

مطالعه‌ی تجربی جابه‌جایی اجباری نانوسیالات در لوله‌ی حلزونی

میلاد تاجیک جمال‌آباد (دانشجوی کارشناسی ارشد)

امیرحسین زمزمیان* (استادیار)

محمد بازوکی (دانشیار)

مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، پژوهشگاه مواد و انرژی

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۴)
دوره ۲ - ۳، شماره ۲، ص. ۵۹-۶۶

milad.tajik6@gmail.com
azamzamian@merc.ac.ir
mpazouki@mcrc.ac.ir

این پژوهش به بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی و ضریب اصطکاک نانوسیالات مس - آب و آلومینیوم - آب در کوئل حلزونی اختصاص دارد. این آزمایش‌ها برای رژیم آرام جریان و تحت شرایط مرزی دمایی دیواره ثابت انجام شده است و نانوسیالات در غلظت‌های مختلف و شرایط عملکرد متفاوت مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. اثر پارامترهایی همچون عدد گراتز، دمایی دیواره و غلظت بر ضریب انتقال حرارت و افت فشار جریان مطالعه شده است. هدایت حرارتی به‌صورت تجربی اندازه‌گیری شده است و نتایج حاصله نشان می‌دهد که در غلظت ۲۰۰۰ ppm هدایت حرارتی نانوسیال آب - مس ۱۸٪ بیشتر از آب - آلومینیوم است. به دلیل جریان ثانویه ایجاد شده در لوله، عدد ناسلت با افزایش عدد گراتز به‌صورت نوسانی تغییر می‌کند. درمورد نانوسیال مس و آلومینیوم افزایش ضریب هدایت حرارتی در بهترین حالت به حدود ۲۶ و ۲۲ درصد می‌رسد.

واژگان کلیدی: کوئل حلزونی، نانوسیال، عدد ناسلت، افت فشار، هدایت حرارتی.

۱. مقدمه

نتایج قابل قبولی خواهد شد. در بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی در جریان آرام شعاعی با استفاده از نانوسیال آلومینا - آب،^[۹] برای ایجاد جریان شعاعی از دو دیسک هم‌محور که با فاصله‌ی مشخصی از هم قرار گرفته بودند استفاده شد. تزریق سیال از مرکز این دو دیسک انجام می‌شد. نتایج نشان داد که عدد ناسلت با افزایش غلظت و رینولدز افزایش یافت. همچنین با افزایش فاصله‌ی بین دو دیسک میزان ناسلت کاهش پیدا کرد. انتقال حرارت جابه‌جایی در یک لوله‌ی خمیده به‌شدت به حرکت ثانویه بستگی دارد. حرکت ثانویه ناشی از نیروی گریز از مرکزی است که به سیال در حین حرکت در یک مسیر منحنی شکل وارد می‌شود؛ این اثر سهم مهمی در افزایش انتقال حرارت خواهد داشت. این پدیده سبب شده است که کوئل‌های حلزونی نقش مهمی در کاربرد انتقال حرارت - نظیر فرایندهای بازیافت حرارتی، تهویه مطبوع و سیستم‌های سرمایشی، راکتورهای شیمیایی و صنایع غذایی و داروسازی - ایفا کنند. درخصوص انتقال حرارت، انتقال جرم و پارامترهای جریان در لوله‌ی منحنی شکل نیز مطالعاتی انجام شده است.^[۱۰]

درمورد انتقال حرارت در کوئل حلزونی و عملکرد مبدل‌های حلزونی مطالعات تجربی بسیاری انجام شده، اما بررسی عددی انتقال حرارت و جریان سیال در این مورد زیاد نیست. برای شبیه‌سازی عملکرد مبدل حلزونی^[۱۱، ۱۲] از ضرایب تصحیح مناسب استفاده شد. علاوه بر بررسی عملکرد و پارامترهای انتقال حرارت این کوئل‌ها در شرایط مختلف،^[۱۳، ۱۴] آنها همچنین مطالعات آزمایشگاهی و محاسباتی فراوانی روی عملکرد این نوع مبدل انجام دادند.^[۱۵] مطالعاتی نیز درخصوص انتقال جرم یونی در کوئل حلزونی برای بستر سیالی انجام شده است.^[۱۶] همچنین بررسی‌های تجربی

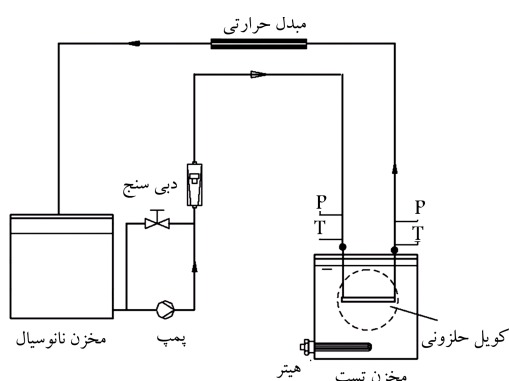
در دهه‌ی گذشته تحقیقات بسیاری درمورد انتقال حرارت چندین نانوسیال به‌صورت تجربی صورت گرفته است. برای بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی،^[۱] انتقال حرارت در کانال‌های موازی با استفاده از نانوسیال نامشخص بررسی و مشاهده شد که مقاومت حرارتی تا ۲۰۰ درصد کاهش یافته است. افزایش زیاد حرارتی نخستین بار در انتقال حرارت جریان مغشوش گزارش شد.^[۲] براین اساس محققین دریافته‌اند که ضریب انتقال حرارت در سرعت یکسان برای نانوسیال مس - آب با ۲ درصد حجمی نانوذرات حدود ۴۰٪ بیشتر از آب خالص است. نتایج این بررسی‌ها نشان‌دهنده‌ی افزایش فوق‌العاده‌ی عدد بی‌بعد ناسلت نانوسیال نسبت به آب است، به‌طوری که مدل‌های نظری مرسوم برای پیش‌بینی عدد ناسلت آب جوابگو نیست و مدل پراکندگی جایگزین^[۳-۴] برای تطبیق با نتایج تجربی قابل استفاده است. محققین نانوسیال‌ها را با لوله‌ی گرمایی نوسانی ترکیب کردند^[۵] تا وسیله‌ی خنک‌کننده‌ی با کارایی بسیار بالا حاصل شود. نتایج تجربی نشان داد که نانوسیال الماس اختلاف دما بین تبخیرکننده و چگالنده را از ۴۰/۹ به ۲۴/۳ درجه سانتی‌گراد برای توان ورودی ۸۰ وات کاهش دهد. در تحلیل عددی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری جریان آرام نانوسیال گاما آلومینا - آب در درون لوله‌های دایره‌ی،^[۶، ۷] برای انجام محاسبات از دو مدل استفاده شد و نهایتاً مدل‌ها را با هم مقایسه کردند. مقایسه‌ی نتایج حاصل از این دو مدل و نتایج مطالعه‌ی تجربی دیگر محققین^[۸] نشان داد که در نظر گرفتن آثار حرکت براونی در ضریب هدایت حرارتی و گرانیروی منجر به

