

بررسی تجربی کارایی گرمایی مبادله‌کن‌های گرمایی پوسته و لوله مارپیچ با استفاده از نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
دانشجوی دکترا، گروه شیمی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

زهرا اندامی
فرزاد ویسی*
لیلا نوروزی

چکیده

در این پژوهش، اثر نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 بر عملکرد گرمایی یک مبادله‌کن گرمایی پوسته و لوله مارپیچ به صورت تجربی بررسی شده است. نانوذرات به قطر ۲۶ نانومتر و در کسرهای حجمی ۰/۰۳، ۰/۰۶ و ۰/۱ درصد در سیال پایه پراکنده می‌شوند. محلول اتیلن گلیکول و آب به عنوان سیال پایه استفاده شده است. آزمایش‌ها برای درصدهای متفاوت آب و اتیلن گلیکول، درصدهای حجمی مختلف ذره و دبی جریان متفاوت سمت لوله مارپیچ انجام شده است. سیال سمت پوسته آب و سیال سمت لوله مارپیچ آب، مخلوط آب و اتیلن گلیکول و نانوسیال می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که نانوسیالات عملکرد گرمایی مبادله‌کن‌های گرمایی را بهبود می‌بخشند. ضریب انتقال گرمایی جابه‌جایی برای محلول آب و اتیلن گلیکول با ۰/۱ درصد نانوذره مغناطیسی Fe_3O_4 حدود ۶۵ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش دبی جریان سمت لوله مارپیچ، عدد ناسلت داخلی به مقدار ۱۶۰ درصد افزایش می‌یابد. می‌توان نتیجه گرفت که نانوسیال مغناطیسی Fe_3O_4 با سیال پایه آب و اتیلن گلیکول می‌تواند به عنوان خنک کننده مفید در مبادله‌کن‌های گرمایی پوسته و لوله مارپیچ به کار گرفته شود. **واژه‌های کلیدی:** مبادله‌کن گرمایی پوسته و لوله مارپیچ، نانوسیال مغناطیسی Fe_3O_4 ، اتیلن گلیکول، درصد حجمی، ضریب انتقال گرمایی.

Experimental investigation of thermal efficiency in shell and helically coiled tube heat exchangers with Fe_3O_4 magnetite nanoparticles

Z. Andami
F. Veysi
L. Norouzi

Department of Mechanical Engineering, Razi University of Kermanshah, Kermanshah, Iran
Department of Mechanical Engineering, Razi University of Kermanshah, Kermanshah, Iran
Department of Chemistry, Razi University of Kermanshah, Kermanshah, Iran

Abstract

In this study, the effect of Fe_3O_4 magnetite nanoparticles on thermal performance of a shell and helically coiled tube heat exchanger was investigated experimentally. The nanoparticles with a diameter of 26 nm dispersed in a base fluid with the particle volume concentrations of 0.03%, 0.06% and 0.1%. Ethylene glycol and water mixture used as the base fluid. The experiments have been conducted at different concentrations of water and ethylene glycol, different particle volume concentration and different coil side flow rate. Fluid on shell side is water and fluids on coil side are water, ethylene glycol/water mixture and nanofluid. Results show that Nanofluids improve the thermal performance of heat exchangers. For example, convective heat transfer coefficient increases about 65% for ethylene glycol/distilled water mixture based on 0.1% Fe_3O_4 nanoparticle. With a four-fold increase in the flow rate, the tube side Nusselt number increases about 160%. It is concluded that Fe_3O_4 magnetite nanofluid can be applied as an effective coolant in the helically coiled tube heat exchangers.

Keywords: Shell and helically coiled tube heat exchanger, Fe_3O_4 magnetite nanofluid, Ethylene glycol, Particle volume concentration, Heat transfer coefficient.

۱- مقدمه

اتیلن گلیکول و انواع روغن‌ها به منظور افزایش رسانایی گرمایی و بهبود عملکرد انتقال گرما ساخته می‌شوند.

کارهای تجربی محدودی به بررسی عملکرد گرمایی مبادله‌کن‌های گرمایی پوسته و لوله مارپیچ با نانوسیال پرداخته‌اند. دین [۱] گزارش می‌دهد که الگوی جریان در لوله‌های مارپیچی منجر به تشکیل جریان ثانویه ناشی از نیروی گریز از مرکز می‌گردد. جریان ثانویه تماس گرمایی بهتری را بین سطح لوله و سیال‌های جاری فراهم می‌نماید. عدد بی‌بعد دین که نسبت حاصلضرب نیروهای اینرسی و گریز از مرکز به نیروهای لزجت در لوله‌های مارپیچ و کانال‌ها است نیز توسط رابطه زیر معرفی می‌شود.

$$De = Re_i \left(\frac{d_i}{2R_{coil}} \right)^{1/2} \quad (1)$$

مبادله‌کن‌های گرمایی پوسته و لوله مارپیچ یکی از انواع مبادله‌کن‌های پرکاربرد در صنایع نفت، گاز، پتروشیمی، غذا، دارو و تهویه مطبوع به‌شمار می‌روند. این مبادله‌کن‌ها عمدتاً در مواردی که انتقال گرما در فشار بالا و دبی کم صورت می‌گیرد استفاده می‌شوند. بهینه‌سازی سیستم‌های انتقال گرما موجود، در اکثر مواقع با هدف کاهش سطح آن‌ها صورت می‌گیرد که همواره باعث کاهش حجم و اندازه این دستگاه‌ها می‌شود؛ لذا برای دستیابی به این هدف، به خنک‌کننده‌های جدید و موثرتری مورد نیاز است و نانوسیالات به عنوان راهکاری جدید در این زمینه مطرح شده‌اند. نانوسیالات به وسیله‌ی پخش و انتشار ذرات در اندازه‌های نانومتری در سیالات پایه‌ی متداولی مانند: آب،

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: veysi@razi.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۳/۰۷

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۲۹

بای و همکاران [۲] انتقال گرمای جریان آشفته در یک لوله مارپیچ افقی در محدوده وسیعی از پارامترهای آزمایشگاهی را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان داده‌اند که افزایش انتقال گرمای سمت لوله مارپیچ به علت اثرات آشفتگی و جریان ثانویه می‌باشد. هم چنین نشان داده‌اند که با افزایش عدد رینولدز، سهم جریان ثانویه برای افزایش انتقال گرما کمتر می‌شود و متوسط ضریب انتقال گرمای لوله مارپیچ به لوله مستقیم تحت همان شرایط، نزدیک‌تر می‌شود. کومار [۳] اثر هیدرودینامیک و مشخصه‌های انتقال گرما در مبادله‌کن گرمایی مارپیچ دو لوله‌ای را به صورت آزمایشگاهی مطالعه کرد. وی آزمایش‌هایی بر روی جریان ناهمسو انجام داد و ضریب کلی انتقال گرما را محاسبه کرد. وی همچنین مقادیر عدد ناسلت و ضریب اصطکاک را برای سمت داخلی و خارجی لوله محاسبه و آن‌ها را با نتایج عددی مقایسه کرد. نتایج کار وی نشان داد که در سرعت ثابت جریان در قسمت داخلی لوله مارپیچ، با افزایش عدد دین ضریب کلی انتقال گرما افزایش می‌یابد. علیمردی [۴] به‌صورت تجربی و عددی اثر خصوصیات فیزیکی (لزجت، رسانایی گرمایی، گرمای ویژه و چگالی)، پارامترهای عملیاتی (سرعت و دمای سیال) و پارامترهای هندسی (گام، قطر لوله، قطر پوسته و...) را روی اعداد ناسلت سمت پوسته و لوله مارپیچ بررسی کرده است. نتایج کار نشان می‌دهد که اگر گام لوله مارپیچ دوبرابر شود، عدد ناسلت سمت پوسته ۱۰ درصد افزایش می‌یابد در حالی که عدد ناسلت سمت لوله فقط ۰/۸ درصد افزایش می‌یابد. خیرول [۵] اثر استفاده از نانوسیال اکسید مس/آب (به عنوان خنک‌کننده) را روی ضریب انتقال گرما، آهنگ انتقال گرما، تلفات اصطکاکی، افت فشار و تلفات انرژی در مبادله‌کن گرمایی صفحه‌ای چین دار (راه راه) به صورت تجربی بررسی می‌کند. با افزایش درصد حجمی نانوذره، ضریب انتقال گرمای نانوسیال از ۱۸/۵ تا ۲۷/۲ درصد افزایش می‌یابد و همچنین با به کارگیری نانوسیال به عنوان سیال انتقال دهنده گرما به جای سیال معمولی، تلفات انرژی در حدود ۲۴ درصد کاهش می‌یابد. کاناداسان [۶] مقایسه‌ای بین خصوصیات انتقال گرما و افت فشار مبادله‌کن‌های گرمایی پوسته و لوله مارپیچ را در دو حالت افقی و عمودی با نانوسیال اکسید مس/آب انجام داده است. این تحقیق تجربی، تحت شرایط جریان آشفته و نانوسیال با درصدهای حجمی متفاوت ۰/۱ و ۰/۲ انجام گرفته و نتایج تست‌های گرفته شده نشان دهنده آن است که انتقال گرما در حالت عمودی افزایش می‌یابد و عدد ناسلت برای کسرهای حجمی گفته شده بیشتر از آب به دست می‌آید. اکبری دوست و همکاران [۷] به‌صورت تجربی و عددی جریان لایه‌ای و پایا در مبادله‌کن گرمایی لوله مارپیچ با شرط مرزی دیواره با دمای ثابت با نانوسیال اکسید مس را مورد بررسی قرار دادند. در بخش تجربی، یک مبادله‌کن گرمایی لوله مارپیچ با نسبت پیچش و انحناهای مختلف طراحی و افت فشار و ضرایب انتقال گرمای جابه‌جایی متوسط محاسبه گردید. در قسمت مطالعه عددی، معادلات حاکم سه بعدی با روش تفاضل محدود با استفاده از زبان برنامه نویسی فرترن^۱ حل گردیدند. نتایج نشان می‌دهند استفاده از سیال پایه در لوله مارپیچی با انحنا بزرگ‌تر در مقایسه با استفاده از نانوسیال در لوله‌های مستقیم، باعث

