(Pr_h)^{0.666} - 1\}} \quad (12)$$

که در آن $f = (1.82 \times \log_{10} Re_h - 1.64)^{-2}$ می‌باشد. عدد پیرانتل برای سیال سرد و گرم از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$Pr_h = \frac{\mu_h \times C_{p,h}}{k_h} \quad (13)$$

$$Pr_c = \frac{\mu_c \times C_{p,c}}{k_c} \quad (14)$$

ضریب جابجایی سیال گرم و سرد از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$h_c = \frac{Nu_c \times K_c}{D_c} \quad (15)$$

$$h_h = \frac{Nu_h \times K_h}{D_h} \quad (16)$$

تمامی خواص ترمودینامیکی در دمای میانگین برای سیال آب از جدول استاندارد استخراج می‌شود. ضریب انتقال حرارت کلی لوله داخلی از رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$U_{i,theo} = \frac{1}{\left\{ \frac{1}{h_h} \right\} + \left\{ \frac{d_{i,ip}/2}{k_{ip}} \times \ln \left(\frac{d_{o,ip}/2}{d_{i,ip}/2} \right) \right\} + \left\{ \frac{d_{i,ip}/2}{d_{o,ip}/2} \times \frac{1}{h_c} \right\}} \quad (17)$$

که در آن $d_{i,ip}$ قطر داخلی لوله داخل و $d_{o,ip}$ قطر بیرونی لوله داخل و k_{ip} ضریب هدایت لوله داخلی می‌باشد. چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه نانو سیال از روابط زیر قابل محاسبه هستند [۹] و [۱۱]:

$$\rho_{nanofluid} = \{\phi \times \rho_{nanoparticle}\} + \{(1 - \phi) \rho_{water}\} \quad (18)$$

$$C_{p,nanofluid} = \frac{[\phi \times \{\rho_{nanoparticle} \times C_{p,nanoparticle}\}] + (1 - \phi) \times [\rho_{water} \times C_{p,water}]}{\rho_{nanofluid}} \quad (19)$$

۴- خواص ترموفیزیکی نانو سیال نانو لوله‌های کربنی-آب

در این پژوهش نانو سیال نانولوله‌های کربنی چند دیواره-آب دیونیزه شده مورد آزمایش قرار گرفته است. نانو ذرات از شرکت آمریکایی US Resaerch Nanomaterials خریداری شده است. جدول (۲) خواص فیزیکی نانو ذرات نانو لوله‌های کربنی مورد استفاده را نشان می‌دهد.

نانو لوله‌های کربنی به شدت آب گریز هستند بنابراین باید در آب پایدار شوند در غیر اینصورت توده‌ای شده و به سرعت ته‌نشین می‌شوند. به همین جهت از سورفکتانت کاتیونی CTAB برای پایدار کردن نانوسیال استفاده شده است. این آزمایش در درصد وزنی های ۰/۰۴، ۰/۱۷ و ۰/۲۵ انجام شده است. لازم به ذکر است که نمونه‌های تهیه شده با این روش به مدت چندین ماه بدون هیچگونه رسوب و ته نشینی قابل مشاهده پایدار مانده اند. شکل (۲) نانوسیال حاوی وزنی نانولوله‌های کربنی ۰/۰۴ وزنی را قبل و بعد از اضافه کردن سورفکتانت CTAB نشان می‌دهد. این شکل می در شکل (۳) اثرات افزودن نانو لوله‌های کربنی در محدوده ۰/۰۴ تا ۰/۲۵ درصد وزنی و در دماهای محدود به 35°C تا 50°C بر نسبت ضریب هدایت گرمایی نانو سیال نانو لوله‌های کربنی- آب به سیال پایه نشان داده شده است. تواند نشان دهنده پایداری مناسب نانوسیال تهیه شده باشد.

برای محاسبه ضریب هدایت گرمایی نانو سیال از روش سیم داغ گذرا با استفاده از دستگاه KD2-Pro و پرآب KS1 استفاده شده است. با توجه به شکل (۳) با افزایش درصد وزنی نانو سیال و افزایش دما، نسبت ضریب انتقال حرارت به طور چشمگیری افزایش می‌یابد.