* نویسنده مسئول

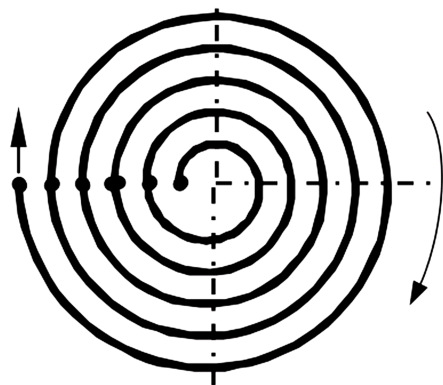
تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۸/۱۹، اصلاحیه ۱۳۹۲/۱۲/۱۴، پذیرش ۱۳۹۳/۳/۲۷.

جدول ۱. مشخصات هندسی کویل.

قطر لوله (mm)	فاصله‌ی بین هر دو لوله (mm)	قطر خارجی کویل (mm)	قطر داخلی کویل (mm)	شعاع میانگین کویل (mm)	طول کل لوله (mm)
۹	۳۰	۴۲۰	۱۰۰	۱۳۰	۵۰۰۰



شکل ۱. سیکل آزمایش.



شکل ۲. لوله حلزونی.

جدول ۲. خواص فیزیکی نانوذرات مورد استفاده.

نانوذره	درصد خلوص	میانگین ابعاد ذرات (nm)	مورفولوژی
مس	۹۹+	۴۰-۵۰	کروی
آلومینیوم	۹۹٫۹	۳۰-۴۰	کروی

خود نشان داد؛ به طوری که بعد از گذشت دو روز از سکون کامل این سیالات هیچ‌گونه ته‌نشینی ظاهری در آن‌ها دیده نشد و با توجه به بالا بودن تلاطم ناشی از به جریان انداختن این سیالات در سیکل آزمایش، در طول مدت انجام آزمایش‌ها می‌توان انتظار داشت که میزان ته‌نشینی ذرات کم باشد. لازم به ذکر است که در تهیه‌ی این نانوسیالات هیچ‌گونه ماده‌ی فعال سطحی یا پایدارکننده به آن‌ها اضافه نشده تا تأثیری بر خواص انتقالی سیال پایه نداشته باشد.

خواص فیزیکی نانوذرات مورد استفاده به‌طور خلاصه در جدول ۲ ارائه شده است. تصاویر میکروسکوپی الکترونی نانوذرات مس و آلومینیوم نیز به‌عنوان نمونه

کاملی در زمینه‌ی انتقال حرارت و افت فشار در پوسته‌ی مبدل حلزونی با سیال عامل گاز^[۱۷] صورت گرفته است که آزمایش طرح شده برای آن «اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت محلی و ضریب افت فشار در پوسته‌ی مبدل» بوده است. جریان دوفازی آب و هوا در کویل مارپیچی نیز بررسی شده است.^[۱۸] کویل‌های مارپیچی و بررسی وضعیت انتقال حرارت در آنها با کویل حلزونی کاملاً متفاوت است. مشخصات افت فشار جریان نانوسیال در داخل کویل مارپیچی با لوله‌های عمودی مارپیچ مورد آزمایش قرار گرفته و برای رژیم جریان آرام بررسی شده است.^[۱۹] همچنین در ادامه این مطالعه و در پژوهشی دیگر، بهبود انتقال حرارت توسط جریان نانوسیال در داخل کویل مارپیچی با لوله‌های عمودی به‌صورت تجربی در منطقه‌ی ورودی حرارتی بررسی شده است.^[۲۰] در هر دو مطالعه به‌منظور داشتن شرط مرزی هم‌دما، درجه حرارت دیواره‌ی لوله‌ها در حدود ۹۵ درجه سلسیوس ثابت نگه داشته شده است. در این مطالعات آزمایشات مختلف در داخل لوله‌های مستقیم و مارپیچی انجام شده و اثرات طیف گسترده‌ی پارامترهای مختلف - مانند اعداد رینولدز و دین، پارامترهای هندسی و جزء وزنی (کسر جرمی) نانوسیال - بررسی شده است. در پژوهش حاضر، انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری در کویل حلزونی با استفاده از نانوسیالات مس - آب و آلومینیوم - آب بررسی شده است. عدد ناسلت را به‌صورت تجربی به دست آورده و میزان افزایش این پارامتر را در حضور نانوذرات با غلظت‌های متفاوت بررسی می‌کنیم.

۲. آزمایش

برای بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی در جریان آرام نانوسیال می‌توان از یک سیکل آزمایش (شکل ۱) استفاده کرد. این سیکل شامل پمپ، مبدل حرارتی، مخزن، قسمت آزمون و تجهیزات ابزار دقیق است. نانوسیال در سیکل با استفاده از پمپ به جریان درمی‌آید و با کمک شیر مقدار دبی مورد نیاز تعیین می‌شود که از طریق یک فلومتر می‌توان مقدار آن را اندازه‌گیری کرد. نانوسیال موجود در سیکل در مخزن جمع‌آوری می‌شود تا دوباره در سیکل به حرکت درآید. قبل از ورود نانوسیال به مخزن، دمای آن را با استفاده از یک مبدل دولوله‌ی پایین می‌آوریم. قسمت آزمون شامل یک لوله‌ی حلزونی است که نانوسیال در داخل آن جریان دارد. برای ایجاد شرط دمای دیواره ثابت، از یک مخزن آب دما ثابت که با استفاده از ترموکوپل و گرم‌کننده دمای آن را ثابت نگه می‌داریم، استفاده شده است. همچنین از ۶ ترموکوپل نوع θ با دقت ۰٫۱° برای اندازه‌گیری دمای دیواره استفاده شده است. برای اندازه‌گیری دمای بالک نانوسیال نیز از ترموکوپل‌های PT-۱۰۰ که به نشان‌گر دما متصل‌اند استفاده شده است. با کمک دو فشارسنج در ابتدا و انتهای لوله می‌توان تغییرات فشار را نیز اندازه‌گیری کرد. کویل مورد استفاده در شکل ۲ و مشخصات هندسی کویل در جدول ۱ آورده شده است.

