

بررسی تجربی عملکرد حرارتی نانوسیال اکسیدروی - اتیلن گلیکول در مبدل حرارتی دو

لوله‌ی در جریان‌های آشفته

علی سعدی^۱، اشکان غفوری^{۱*}^۱ گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران**Experimental Study of the Thermal Performance of ZnO – EG NanoFluid in Double Tube Heat Exchanger in Turbulent Flow**Ali Saadi¹, Ashkan Ghafouri^{1*}¹Department of Mechanical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran**Abstract**

An experimental study was carried out in order to find out the effects of ZnO Nano fluid with a mean diameter of 30nm on heat transfer, pressure drop and thermal performance of a double tube heat exchanger, where the volume fraction of nanoparticles in the base fluid is less than 1% (low concentration). Ethylene glycol and Nano fluid with particle volume fraction of 0.5%, 0.7% and 1% are used as working fluid. The experiments are carried out in the fully developed turbulent regime. The results indicate that addition of low value of nanoparticles to the base fluid motivates the heat transfer to increase remarkably. The Nano fluid also show that the pressure drop of Nano fluid is slightly higher than that of the base fluid and does not increase with increasing the nanoparticles volume fraction. In this paper, experimental results have been compared with the existing correlations for Nano fluid convective heat transfer coefficient in turbulent regime. Also Nusselt number and friction factor were considered in definition of thermal performance factor for all cases are greater than unity which indicate that this Nano fluid enhances the heat transfer without huge penalty in pumping power. Thermal performance factor maximum is obtained 1.32% by 1% volume fraction and between 1.03%~1.20% by 0.5% volume fraction. Also, for Reynolds about 6300, nusselt number have increased by 0.7% volume fraction, about 19.8 percent. Hence, applying the methods studied here could be considered as a good choice in particle application.

Keywords: Zno nanoparticles, thermal performance, Nusselt number, thermal conductivity, turbulent flow, convective heat transfer

Received: 26/04/2023

Accepted: 07/06/2023

چکیده

در این پژوهش اثر افزودن نانوسیال اکسیدروی به اتیلن گلیکول در ضریب انتقال حرارت جابجائی اجباری و آشفته در یک مبدل دو لوله‌ای مورد آزمایش قرار گرفته است. بیشتر سیال‌ها ضریب هدایت حرارتی پائینی نسبت به جامدات دارند لذا افزودن ذرات جامد با ضریب هدایت حرارتی بالا می‌تواند باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجائی آنها شود. نانوذرات به دلیل داشتن نسبت سطح به حجم بالا، دارای خصوصیات متفاوتی نسبت به حالت معمولی خود هستند و ضریب هدایت حرارتی متفاوتی دارند. در این پژوهش نانوذره‌ی اکسیدروی با قطر ۳۰-۱۰ نانومتر تهیه و با استفاده از تغییر اسیدیته، همزن دور بالا و آلتراسونیک در اتیلن گلیکول به صورت پایدار در آمده است. نانوسیال با غلظت‌های مختلف ۰/۵، ۰/۷ و ۱ درصد کسر حجمی برای بررسی تاثیر غلظت نانوذرات بر ضریب انتقال حرارت جابجائی آماده گردید. برای انجام آزمایش‌ها یک مبدل دو لوله‌ای ساخته شد و نانوسیال در لوله‌ی داخلی مورد آزمایش قرار گرفت. آزمایش‌ها در محدوده‌ی عدد رینولدز ۶۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ انجام گرفت. نتایج آزمایشگاهی نشان داد انتقال حرارت جابه‌جایی هر سه نانو سیال بیشتر از سیال پایه بوده که با افزایش غلظت نانوسیال اکسیدروی در اتیلن گلیکول و افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت افزایش پیدا می‌کند. ماکزیمم بازدهی عملکرد مربوط به غلظت حجمی یک درصد در حدود ۱/۳۲ و همچنین جهت غلظت ۰/۵ درصد بین ۱/۰۳ تا ۱/۲۰ می‌باشد. در نتیجه ماکزیمم ناسلت در غلظت حجمی ۰/۷ درصد در رینولدز ۶۳۰۰ در حدود ۱۹/۸ درصد می‌باشد و همچنین ماکزیمم افزایش انتقال حرارت در غلظت حجمی یک درصد در حدود ۳۳/۲ درصد در رینولدز ۷۲۰۰ است.

واژه‌های کلیدی: نانوذرات اکسیدروی، عملکرد حرارتی، عدد ناسلت، هدایت حرارتی، جریان مغشوش، انتقال حرارت جابه‌جایی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۷

* نویسنده مسئول: اشکان غفوری

نشانی: اهواز، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی

پست الکترونیکی: a.ghafouri@iauhvaz.ac.ir

۱. مقدمه

در صنعت همواره مشکل گرم شدن بیش از حد مجاز دستگاه‌ها وجود داشته است. از این رو سرعت بخشیدن به انتقال حرارت و نیز کوچک کردن تأسیسات آن یک نیاز اساسی است. در مناطق گرم که خنک‌کاری محیط هزینه‌ی بیشتری دارد، این مشکل سبب زیان‌های بسیاری از قبیل کاهش طول عمر دستگاه‌ها و گرم شدن محیط کار می‌شود. در استان خوزستان به علت وجود منابع نفتی و معدنی فراوان، صنایع بسیاری فعال‌اند. بسیاری از این صنایع در فصل تابستان با مشکل‌های جدی برای دفع حرارت از دستگاه‌ها روبرو هستند. همچنین رشد فن‌آوری و گسترش صنعت باعث شده است که شار حرارتی تولید شده توسط دستگاه‌ها بالا رود. این امر موجب شده است که سیال عامل انتقال حرارت در بسیاری از موارد از هوا به آب یا دیگر مایعات تغییر کند؛ چرا که مایعات مرسوم در انتقال حرارت، دارای ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمای ویژه‌ی بیشتری نسبت به هوا هستند. پایین آمدن بازده دستگاه‌ها و نیز فرسودگی‌شان بر اثر گرمای زیاد باعث شده است که موضوعات پژوهشی زیادی در زمینه‌ی ارتقاء انتقال حرارت تعریف شود. افزایش سطح انتقال حرارت، افزایش سرعت جریان و پخش کردن ذرات جامد با هدایت حرارتی بالا در سیال عامل انتقال حرارت، از جمله روش‌های مرسوم برای بهبود در انتقال حرارت جابجائی است. پایین بودن ضریب هدایت حرارتی سیال‌ها، مانعی جدی در بهبود دادن انتقال حرارت جابجائی است. روش بررسی شده در این پژوهش برای بهبود و سرعت بخشیدن به انتقال حرارت، جایگزین کردن آب به‌عنوان سیال عامل انتقال حرارت با نانوسیال است. این کار نه تنها می‌تواند انتقال حرارت را سرعت بخشد، بلکه با بالا بردن بازده مبدل‌های حرارتی می‌تواند حجم تأسیسات و مصرف انرژی را کاهش دهد. با توجه به مشکل انرژی در کشور، به خصوص در فصل گرم در استان خوزستان، بهبود دادن انتقال حرارت اهمیت بالایی دارد. ایده‌ی افزودن ذرات جامد به سیال برای بهبود دادن ضریب