افزایش موثر انتقال گرما می‌گردد. نانوسیال با کسرهای حجمی بالاتر، ضریب انتقال گرما و افت فشار بالاتری را در لوله‌های مارپیچ مختلف نشان می‌دهند. آن‌ها همچنین دریافتند که لوله‌های مارپیچ با نسبت انحنا برابر ولی نسبت پیچش مختلف، نتایج تقریباً یکسانی دارند. میرفندراسکی [۸] انتقال گرما در مبادله‌کن‌های لوله مارپیچ را به‌صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار داده است. در این مطالعه جریان دائمی و لایه‌ای در لوله با شرط مرزی شار گرمایی ثابت در دیواره در نظر گرفته شده است. رفتار انتقال گرما جابه‌جایی و افت فشار نانوسیال آب-نقره را در مبادله‌کن لوله مارپیچ ارزیابی و با آب خالص مقایسه می‌کند. در قسمت تجربی شش مبادله‌کن گرمایی لوله مارپیچ با انحنا و نسبت‌های پیچش متفاوت طراحی شد. در تحلیل عددی به‌کار رفته، معادله ناویر-استوکس به روش تفاضل محدود^۲ با الگوریتم تصویرسازی^۳ با استفاده از زبان برنامه‌نویسی فرترن حل شده است. نتایج نشان می‌دهند که برای جریان اشاره شده، نسبت انحنا بیشتر سبب افزایش انتقال گرما می‌گردد. استفاده از سیال پایه در لوله‌های مارپیچ با انحناهای بزرگ‌تر، انتقال گرما را نسبت به حالتی که نانوسیال در لوله‌های مستقیم جریان می‌یابد، بیشتر افزایش می‌دهند. بهره‌مند [۹] به‌صورت عددی ویژگی‌های انتقال گرما نانوسیال اکسید آلومینیوم جریان یافته در داخل مبادله‌کن گرمایی پوسته و لوله مارپیچ را مورد بررسی قرار داد. محاسبات عددی با مدل آشفتگی SST^۴ انجام گرفت. سیال گرم در سمت لوله و سیال سرد در سمت پوسته جریان یافت. خواص ترموفیزیکی سیالات وابسته به دما در نظر گرفته شد. محدوده‌ی اعداد رینولدز سمت لوله مارپیچ، سمت پوسته و عدد پرانتل به‌ترتیب ۳۶۰۰-۹۰۰۰، ۲۶۰۰-۶۰۰ و ۸/۳-۲/۲ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش کسر حجمی ذره، ضریب انتقال گرمای کلی و ضرایب انتقال گرمای سمت پوسته و لوله مارپیچ افزایش می‌یابند. استفاده از نانوسیال با کسرهای حجمی ۰/۲ و ۰/۳، درصد، آهنگ انتقال گرما را در حدود ۱۴ و ۱۸ درصد به‌ترتیب افزایش می‌دهد. برای دبی جرمی یکسان، آهنگ انتقال گرما در نانوسیال با افزایش کسر حجمی نانوذره به‌طور چشمگیری در مقایسه با آب افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که اثربخشی با کاهش دبی جرمی، افزایش کسر حجمی ذرات، قطر لوله و قطر لوله مارپیچ افزایش می‌یابد. باقرزاده [۱۰] به‌صورت عددی انتقال گرما جابه‌جایی نانوسیال در لوله مارپیچ را مورد بررسی قرار داد. دو شرط مرزی برای دیواره لوله در نظر گرفته شد: دما ثابت و شار گرمایی ثابت. در مطالعه عددی حاضر، مدل چهار معادله در نظر گرفتن مکانیزم لغزش برای سیال پایه و نانوذرات اعمال می‌شود. معادلات حاکم به‌صورت بی‌بعد و با استفاده از روش تفاضل محدود حل شده است. نانوسیال اکسید مس/آب با کسر حجمی ۰/۲ درصد و نانوسیال نقره/آب با کسر حجمی ۰/۳ درصد برای اعتبارسنجی نتایج عددی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهند که نتایج حاصل از مدل همگن با داده‌های تجربی متفاوت است به‌ویژه در برخی مناطق در حالی که مدل دوفازی دارای نتایج نسبتاً دقیقی است. شبیه‌سازی

^۲ Finite difference method

^۳ Projection

^۴ Shear Stress Transport

^۱ FORTRAN

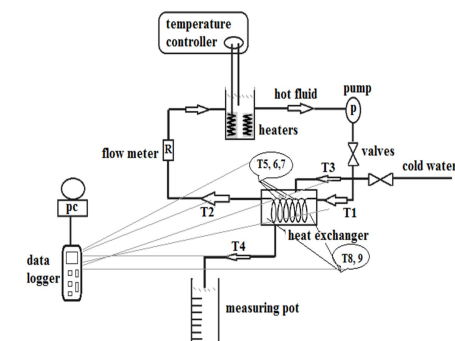
می‌توان نتیجه گرفت که حرکت براونی نانوذرات اثر عمده‌ای بر انتقال گرما نانوسیال تحت یک میدان مغناطیسی ضعیف دارد. باسو[۱۴] مشخصه‌های انتقال گرما را جابه‌جایی اجباری نانوسیال Fe_3O_4 -آب را بررسی کرد. جریان نانوسیال در لوله‌ی مسی افقی و در محدوده‌ی رینولدز ۲۵۰۰ تا ۵۰۰۰ که در رژیم گذرا قرار می‌گیرد، مورد مطالعه قرار گرفت. وی اثر پارامترهایی همچون عدد رینولدز، فاصله‌ی محوری و غلظت جرمی را بررسی کرد. نتایج ارائه شده نشان داد که ضریب انتقال گرما نانوسیال Fe_3O_4 -آب با افزایش غلظت نانوسیال در منطقه‌ی گذرا کاهش یافته است. ردی[۱۵] عملکرد انتقال گرما نانوسیال اکسید تیتانیوم را در مبادله‌کن گرمایی دولوله‌ای با لوله مستقیم و مارپیچ به صورت تجربی مورد بررسی قرار داده است. محدوده اعداد رینولدز بین ۴۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ بوده و سیال پایه از ۶۰ درصد آب مقطر و ۴۰ درصد اتیلن گلیکول تهیه شده است. وی دریافت که ضریب انتقال گرما نانوسیال با ۰/۲ درصد حجمی حدود ۱۰/۷۳ و ۱۳/۸۵ درصد در لوله مستقیم و مارپیچ به ترتیب نسبت به سیال پایه افزایش می‌یابد. ساندر و همکاران[۱۶] خصوصیات انتقال گرما نانوسیال Fe_3O_4 جریان یافته در لوله دایره‌ای را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. محدوده اعداد رینولدز بین ۳۰۰۰ تا ۲۲۰۰۰ بوده و درصد حجمی نانوذره بین ۰ تا ۰/۶ درصد می‌باشد. آن‌ها دریافتند که ضریب انتقال گرما جابه‌جایی حدود ۳۰/۹۶ درصد در غلظت ۰/۶ درصد حجمی نسبت به سیال پایه آب تحت شرایط یکسانی افزایش می‌یابد. همان‌طور که دیده می‌شود در گزارش‌های ارائه شده در کارهای قبلی اثر استفاده از نانوسیال مغناطیسی Fe_3O_4 با سیال پایه آب و اتیلن گلیکول بر انتقال گرما مبادله‌کن گرمایی لوله مارپیچ افقی به صورت تجربی ارائه نشده است. در این کار با استفاده از نانوسیال مغناطیسی اثر جریان حجمی متغیر سمت لوله مارپیچ و درصدهای حجمی متفاوت نانوذره بر عملکرد گرمایی این نوع از مبادله‌کن گرمایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین تاثیر افزایش غلظت اتیلن گلیکول در سیال پایه بر کارایی گرمایی نیز بررسی می‌شود.