۲.۱. تهیه‌ی نانوسیال

نانوسیالات مورد استفاده به روش تک‌مرحله‌ی تهیه شد که پایداری نسبتاً خوبی از

با جایگذاری \bar{h}_L در معادله‌ی ۴ می‌توان عدد ناسلت را چنین بیان کرد:

$$\overline{Nu} = -\frac{\lambda}{\pi} \frac{\dot{m} C_p}{pL} \ln \frac{T_w - T_{m,o}}{T_w - T_{m,i}} \quad (5)$$

یا:

$$\overline{Nu} = -\frac{\lambda}{\pi} Gz \ln \frac{T_w - T_{m,o}}{T_w - T_{m,i}} \quad (6)$$

که در آن Gz عدد بی‌بعد گراتز است. T_w ، $T_{m,o}$ و $T_{m,i}$ به ترتیب دمای دیواره‌ی لوله، دمای خروجی و ورودی نانوسیال است.

$$Gz = \frac{\dot{m} C_p}{pL} \quad (7)$$

در رابطه‌ی ۷، \dot{m} دبی جرمی، k هدایت حرارتی نانوسیال، C گرمای ویژه و L طول لوله است. افت فشار بین ورودی و خروجی کویل با استفاده از مانومتر دیجیتالی اندازه‌گیری شده است. ضریب اصطکاک از معادله‌ی ۸ محاسبه می‌شود.

$$f = \frac{\Delta p}{\left(\frac{\rho v^2}{2}\right) L} \quad (8)$$

که در آن v سرعت جریان و d قطر لوله است. برای کویل حلزونی عدد دین، بیان‌کننده‌ی نوع جریان است که چنین بیان می‌شود.

$$De = Re \left(\frac{d/\gamma}{R_{ave}} \right)^{0.5} \quad (9)$$

Re عدد رینولدز، a شعاع لوله و R_{ave} شعاع متوسط کویل است.

۴. صحت آزمایشات

برای بررسی دقت و صحت سیستم تهیه شده و همچنین به منظور انجام آزمایشات پایه، فرایند انتقال حرارت در کویل حلزونی با آب مقطر بررسی شده است. از مقایسه‌ی نتایج حاصل از این آزمایشات با معادله‌ی ارائه شده‌ی عدد ناسلت کویل حلزونی می‌توان میزان دقت آزمایشات را به دست آورد. کوپیر و کولور^[۲۳،۲۴] عدد ناسلت را برای کویل حلزونی مطابق رابطه‌ی ۱۰ ارائه دادند.

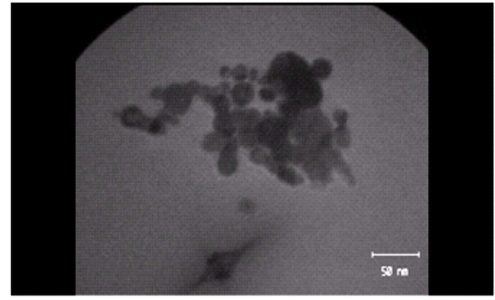
$$Nu_T = \left(1.98 + 1.8 \frac{a}{R_{ave}} \right) Gz^{0.7} \quad (10)$$

نمودار عدد ناسلت با عدد بی‌بعد گراتز $\left(\frac{\dot{m} C_p}{pL}\right)$ ، برای دماهای مختلف را می‌توان در شکل ۴ مشاهده کرد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که داده‌های تجربی تطابق خوبی با مدل کوپیر و کولور دارند و بیشینه خطا در حدود ۱۰٪ است.

کوپیر و کولور^[۲۵،۲۴] ضریب اصطکاک برای کویل حلزونی با سه پیچش، و سرینواسان^[۲۶] ضریب اصطکاک برای کویل با پنج پیچش را اندازه‌گیری کرده‌اند و برای طراحی کویل، معادله‌ی ۱۱ را پیشنهاد کردند که در آن اثر طول لوله حلزونی و همچنین گام آن در نظر گرفته شده است.

$$f = \frac{0.62 \left(n_1^{0.7} - n_2^{0.7} \right)}{Re^{0.6} \left(\frac{b}{a} \right)^{0.3}} \quad (11)$$

در این معادله n_1 و n_2 به ترتیب تعداد پیچ از مبدا تا شروع و خاتمه‌ی لوله حلزونی است. معمولاً شروع لوله‌ی حلزونی از مرکز یا مبدا نیست و لذا $n_1 \neq 0$ است و



الف) نانو ذرات مس؛



ب) نانو ذرات آلومینیوم.

شکل ۳. تصویر میکروسکوپی الکترونی عبوری.

در شکل ۳ نشان داده شده است. این تصاویر توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری کفا (شرکت کارآفرینی و فناوری ایران) تهیه شده است.