(ب)

(الف)

شکل ۲- نانوسیال نانولوله کربنی-آب، (الف) با سورفکتانت CTAB، (ب) بدون سورفکتانت CTAB

جدول ۲- مشخصات فیزیکی نانو ذرات نانو لوله‌های کربنی استفاده شده در پژوهش حاضر

US Research Nanomaterials Inc	شرکت سازنده
۵-۱۵ (nm)	قطر بیرونی
۳-۵ (nm)	قطر داخلی
۵۰ (μm)	طول (TEM)
چند دیواره	شکل
$2/6 (g/cm^3)$	چگالی
$3000 (W/m.K)$	هدایت حرارتی

نانولوله‌های کربنی دارای ضریب انتقال حرارت هدایتی بالایی هستند. با افزایش درصد وزنی، مقدار نانولوله‌ها در سیال افزایش می‌یابد و باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال می‌شوند. ولی این روند تا موقعی ادامه می‌یابد که پدیده خوشه‌ای شدن و ته نشینی اتفاق نیفتد. خوشه‌ای شدن نانو ذرات و تجمع آنها سبب کاهش قابلیت هدایت گرمایی نانو سیال می‌شود. همانگونه که در شکل (۳) مشخص است در درصد وزنی های پایین (۰/۰۴ و ۰/۱۷) تأثیر دما تقریباً کمتر بوده ولی با افزایش درصد وزنی به ۰/۲۵ دما تغییرات بیشتری را روی نانو سیال داشته است. بیشترین مقدار ضریب هدایت گرمایی حدود ۲۱٪ در غلظت وزنی ۰/۲۵ بدست آمد. همچنین با افزایش دما از ۳۵°C تا ۵۰°C مقدار نسبت ضریب هدایت گرمایی نانو سیال ۰/۲۵ درصد وزنی حدود ۱۰ درصد افزایش یافت.

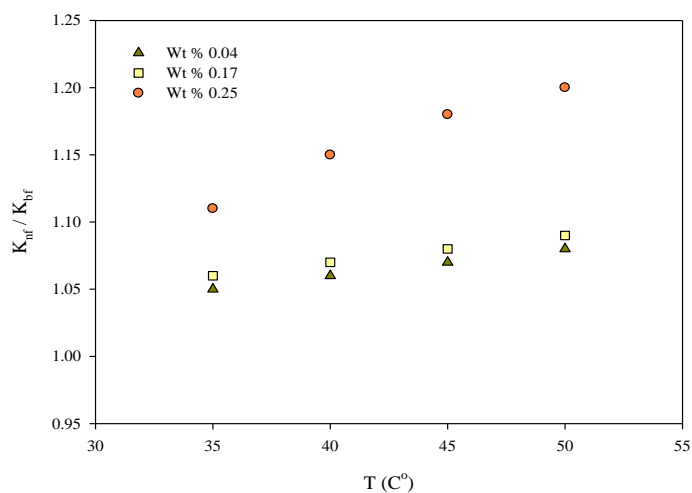
برای اندازه‌گیری لزجت دینامیکی نانو سیال از لزجت سنج نوع دورانی، بروکفیلد^۱ استفاده شد. شکل (۴) اثر دما بر نسبت لزجت دینامیکی نانو سیال به سیال پایه در درصد وزنی ۰/۰۴، ۰/۱۷ و ۰/۲۵ را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با افزایش غلظت، ویسکوزیته افزایش یافته و با افزایش دما از ۳۵°C تا ۵۰°C ویسکوزیته کاهش می‌یابد. علت آن است که با افزایش دما نیروهای بین مولکولی کاهش می‌یابد. به عنوان مثال برای نانو سیال با درصد وزنی ۰/۰۴ درصد با افزایش دما از ۳۵°C تا ۵۰°C کاهش ۸ درصدی لزجت نسبی مشاهده می‌شود. همچنین با افزایش کسر جرمی، ویسکوزیته نانوسیال افزایش می‌یابد. افزودن نانو لوله‌ها به سیال پایه به علت افزایش نیروهای بین مولکولی از حرکت آسان لایه‌ها بر روی یکدیگر جلوگیری کرده و سبب افزایش لزجت می‌شود. در دماهای بالاتر نرخ کاهش ویسکوزیته شدیدتر است زیرا با افزایش دما حرکات بی نظم نانولوله‌ها افزایش یافته و راحت‌تر می‌توانند بر نیروهای بین مولکولی غلبه نمایند.