هدایت حرارتی آن، به ماکسول مربوط می‌شود [۱] و بسیاری از پژوهشگران با استفاده از ذرات با ابعاد میکرومتر سعی در انجام آن کرده‌اند. ایراد اصلی این روش ته‌نشینی سریع این ذرات است و اگر سیال برای جلوگیری از ته‌نشینی، مدام در حال گردش نگه داشته شود، ذرات آن باعث فرسودگی اجزای دستگاه می‌شوند. همچنین این سیال را نمی‌توان در میکروکانال‌ها مورد استفاده قرار داد چرا که باعث گرفتگی آنها می‌شود. این سیال‌ها کاربرد عملی ندارند زیرا برای مؤثر بودنشان باید مقدار زیادی از ذرات را در سیال پایه پخش کرد که این باعث افت فشار شدید می‌شود. با توجه به مشکلاتی که ذرات در ابعاد میلی‌متر و میکرومتر ایجاد می‌کنند، مانند گرفتگی مجراها، پژوهش‌گران به ایده‌ی نانوسیال رسیدند؛ یعنی سیالی که با پخش کردن ذرات با ابعاد کمتر از ۱۰۰ نانومتر در یک سیال پایه به‌وجود می‌آید. این نمونه سیال می‌تواند مشکلات پیشین را تا حد زیادی برطرف کند. جنس، اندازه، شکل و غلظت ذرات عوامل مهمی در پایداری و ضریب هدایت حرارتی مخلوط هستند. در انتقال حرارت جابجائی، علاوه بر موارد قبلی باید شرایط جریان را هم در نظر گرفت. همچنین مکانیزم‌های انتقال حرارت دیگری مانند حرکت کاتوره‌ای ذرات و نیز اختلال در لایه‌ی مرزی بر اثر حضور ذرات پیش‌بینی می‌شود که ممکن است باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجائی شوند. هرچند، مکانیزم‌های دیگری مانند تأثیر افزایش غلظت بر آشفتگی جریان، همچنین مقاومت تماسی بین دو ذره و نیز بین ذره و سیال وجود دارند که ممکن است باعث کاهش ضریب انتقال حرارت جابجائی نانوسیال نسبت به اتیلن گلیکول شود. پژوهش‌های اولیه روی نانوذرات با تمرکز بر ضریب هدایت حرارتی انجام شده است. ضریب هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال بیشتر به روش سیم داغ گذرا اندازه گرفته شده است؛ چرا که یکی از دقیق‌ترین روش‌ها برای این منظور است. روش‌های دیگری نیز مانند نوسان دمایی و حالت پایا هم مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اولین پژوهش‌ها در این زمینه توسط ماسودا^۱ و همکاران [۲] انجام گرفتند اما

¹ Masuda

ضریب انتقال حرارت مشاهده شد که این نتیجه در تضاد با نتایج پاک و چو [۵] برای سرعت متوسط یکسان است. ایشان افزایش ۴۰ درصدی را در ضریب انتقال حرارت جابجائی نانوسیال نسبت به آب در شرایط سرعت یکسان نشان دادند. ایشان این نتیجه را چنین توضیح دادند که در آزمایش پاک و چو [۵] افزایش در ویسکوزیته به حدی زیاد بوده است که ممکن است بر آثار آشفتگی جریان غلبه کرده باشد و باعث کاهش انتقال حرارت شده باشد. بنابراین، ایشان نشان دادند که نه تنها غلظت، بلکه اندازه‌ی ذرات و ویژگی‌های جنس آنها نیز مهم هستند و در صورتی که نانوسیال به شکلی مناسب طراحی شده باشد انتقال حرارت را بهبود می‌دهد. ایشان افت فشار را هم مطالعه کردند که تفاوت چندانی بین ضریب اصطکاک آب و نانوسیال مشاهده نشد. پژوهش دیگری در زمینه‌ی انتقال حرارت جابجائی نانوسیال‌ها توسط ون و دینگ^۴ [۷] انجام گرفت. ایشان برای اولین بار اثر ناحیه‌ی ورودی را مورد بررسی قرار دادند. طول ناحیه‌ی ورودی گرمایی و هیدرودینامیکی در جریان آرام معمولاً طولانی است. از آنجا که لایه‌ی مرزی در این ناحیه باریک‌تر از ناحیه‌ی توسعه یافته است، ضریب انتقال حرارت جابجائی در آن بیشتر است. ایشان ضریب انتقال حرارت جابجائی محلی را در جریان آرام درون لوله اندازه‌گیری کردند. ایشان از ترکیبات متفاوت آب - اکسید آلومنیوم در جریان درون یک لوله‌ی مسی به قطر ۵/۴ میلی‌متر و به طول ۹۷۰ میلی‌متر استفاده کردند. برای تخمین زدن ویسکوزیته از رابطه‌ی اینشتین استفاده شد. ایشان شاهد افزایش در ضریب انتقال حرارت بودند و معلوم شد که بیشترین مقدار افزایش مربوط به ناحیه‌ی ورودی است. همچنین با افزایش غلظت ذرات به مقدار ضریب انتقال حرارت جابجائی نیز افزوده شده است. ون و دینگ [۷] دریافتند که رابطه‌ی دیتوس - بولتر نمی‌تواند ضریب انتقال حرارت جابجائی نانوسیال را پیش‌بینی کند که نشان دهنده‌ی وجود ویژگی‌های خاصی در انتقال حرارت جابجائی آن است؛ همچنین مشاهده کردند که

آزمایش ایستمن^۱ و همکاران [۳] که در آن ذرات مس به‌روش تک مرحله‌ای وارد سیال شده بودند نتیجه‌ای موفقیت آمیز داشت و توجه‌ی بسیاری را به خود جلب نمود. نتیجه‌ی این آزمایش تا حد زیادی بهتر از نتایج پیش‌بینی شده توسط نظریه‌های ماکروسکوپی موجود است. داس^۲ و همکاران [۴] دریافتند که ضریب هدایت حرارتی نانوسیال‌ها خیلی بیشتر از سیال پایه‌ی خود به دما وابستگی دارد و با افزایش دما، افزایش چشم‌گیر می‌یابد. پژوهش آنها کاربرد ویژه‌ای به نانوسیال‌ها می‌دهد؛ به این صورت که می‌توان از آنها به‌عنوان سیال هوشمند استفاده کرد که با شناسایی نقاط داغ می‌تواند ضریب هدایت حرارتی خود را بالا ببرد و در نتیجه انتقال حرارت از آن نقاط را تسریع بخشد. اولین پژوهش در زمینه‌ی انتقال حرارت جابجائی در نانوسیال‌ها به‌وسیله‌ی پاک و چو^۳ [۵] در لوله‌ای به قطر ۱۰/۶۶ میلی‌متر انجام گرفت. آنها از ذرات با ابعاد ۱۳ نانومتر و ۲۷ نانومتر استفاده کردند. آزمایش نشان داد که ضریب انتقال حرارت جابجائی نانوسیال نسبت به آب در جریان آشفته و رینولدز یکسان، افزایش و در سرعت متوسط یکسان، کاهش یافته است. ایشان نتیجه‌ی کار را به‌صورت ضریب انتقال حرارت جابجائی بعددار ارائه دادند؛ چرا که عدد ناسلت به دلیل تأثیر ضریب هدایت حرارتی در آن، ممکن است شاخص مناسبی از ضریب انتقال حرارت جابجائی نباشد. همچنین ایشان رابطه‌ی دیتوس - بولتر را برای همبسته کردن داده‌های خود اصلاح کردند. هرچند که رابطه آنها نمی‌تواند کاربرد عملی چندانی داشته باشد؛ چرا که در آن اثر غلظت یا اندازه‌ی ذرات به‌شکل واضحی مشاهده نمی‌شود. ایشان همچنین شاهد افزایش ویسکوزیته‌ی نانوسیال همراه با افزایش غلظت ذرات بودند. به این معنی که همراه با افزایش ضریب انتقال حرارت جابجائی، افت فشار هم افزایش می‌یابد. در آزمایشی که توسط خوان و لی^۴ [۶] پس از آن انجام شد، نتایج متفاوتی به‌دست آمد. ایشان از نانوذرات مس با اندازه‌ی تقریباً ۱۰۰ نانومتر استفاده کردند. در آزمایش افزایش قابل توجه‌ای در