۳. خواص فیزیکی نانوسیال

۳.۱. چگالی و گرمای ویژه‌ی نانوسیال

چگالی نانوسیال معمولاً از طریق رابطه‌ی پاک و چو^[۲۱] به دست می‌آید:

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

که در آن ϕ درصد حجمی نانوذرات، ρ_p چگالی نانوذرات و ρ_f چگالی سیال پایه است. برای محاسبه‌ی گرمای ویژه‌ی نانوسیالات دو رابطه‌ی مختلف وجود دارد:

۱. رابطه‌ی پاک و چو^[۲۱]:

$$C_{p,nf} = \phi (C_{p,p}) + (1 - \phi) (C_{p,f}) \quad (2)$$

۲. رابطه‌ی زوان و روتزل^[۲۲]:

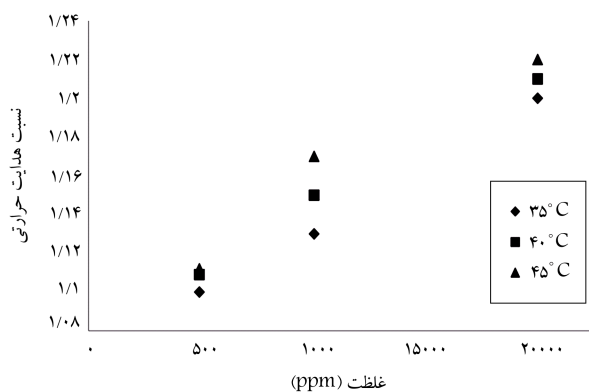
$$C_{p,nf} = \frac{\phi (\rho_s C_{p,p}) + (1 - \phi) (\rho_f C_{p,f})}{\rho_{nf}} \quad (3)$$

از آنجا که نتایج رابطه‌ی زوان و روتزل تطابق بهتری با داده‌های آزمایشگاهی دارد، در این مطالعه از این رابطه برای محاسبه‌ی گرمای ویژه‌ی نانوسیال استفاده شده است.

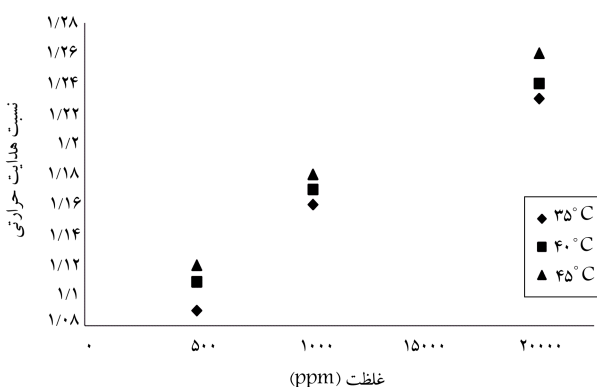
۳.۲. محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی

برای محاسبه‌ی عدد ناسلت از معادله‌ی ۴ استفاده می‌کنیم.

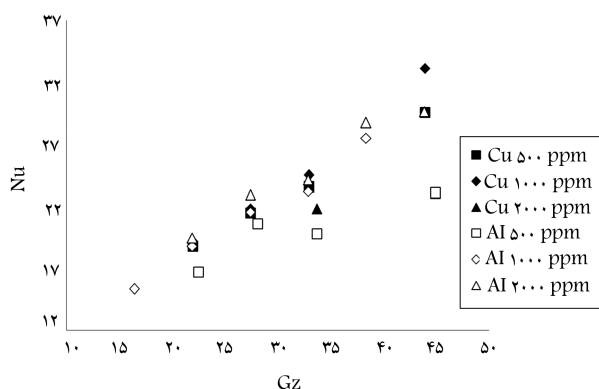
$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h} D}{k} \quad (4)$$



شکل ۶. نسبت ضرایب هدایت حرارتی نانوسیال آب - آلومینیوم.



شکل ۷. نسبت ضرایب هدایت حرارتی نانوسیال آب - مس.

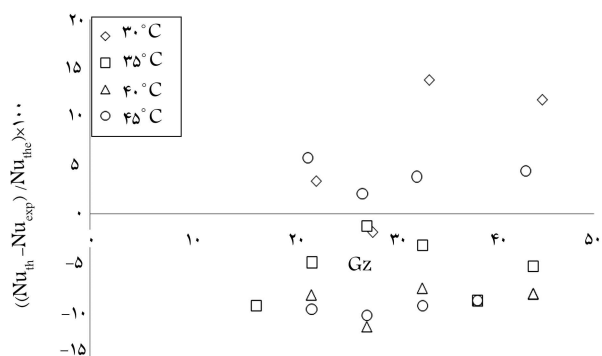


شکل ۸. تغییرات عدد ناسلت نانوسیال آب - مس برای سه غلظت متفاوت در دمای ۳۰ درجه.

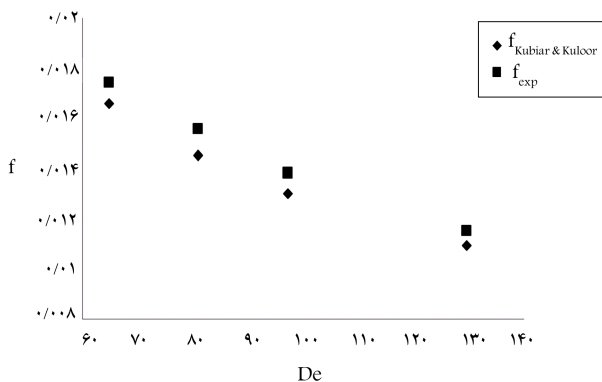
قابل پیش‌بینی بود. درمورد نانوسیال مس و آلومینیوم افزایش ضریب هدایت حرارتی در بهترین حالت به حدود ۲۶ و ۲۲ درصد می‌رسد. البته باید توجه داشت که با وجود نزدیک بودن اندازه ذرات مورد استفاده و شکل آن‌ها، مورفولوژی و تخلخل این ذرات کاملاً یکسان نیست و ممکن است این عامل نیز تأثیری در اختلاف‌های ایجاد شده داشته باشد.

۲.۵. انتقال حرارت جابه‌جایی

اثر افزایش غلظت برای نانوسیالات آب - آلومینیوم و آب - مس در شرایط مرزی دمای دیواره ۳۰ درجه در شکل ۸ نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود



شکل ۹. مقایسه‌ی داده‌های تجربی با مدل کوپیر و کولور [۲۳، ۲۴] برای سیال پایه.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی ضریب اصطکاک تجربی با معادله‌ی کوپیر و کولور.