۲- روش انجام آزمایش

۲-۱- سامانه انجام آزمایش

یک سامانه آزمایشگاهی برای مطالعه فرآیند انتقال گرما در مبادله‌کن گرمایی پوسته و لوله مارپیچ با استفاده از نانوسیال ساخته شده است، طرحواره سامانه انجام آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است. مبادله‌کن گرمایی لوله مارپیچ و تجهیزات دیگری همچون مخزن گرمایش ۶ لیتری، دو عدد گرمکن هریک به توان ۲ کیلووات، کنترل-کننده دما مدل (SUN-15, SUNWARD) که حساسیت رله کنترل آن ۰ تا ۱۹ درجه، پمپ گریز از مرکز مدل (15WG06-10-P MINI-) ۱۲ کاناله (BTM-4208 SD) با دقت ۰/۱ درجه سلسیوس، دیتالاگر ۱۲ (TYPEPUMP)، عدد ترموکوپل نوع k با دقت ۰/۱ درجه سلسیوس و جریان سنج که مخصوص اندازه‌گیری دبی ۰ تا ۷ لیتر بر دقیقه در محدوده دمایی ۵ تا ۸۵ درجه سلسیوس می‌باشد، در این سامانه به کار گرفته شده است. در شکل ۲ تصویر سامانه انجام آزمایش دیده می‌شود.

عددی برای اعداد رینولدز مختلف و نسبت انحنای متفاوت انجام می‌گیرد. نتایج نشان دهنده آن است که اعداد رینولدز و نسبت انحنای بالاتر موجب افزایش جریان ثانویه در لوله مارپیچ می‌گردند که باعث افزایش آهنگ انتقال گرما به‌خصوص در ناحیه بیرونی لوله می‌گردد. محمودی[۱۱] به‌صورت عددی و تجربی انتقال گرما جابه‌جایی و افت فشار در لوله مارپیچی را با استفاده از نانوسیال اکسیدتیتانیوم/آب به-عنوان سیال کاری مورد ارزیابی قرار داد. هدف از این کار بررسی اثرات فیزیکی و هندسی بر افزایش انتقال گرما و افت فشار در لوله مارپیچ می‌باشد. آزمایش‌ها در محدوده اعداد رینولدز ۳۰۰۰ تا ۱۸۰۰۰ و کسرهای ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصدحجمی برای پنج نسبت انحنای مختلف انجام گرفت. در شبیه‌سازی عددی، خواص ترموفیزیکی سیال کاری به-صورت تابعی دما و غلظت نانوسیال در نظر گرفته شد. برای رژیم جریان آشفته، مدل استاندارد k-ε برای شبیه‌سازی ویژگی‌های جریان به‌کار گرفته شد. نتایج عددی مطابقت مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از نانوسیال به‌جای آب مقطر منجر به افزایش ۳۰ درصدی عدد ناسلت می‌گردد. در نهایت چهار رابطه برای محاسبه عدد ناسلت متوسط و ضریب اصطکاک در لوله‌های مارپیچی تحت شرط مرزی دمای ثابت دیواره برای هر دو رژیم جریان لایه‌ای و آشفته معرفی شدند. کومار[۱۲] به‌صورت تجربی ویژگی‌های انتقال گرما نانوسیال Fe_3O_4 جریان یافته در لوله داخلی یک مبادله‌کن گرمایی دولوله‌ای U شکل با نوار طولی را بررسی کرده است. نانوسیال Fe_3O_4 با غلظت‌های متفاوت (سیال گرم) در لوله داخلی و سیال سرد در فضای بین دو لوله جریان می‌یابد. اثر اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ و کسرهای حجمی ۰/۰۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۳ و ۰/۰۶ درصد بر انتقال گرما و ضریب اصطکاک بررسی شد. از سه نوار طولی با ابعاد مختلف استفاده شد. نتایج نشان می‌دهند که عدد ناسلت نانوسیال با افزایش عدد رینولدز و درصدحجمی ذره و کاهش ابعاد نوار طولی، افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال در عدد رینولدز ۲۸۹۵۴، افزایش عدد ناسلت نانوسیال با ۰/۰۶ درصدحجمی نسبت به آب، ۱۴/۷ درصد می‌باشد. وجود نوار طولی در سمت لوله برای همان نانوسیال، عدد ناسلت را به‌مقدار ۴۱/۲۹ درصد افزایش می‌دهد. ضریب اصطکاک برای نانوسیال با ۰/۰۶ درصدحجمی، ۱/۰۹۲ بار بیشتر از آب و با وجود نوار طولی ۱/۲۶۷ بار بیشتر از آب در عدد رینولدز ۲۸۹۵۴ به‌دست می‌آید. در نهایت نیز روابط جدیدی برای محاسبه عدد ناسلت و ضریب اصطکاک باتوجه به داده‌های تجربی به‌دست می‌آید. شا[۱۳] خصوصیات انتقال گرما جابه‌جایی نانوسیال Fe_3O_4 /آب (۳ درصدحجمی) را تحت یک میدان مغناطیسی ثابت و یکنواخت موازی مورد بررسی قرار داد. اثر دما و شدت میدان مغناطیسی بر انتقال گرما جابه‌جایی نانوسیال Fe_3O_4 در این آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. نانوسیال در یک لوله مدور گرم شده با قطر ۳ میلی‌متر و طول ۶۰۰ میلی‌متر جریان یافت. در غیاب میدان مغناطیسی، ضرایب انتقال گرمای جابه‌جایی متوسط نانوسیال Fe_3O_4 ، ۱/۲ تا ۲/۳ درصد تحت رژیم جریان لایه‌ای و ۴/۷ تا ۵/۶ درصد تحت رژیم جریان آشفته نسبت به آب مقطر افزایش یافتند. هنگامی که میدان مغناطیسی ثابت و یکنواخت موازی استفاده شد، مشاهده گردید که با افزایش شدت میدان مغناطیسی، ضرایب انتقال گرما جابه‌جایی نانوسیال کاهش می‌یابند. با افزایش دمای نانوسیال، ضریب انتقال گرما افزایش می‌یابد.



شکل ۱- طرحواره سامانه مورد آزمایش

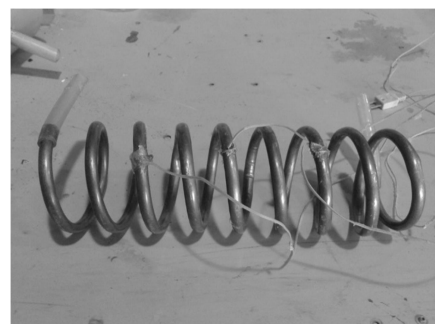


شکل ۲- سامانه آزمایشگاهی

برای ساخت مبادله‌کن گرمایی پوسته و لوله مارپیچی مورد استفاده در این آزمایش، از یک لوله‌ی آلومینیومی به قطر داخلی ۷٫۶ میلی‌متر و قطر خارجی ۱۰ میلی‌متر به‌عنوان لوله مارپیچ و برای ساخت پوسته از یک لوله‌ی پلی اتیلنی استفاده می‌شود به طوری که لوله مارپیچ به صورت هم محور در داخل آن قرار خواهد گرفت. ابعاد مبادله‌کن گرمایی مورد آزمایش در جدول ۱ آورده شده است. پس از جایگذاری ترموکوپل‌ها بر روی دیواره لوله مارپیچ و داخل پوسته، با استفاده از پشم شیشه سطح خارجی مبادله‌کن عایق‌بندی می‌شود. شکل ۳ لوله مارپیچ ساخته شده و محل قرارگیری ترموکوپل‌ها را بر روی بدنه آن نشان می‌دهد.