۵- نتایج

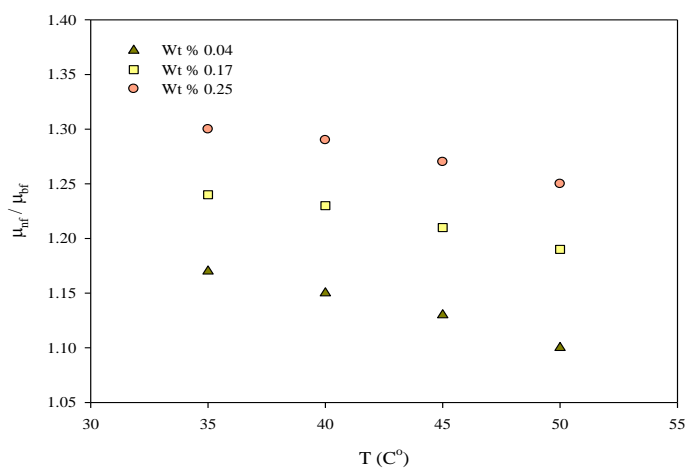
قبل از شروع آزمایش‌های مربوط به انتقال حرارت نانوسیال در مدل حرارتی دولوله‌ای، ابتدا ضریب انتقال حرارت داخلی مبدل با استفاده از آب خاص به عنوان سیال سرد و گرم محاسبه شده و با نتایج حاصل از معادله (۱۷) مقایسه شد. همانطور که در شکل (۵) رسم شده است اختلاف کمی بین مقادیر آزمایشگاهی و نتایج تئوریک حاصل از معادله (۱۷) وجود دارد و حداکثر خطای موجود بین نتایج ۱۰/۷٪ است که بیانگر صحت و دقت بالای داده‌های آزمایشی می‌باشد.

با افزایش دمای ورودی سیال گرم ضریب انتقال حرارت داخلی مبدل با افزایش حدود ۶ درصد مواجه می‌شود که در مورد داده‌های آزمایشگاهی این افزایش مقدار بیشتری را نشان می‌دهد. شکل (۶) تأثیرات عدد رینولدز و درصد وزنی نانوسیال بر ضریب انتقال حرارت در دمای ۳۵°C را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، با افزایش غلظت نانوسیال، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد که بدلیل افزایش هدایت حرارتی سیال با درصد وزنی بالاتر نسبت به سیال های درصد وزنی های کمتر می‌باشد.