n_1 و n_2 هر دو مقادیری فرضی‌اند و لزوماً عدد صحیح نخواهند بود؛ این مقادیر چنین محاسبه می‌شود:

$$n_1 = \frac{L}{2\pi N b} - \frac{N}{2}$$

$$n_2 = \frac{L}{2\pi N b} + \frac{N}{2}$$

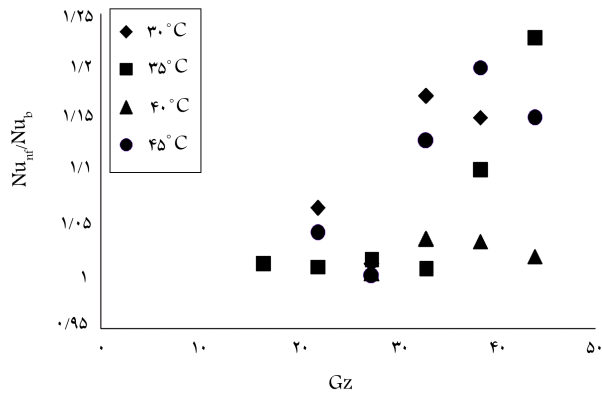
که در آن L طول کل لوله، b شعاع انحنا، N تعداد پیچ‌های لوله حلزونی است. این معادله برای $500 \leq Re^{0.6} \left(\frac{b}{a}\right)^{0.5} \leq 20000$ و $7/3 \leq \frac{b}{a} \leq 15/5$ قابل استفاده است. در شکل ۱۱ تطابق خوب داده‌های تجربی به دست آمده با معادله‌ی کوپیر و کولور، و نیز اندک بودن اختلاف بین آنها نشان داده شده است.

۵. نتایج

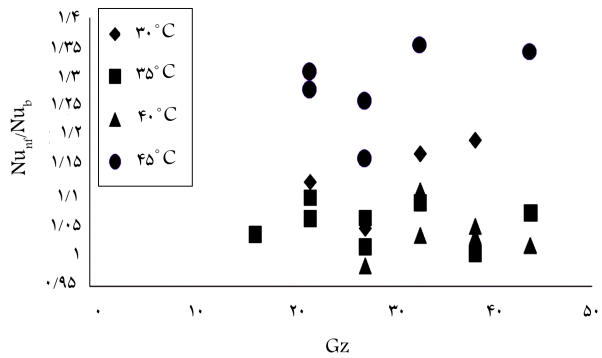
۱.۵. ضریب هدایت حرارتی

نتایج مربوط به ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات مورد استفاده نیز در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده است. با دقتی شدن در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که با افزایش دما ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات افزایش بیشتری پیدا می‌کند، که با در نظر گرفتن تأثیر حرکت براونی در افزایش ضریب هدایت حرارتی ناشی از افزایش تلاطم و جابه‌جایی‌های طبیعی کوچک قابل توجیه است.

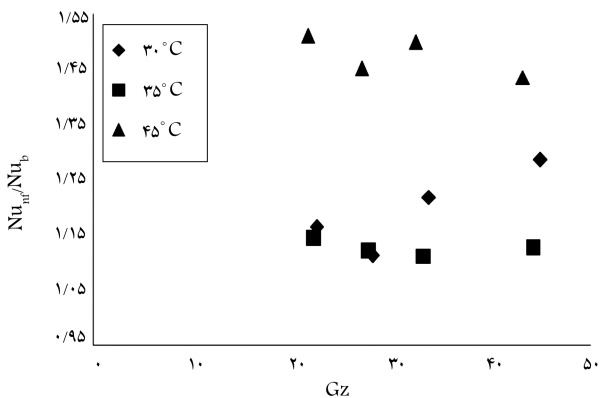
ضریب هدایت حرارتی نانوسیال آب - مس بیشتر از نانوسیال آب - آلومینیوم است. این امر تا حدودی به دلیل ضریب هدایت حرارتی بالاتر مس نسبت به آلومینیوم



الف) غلظت ۵۰۰ ppm



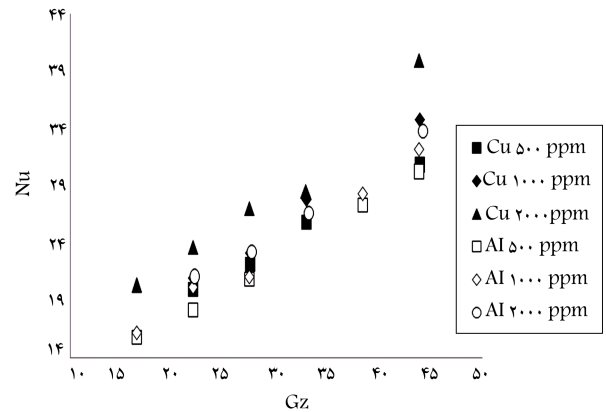
ب) غلظت ۱۰۰۰ ppm



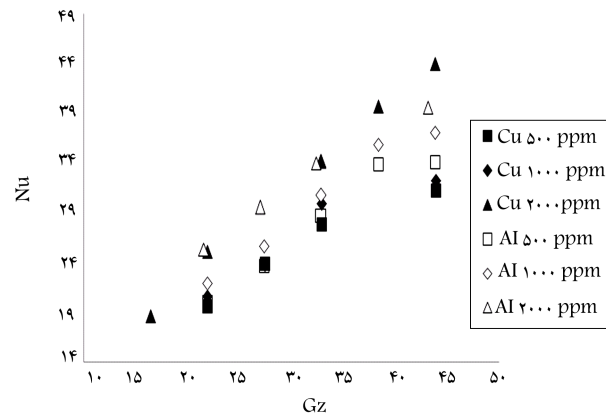
ج) غلظت ۲۰۰۰ ppm

شکل ۱۱. نسبت عدد ناسلت نانوسیال آب - آلومینیوم در غلظت‌های مختلف.

به ترتیب برای غلظت‌های ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ ppm، مشاهده می‌شود که مقدار این نسبت بیشتر شده است. به طوری که برای شرایط مرزی ۴۵ درجه این نسبت در ۱۰۰۰ ppm به ۱٫۳ و در ۲۰۰۰ ppm به ۱٫۵ می‌رسد. مشاهده می‌شود که نسبت عدد ناسلت برای دمای ۴۵ درجه بیشتر از دمای ۳۰ درجه است. این اختلاف برای غلظت ۲۰۰۰ ppm بارزتر هم می‌شود، به طوری که اختلاف قابل ملاحظه‌یی (حدوداً ۴۰٪) بین نسبت عدد ناسلت در دمای ۴۵ درجه و ۳۰ درجه وجود دارد. اما علت این پدیده را می‌توان در غلظت نانوسیال یافت. دما مستقیماً بر ذرات نانو موجود در محیط تأثیر می‌گذارد. هرچه تعداد این ذرات در محیط بیشتر باشد، تأثیرپذیری سیال از دما نیز بیشتر می‌شود. در مقابل افزایش دبی جریان تأثیرچندانی بر عدد ناسلت ندارد و اثر آن بر عدد ناسلت برای سیال پایه و نانوسیال یکسان است.