⁴ Xuan & Li

⁵ Wen & Ding

¹ Eastman

² Das

³ Pak & Cho

حرارت جابجائی کمتر از حد پیش‌بینی شده توسط روابط مربوط به سیال‌های تک‌فاز است. لی و همکاران گزارش نمودند که با افزودن ۴ درصد حجمی از نانو ذرات اکسیدمس با قطر ۳۵ نانومتر در اتیلن گلیکول به هدایت حرارتی آن ۲۲ درصد و با افزودن ۵ درصد حجمی از نانو ذرات اکسید آلومینیوم در آن به هدایت حرارتی نانوسیال حاصل ۱۸ درصد افزوده می‌شود. ایستمن^۳ و همکاران [۱۰] با استفاده از نانوذرات مس خالص به اندازه‌ی کمتر از ۱۰ نانومتر و غلظت حجمی ۰/۳ درصد در اتیلن گلیکول به یک افزایش ۴۰ درصدی در ضریب هدایت حرارتی نانوسیال حاصل شده دست یافتند. ملاحظه نمودند که در سوسپانسیون‌های استاتیک نانوسیالات عمل ته‌نشینی حتی پس از هفته‌ها و ماه‌ها اتفاق نمی‌افتد. در حقیقت نانوسیالات در تجهیزات مربوط به انتقال حرارت بیشتر شبیه سیال یک فاز عمل می‌نمایند. ایشان همچنین نشان دادند که افزایش سطح به حجم نانو ذرات و یا کاهش نانوذرات یک عامل مهمی در افزایش هدایت حرارتی موثر می‌باشد [۱۱]. بیشتر مطالعات انجام شده در حیطه‌ی انتقال حرارت نانوسیالات حاوی نانو اکسیدهای فلزی مربوط به اکسید آلومینیوم، اکسید تیتانیوم و اکسید مس بوده است در حالیکه این مطالعات برای نانو اکسیدروی در سیال پایه بسیار محدود [۱۲] و در خصوص سیال اتیلن گلیکول تا حدودی انجام شده است [۱۳-۱۶]. یو^۴ و همکارانش با استفاده از سیال حاوی نانو اکسید روی در اتیلن گلیکول با غلظت ۵ درصد کسر حجمی، هدایت حرارتی آن را به میزان ۲۶/۵ درصد افزایش دادند [۱۶]. در تحقیقی دیگر محققان میزان افزایش ضریب هدایت حرارتی نانو اکسیدروی در سیال پایه اتیلن گلیکول با غلظت ۵/۵ درصد کسر حجمی را مورد اندازه‌گیری قرار دادند که میزان افزایش هدایت حرارتی آن در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد برابر ۲۳ درصد بوده است. در خصوص نانوسیال اکسیدروی مطالعات اندکی صورت گرفته است که بیشتر مطالعات مربوط به آن در سیال پایه اتیلن گلیکول بوده است.

طول ناحیه‌ی ورودی نانوسیال بیشتر از طول ناحیه‌ی ورودی سیال پایه‌ی خود است. در ضمن بحث در نتایج، چند احتمال را برای بهبود ضریب انتقال حرارت جابجائی مطرح کردند. ایشان بیان داشتند که پخش غیریکنواخت ذرات، ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته ممکن است منجر به کاهش ضخامت لایه‌ی مرزی و افزایش انتقال حرارت شود. هر چند که این گزاره تنها یک پیشنهاد بوده و در پژوهش آنها به اثبات نرسیده است. پژوهش دیگری که نتایج مشابه با خوان و لی [۶] دارد، مربوط به هریس^۱ و همکاران [۸] است. ایشان مخلوط CuO و Al_2O_3 در آب را، درون یک لوله‌ی مسی به قطر ۶ میلی‌متر آزمایش کردند. بهبود کلی در انتقال حرارت گزارش شد و نتایج بهتری برای ذرات Al_2O_3 به دست آمد. نشان داده شد که رابطه‌ی سیدر - تات برای جریان آشفتگی نانوسیال‌ها ناکافی است و نمی‌تواند بهبود در انتقال حرارت را به خوبی پیش‌بینی کند. دو نتیجه‌ی مهم که در این پژوهش مشاهده شد این است که بهبود در انتقال حرارت با افزایش غلظت ذرات افزایش می‌یابد و این بهبود در عده‌های پکلت بالاتر، بیشتر است. هریس و همکاران [۸] بهبود در ضریب انتقال حرارت جابجائی را، مانند خوان و لی [۶]، به پخش‌شدگی ذرات، حرکت کاتوره‌ای آنها و بهبود در ضریب هدایت حرارتی نسبت دادند. برخلاف خوان و لی [۶] ایشان از نانوذرات نافلزی استفاده کردند اما همچنان بهبود در انتقال حرارت قابل توجه است و روابط قدیمی جریان آشفتگی برای توضیح آن کافی نیست. در کل به نظر می‌رسد که منبع تهیه‌ی ذرات، روش تولید، روش پخش کردن ذرات، اندازه‌ی آنها، pH مخلوط و بسیاری از موارد دیگر مسئول این تفاوت‌ها در نتایج تجربی پژوهشگران است. یانگ^۲ و همکاران [۹] انتقال حرارت جابجائی چند مخلوط را در جریان آرام درون لوله بررسی کردند و از دو مبدل دولوله‌ای استفاده کردند. ذرات مورد استفاده از جنس گرافیت با نسبت طول به قطر کمتر از یک بودند. این ذرات ضریب هدایت حرارتی و ضریب انتقال حرارت جابجائی نانوسیال‌ها را افزایش دادند. هر چند، نتایج تجربی نشان دادند که بهبود در ضریب انتقال

³ Eastman

⁴ Yu

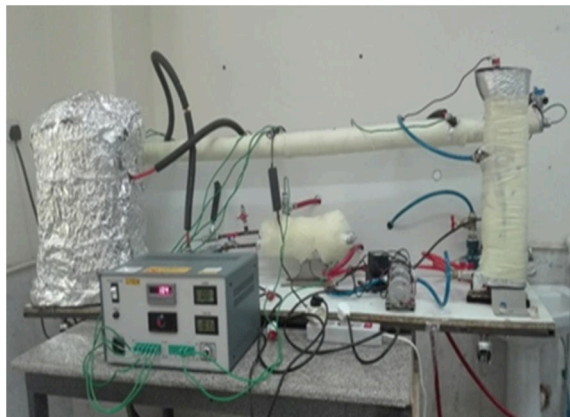
¹ Heris

² Yang

۲. شرح مسأله

۲.۱. دستگاه آزمایش

دبی هر دو جریان با استفاده از سنجش حجم و زمان در نظر گرفته شده است.



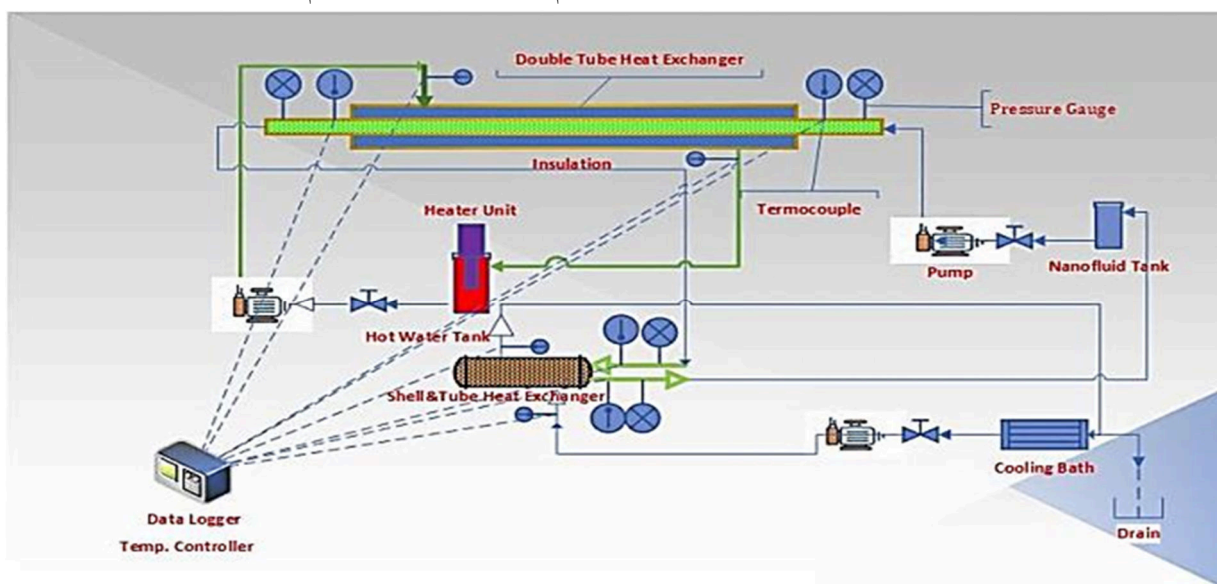
شکل ۱- نمای کلی دستگاه آزمایش

اجزای دستگاه شکل ۱ که شماتیک آن در شکل ۲ آمده است، عبارتند از:

- ۱- مخزن نانوسیال، ۲- بخش خنک‌کاری، ۳- پمپ نانوسیال، ۴- شیر مسیر کنارگذر برای تنظیم دبی نانوسیال، ۵- شیر تخلیه نانوسیال، ۶- بخش آزمایش، ۷- شیر برای تغییر دادن مسیر نانوسیال برای دبی‌سنجی، ۸- شیر مخزن دبی‌سنجی برای نانوسیال، ۹- مخزن دبی‌سنجی برای نانوسیال، ۱۰- ترموکوپل، ۱۱- دستگاه داده‌برداری، ۱۲- مخزن آب گرم، ۱۳- گرم‌کن برقی، ۱۴- پمپ آب گرم، ۱۵- شیر برای تغییر دادن مسیر آب گرم برای دبی‌سنجی، ۱۶- شیر مخزن دبی‌سنجی برای آب گرم، ۱۷- مخزن دبی‌سنجی برای آب گرم، ۱۸- شیر تخلیه آب گرم.

آزمایشات تجربی توسط دستگاه مبدل حرارتی دولوله‌ای شکل ۱ انجام شده است، از این رو تصمیم به ساخت یک مبدل دولوله‌ای گرفته شد تا ضریب انتقال حرارت جابجائی آشفته محاسبه شود. از آنجا که هدف به دست آوردن ضریب انتقال حرارت جابجائی نانوسیال در لوله است، مسیر گذر نانوسیال در مبدل، لوله‌ی داخلی انتخاب شد. با توجه به اینکه پایداری فاز نانوذرات، با افزایش دما کاهش می‌یابد، تصمیم گرفته شد که نانوسیال به‌عنوان سیال خنک‌کننده وارد بخش آزمایش شود تا نیازی به گرم کردن آن با گرم‌کن برقی نباشد. از این رو یک حلقه‌ی آب گرم که شامل فضای حلقوی بخش آزمایش است، پیش‌بینی شد. همچنین مخزنی دارای یک دم‌پا ترموات مدل RTD و یک گرم‌کن برقی برای نگهداری و گرم کردن آب تا یک دمای معین در نظر گرفته شد. از آنجا که نانوسیال می‌بایست به شکل حلقه بسته جریان یابد، یک مبدل دیگر پیش‌بینی شد تا با استفاده از جریان آب حمام سرد نانوسیال را خنک کند.

چهار حس گر دما نوع K که صحت آنها در حد ۰/۵ درجه سانتیگراد بوده است، در ورودی و خروجی نانوسیال و آب گرم در مبدل نصب شده است. همچنین ابزاری برای سنجش



شکل ۲- طرح شماتیک دستگاه طراحی شده

۲.۲. تهیه ی نانوسیال اکسیدروی - اتیلن گلیکول

نانوذرات مورد استفاده در این تحقیق از شرکت مهرگان شیمی که از شاخه ی Us Research Material تهیه شده است. مشخصه ی نانو ذره خریداری شده در جدول ۱ و همچنین مشخصات اتیلن گلیکول در جدول ۲ آمده است:

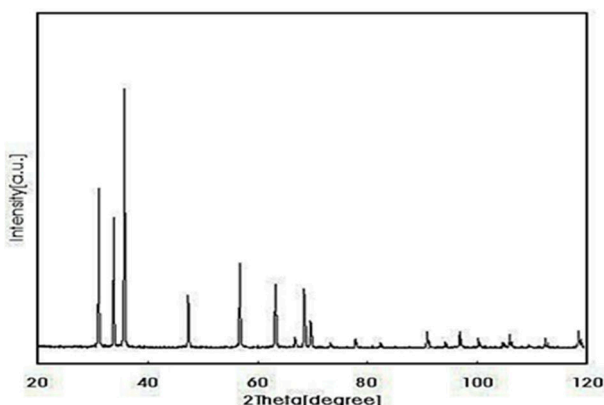
جدول ۱- خواص نانوذره مورد آزمایش ZnO

جنس ذره	جنس ذره
خلوص	٪۹۹+
اندازه (nm)	۱۰-۳۰
سطح ویژه (m^2/gr)	۲۰-۶۰
شکل	کروی
رنگ	سفید
چگالی (gr/cm^3)	۵/۶۰۶

جدول ۲- خواص فیزیکی سیال پایه اتیلن گلیکول

سیال پایه	گرمای ویژه ($kJ/kg.^\circ k$)	چگالی (kg/m^3)	ضریب هدایت حرارتی ($w/m.^\circ k$)
اتیلن گلیکول	۲۴۱۵	۱۱۱۱	۰/۲۵۲

همانطور که از داده های جدول مشخص است نانو ذره ی مورد مطالعه کروی شکل با اندازه ی میانگین قطر ۲۰ نانومتر می باشد. جهت اطمینان از نوع ذره، تصویر XRD گرفته و به همراه نمونه فرستاده شد. داده های تفرق پرتو ایکس پودری به صورت شدت فوتون بر حسب زاویه ی دکتور 2θ است این داده ها به صورت لیستی از محل پیک و شدت آنها در شکل ۳ آمده است:



شکل ۳- طیف حاصل از پرتو پراش X از نمونه ی ZnO

آرایش اجزای دستگاه به صورت افقی است و مخزن های نانوسیال و آب در ارتفاع بالاتری نسبت به دیگر اجزاء قرار گرفته اند تا فشار مورد نیاز برای رساندن سیال ها به پمپ تأمین گردد. همچنین شیر و اتصالات ۱/۲ اینچ و شیلنگ ها ۳/۸ اینچ برای دستگاه انتخاب شد.

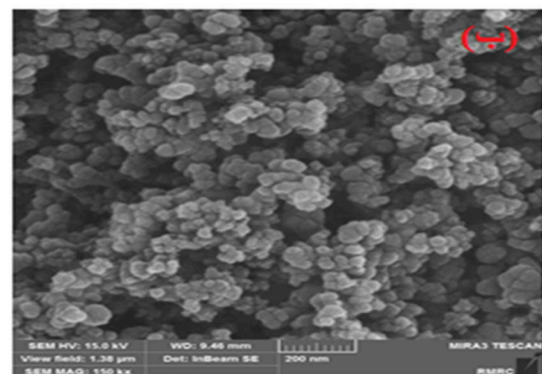
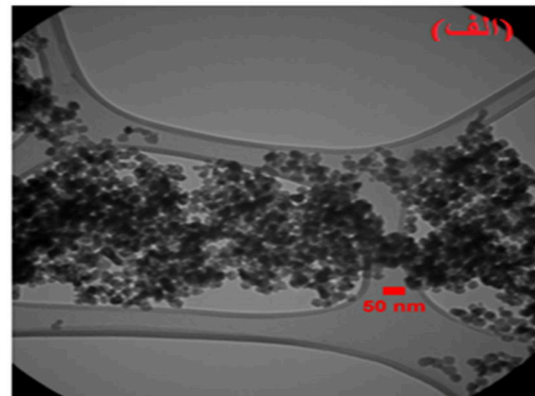
ترموکوپل ها از سوراخ ایجاد شده در دیوارها عبور داده شدند و درز باقیمانده بین آنها و دیواره ی سوراخ با چسب اپوکسی آب بندی شد و از آنجا که این چسب ترد است، برای جلوگیری از شکسته شدن لبه ی آن، اطراف سیم ترموکوپل و سوراخ با چسب انعطاف پذیر سیلیکا پوشانده شد. محل نصب ترموکوپل ها در لوله ی داخلی به قدر کافی از ناحیه ی انتقال حرارت فاصله دارد ($X/D \sim 10$) و در لوله ی خارجی هم پس از سه راهی نصب شد تا دمای اندازه گیری شده تابع فاصله ی شعاعی نوک ترموکوپل تا مرکز لوله نباشد؛ با این حال، سعی شد ترموکوپل ها در فاصله ی شعاعی یکسانی نصب شوند. ابعاد مخزن $10 \times 10 \times 40$ سانتیمتر مکعب انتخاب گردید، مخزن آب گرم با توجه به مقدار سیال مورد نیاز با ابعاد $10 \times 20 \times 40$ سانتیمتر مکعب انتخاب شد. ورودی آب و محل اتصال گرم کن به مخزن در دیوارها و مقابل یکدیگر قرار داده شدند. خروجی نیز در کف و زیر محل اتصال گرم کن برقی به مخزن قرار داده شده است.