جدول ۱- ابعاد مبادله‌کن گرمایی

پارامتر	مقدار (میلی‌متر)
قطر لوله مارپیچ	۸۰
قطر پوسته	۱۰۰
قطر داخلی لوله	۷٫۶
قطر خارجی لوله	۱۰
گام لوله مارپیچ	۳۰



شکل ۳- لوله‌ی مارپیچ

نانوسیال گرم از داخل لوله مارپیچ و سیال سرد از داخل پوسته مبادله‌کن عبور می‌کند. داخل مخزن دو عدد گرمکن نصب شده است که از طریق سیستم کنترل‌کننده دما، دمای ورودی به لوله مارپیچ مبادله‌کن را ثابت نگه می‌دارد و پس از آن که سیستم به حالت پایدار رسید، داده‌ها ثبت می‌شوند. آزمایش‌ها برای حالت‌های جریان حجمی متغیر سمت لوله مارپیچ و با سیال‌های آب، آب و اتیلن‌گلیکول و نانوسیال با کسرهای حجمی متفاوت انجام می‌گیرد. جدول ۲ محدوده تغییر پارامترهای عملیاتی را نشان می‌دهد.

جدول ۲- محدوده تغییر پارامترهای عملیاتی

پارامتر	مقدار
دبی حجمی سمت لوله مارپیچ (لیتر بر دقیقه)	۲-۶
دبی حجمی سمت پوسته (لیتر بر دقیقه)	۴
دمای سیال ورودی لوله مارپیچ (درجه سلسیوس)	۵۰
درصد حجمی	۰٫۰۳، ۰٫۰۶، ۰٫۱

۲-۲- سنتز نانوذره و تهیه نانوسیال

ابتدا ۱ مول از آهن (III) کلرید شش آبه (۱ mmol) را به ۲ مول از آهن (II) کلرید چهار آبه (۲ mmol) اضافه کرده و ۱۳۰ میلی‌لیتر آب به آن اضافه می‌شود. در مرحله‌ی بعد تحت گاز نیترون قرار داده می‌شود و همزمان با بهم زدن محلول، ۱۱ میلی‌لیتر آمونیاک ۲۸ درصد به آن اضافه می‌گردد و محلول سیاه رنگ را به‌مدت یک ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس روی دستگاه همزن مغناطیسی قرار می‌دهیم و بعد از یک ساعت ذرات Fe_3O_4 سیاه رنگ توسط مگنت خارجی از محلول جدا شده و سه مرتبه با آب دیونیزه شست‌وشو داده می‌شود. خصوصیات نانوذره به‌کار گرفته شده در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- خواص ترموفیزیکی نانوذره مغناطیسی Fe_3O_4

ρ (kg/m ³)	k (W/mK)	C_p (J/kg.K)
۵۱۸۰	۸۰٫۴	۶۷۰

۲-۲-۱- پایدارسازی ذرات جامد

به‌دلیل اختلاف زیاد میان چگالی ذرات اکسید فلزی و سیال پایه، ذرات شروع به ته‌نشینی می‌کنند. سه روش متداول برای پایدارسازی ذرات جامد در سیال پایه وجود دارد که عبارتند از: استفاده از مواد فعال‌کننده سطح، تغییر اسیدیته و نوسانات مافوق صوت. در این کار از روش سوم تاثیر ارتعاش اولتراسونیک بر پایداری ذرات در سیال پایه استفاده شده است. هم‌چنین اتیلن گلیکول علاوه بر آن که نقش بخشی از سیال پایه را ایفا می‌کند به‌عنوان پایدار کننده ذرات جامد نیز به‌کار برده می‌شود. نانوسیال Fe_3O_4 به مدت دو الی چهار هفته بدون هیچ‌گونه ته‌نشینی باقی می‌ماند، هرچند اگر هم ته‌نشینی ایجاد شود می‌توان از همزن مکانیکی استفاده نمود.

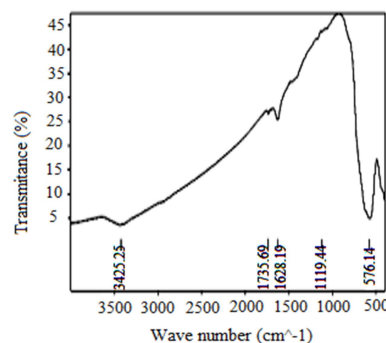
۲-۳- آنالیز نمونه

۲-۳-۱- طیف سنجی مادون قرمز FT-IR^۱

طیف سنجی مادون قرمز بر اساس جذب تابش و بررسی جهش-های ارتعاشی مولکول‌ها و یون‌های چند اتمی صورت می‌گیرد. این روش به عنوان روشی پر قدرت و توسعه یافته برای تعیین ساختار و اندازه‌گیری گونه‌های شیمیایی به کار می‌رود. از این طیف سنجی عمدتاً برای شناسایی ترکیبات آلی استفاده می‌شود، زیرا طیف‌های این ترکیبات معمولاً پیچیده هستند و تعداد زیادی نقطه اوج کمینه و بیشینه دارند که می‌توانند برای اهداف مقایسه‌ای به کار گرفته شوند. ویژگی FT-IR این است که تمام طول موج‌های ناحیه طیفی مورد نظر در یک زمان به نمونه تابیده می‌شود. بنابراین سرعت، قدرت تفکیک و نسبت سیگنال به نویز در روش تبدیل فوری برتری قابل ملاحظه‌ای نسبت به روش معمولی IR دارد. برخی اطلاعاتی که می‌توان از طیف سنجی تبدیل فوری مادون قرمز به دست آورد به شرح زیر است:

- شناسایی کیفی و کمی ترکیبات آلی حاوی نانوذرات
- تعیین نوع گروه عاملی و پیوندهای موجود در مولکول‌ها

یک نمونه سنتز شده و خشک نانودره مورد آنالیز قرار گرفت. تصویر الگوی FT-IR نمونه سنتز شده در محدوده طول موج ۴۰۰ تا cm^{-1} ۴۰۰۰ در شکل ۴ آمده است. پیک مشاهده شده در محدوده طول موج ۱۵۰۰ تا cm^{-1} ۲۰۰۰ مربوط به ارتعاشات خمشی پیوند H-O-H می‌باشد که نشان دهنده وجود پیوند هیدروژنی در سطح اکسید آهن است و اینکه مولکول‌های آب به صورت شیمیایی جذب سطوح مغناطیسی می‌شوند. همچنین پیک مشاهده شده در طول موج cm^{-1} ۵۷۶ مربوط به ارتعاشات خمشی پیوند فلز-اکسیژن (پیوند Fe-O در شبکه بلوری Fe_3O_4) می‌باشد. این پیوند به‌طور خاصی در تمامی ساختارهای بلورین و منظم فریت‌ها دیده می‌شود. که می‌توان گفت ذره سنتز شده نانودره مغناطیسی Fe_3O_4 است.



شکل ۴- تصویر FT-IR نانوذرات Fe_3O_4

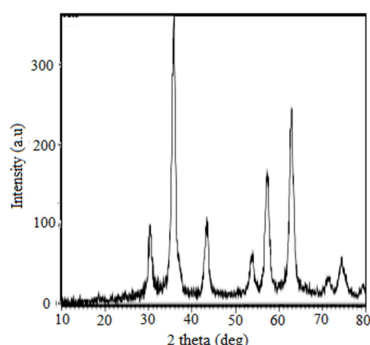
۲-۳-۲- الگوی XRD نانودره Fe_3O_4

XRD یا همان پراش اشعه ایکس (X-Ray Diffraction) یکی از روش‌های شناسایی ساختارهای بلوری، مقایسه داده‌ها و طیف XRD

نمونه مجهول با داده‌های نمونه استاندارد مندرج بر روی کارت‌های JCPDS^۲ می‌باشد. برخی اطلاعاتی که می‌توان از آنالیز XRD به دست آورد:

- درک ساختار کریستالی مواد ناشناخته
- تعیین مشخصات ساختاری شامل: پارامتر شبکه، اندازه و شکل دانه و ترکیب فاز
- محاسبه اندازه دانه‌های نانومتری در شرایط خاص با استفاده از رابطه شرر

علاوه بر انجام آنالیز طیف سنجی مادون قرمز که در بخش قبلی نیز به آن اشاره گردید جهت اطمینان از اینکه ذره سنتز شده نانودره مغناطیسی Fe_3O_4 است، آنالیز XRD نیز صورت گرفت. شکل ۵ آنالیز XRD نانودره مغناطیسی Fe_3O_4 را نشان می‌دهد.