شکل ۹. تغییرات عدد ناسلت نانوسیال آب - مس برای سه غلظت متفاوت در دمای ۳۵ درجه.



شکل ۱۰. تغییرات عدد ناسلت نانوسیال آب - مس برای سه غلظت متفاوت در دمای ۴۰ درجه.

با افزایش غلظت، عدد ناسلت نیز افزایش می‌یابد زیرا افزایش تجمع ذرات در سیال به افزایش فرایند انتقال حرارت کمک شایانی می‌کند. به طور کلی عدد ناسلت با دبی جریان (که عدد بی بعد گرانز تغییر مناسبی از آن است) نسبت مستقیم دارد چرا که با افزایش آن نیروی اینرسی سیال، و در نتیجه انتقال تکانه و انتقال انرژی افزایش می‌یابد. افزایش دمای دیواره سبب می‌شود که سیال توانایی بیشتری برای کسب حرارت و در نتیجه انتقال حرارت پیدا کند، که این خود موجب افزایش عدد ناسلت می‌شود. برای مثال در عدد ناسلت نانوسیال آب - آلومینیوم از ۱۸۷ در عدد گرانز ۲۲ به ۲۹ در حدود عدد گرانز ۴۳ می‌رسد.

در شکل ۹ و ۱۰ روند تغییرات عدد ناسلت برای هر دو نانوسیال در دمای دیواره ۳۵ و ۴۰ درجه نشان داده شده است. به وضوح می‌توان دریافت که افزایش عدد ناسلت برای دمای ۴۵ درجه نسبت به دیگر شرایط مرزی مشخص تر است. در واقع در دماهای بالاتر اثر افزایش غلظت بر عدد ناسلت بیشتر است.

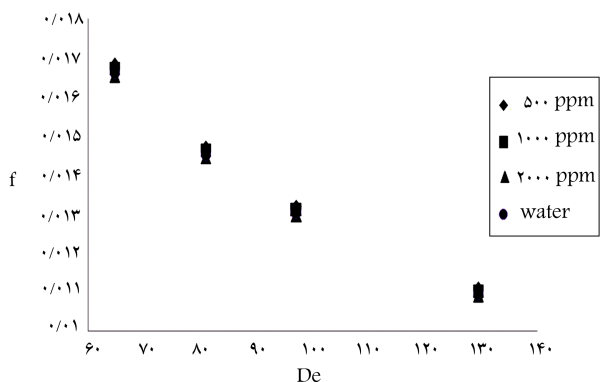
برای درک صحیح و بررسی میزان افزایش عدد ناسلت با استفاده از نانوسیالات، نسبت عدد ناسلت نانوسیال به سیال پایه Nu_nu/Nu_b مناسب‌ترین معیار سنجش به نظر می‌رسد. نسبت عدد ناسلت نانوسیال آب - آلومینیوم برای غلظت ۵۰۰ ppm در شکل ۱۱ الف نشان داده شده است. برای این غلظت نسبت عدد ناسلت در بیشتر داده‌ها به عدد ۱ نزدیک است و می‌توان دریافت که نانوسیال آب - آلومینیوم در این غلظت تأثیر افزایشی چندانی ندارد. اما در شکل‌های ۱۱ ب و ۱۱ ج که

می‌شود. جریان ثانویه‌ی ایجاد شده در لوله سبب نوسانی شدن عدد ناسلت در کوئل حلزونی می‌شود که این پدیده را می‌توان به خوبی در این شکل مشاهده کرد. طبق این نتایج می‌توان دریافت که افزایش غلظت نانوسیال باعث کاهش نوسانات عدد ناسلت می‌شود.

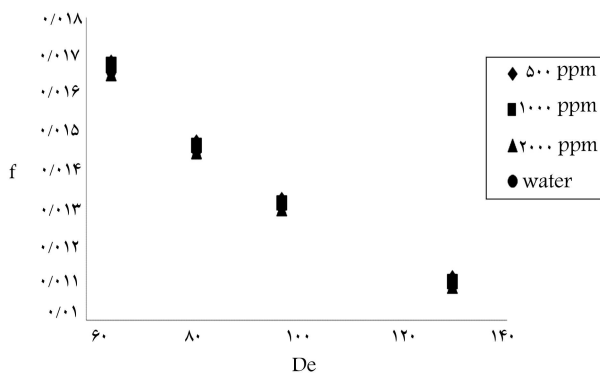
۳.۵. افت فشار

در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب ضریب اصطکاک برای نانوسیال‌های آب - آلومینیوم و آب - مس در غلظت‌های مختلف به‌ازای مقادیر مختلف عدد دین نشان می‌دهند. به وضوح دیده می‌شود که با افزایش عدد دین ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد و در مقابل، افزایش غلظت موجب افزایش ناچیز ضریب اصطکاک می‌شود.

علت اصلی این امر این است که لوله‌ی حلزونی دارای افت فشار زیادی است و افزودن نانوذرات اگرچه افت فشار را بیشتر می‌کند اما در مقابل میزان افت فشار خود لوله حلزونی ناچیز است. افزودن نانوذرات به سیال پایه منجر به افزایش فشار می‌شود، و این روند برای نانوسیالات با غلظت‌های جرمی بالاتر ادامه پیدا می‌کند. در توجیه افزایش افت فشار ناشی از افزودن نانوذرات می‌توان گفت که با افزودن نانوذرات به سیال پایه، گرانروی دینامیکی مخلوط حاصل افزایش می‌یابد. از آنجا که میزان افت فشار جریان با گرانروی جریان رابطه‌ی مستقیم دارد، افزودن نانوذرات به سیال پایه منجر به افزایش میزان افت فشار جریان می‌شود. عامل دیگری که باعث افزایش افت فشار جریان نانوسیال می‌شود، حرکات آشفتگی و نامنظم نانوذرات در داخل سیال است. چنان که در شکل‌ها نشان داده شده، اختلاف بین سیال پایه و نانوسیال بسیار کم است ولی با افزایش دبی این اختلاف بیشتر می‌شود. علت این



شکل ۱۳. ضریب اصطکاک نانوسیال آب - آلومینیوم.