برای اندازه گیری دما ابزارهای متفاوتی وجود دارد که پس از بررسی عملکرد و قیمت آنها [۱۷, ۱۸]، ترموکوپل به علت داشتن قیمت مناسب و دقت کافی، برای اندازه گیری دما انتخاب شد. چهار عدد ترموکوپل نوع K و یک عدد دستگاه داده برداری انتخاب شد. انتخاب ترموکوپل نوع K به دلیل قیمت مناسب و صحت کافی، در حد ۰/۵ درجه سانتیگراد بوده است. همچنین از آنجا که ترموکوپل می بایست وارد جریان سیال شود، ترموکوپلی انتخاب شد که دارای اتصالی ظریف باشد تا اختلال کمتری در جریان ایجاد کند.

برای اندازه گیری فشار ورودی و خروجی لوله ی مبدل دو لوله ای از کنترلر فشار آتونیکس مدل LOICPA سری PSAN استفاده شده است.

شده بود اندازه‌گیری شدند، در ادامه مقدار پتانسیل زتای سطح نانوذره برای هر نمونه بوسیله‌ی یک دستگاه زتاسایزر در شرایط دمای ۲۱ درجه‌سانتیگراد، فشار ۱ اتمسفر و رطوبت ۳۸ درصد اندازه‌گیری شد، در نهایت با بررسی تاثیر مقدار اسیدیته بر پتانسیل زتای سطح نانوذره برای هر نمونه مقدار بهینه اسیدیته نیز حاصل شد. سپس جهت پخش نانوذرات و پایداری سوسپانسیون حاصل شده نمونه‌ها به مدت ۸ ساعت در معرض ارتعاشات آلتراسونیک حمامی قرار گرفت. بررسی سوسپانسیون‌های حاصل نشان داد که نانوذرات رسوب نموده و سوسپانسیون‌های حاصل شده از پایداری لازم برخوردار نمی‌باشند. این آزمایش‌ها با همونایزر دور بالا نیز تکرار گردید و نمونه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه با دور ۱۳۵۰۰ دور در دقیقه همزده شدند نتایج بدست آمده نظیر نتایج حاصل از آلتراسونیک حمامی بودند. در سری سومی آزمایش‌ها از روش ترکیبی همونایزر/ آلتراسونیک حمامی استفاده گردید. ابتدا نمونه‌ها توسط همونایزر با ۱۳۵۰۰ دور در دقیقه همزده شدند و سپس به مدت ۸ ساعت در معرض آلتراسونیک قرار گرفتند. در طول آزمایش به فواصل زمانی ۲ ساعت نمونه‌ها توسط همونایزر همزده تا رسوب تشکیل شده در آنها در اتیلن‌گلیکول پراکنده شود. پس از پایان آزمایش مقداری رسوب در نمونه‌ها مشاهده گردید. اگر چه با این روش ترکیبی مقدار رسوب در مقایسه با رسوب موجود در سوسپانسیون‌های حاصل از آلتراسونیک کمتر بود، اما با این روش نیز نانوسیال پایدار به دست نیامد. آزمایش‌های فوق با آلتراسونیک پروپی نیز تکرار گردید اما نمونه به مدت یک ساعت در معرض ارتعاشات آلتراسونیک قرار گرفتند. پس از پایان آزمایش رسوبی در نمونه‌ها مشاهده نگردید. استفاده از همونایزر دور بالا در کنار آلتراسونیک پروپی منجر به پایداری نانوسیال پایدار گردید. نتایج آزمایشات نشان داد که با روش ترکیبی همونایزر دور بالا / آلتراسونیک حمامی حتی به مدت ۸ ساعت نمی‌توان به نانوسیال پایدار دست یافت. در مقایسه با مدت زمان مورد نیاز برای تهیه‌ی نانوسیال پایدار با روش ترکیبی همونایزر دور بالا / آلتراسونیک پروپی به مدت سه

همچنین به منظور درک خواص ساختاری و اطمینان از شکل و اندازه‌ی نانوذرات اکسیدروی، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی توسط شرکت مذکور گرفته شد که تصویر TEM آنها در شکل ۴ قسمت الف و SEM در قسمت ب آمده است میکروسکوپ الکترونی عبوری نشر میدانی بدلیل دارا بودن تفنگ الکترونی و برخورد پرتو الکترونی به نمونه، از قدرت تفکیک بالاتری نسبت به میکروسکوپ نوری برای بزرگنمایی تصاویر برخوردار بوده و تصاویر را با عمق میدان بسیار بزرگ تری نشان می‌دهد. این روش بیشتر در محدوده-ی وسیعی از مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است [۱۹].



شکل ۴- الف: آنالیز TEM از نانوپودر اکسیدروی، ب: آنالیز SEM از نانوپودر اکسیدروی

ساخت نانوسیال اکسیدروی برپایه‌ی اتیلن گلیکول با دو روش انجام شد. با استفاده از محلول‌های سدیم هیدروکسید با غلظت ۰/۱ نرمال و هیدروکلریک اسید با غلظت ۱ مولار در گستره‌ی ۲ تا ۱۲ تغییر داده شد. مقدار اسیدیته‌ی نمونه‌ها بوسیله‌ی اسیدیته سنج دقیق دیجیتالی به کمک محلول سه محلول بافر با مقادیر اسیدیته ۴، ۷ و ۱۰ استاندارد سازی

$$\frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} = -\frac{T_s - T_{m,o}}{T_s - T_{m,i}} = \exp\left(\frac{PL}{\dot{m}c_p} \bar{h}\right) \quad (7)$$

با مرتب‌سازی معادله ی (۷) نتیجه می‌گیریم:

$$\bar{h} = \frac{\dot{m}c_p}{PL} L_n \left(\frac{T_s - T_{m,i}}{T_s - T_{m,o}} \right) \quad (8)$$

و همچنین میزان دمای T_s را از رابطه ی (۹) استفاده نمود که نمایش داده شده است:

$$LMTD = \frac{(T_{o1} - T_{i2}) - (T_{o2} - T_{i1})}{L_n \left(\frac{T_{o1} - T_{i2}}{T_{o2} - T_{i1}} \right)} \quad (9)$$

عدد ناسلت متوسط محاسبه شده را می‌توان به شرح زیر محاسبه کرد:

$$Nu = \frac{\bar{h}d}{k} \quad (10)$$

h ضریب انتقال حرارت نانوسیال، d قطر داخلی لوله‌ی آزمایش، k رسانای گرمای نانوسیال است. همانند ضریب انتقال حرارت، ضریب اصطکاک نانوسیال در بخش تست با مرتب کردن از طریق زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta P = f \frac{LV^2}{d2g} \quad (11)$$

با ساده‌سازی رابطه (۱۱) ضریب اصطکاک نانوسیال بدست آمده به شرح زیر می‌باشد:

$$f = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho V^2 L} d \quad (12)$$

F ضریب اصطکاک نانوسیال، ΔP افت فشار اندازه‌گیری شده نانوسیال، L طول لوله، ρ چگالی نانوسیال و v سرعت متوسط نانوسیال است. ویژگی‌های فیزیکی مانند چگالی، ویسکوزیته، گرمای ویژه و رسانایی از طریق روابط زیر محاسبه می‌شوند. چگالی با استفاده از معادله‌ی زیر از رابطه-ی هامیلتون^۱ [۲۱] محاسبه می‌شود:

$$\rho_{nf} = \phi\rho_p + (1 - \phi)\rho_f \quad (13)$$

ساعت مزیت این آلتراسونیک را نسبت به آلتراسونیک حمامی نشان می‌دهد.