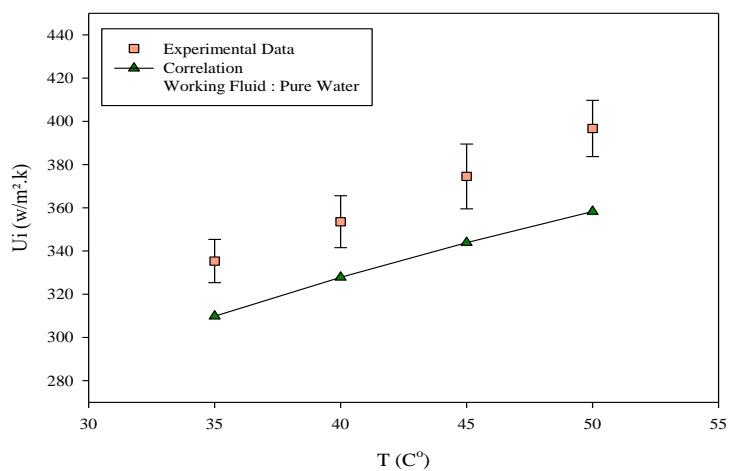
¹ Brookfield CAP 2000+ Viscometer



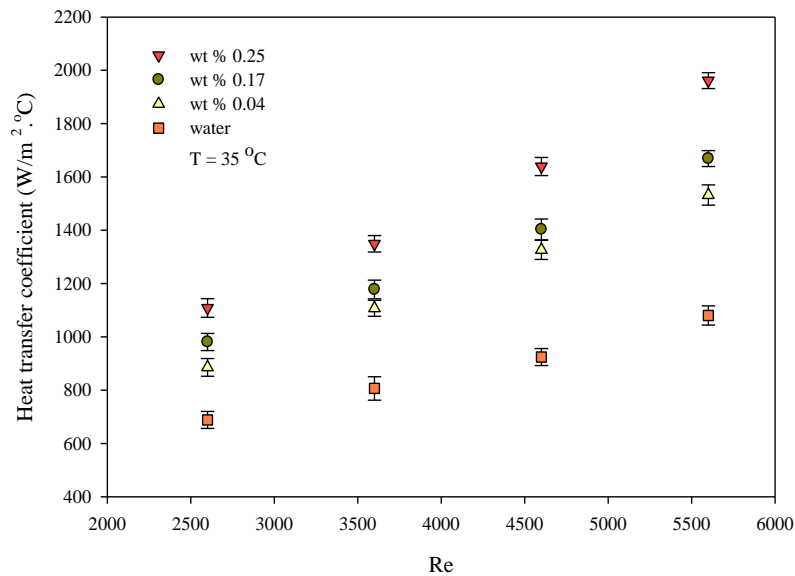
شکل ۳- ضریب هدایت گرمایی نانو سیال نانو لوله‌های کربنی- آب



شکل ۴- لزجت نانو سیال نانو لوله‌های کربنی- آب



شکل ۵- مقایسه آزمایشگاهی و تئوری ضریب کلی انتقال حرارت لوله داخلی سیال آب در دبی ۱۰۰ (L/h)

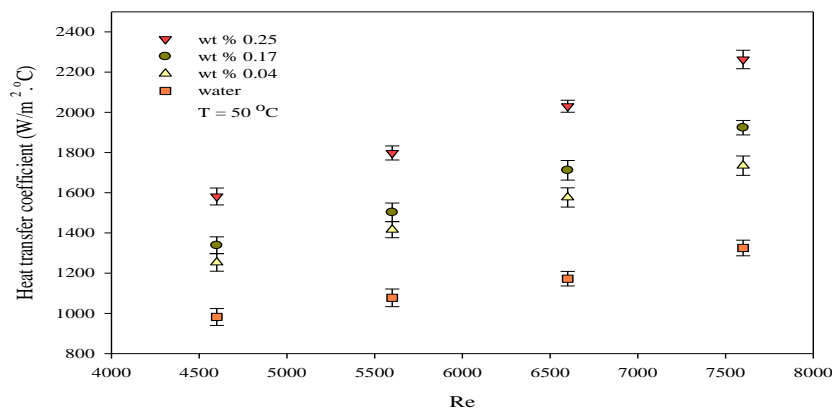


شکل ۶- تاثیر عدد رینولدز و درصد وزنی بر ضریب انتقال حرارت در دمای ۳۵ °C

همچنین تاثیر مثبت حرکت بروانی را می‌توان علت دیگر افزایش ضریب انتقال حرارت نانو سیال دانست. حرکات بی‌نظم و تصادفی نانو لوله‌ها درون سیال سبب می‌شود که توسعه لایه مرزی حرارتی به تأخیر افتد که منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی خواهد شد [۹،۱۷]. نسبت افزایش ضریب انتقال حرارت برای نانوسیال با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. به عنوان مثال مشاهده می‌شود که ضریب انتقال حرارت مبدل حرارتی با افزایش عدد رینولدز از ۲۶۰۰ به ۵۶۰۰ برای سیال آب و نانو سیال با کسر جرمی ۰/۲۵٪ به ترتیب حدود ۵۲٪ و ۷۱٪ افزایش می‌یابد.

شکل (۷) تأثیرات عدد رینولدز و درصد وزنی نانوسیال بر ضریب انتقال حرارت در دمای ۵۰°C را نشان می‌دهد. ضریب انتقال حرارت مبدل حرارتی با افزایش عدد رینولدز از ۴۶۰۰ به ۷۶۰۰ برای سیال آب و نانو سیال با کسر جرمی ۰/۲۵٪ بترتیب حدود ۳۴٪ و ۴۳٪ افزایش می‌یابد. طبق شکل تاثیر عدد رینولدز بر ضریب انتقال حرارت به مراتب بیشتر از تاثیر دما می‌باشد. با افزایش دما ضریب انتقال حرارت به تدریج افزایش می‌یابد. به طوری که بیشترین مقدار ضریب انتقال حرارت حدود $2263 \text{ (W/m}^2\cdot\text{°C)}$ در دمای ۵۰°C بدست آمد. با توجه به نتایج، افزایش ضریب انتقال حرارت مبدل حرارتی غیر فلزی بر اثر افزایش دما در دبی حجمی ۳۰۰ (L/h) برای سیال آب دیونیزه شده برابر حدود ۹٪ و برای نانو سیال نانو لوله‌های کربنی-آب ۰/۰۴، ۰/۱۷ و ۰/۲۵ به ترتیب ۱۵٪، ۱۲٪ و ۱۷٪ گزارش شد.