شکل ۵- آنالیز XRD نانوذرات Fe_3O_4

نمونه سنتز شده توسط آنالیز پراش پرتو ایکس با طول موج ۱.۵۴ انگسترم مورد آنالیز قرار گرفت. محل‌ها و شدت پیک‌های پراکنده با الگوی استاندارد JCPDS شماره ۴۳۱۹-۸۹ سازگار است. همچنین پیک‌ها و ساختار مشاهده شده با مقادیر گزارش شده در کار پری یا و همکاران [۱۷] مطابقت مناسبی دارد. در الگوی XRD نانو ذره، اکسید آهن به صورت Fe_3O_4 در سیستم بلوری مکعبی متبلور شده است. همچنین با جایگذاری داده‌های حاصل از آنالیز XRD در معادله دی‌بی شرر^۳ اندازه کریستال ۲۶ نانومتر بدست می‌آید:

$$D = 0.9\lambda / \beta \cos \theta \quad (۲)$$

که D متوسط اندازه کریستال برحسب نانومتر، λ طول موج اشعه ایکس برحسب نانومتر، β عرض پیک در نصف ارتفاع^۴ برحسب رادیان و θ نصف زاویه‌ی تفرق مربوط به اوج برحسب رادیان می‌باشد.

۲-۴- خواص ترموفیزیکی نانوسیال

با افزودن مقدار مشخصی از نانودره به سیال پایه، درصد حجمی ذره را می‌توان با کمک معادله (۳) محاسبه نمود:

$$\varphi = \frac{\frac{m_p}{\rho_p} + \frac{m_{bf}}{\rho_{bf}}}{\frac{m_p}{\rho_p} + \frac{m_{bf}}{\rho_{bf}}} \times 100 \quad (۳)$$

^۲ Joint Committee on Powder Diffraction Standards

^۳ Debye Scherrer

^۴ FWHM: Full Width at Half Maximum

^۱ Fourier Transform Infrared Spectroscopy

$$\bar{T}_w = \frac{T_5 + T_6 + T_7}{3}$$

$$\bar{T}_h = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

$$\bar{T}_c = \frac{T_3 + T_4 + T_8 + T_9}{4}$$

و عدد ناسلت سمت لوله مارپیچ به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$Nu_{coil} = \frac{h_i \times d_i}{k_h} \quad (13)$$

۳- بحث و نتایج

آزمایش‌های نهایی برای نانوسیال مغناطیسی Fe_3O_4 در کسرهای حجمی ۰٫۰۳، ۰٫۰۶ و ۰٫۱ درصد انجام می‌شود. برای مقایسه نتایج نانوسیال با سیال پایه نیز آزمایش‌هایی با سیال آب و ترکیبی از آب و اتیلن گلیکول (۲۰ و ۴۰ درصد) انجام می‌شود. کلیه آزمایش‌ها در دمای ثابت ۵۰ درجه سلسیوس سیال ورودی لوله مارپیچ و دبی‌های ۲-۶ لیتر بر دقیقه سمت لوله مارپیچ و ۴ لیتر بر دقیقه سمت پوسته انجام می‌شود. این محدوده دبی باتوجه به سرعت‌های متداول در مدار لوله مارپیچ و پوسته اینگونه مبادله‌کن‌ها انتخاب شده است.

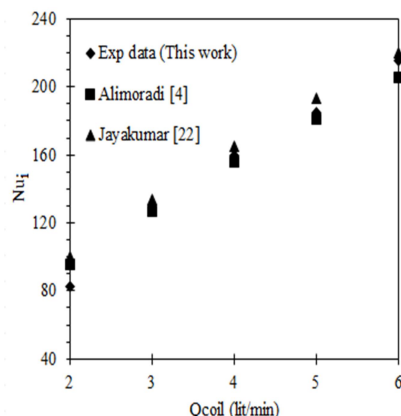
۳-۱- مقایسه با کار دیگران

در ابتدا برای بررسی نتایج آزمایش، عدد ناسلت به‌دست آمده از آزمایش با آب با روابط موجود در کارهای دیگران مقایسه می‌شود. آزمایش‌ها برای آب در دبی‌های مختلف انجام می‌شود و عدد ناسلت از طریق روابط معرفی شده محاسبه می‌شوند. به منظور مقایسه و اطمینان از صحت نتایج از روابط علیمردی، معادله (۱۴) و جایاکومار، معادله (۱۵) استفاده می‌شود [۴، ۲۲].

$$Nu_{coil} = 0.1211 Re^{0.685} Pr^{0.315} \quad (14)$$

$$Nu_{coil} = 0.0895 Re^{0.71} Pr^{0.4} \quad (15)$$

در شکل ۶ نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از روابط (۱۴) و (۱۵) در دبی‌های متفاوت مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌گردد نتایج داده‌های آزمایشگاهی با داده‌های حاصل از کار علیمردی [۴] و جایاکومار [۲۲] سازگاری قابل قبولی دارد. اختلاف داده‌ها با رابطه (۱۴) حدود ۳ درصد است، که قابل اعتماد بودن دستگاه انجام آزمایش را نتیجه می‌دهد.



شکل ۶- تغییرات عدد ناسلت داخلی آزمایشگاهی و روابط علیمردی [۴] و جایاکومار [۲۲]

برای پیش‌بینی رسانایی گرمایی محلول مایع/جامد، از مدل ماکسول استفاده شده است. این مدل برای محلول‌های همگن با درصد حجمی پایین و ذرات کروی با اندازه یکنواخت مناسب می‌باشد [۱۸]:

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_p + 2k_{bf} + 2\phi(k_p - k_{bf})}{k_p + 2k_{bf} - \phi(k_p - k_{bf})} \quad (4)$$

از مدل برینکمن [۱۹] برای محاسبه لزجت استفاده می‌شود:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \frac{1}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (5)$$

و در نهایت چگالی و گرمای ویژه نیز با رابطه‌های (۶) و (۷) محاسبه می‌گردند [۲۰، ۲۱]:

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{v}\right)_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_p \quad (6)$$

$$C_{p,nf} = \phi C_{p,np} + C_{p,bf}(1 - \phi) \quad (7)$$

۲-۵- محاسبه ضرایب انتقال گرما و عدد ناسلت

اندازه‌گیری ضریب انتقال گرما جابه‌جایی و عدد ناسلت و بررسی تغییرات آن‌ها نسبت به دبی و کسر حجمی نانوذره از اهداف اصلی این تحقیق می‌باشد که در این بخش به آن پرداخته می‌شود.

فرضیه‌های استفاده شده به شرح زیر می‌باشند:

۱. دمای سطح لوله مارپیچ با استفاده از ۳ عدد ترموکوپل که روی سطح لوله مارپیچ جایگذاری شده‌اند، اندازه‌گیری می‌شود و دمای میانگین خوانده شده توسط آن‌ها به عنوان دما در تمامی طول مبادله‌کن گرمایی انتخاب می‌شود.
۲. باتوجه به ضخامت بسیار کم لوله مارپیچ آلومینیومی و رسانایی گرمایی بالای آلومینیوم، از مقاومت گرمایی دیواره لوله مارپیچ و مقاومت رسوب صرف‌نظر شده است.
۳. به دلیل عایق‌کاری مناسب، از تلفات گرمایی چشم پوشی می‌شود.

آهنگ انتقال گرما در سمت پوسته و لوله مارپیچ با استفاده از رابطه‌های (۸) و (۹) محاسبه می‌شوند:

$$q_{shell} = \dot{m}_{shell} C_{p,c} (T_4 - T_3) \quad (8)$$

$$q_{coil} = \dot{m}_{coil} C_{p,h} (T_1 - T_2) \quad (9)$$

که $\dot{m}_{shell}$ و $\dot{m}_{coil}$ دبی جرمی سمت پوسته و لوله مارپیچ، $C_{p,c}$ و $C_{p,h}$ گرمای ویژه سیال سرد و گرم، T_1 و T_2 دمای ورودی و خروجی سیال سمت لوله مارپیچ و T_3 و T_4 دمای ورودی و خروجی سیال سمت پوسته می‌باشند.