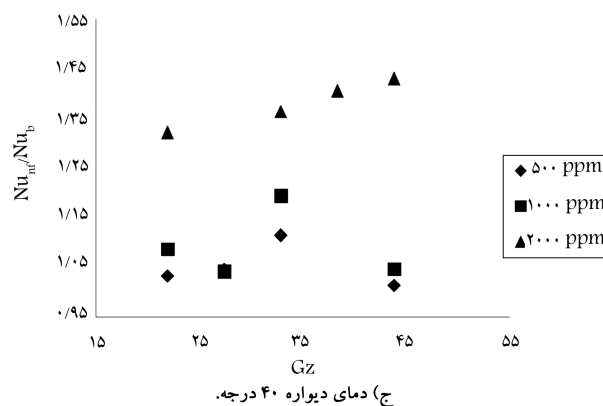
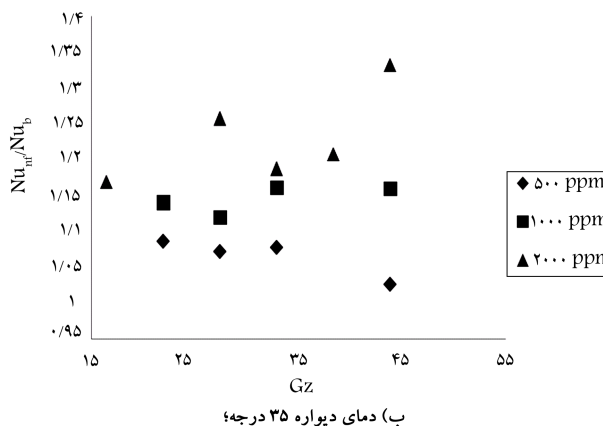
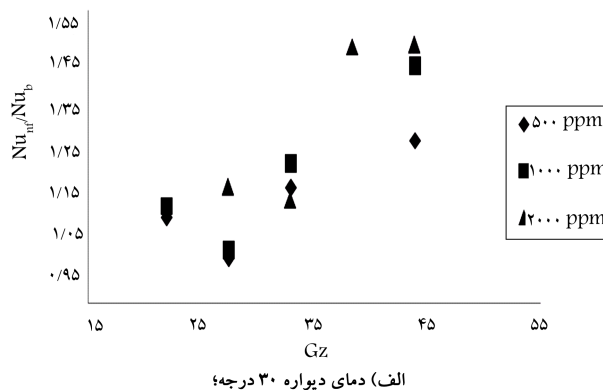


شکل ۱۴. ضریب اصطکاک نانوسیال آب - مس.

نمودار نسبت عدد ناسلت نانوسیال آب - مس برای غلظت‌های متفاوت در شرط مرزی دمای دیواره ۳۰ درجه را می‌توان در شکل ۱۲ الف مشاهده کرد. نسبت عدد ناسلت، چنان که پیش‌بینی می‌شد، با افزایش غلظت افزایش می‌یابد. از طرفی شاهد نوساناتی در نسبت عدد ناسلت هستیم که همانند قبل بر اثر جریان ثانویه به وجود آمده است.

در شکل ۱۲ ج نسبت عدد ناسلت برای شرط مرزی ۴۰ درجه و اختلاف بین داده‌ها در غلظت‌های مختلف بارزتر است.

علت این پدیده آن است که در دماهای بالاتر، نانوذرات بیشتر می‌توانند پتانسیل خود را برای افزایش انتقال حرارت نشان دهند. برای مثال اختلاف بین نسبت عدد ناسلت در غلظت‌های ۱۰۰۰ ppm یا ۲۰۰۰ ppm با افزایش دمای شرط مرزی بیشتر



شکل ۱۲. نسبت عدد ناسلت نانوسیال آب - مس در دماهای مختلف.

h : ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی ($W/m^2.K$)؛
 \bar{h} : ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط ($W/m^2.K$)؛

k : ضریب هدایت حرارتی ($W/m.K$)؛

K_b : ثابت بولتزمن؛

L : طول لوله (m)؛

\dot{m} : دبی جرمی (kg/s)؛

M : جرم مولکولی (g/mol)؛

n : ضریب شکل؛

N_A : عدد آووگادرو؛

Nu : عدد ناسلت؛

Pr : عدد پرانتل؛

Pe : عدد پکلت؛

Re : عدد رینولدز؛

r_c : شعاع خوشه‌ها (m)؛

T : دما ($^{\circ}C$)؛

Gz : عدد گراتز؛

a : شعاع لوله؛

b : گام کویل حلزونی؛

R : شعاع کویل حلزونی؛

De : عدد دین؛

ϕ : غلظت.

زیر نویس ها

b, bf : سیال پایه؛

eff : مؤثر؛

in : ورودی؛

out : خروجی؛

nf : نانوسیال؛

p : ذره؛

w : دیواره.

۶. نتیجه‌گیری

در این پروژه انتقال حرارت جابه‌جایی در کویل حلزونی با استفاده از نانوسیالات مختلف به‌عنوان سیال عامل و تأثیر عواملی نظیر دما، غلظت نانوذرات و دبی بر ضریب انتقال حرارت بررسی شده است. آزمایش‌ها تحت شرط مرزی دمای دیواره ثابت برای رژیم جریان آرام انجام شده است. با مقایسه‌ی داده‌های تجربی برای آب با مدل‌های نظری موجود صحت آزمایش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. براساس نتایج به دست آمده می‌توان گفت:

- ضریب هدایت حرارتی نانوسیال آب - مس بیشتر از نانوسیال آب - آلومینیوم است. این امر تا حدودی به دلیل ضریب هدایت حرارتی بالاتر مس نسبت به آلومینیوم قابل پیش‌بینی بود. درمورد نانوسیال مس و آلومینیوم افزایش ضریب هدایت حرارتی در بهترین حالت به حدود ۲۶ و ۲۲ درصد می‌رسد.
- افزودن نانوذرات به سیال پایه منجر به افزایش افت فشار می‌شود و این روند برای هر دو نانوسیال به کار برده شده با غلظت‌های جرمی بالاتر ادامه پیدا می‌کند.
- عدد ناسلت نانوسیالات با افزایش عدد گراتز افزایش می‌یابد و مقدار آنها همواره بیشتر از عدد ناسلت سیال پایه است.
- جریان ثانویه که به دلیل نیروی گریز از مرکز به وجود می‌آید سبب نوسانی شدن عدد ناسلت می‌شود. جریان ثانویه سبب می‌شود دیواره‌ی لوله به‌طور متناوب در معرض جریان سرد و گرم قرار گیرد و در نتیجه نوسانات در ناحیه‌ی ورودی برای عدد ناسلت مشاهد شود.