در جدول (۳) نسبت ضریب انتقال حرارت مبدل در حالت استفاده از نانو سیال به ضریب انتقال حرارت مبدل در حالت استفاده از آب خالص به ازای دما و غلظت‌های مختلف در دبی حجمی ۳۰۰ (L/h) نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشخص می‌شود که با افزایش دما و غلظت، نسبت ضریب انتقال حرارت نیز افزایش یافته است اما اثر تغییر غلظت بیشتر از اثر تغییر دما می‌باشد.



شکل ۷- تاثیر عدد رینولدز و درصد وزنی بر ضریب انتقال حرارت در دمای ۵۰ °C

جدول ۳- نسبت ضریب انتقال حرارت نانو سیال به ضریب انتقال حرارت آب خالص

غلظت			دما
%/۲۵	%/۱۷	%/۰۴	
۱/۴۱	۱/۲۵	۱/۱۹	۲۵ °C
۱/۴۳	۱/۲۶	۱/۱۹	۵۰ °C

۷- نتیجه گیری

در این تحقیق تاثیرات افزودن نانوذرات نانو لوله‌های کربنی (با قطر ۵ تا ۱۵ نانومتر) بر انتقال حرارت مبدل حرارتی دو لوله‌ای با پوسته غیر فلزی PVDF بررسی شد. نتایج نشان داد با افزایش دما، غلظت و دبی سیال، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. افزایش دبی بیشترین تاثیر را در افزایش انتقال حرارت بر عهده دارد. با افزایش دما و غلظت، نسبت ضریب انتقال حرارت مبدل در حالت استفاده از نانو سیال به ضریب انتقال حرارت در حالت استفاده از آب خالص افزایش می‌یابد اما اثر تغییر غلظت بیشتر از اثر تغییر دما می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که با استفاده از نانوسیال نانولوله‌های کربنی می‌توان ضریب انتقال حرارت را تا ۷۵٪ افزایش داد که در مقایسه با سایر نانو سیالات مرسوم، مقدار قابل ملاحظه‌ای می‌باشد.

مراجع

- [1] Choi., S.U.S., "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles, Developments and Applications of Non-Newtonian Flows", Vol. 231, No. 66, pp. 99-105, (1995).
- [2] Masuda, H., Ebata, A., Teramae, K., and Hishinuma, N., "Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-fine Particles (Dispersion of γ -Al₂O₃, SiO₂, and TiO₂ Ultra-fine Particles)", Netsu Bussei (Japan), Vol. 4, No. 4, pp. 227-233, (1993).