استفاده از روش ترکیبی هموژنایزر دور بالا و آلتراسونیک پروپی ساخت نانوسیال اکسیدروی/آب در پژوهش سوگانتی و راجان مطابقت دارد که ایشان برای تهیه‌ی نانوسیال اکسیدروی/آب در حضور ماده‌ی پراکنده ساز هگزامتاسففات از روش ترکیبی هموژنایزر دور بالا/آلتراسونیک پروپی استفاده نموده و نانوسیال پایدار به دست آوردند [۲۰].

۳. روش حل

۳.۱. فرمول‌ها و روابط ریاضی

بهترین روش برای ارزیابی عملکرد حرارتی سیستم مبدل حرارتی دو لوله‌ای محاسبه عدد ضریب انتقال حرارت است. میزان انتقال گرما از سیال گرم کننده به صورت زیر است:

$$q_{conv} = \dot{m}C_p(T_{m,o} - T_{m,i}) \quad (1)$$

q_{conv} میزان انتقال حرارت آب داغ و $\dot{m}c_p$ میزان شدت جریان آب داغ است با استفاده از رابطه (۲) یک حجم کنترل دیفرانسیل مایع درون لوله‌ی داخلی از طریق زیر محاسبه می‌شود:

$$dq_{conv} = \dot{m}C_p dT_m \quad (2)$$

با استفاده از تعریف انتقال حرارت بر اساس شار گرما داریم:

$$dq_{conv} = q_s'' P dx \quad (3)$$

با استفاده از رابطه‌ی (۲) و (۳):

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s'' P d}{\dot{m}c_p} \quad (4)$$

با تکمیل قانون خنک کننده نیوتن در رابطه (۴) داریم:

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{P}{\dot{m}c_p} h(T_s - T_m) \quad (5)$$

با جداسازی متغیرها و انتگرال‌گیری داریم:

$$L_n = \frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} = -\frac{PL}{\dot{m}c_p} \left(\frac{1}{L} \int_0^L h dx \right) \quad (6)$$

با جداسازی معادلات از طرفین داریم:

¹ Hamilton

همچنین معادله‌ی وانگ [۲۳] جهت تعیین ویسکوزیته نانوسیال در زیر داریم:

$$\mu_{nf,Wang} = (1 + 7.3\phi + 123\phi^2)\mu_f \quad (۱۹)$$

که μ_{nf} ویسکوزیته نانوذرات، μ_f ویسکوزیته سیال پایه است. جهت اعتبارسنجی و قابلیت اطمینان از بخش آزمایشگاهی جهت اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جابجایی و مقایسه-ی داده‌های آزمایشگاهی، از معادله‌های گنیلینسکی [۲۴]، دتیوس بولتر [۲۵]، پتخوف [۲۶] و میگا [۲۷] جهت جریان-های مغشوش استفاده شده است:

معادله‌ی گنیلینسکی جهت جریان مغشوش را از رابطه‌ی زیر داریم:

$$Nu = \frac{f/8(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\sqrt{\frac{f}{8}}(Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \left(\frac{Pr}{Pr_f}\right)^{0.11} \left[1 + \left(\frac{d}{L}\right)^{\frac{2}{3}}\right] \quad (۲۰)$$

بین محدوده‌ی عدد پرانتل $0.5 < Pr < 10^6$ و عدد رینولدز $2300 < Re < 5 \times 10^6$ کاربرد دارد. در این رابطه ضریب داری از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$f = \frac{1}{(1.82 \log_{10} Re - 1.64)^2} \quad (۲۱)$$

که Re عدد رینولدز، Pr عدد پرانتل در دمای میانگین، Pr_f عدد پرانتل در لوله‌ی داخلی بخش آزمایش، L طول لوله و d قطر لوله می‌باشد.

همچنین معادله دتیوس - بولتر از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (۲۲)$$

همچنین معادله‌ی پتخوف [۲۶] از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$Nu = \frac{(f/8)RePr}{1.07 + 12.7(f/8)^{0.5}(Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (۲۳)$$

جهت محدوده‌ی رینولدز $104 < Re < 5 \times 10^6$ و محدوده پرانتل $0.5 < Pr < 200$ می‌باشد.

معادله‌ی میگا [۲۷] را از رابطه‌ی زیر داریم:

ρ_{nf} چگالی نانوذرات، ϕ کسر حجمی نانوذرات، ρ_{np} چگالی نانو ذره و ρ_f چگالی سیال پایه است و همچنین ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال را می‌توان از رابطه (۱۴) محاسبه نمود:

$$C_{p,nf} = \frac{\phi(\rho c_p)_p + (1 - \phi)(\rho c_p)_f}{\rho_{nf}} \quad (۱۴)$$

هامیلتون [۲۱] یکی از مدل‌های پایه‌ای برای محاسبه‌ی هدایت حرارتی نانوسیال است. مخلوط جامد - مایع می‌باشد که از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$C_{p,nf} = \frac{\phi(\rho c_p)_p + (1 - \phi)(\rho c_p)_f}{\rho_{nf}} \quad (۱۵)$$

K_p هدایت حرارتی ذره، ϕ کسر حجمی، K_f هدایت حرارتی سیال پایه و n ضریب شکل تجربی که از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$n = \frac{3}{\psi} \quad (۱۶)$$

ψ شکل کروی ذره که نسبت سطح کروی شکل به حجم ذره می‌باشد که در اینجا مقدار n را برابر ۳ در نظر می‌گیریم.

ضریب هدایت حرارتی (رسانایی گرمایی) نانوسیال را با استفاده از دستگاه $KD2 - Pro$ نیز اندازه‌گیری شده است.

مدل دیگر برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی از رابطه‌ی چوی [۲۲] می‌توان محاسبه کرد:

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_w + 2\phi(k_p - k_w)(1 + \beta)^3}{k_p + 2k_w - \phi(k_p k_w)(1 + \beta)^3} \quad (۱۷)$$

k_{nf} رسانایی گرمایی نانوسیال، k_p رسانایی گرمایی نانوذرات، k_w رسانایی گرمایی سیال پایه، β ضخامت لایه-ی نانویی به شعاع اولیه‌ی ذره است. معمولاً برای محاسبه‌ی رسانایی گرمایی نانوسیال از مقدار $\beta = 0.1$ استفاده می‌شود. مدل‌های متعددی برای تعیین ویسکوزیته‌ی موثر نانوسیالات وجود دارد که در این تحقیق از معادله بچلر و وانگ استفاده شد که معادله‌ی بچلر جهت ذرات کروی با درصد حجمی کمتر از ۵٪ کاربرد دارد و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\mu_{nf,Batchelor} = (1 + 2.5\phi + 6.2\phi^2)\mu_f \quad (۱۸)$$

$$U_{Nu} = \left[\left(\frac{d}{k} U_h \right)^2 + \left(\frac{h}{k} U_d \right)^2 + \left(\frac{hd}{k^2} U_k \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$U_{Nu} = \left[\left(\frac{2d}{\rho L V^2} U_{\Delta p} \right)^2 + \left(\frac{2\Delta p}{\rho L V^2} U_d \right)^2 + \left(\frac{2\Delta p d}{\rho^2 L V^2} U_f \right)^2 + \left(\frac{2\Delta p d}{\rho L^2 V^2} U_L \right)^2 + \left(\frac{4\Delta p d}{\rho L V^3} U_v \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

در جدول ۳ می‌توان عدم قطعیت پارامترهای اندازه‌گیری شده را که از رابطه‌ی (۲۷) محاسبه شده است را مشاهده نمود:

جدول ۳- عدم قطعیت پژوهش

پارامتر	عدم قطعیت اندازه‌گیری شده
عدد رینولدز	$\pm 3.6\%$
ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی	$\pm 4.7\%$
عدد ناسلت	$\pm 5\%$
ضریب اصطکاک	$\pm 6.4\%$

۴. تفسیر و تحلیل نتایج

بعد از ساخت و راه‌اندازی دستگاه آزمایش و انجام تست-های اولیه، آزمایشات مختلفی برای تعیین میزان تأثیر نانوسیال اکسیدروی- اتیلن گلیکول بر افت فشار و افت دما در مبدل دولوله‌ای انجام گرفت. شکل ۵ مقایسه ناسلت تجربی سیال پایه با مدل‌های دیتوس-بولتر، گنیلینسکی، مایگا و پتخوف را نشان می‌دهد که معادله‌ی گنیلینسکی تطابق خوبی با داده‌های آزمایش نسبت به بقیه‌ی معادله‌ها را دارد.