ضرایب انتقال گرما جابه‌جایی سمت لوله مارپیچ و پوسته و ضریب انتقال گرمای کلی عبارتند از:

$$h_i = \frac{q_{coil}}{A_i (\bar{T}_h - \bar{T}_w)} \quad (10)$$

$$h_o = \frac{q_{shell}}{A_o (\bar{T}_w - \bar{T}_c)} \quad (11)$$

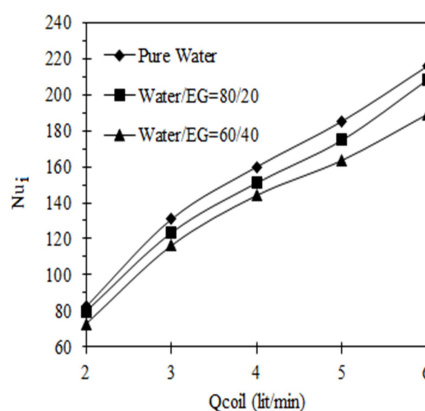
$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (12)$$

که $\bar{T}_w$ ، $\bar{T}_h$ و $\bar{T}_c$ به‌ترتیب نشانگر دماهای متوسط دیواره لوله مارپیچ، سیال سمت لوله مارپیچ و پوسته می‌باشند که به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

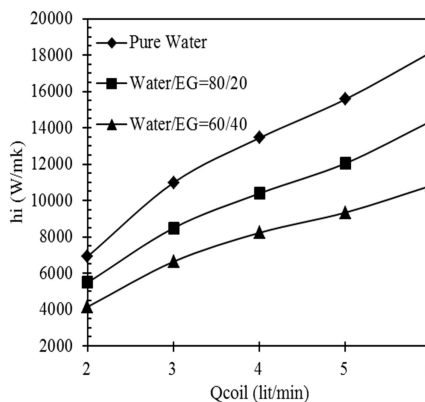
۳-۲- بررسی انتقال گرما در سیال پایه

بررسی تغییرات عدد ناسلت و ضرایب انتقال گرما برحسب دبی جریان سمت لوله مارپیچ برای آب و نسبت‌های متفاوت اتیلن گلیکول در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ آورده شده است. دمای سیال ورودی لوله مارپیچ ۵۰ درجه سلسیوس و دبی سیال خنک کن ۴ لیتر بر دقیقه می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مطابق با انتظار افزودن اتیلن گلیکول باعث کاهش انتقال گرما می‌گردد که این کاهش در عدد ناسلت برای سیال‌های پایه با ۲۰ و ۴۰ درصد اتیلن گلیکول نسبت به آب به ترتیب ۶ و ۱۲ درصد می‌باشد. افزایش غلظت اتیلن گلیکول همچنین باعث کاهش ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی و ضریب کلی انتقال گرما می‌گردد که این کاهش در ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی داخلی برای سیال‌های پایه با ۲۰ و ۴۰ درصد اتیلن گلیکول نسبت به آب به ترتیب ۲۸ و ۶۶ درصد و برای ضریب انتقال گرمای کلی نیز ۱۳ و ۳۱ درصد است. که این امر باتوجه به خواص گرمایی ضعیف اتیلن گلیکول؛ کاهش ضریب رسانایی گرمایی و افزایش لزجت با افزایش غلظت اتیلن گلیکول قابل توجه می‌باشد.

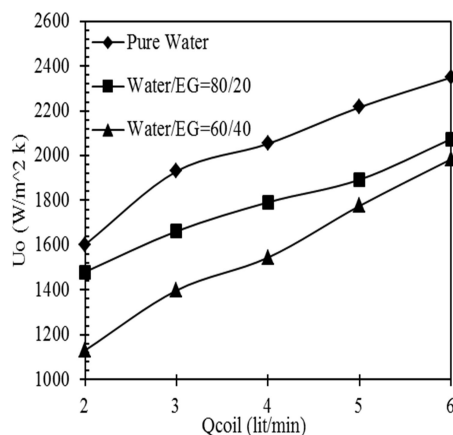
همان‌طور که مشاهده می‌گردد، با افزایش دبی جریان سمت لوله مارپیچ، عدد ناسلت و ضرایب انتقال گرما افزایش می‌یابند. به عنوان مثال در تمامی سیالات استفاده شده با رشد چهار برابری دبی جریان، عدد ناسلت به‌طور میانگین در حدود ۱۶۰ درصد افزایش می‌یابد.



شکل ۷- تغییرات عدد ناسلت سمت لوله برای درصدهای متفاوت اتیلن گلیکول



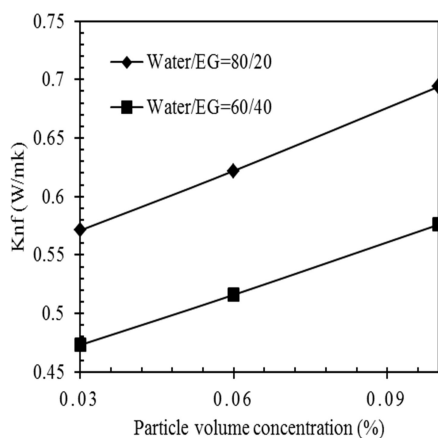
شکل ۸- تغییرات ضریب انتقال گرمای داخلی برای درصدهای متفاوت اتیلن گلیکول



شکل ۹- تغییرات ضریب انتقال گرمای کلی برای درصدهای متفاوت اتیلن گلیکول

۳-۳- بررسی اثر افزایش کسر حجمی نانوذرات

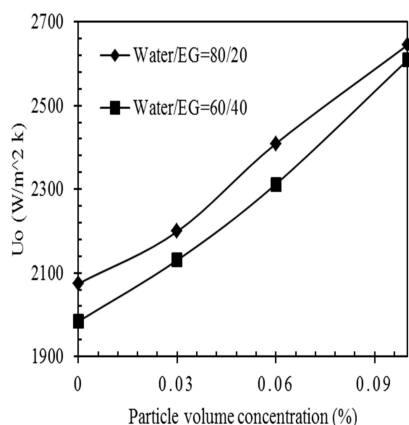
شکل ۱۰ تغییرات رسانایی گرمایی نانوسیال را با درصد حجمی نانوذره برای دو سیال پایه ۸۰ درصد آب و ۲۰ درصد اتیلن گلیکول و ۶۰ درصد آب و ۴۰ درصد اتیلن گلیکول در دبی ثابت ۴ لیتر بر دقیقه سیال خنک کن، ۳ لیتر بر دقیقه سیال داخل لوله مارپیچ و دمای ۵۰ درجه سلسیوس نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب رسانایی گرمایی با افزایش غلظت (درصد حجمی نانوذره)، ۲۱ درصد افزایش می‌یابد. بسیاری از محققین گزارش داده‌اند که رسانایی گرمایی نانوسیال تابعی از درصد حجمی ذرات است. چاندراسکار [۲۳] نتیجه می‌گیرد که تعاملات ذرات با یکدیگر، حرکت تصادفی و خوشه‌ای بودن ذرات دلایلی برای افزایش رسانایی گرمایی نانوسیال می‌باشند. باید به این نکته نیز توجه داشت که با توجه به پایین بودن خواص گرمایی اتیلن گلیکول، با افزایش درصد آن، رسانایی گرمایی نانوسیال کاهش می‌یابد.



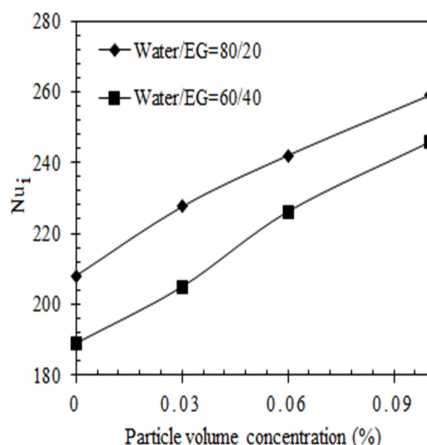
شکل ۱۰- اثر درصد حجمی ذره بر رسانایی گرمایی

شکل ۱۱ اثر افزایش درصد حجمی ذره را بر ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی داخلی در دبی ثابت ۴ لیتر بر دقیقه سیال خنک کن، ۶ لیتر

گرما بهتری نسبت به آب هستند، همچنین نانوسیال اکسید آهن/ ۸۰ درصد آب ۲۰ درصد اتیلن گلیکول در تمامی غلظت‌ها عملکرد انتقال گرما بهتری نسبت به نانوسیال اکسید آهن/ ۶۰ درصد آب ۴۰ درصد اتیلن گلیکول دارد. باید به این نکته نیز توجه داشت که افزودن نانوذره می‌تواند اثر کاهش انتقال گرما ناشی از حضور اتیلن گلیکول را کاهش دهد.