فهرست علائم

C_p : ظرفیت گرمایی ویژه ($W/kg.K$)؛

d_{hy} : قطر هیدرولیکی (m)؛

d_p : قطر ذره (m)؛

منابع (References)

1. Lee, S. and Choi, S.U.S. "Application of metallic nanoparticle suspensions in advanced cooling systems", International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, Atlanta, USA (1996).
2. Xuan, Y. and Li, Q. "Heat transfer enhancement of nanofluids", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **21**, pp. 58-64 (2002).
3. Xuan, Y. and Li, Q. "Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids", *J. Heat Transfer*, **125**, pp. 151-155 (2003).
4. Xuan, Y.M. and Rotzel, W. "Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **43-19**, pp. 3701-3707 (2000).
5. Ma, H.B., Wilson, C., Borgmeyer, B., Park, K., Yu, Q., Choi, S.U.S. and Tirumala, M. "Effect of nanofluid on the heat transport capability in an oscillating heat pipe", *Appl. Phys.*, **88-14**, pp. 1431-1436 (2006).
6. Moghadami, M. "Numerical investigation of heat transfer and pressure drop coefficient for nanofluids in laminar and turbulent regime", Ms Thesis, university of Tehran (2008).

7. Raisee, M. and Moghaddami, M. "Numerical investigation of laminar forced convection of nanofluids through circular pipes", *J. Enhanced Heat Transfer*, **15-4**, pp. 335-350 (2008).
8. Zeinaly Heris, S., Nasr Esfahany, M. and Etemad, S.Gh. "Experimental investigation of convective heat transfer of Al₂O₃/ water nanofluid in circular tube", *Int. J. Heat Fluid Flow*, **28**, pp. 203-210 (2007).
9. Gherasim, I., Roy, G., Nguyen, C.T. and Vo-Ngoc, D. "Experimental investigation of nanofluids in confined laminar radial flows", *Int. J. Thermal Science*, **48-8**, pp. 1486-1493 (2009).
10. Naphon, P. and Wongwises, S. "A critical review of the heat transfer and flow characteristics in the curved pipes", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **10**, pp. 463-490 (2006).
11. Ho, J.C., Wijesundera, N.E. and Rajasekar S. "Study of a compact spiral-coil cooling and dehumidifying heat exchanger unit", *Applied Thermal Engineering*, **16**, pp. 777-790 (1996).
12. Ho, J.C., Wijesundera, N.E. and Rajasekar, S. "An unmixed-air flow model of a spiral cooling dehumidifying heat transfer", *Applied Thermal Engineering*, **19**, pp. 865-883 (1999).
13. Naphon, P. and Wongwises, S. "Investigation of the performance of a spiral-coil finned tube heat exchanger under dehumidifying conditions", *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, **76**, pp. 71-79 (2003).
14. Naphon, P. and Wongwises, S. "A study of the heat transfer characteristics of a compact spiral coil heat exchanger under wet-surface conditions", *Experimental Thermal and Fluid Science*, **29**, pp. 511-521 (2005).
15. Naphon, P. and Wongwises, S. "Heat transfer coefficients of a spiral-coil finned tube heat exchanger", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **32**, pp. 371-385 (2005).
16. Prasad, P.R., Sujatha, V., Sarma, C.B. and Raju, G.J.V.J. "Studies on ionic mass transfer in the presence of spiral coil turbulence promoters in batch fluidized beds", *Chemical Engineering and Processing*, **43**, pp. 1055-1062 (2004).
17. Neeraas, B.O., Fredheim, A.O. and Aunan, B. "Experimental shell-side heat transfer and pressure drop in gas flow for spiral-wound LNG heat exchanger", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **47**, pp. 353-361 (2004).
18. Murai, Y., Yoshikawa, S., Toda, S., Ishikawa, M. and Yamamoto, F. "Structure of air-water two-phase flow in helically coiled tubes", *Nuclear Engineering and Design*, **236** pp. 94-106 (2006).
19. Fakoor-Pakdaman, M., Akhavan-Behabadi, M.A. and Razi, P. "An empirical study on the pressure drop characteristics of nanofluid flow inside helically coiled tubes", *International Journal of Thermal Sciences*, **65**, pp. 206-213 (2013).
20. Akhavan-Behabadi, M.A., Fakoor Pakdaman, M. and Ghazvini, M. "Experimental investigation on the convective heat transfer of nanofluid flow inside vertical helically coiled tubes under uniform wall temperature condition", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **39**, pp. 556-564 (2012).
21. Pak, B.C. and Cho, Y. "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles", *J. of Experimental Heat Transfer*, **11**(2), pp. 151-170 (1998).
22. Xuan, Y.M. and Rotzel, W. "Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **43-19**, pp. 3701-3707 (2000).
23. Kubair, V. and Kuloor, N.R. "Heat transfer to Newtonian fluids in coiled pipes in laminar flow", *Int. J. Heat Mass Transfer*, **9**, pp. 63-75 (1966).
24. Kubair, V. and Kuloor, N.R. "Heat transfer to Newtonian fluids in spiral coils at constant tube wall temperature in laminar flow", *Indian J. Technol.*, **3**, pp. 144-146 (1965).
25. Kubair, V. and Kuloor, N.R. "Flow of Newtonian fluids in archimedian spiral tubecoil correlation of the laminar, transition and turbulent flow", *Indian J. Technol.*, **4**, pp. 3-8 (1966).
26. Srinivasan, P.S., Nandapurkar, S.S. and Holland, F.A. "Friction factor for coils", *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **48**, pp. T156-T161 (1970).