- [3] Wang, X., Choi, S. U. S., and Xu, X., "Thermal Conductivity of Nano Particle Fluid Mixture", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 13, pp. 474-480, (1999).
- [۴] نوید بزرگان، فرشاد پناهی زاده، نریمان بزرگان، "بررسی کاربرد نانو سیالات اتیلن گلیکول-اکسید آلومینیوم به عنوان سیال خنک کننده در مبدل حرارتی دو لوله‌ای"، *مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس*، دانشگاه تربیت مدرس، دوره ۱۱، شماره ۳، ص ۷۵-۸۴، (۱۳۹۰).
- [5] Amrollahi, A., Rashidi, A.M., Lotfi, R., Emami Meibodi, M., and Kashefi, K., "Convection Heat Transfer of Functionalized MWNT in Aqueous Fluids in Laminar and Turbulent Flow at the Entrance Region", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 717-723 (2010).
- [6] Talaei, Z., Mahjoub, A. R., Rashidi, A.M., Amrollahi, A., and Emami Meibodi, M., "The Effect of Functionalized Group Concentration on the Stability and Thermal Conductivity of Carbon Nanotube Fluid as Heat Transfer Media", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, pp. 513, (2011).
- [7] Esfe, M.H., Saedodin, S., Mahian, O., and Wongwises, S., "Thermophysical Properties, Heat Transfer and Pressure Drop of COOH-functionalized Multi Walled Carbon Nanotubes/water Nanofluids", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 58, pp. 176-183, (2014).
- [8] Xie, H., Lee, W., Youn, M., and Choi, "Nanofluids Containing Multi Walled Carbon Nanotubes and their Enhanced Thermal Conductivities", *Journal of Applied Physics*, Vol. 94, pp. 4967-4971, (2003).
- [9] Ding, Y., Alias, H., Wen, D., and Williams, R. A., "Heat Transfer of Aqueous Suspensions of Carbon Nanotubes (CNT Nanofluids)", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 240-250, (2006).
- [۱۰] ابراهیم حسینی پور، سعید زینالی هریس، مهدی شنبدی، "بررسی تجربی ضریب انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال نانولوله کربن-آب تحت بار حرارتی ثابت"، *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، دوره ۱۴، شماره، (۱۳۹۳).
- [11] Lotfi, R., Rashidi, A.M., and Amrollahi, A., "Experimental Study on the Heat Transfer Enhancement of MWNT Water Nanofluid in a Shell and Tube Heat Exchanger", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 108-111, (2012).
- [۱۲] محمدپور جعفرقلی، قنبرعلی شیخ زاده، "مطالعه عددی جریان آشفته نانو سیالات حاوی نانو لوله کربنی در یک مبدل حرارتی دولوله ای با جریان مخالف"، *دانشگاه کاشان*، (۱۳۸۱).
- [13] Joen, C., Park, Y., Wang, Q., Sommers, A., Han, X., and Jacobi, A., "A Review on Polymer Heat Exchangers for HVAC&R Applications", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 32, pp. 763-779, (2009).
- [14] Shokouhmand, H., and Sangtarash, F., "The Effect of Flexible Tube Vibration on Pressure Drop and Heat Transfer in Heat Exchangers Considering Viscous Dissipation Effects", *Heat Mass Transfer*, 10.1007/s00231-008-0388-2, (2008).

- [15] Aghayari, R., Maddah, H., Zarei, M., Dehghani, M., and Ghanbari Kaskari Mahalle, S., "Heat Transfer of Nanofluid in a Double Pipe Heat Exchanger", Hindawi Publishing Corporation, International Scholarly Research Notices, Article ID 736424, (2014).
- [16] Chavda, N.K., Patel, J. R., and Patel, H.H., and Parmar, A.A., "Effect of Nanofluid on Heat Transfer Characteristics of Double Pipe Heat Exchanger: Part-i: Effect of Aluminum Oxide Nanofluid", IJRET. 2319-1163, (2013).
- [17] He, Y., Jin, Y., Chen, H., Ding, D., and Cang, H. Lu., "Heat Transfer and Flow Behavior of Aqueous Suspensions of TiO₂ Nanoparticles (nano β fluids) Flowing Upward Through a Vertical Pipe", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, No. 11, pp. 2272-2281, (2007).

فهرست نمادهای انگلیسی

انتقال حرارت	Q
دما	T
قطر لوله	D, d
ضریب هدایت حرارتی	K
دبی جرمی	\dot{m}
ظرفیت گرمایی ویژه	C_p
ضریب انتقال حرارت	h
ضریب انتقال حرارت کلی	U
عدد ناسلت	Nu
چگالی	ρ
دمای لگاریتمی	$LMTD$
سرعت سیال	V
عدد رینولدز	Re
عدد پرانتل	Pr

زیرنویس ها

گرم	h
سرد	c
داخلی	i
خارجی	o
میانگین	avg
آزمایشگاهی	exp
لوله	p

Abstract

In the present research the effect of adding multi wall Carbon nano tubes (with 10-15 nano meter diameter) on the heat transfer coefficient of a heat exchanger is investigated. This work is performed by a co current flexible double pipe heat exchanger made of PVDF.

To this end, the viscosity and thermal conductivity of nano fluids is measured experimentally for various temperatures and concentrations. The nano fluid temperature is set at 35°C, 40°C, 45°C and 50°C. The flow rate of nano fluid inside the inner tube was adjusted at 100 (L/h), 200(L/h), 300(L/h) while, the cold water flow rate of the outer tube is 100 (L/h)The results shows that heat transfer coefficient of the heat exchanger improves with increasing the fluid temperature, concentration and flow rate. The most effective factor on the heat transfer coefficient is flowrate. Obtained results indicate that using this nano fluid enhances heat transfer coefficient 75%.