شکل ۱۲- تغییرات ضریب انتقال گرمای کلی با افزایش غلظت حجمی نانوذره در دبی ثابت ۴ لیتر بر دقیقه سیال خنک کن، ۶ لیتر بر دقیقه سیال سمت لوله مارپیچ



شکل ۱۳- تغییرات عدد ناسلت داخلی با افزایش غلظت حجمی نانوذره در دبی ثابت ۴ لیتر بر دقیقه سیال خنک کن، ۶ لیتر بر دقیقه سیال سمت لوله مارپیچ

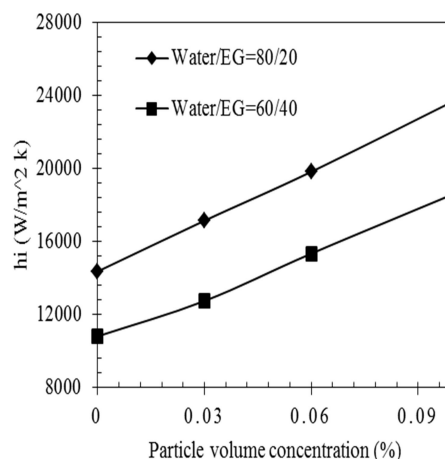
بررسی عدم قطعیت و محاسبه خطا

برای ارزیابی دقت آزمایش‌های انجام شده، تحلیل خطا صورت گرفته است. درصد خطای پارامتر h_i و Nu_i در اعداد رینولدز حداقل و حداکثر برای هر سیال محاسبه می‌شود. برای این کار رابطه (۱۰) به صورت زیر به کار گرفته می‌شود:

$$h_i = \frac{\dot{q}}{(T_h - T_w)} \quad (16)$$

از رابطه (۱۶) دیفرانسیل گرفته می‌شود:

بر دقیقه سیال سمت لوله مارپیچ و دمای سیال سمت لوله مارپیچ ۵۰ درجه سلسیوس برای درصدهای متفاوت اختلاط آب و اتیلن گلیکول نشان می‌دهد. واضح است که ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی سمت لوله با افزایش درصد حجمی نانوذره، افزایش می‌یابد. افزایش انتقال گرمای جابه‌جایی، نسبت به سیال پایه برای کسرهای حجمی ۰.۰۳، ۰.۰۶ و ۰.۱ درصد به ترتیب ۱۸.۹۷، ۳۴.۶۶ و ۶۵.۴ درصد در برای نانوسیال با ۲۰ درصد اتیلن گلیکول به دست می‌آیند. برای نانوسیال با ۴۰ درصد اتیلن گلیکول نیز این افزایش‌ها نسبت به سیال پایه در کسرهای حجمی ۰.۰۳، ۰.۰۶ و ۰.۱ درصد به ترتیب ۱۶.۵۷، ۳۷.۵۹ و ۶۹.۱۵ درصد به دست می‌آیند. این افزایش‌ها به دلیل کاهش اختلاف دمای بین نانوسیال و دیواره است.



شکل ۱۱- تغییرات ضریب انتقال گرمای داخلی با افزایش غلظت حجمی نانوذره در دبی ثابت ۴ لیتر بر دقیقه سیال خنک کن، ۶ لیتر بر دقیقه سیال سمت لوله مارپیچ

شکل ۱۲ تغییرات ضریب انتقال گرمای کلی را با درصد حجمی نانوذره نشان می‌دهد. افزایش نسبت به سیال پایه برای کسرهای حجمی ۰.۰۳، ۰.۰۶ و ۰.۱ به ترتیب ۵.۹، ۱۸.۴۱ و ۲۸.۵۵ درصد برای نانوسیال با ۲۰ درصد اتیلن گلیکول به دست می‌آیند. برای نانوسیال با ۴۰ درصد اتیلن گلیکول نیز این افزایش‌ها نسبت به سیال پایه در کسرهای حجمی ۰.۰۳، ۰.۰۶ و ۰.۱ درصد به ترتیب ۱۴.۳۳، ۳۲.۵۶ و ۴۵.۱۱ درصد می‌باشند. این افزایش به دلیل افزایش رسانایی گرمایی سیال و حرکت تصادفی نانوذرات می‌باشد که باعث افزایش آهنگ انتقال گرما بین سیال جاری در لوله مارپیچ و پوسته است.

شکل ۱۳ تغییرات عدد ناسلت داخلی را با درصدهای حجمی مختلف نشان می‌دهد. افزایش عدد ناسلت سمت لوله نسبت به سیال پایه در کسرهای حجمی ۰.۰۳، ۰.۰۶ و ۰.۱ درصد به ترتیب ۹ درصد، ۱۳.۲۴ درصد و ۲۴.۶ درصد برای نانوسیال با ۲۰ درصد اتیلن گلیکول به دست می‌آیند. برای نانوسیال با ۴۰ درصد اتیلن گلیکول نیز این افزایش‌ها نسبت به سیال پایه در کسرهای حجمی ۰.۰۳، ۰.۰۶ و ۰.۱ درصد به ترتیب ۶.۹۶ درصد، ۱۵.۷۲ درصد و ۲۷.۴۶ درصد به دست می‌آید.

نتایج نشان می‌دهند که هردو نانوسیال با سیال‌های پایه ۲۰ و ۴۰ درصد اتیلن گلیکول با غلظت ۰.۱ درصد حجمی دارای عملکرد انتقال

بررسی گردید. برای بررسی صحت نتایج و مقایسه با کارهای قبلی، آزمایش‌هایی با آب و در نهایت آزمایش‌های نهایی با نانوسیال Fe_3O_4 ، انجام گرفت. براساس آزمایش‌های انجام شده، نتایج زیر به دست آمد:

۱. افزایش غلظت اتیلن گلیکول باعث کاهش انتقال گرما می‌گردد، به‌عنوان نمونه برای سیال پایه با ۲۰ درصد اتیلن گلیکول این کاهش در ضریب انتقال گرمای داخلی، کلی و عدد ناسلت به- ترتیب ۲۸، ۱۳ و ۶ درصد می‌باشد.

۲. نانوسیال در کسرهای حجمی بالاتر ضریب انتقال گرمای بالاتری را نسبت به سیال پایه می‌دهد، ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی برای محلول آب مقطر و اتیلن گلیکول با ۰/۱ درصد نانوذره مغناطیسی Fe_3O_4 با سیال پایه ۲۰ درصد اتیلن گلیکول با دبی سیال خنک کن ۴ لیتر بر دقیقه و دبی جریان سمت لوله مارپیچ ۲ تا ۶ لیتر بر دقیقه، به‌طور میانگین در حدود ۶۵ درصد افزایش می‌یابد.

۳. با افزایش دبی جریان سمت لوله مارپیچ، عدد ناسلت و ضرایب انتقال گرما افزایش می‌یابند. به عنوان مثال در تمامی سیالات استفاده شده با رشد چهار برابری دبی جریان، عدد ناسلت به‌طور میانگین در حدود ۱۶۰ درصد افزایش می‌یابد.

۴. افزودن نانوذره می‌تواند اثر کاهش انتقال گرما ناشی از حضور اتیلن گلیکول را کاهش دهد. به‌عنوان مثال با افزودن ۴۰ درصد اتیلن گلیکول به آب انتقال گرما در حدود ۱۱ درصد کاهش می- یابد که با افزودن ۰/۱ درصد حجمی نانوذره به همین سیال پایه، انتقال گرما در حدود ۱۳ درصد نسبت به آب افزایش می‌یابد.

۵- نمادها

A	مساحت (m^2)
C_p	گرمای ویژه ($J/kg \cdot K$)
De	عدد دین
d	قطر لوله (m)
h	ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی ($W/m^2 \cdot K$)
k	رسانایی گرمایی ($W/m \cdot K$)
m	جرم ذره (kg)
$\dot{m}$	دبی جرمی (kg/s)
Nu	عدد ناسلت
Pr	عدد پرانتل
Q	دبی حجمی (m^3/s)
q	آهنگ انتقال گرما (Watt)
R	شعاع (m)
Re	عدد رینولدز
T	دما (K)
$\bar{T}$	دمای متوسط (K)
v	حجم (m^3)

علائم یونانی

ρ	چگالی (kg/m^3)
φ	درصد حجمی ذره

زیر نویس‌ها

$$dh_i = \sqrt{\left(\frac{\partial h_i}{\partial \dot{q}} d\dot{q}\right)^2 + \left(\frac{\partial h_i}{\partial T_h} dT_h\right)^2 + \left(\frac{\partial h_i}{\partial T_w} dT_w\right)^2} \quad (17)$$

به کمک رابطه (۱۶) مشتقات جزئی موجود در رابطه (۱۷) به- دست می‌آید:

$$\frac{\partial h_i}{\partial \dot{q}} = \frac{1}{(\bar{T}_h - \bar{T}_w)}, \quad \frac{\partial h_i}{\partial T_h} = \frac{-\dot{q}}{(\bar{T}_h - \bar{T}_w)^2}, \quad \frac{\partial h_i}{\partial T_w} = \frac{\dot{q}}{(\bar{T}_h - \bar{T}_w)^2}$$