شکل ۶ عدد ناسلت تجربی نانوسیال در غلظت‌های مختلف با رینولدزهای متفاوت را نشان می‌دهد.

$$Nu = 0.085 Re^{0.71} Pr^{0.35} \quad (24)$$

معادله‌ی اصطکاک بلازیوس [۲۵] به صورت زیر است:

$$Nu = 0.0316 Re^{-0.25} \quad (25)$$

معیار بازدهی عملکرد که برای بررسی هم‌زمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار می‌توان از رابطه‌ی زیر استفاده کرد هر چه معیار بازدهی عملکرد بیشتر بود، مطلوب‌تر است و در مواردی که از یک بالاتر باشد صرفه‌ی اقتصادی دارد، که می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه نمود:

$$\eta = \left(\frac{Nu_{nf}}{Nu_f} \right) / (f_{nf}/f_f)^{1/3} \quad (26)$$

۳.۲. تحلیل عدم قطعیت اندازه‌گیری

عدم قطعیت اندازه‌گیری پارامترهای انتقال حرارت در جدول ۳ برپایه‌ی روش کین و مک کلینتک محاسبه شده است که پراکندگی داده‌ها را مشخص می‌کند. عدم قطعیت را می‌توان به شکل نسبی از رابطه‌ی زیر بدست آورد:

$$U_R = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial R}{\partial v_i} U_{v_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

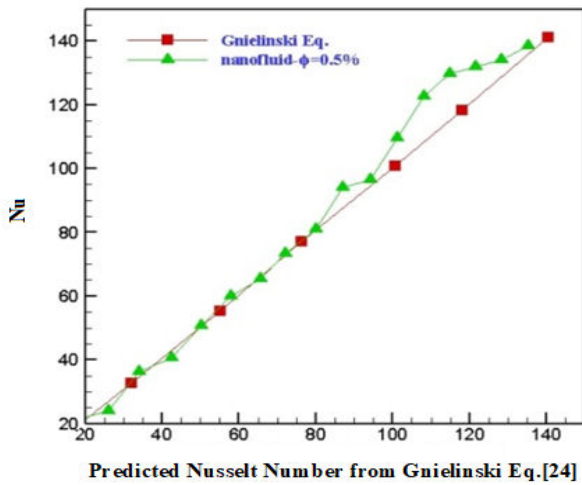
که عدم قطعیت پارامترهای عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در زیر آمده است:

$$U_{Re} = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Re}{\partial v_i} U_{v_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

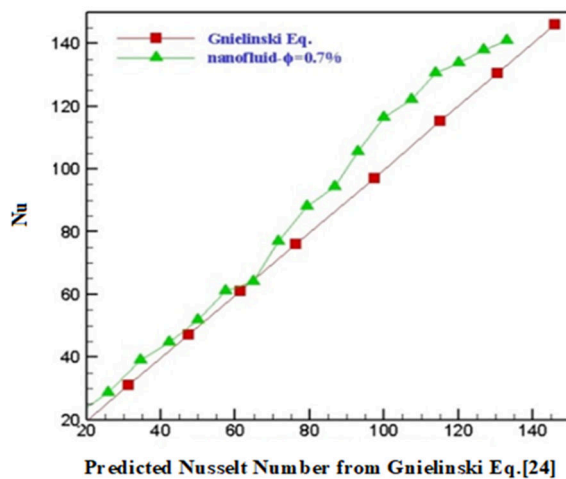
$$U_h = \left[\left(\frac{d}{v} U_v \right)^2 + \left(\frac{v}{v} U_d \right)^2 + \left(\frac{vd}{v^2} U_v \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$U_h = \left[\left(\frac{vdc_p}{L} U_{\rho} \ln \frac{\Delta T_{i,s}}{\Delta T_{o,s}} \right)^2 + \left(\frac{\rho dc_p}{U_v} U_{\rho} \ln \frac{\Delta T_{i,s}}{\Delta T_{o,s}} \right)^2 + \left(\frac{\rho dc_p}{L^2} U_L \ln \frac{\Delta T_{i,s}}{\Delta T_{o,s}} \right)^2 + \left(\frac{\rho dc_p}{L} U_{\Delta T_{i,s}} \frac{1}{\Delta T_{i,s}} \right)^2 + \left(\frac{\rho dc_p}{U_{\Delta T_{o,s}} \Delta T_{o,s}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

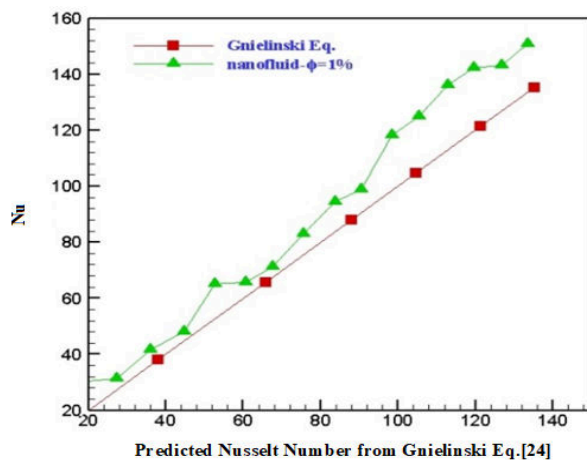
شکل‌های ۷، ۸ و ۹ به ترتیب تطابق گنیلینسکی با نانوسیال غلظت حجمی ۰/۵، ۰/۷ و ۱ درصد را نشان می‌دهند:



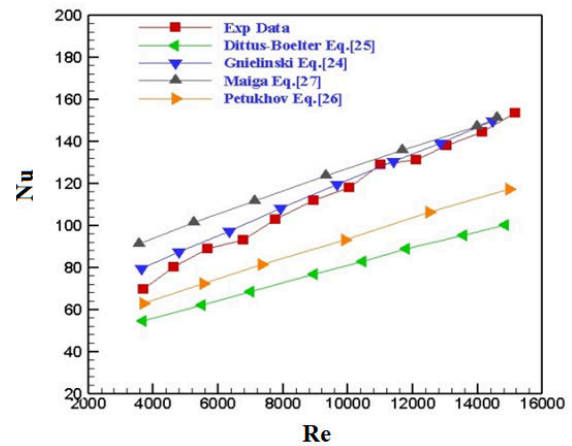
شکل ۷- مقایسه‌ی عدد ناسلت نانوسیال با غلظت حجمی ۰/۵ درصد با گنیلینسکی



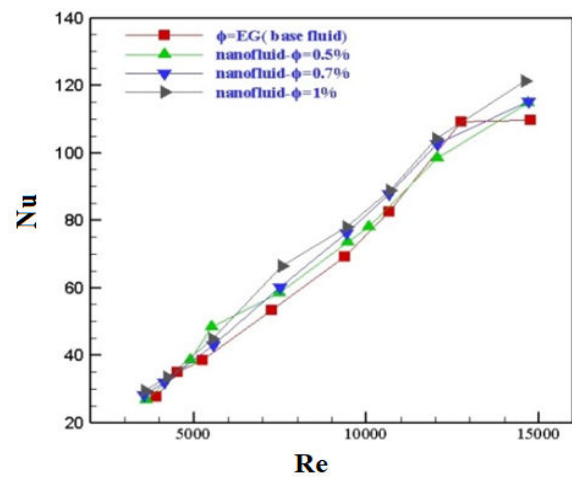
شکل ۸- مقایسه‌ی عدد ناسلت نانوسیال با غلظت حجمی ۰/۷ درصد با گنیلینسکی



شکل ۹- مقایسه‌ی عدد ناسلت نانوسیال با غلظت حجمی ۱ درصد با گنیلینسکی



شکل ۵- مقایسه ناسلت تجربی سیال پایه با مدل‌های دیتوس-بولتر، گنیلینسکی، مایگا، پتخوف