باتوجه به این که دمای سطح و سیال ورودی و خروجی به لوله مارپیچ را با ترموکوپل نوع K اندازه‌گیری می‌کنیم، $d\bar{T}_h$ و $d\bar{T}_w$ مشخص می‌باشند. ولی $d\dot{q}$ نامعلوم است و باید محاسبه شود. برای به- دست آوردن $d\dot{q}$ به ترتیب زیر عمل می‌شود:

$$\dot{q} = \frac{q_{coil}}{A_i} \quad (18)$$

$$d\dot{q} = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{q}}{\partial q_{coil}} dq_{coil}\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{q}}{\partial A_i} dA_i\right)^2} \quad (19)$$

به کمک رابطه (۱۸) مشتقات جزئی در معادله (۱۹) به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\frac{\partial \dot{q}}{\partial q_{coil}} = \frac{1}{A_i}, \quad \frac{\partial \dot{q}}{\partial A_i} = \frac{-q_{coil}}{A_i^2}$$

$$dq_{coil} = 0.01 q_{coil}$$

و همچنین برای dA_i :

$$A_i = 2\pi r_i l \rightarrow dA_i = 2\pi l dr_i$$

$$dr_i = 0.02 mm$$

که $d\dot{q}$ با استفاده از مقادیر به دست آمده در بالا به دست می‌آید. در این جا تمام مشتقات جزئی مورد نیاز در معادله (۱۷) مشخص هستند و به راحتی می‌توان خطای h_i را برای هر سیال و در هر دبی محاسبه نمود. برای محاسبه درصد خطای پارامتر Nu_i از رابطه (۱۳) دیفرانسیل گرفته می‌شود:

$$dNu_i = \sqrt{\left(\frac{\partial Nu_i}{\partial h_i} dh_i\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu_i}{\partial d_{t,i}} dd_{t,i}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu_i}{\partial k_h} dk_h\right)^2} \quad (20)$$

از رابطه (۱۳) مشتقات جزئی موجود در رابطه (۲۰) به دست می- آید:

$$\frac{\partial Nu_i}{\partial h_i} = \frac{d_{t,i}}{k_h}, \quad \frac{\partial Nu_i}{\partial d_{t,i}} = \frac{h_i}{k_h}$$

مقادیر dh_i و $dd_{t,i}$ قبلاً محاسبه شده‌اند. با توجه به اینکه k از جدول خوانده می‌شود خطای آن صفر بوده در نتیجه مقدار dk برابر با صفر می‌گردد و دیگر نیازی به محاسبه $\frac{\partial Nu_i}{\partial k_h}$ نیست.

با جایگذاری مقادیر در روابط خطای عدد ناسلت نیز محاسبه می- گردد. برای هر سیال بیشینه خطا در عدد رینولدز بیشینه به دست می- آید و خطا در حالت نانوسیال با سیال پایه ۲۰ درصد اتیلن گلیکول در درصد حجمی ۰/۱ و دبی جریان داخلی ۶ لیتر بر دقیقه، در حالت بیشینه خود قرار دارد، که مقدار خطا ۱۶ درصد می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، اثر استفاده از نانوذره مغناطیسی Fe_3O_4 در درصدهای حجمی مختلف با سیال پایه آب به همراه اتیلن گلیکول بر عملکرد انتقال گرما مبادله‌کن گرمایی لوله مارپیچ به صورت تجربی

سیال پایه	bf
سرد	c
لوله مارپیچ	coil
گرم	h
داخلی	i
نانوسیال	nf
خارجی	o
ذره	p
پوسته	shell
دیواره	w

۶- مراجع

- International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 109, pp. 440-453, 2017.
- [13] Sha L., Ju Y., Zhang H. and Wang J., Experimental investigation on the convective heat transfer of Fe₃O₄/water nanofluids under constant magnetic field. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 113, pp. 566-574, 2017.
- [14] Basov S., Experimental Investigation into the Forced Convective Heat Transfer of Aqueous Fe₃O₄ Nanofluids under Transition Region. *Journal of Nanoparticles*, Vol. 2013, 2013.
- [15] Reddy M. C. S. and Rao V. V., Experimental investigation of heat transfer coefficient and friction factor of ethylene glycol water based TiO₂ nanofluid in double pipe heat exchanger with and without helical coil inserts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 68-76, 2014.
- [16] Sundar L. S., Naik M. T., Sharma K. V., Singh M. K. and Reddy T. C. S., Experimental investigation of forced convection heat transfer and friction factor in a tube with Fe₃O₄ magnetic nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 37, pp. 65-71, 2012.
- [17] Priya J. V., Parasuraman K., Anbarasu M. and Balamurugan K., Synthesis and Characterization of Fe₃O₄ Nanoparticles by Chemical Precipitation Method, *An International Research Journal of Nano Science & Technology*, Vol. 5, No.4-6, pp. 155-160, 2015.
- [18] Maxwell J. C., *A treatise on electricity and magnetism*: Clarendon press, 1881.
- [19] Brinkman H. C., The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 20, No.4, pp. 571-571, 1952.
- [20] Pak B. C. and Cho Y. I., Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer an International Journal*, Vol. 11, No.2, pp. 151-170, 1998.
- [21] Zhang X., Gu H. and Fujii M., Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 31, No.6, pp. 593-599, 2007.
- [22] Jayakumar J. S., Mahajani S. M., Mandal J. C., Iyer K. N. and Vijayan P. K., CFD analysis of single-phase flows inside helically coiled tubes. *Computers & chemical engineering*, Vol. 34, No.4, pp. 430-446, 2010.
- [23] Chandrasekar M., Suresh S., Srinivasan R. and Bose A. C., New analytical models to investigate thermal conductivity of nanofluids. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, Vol. 9, No.1, pp. 533-538, 2009.
- [1] Dean W. R. and Hurst J. M., Note on the motion of fluid in a curved pipe. *Mathematika*, Vol. 6, No.1, pp. 77-85, 1959.
- [2] Bai B., Guo L., Feng Z. and Chen X., Turbulent heat transfer in a horizontal helically coiled tube. *Heat Transfer-Asian Research: Co - sponsored by the Society of Chemical Engineers of Japan and the Heat Transfer Division of ASME*, Vol. 28, No.5, pp. 395-403, 1999.
- [3] Kumar V., Saini S., Sharma M. and Nigam K. D. P., Pressure drop and heat transfer study in tube-in-tube helical heat exchanger. *Chemical Engineering Science*, Vol. 61, No.13, pp. 4403-4416, 2006.
- [4] Alimoradi A. and Veysi F., Prediction of heat transfer coefficients of shell and coiled tube heat exchangers using numerical method and experimental validation. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 107, pp. 196-208, 2016.
- [5] Khairul M. A., Alim M. A., Mahbubul I. M., Saidur R., Hepbasli A. and Hossain A., Heat transfer performance and exergy analyses of a corrugated plate heat exchanger using metal oxide nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 8-14, 2014.
- [6] Kannadasan N., Ramanathan K. and Suresh S., Comparison of heat transfer and pressure drop in horizontal and vertical helically coiled heat exchanger with CuO/water based nano fluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 42, pp. 64-70, 2012.
- [7] Akbaridoust F., Rakhsha M., Abbassi A. and Saffar-Avval M., Experimental and numerical investigation of nanofluid heat transfer in helically coiled tubes at constant wall temperature using dispersion model, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 58, No.1-2, pp. 480-491, 2013.
- [8] Mirfendereski S., Abbassi A. and Saffar-avval M., Experimental and numerical investigation of nanofluid heat transfer in helically coiled tubes at constant wall heat flux. *Advanced Powder Technology*, Vol. 26, No.5, pp. 1483-1494, 2015.
- [9] Bahrehmand S. and Abbassi A., Heat transfer and performance analysis of nanofluid flow in helically coiled tube heat exchangers. *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 109, pp. 628-637, 2016.
- [10] Bagherzadeh F., Saffar-Avval M., Seyfi M. and Abbassi A., Numerical investigation of nanofluid heat transfer in helically coiled tubes using the four-equation model. *Advanced Powder Technology*, Vol. 28, No.1, pp. 256-265, 2017.
- [11] Mahmoudi M., Tavakoli M. R., Mirsoleimani M. A., Gholami A. and Salimpour M. R., Experimental and numerical investigation on forced convection heat transfer and pressure drop in helically coiled pipes using TiO₂/water nanofluid. *International Journal of Refrigeration*, Vol. 74, pp. 627-643, 2017.
- [12] Sundar L. S., Bhramara P., Kumar N. R., Singh M. K. and Sousa A. C., Experimental heat transfer, friction factor and effectiveness analysis of Fe₃O₄ nanofluid flow in a horizontal plain tube with return bend and wire coil inserts.