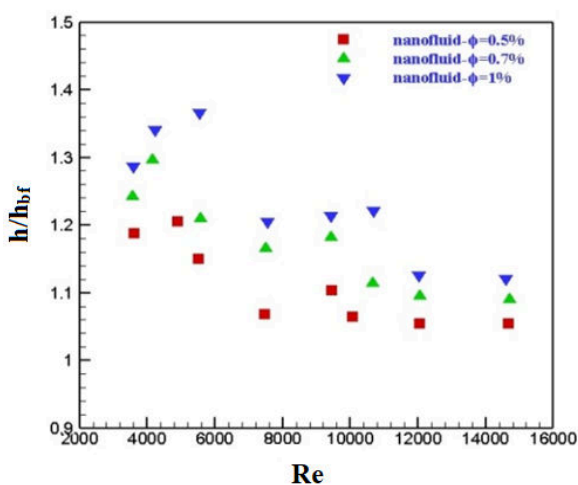


شکل ۶- عدد ناسلت تجربی نانوسیال در رینولدزهای مختلف

همانطور که از شکل ۶ مشخص است افزایش زیاد در مقدار h در ناحیه‌ی ورودی می‌تواند نتیجه‌ی کاهش ضخامت لایه-ی مرزی حرارتی باشد. مکانیزم دقیق کاهش لایه‌ی حرارتی نامشخص است. یکی از دلایل این مسئله ممکن است مهاجرت ذرات در سیال پایه و در نتیجه عملکرد برشی، گرادیان ویسکوزیته و حرکت براونی در سطح مقطع لوله باشد. مهاجرت ذره در نتیجه این آثار می‌تواند موجب غیر-یکنواختی قابل ملاحظه‌ی غلظت ذره مخصوصاً در مورد ذرات نسبتاً بزرگ شود. غلظت غیر یکنواخت ذره تأثیر به‌سزایی روی ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته موضعی دارد. در مقایسه با فرض هدایت حرارتی ثابت، توزیع غیر یکنواخت ضریب هدایت حرارتی در نتیجه‌ی مهاجرت ذره، موجب افزایش عدد ناسلت می‌گردد.

ابعاد و جزء حجمی نانوذرات معلق و سرعت جریان در نظر گرفت. جریان نانوسیال تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند جاذبه، حرکت براونی، نیروی اصطکاک بین سیال و ذره، پدیده ی نفوذ براونی و پراکندگی قرار می‌گیرد. حرکت اتفاقی نانوذرات معلق نرخ تبادل انرژی در سیال را افزایش می‌دهد. پراکندگی موجب تخت شدن توزیع دما گشته و گرادیان دمای بین دیواره و سیال را افزایش داده و سبب افزایش نرخ انتقال حرارت می‌گردد.

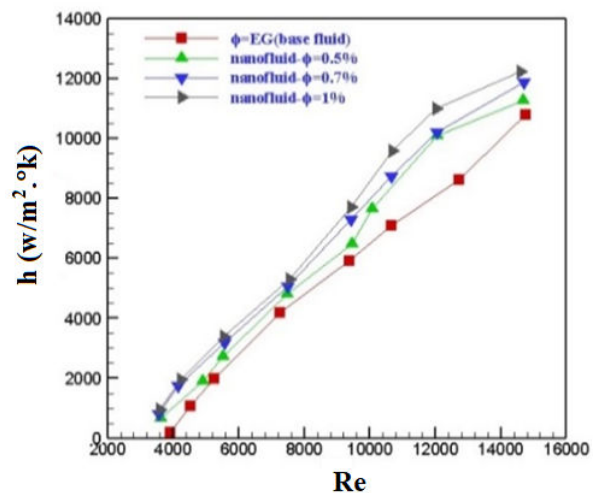
شکل ۱۱ نسبت ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال به سیال پایه در رینولدزهای یکسان و غلظت‌های حجمی یکسان بیشتر از واحد می‌باشد. در رینولدز ۱۰۷۰۰ افزایش عدد ناسلت جهت غلظت‌های حجمی ۰/۷ و ۰/۵ درصد به ترتیب ۱۴/۷ درصد و ۶/۳ درصد می‌باشد. این مقادیر جهت رینولدز ۵۳۰۰، ۱۲/۲ درصد و ۱۸/۶ درصد می‌باشند. در این آزمایش ماکزیمم انتقال حرارت در حدود ۱/۳۶ جهت غلظت حجمی ۱ درصد در رینولدز ۵۵۰۰ می‌باشد.



شکل ۱۱- نسبت ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به عدد رینولدز

در شکل ۱۲ تغییرات ناسلت نسبت به ناسلت پایه بر حسب عدد رینولدز در درصد‌های حجمی متفاوت باهم مقایسه شده است. از آنجا که تمامی نسبت‌های بدست آمده مقادیر بالاتر از یک را نشان می‌دهند می‌توان برتری استفاده از نانوسیال، در افزایش انتقال حرارت نسبت به سیال پایه را دریافت کرد که ماکزیمم نسبت ناسلت در حدود ۱/۳۲ برای غلظت حجمی ۱ درصد در رینولدز ۵۵۰۰ است.

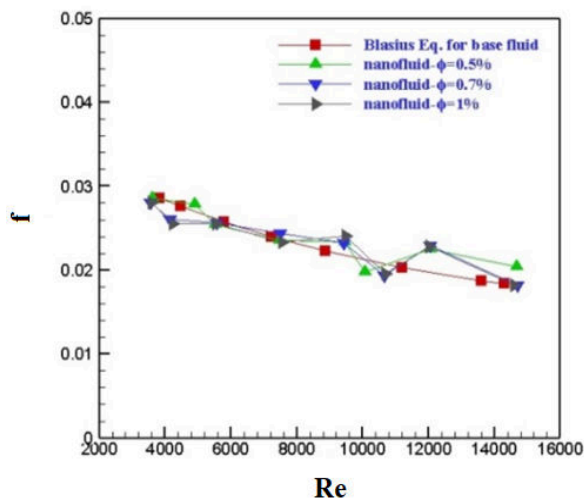
شکل ۷ تطابق عدد ناسلت با نمودار گلینیسکی که جهت غلظت حجمی ۰/۵ درصد در حدود ۱۱ درصد، شکل ۸ غلظت حجمی ۰/۷ درصد در حدود ۱۸ درصد و شکل ۹ جهت غلظت حجمی ۱ درصد در حدود ۲۳ درصد می‌باشد. که مشهود است که گلینیسکی جهت غلظت‌های حجمی پائین تطابق بهتری نسبت به غلظت‌های بالای حجمی دارد. شکل ۱۰ به خوبی نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی جهت تمام غلظت‌های حجمی بیشتر از سیال پایه می‌باشد.



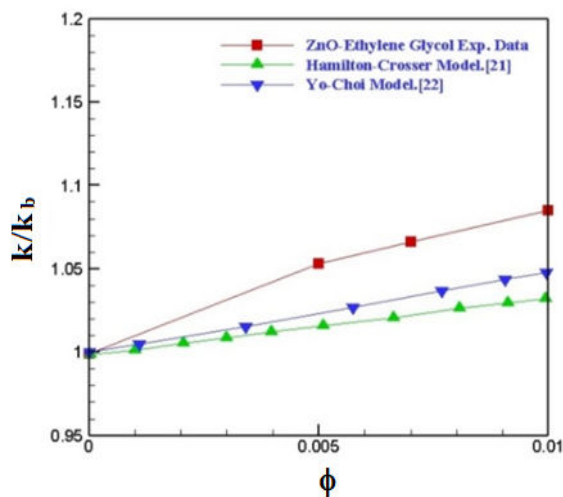
شکل ۱۰- ضریب انتقال حرارت تجربی نانوسیال در رینولدزهای مختلف

وجود نانوذره بر توسعه‌ی لایه‌ی مرزی در لوله و در نتیجه‌ی انتقال حرارت مؤثر است. در مورد مایعات خالص (سیال پایه) لایه‌ی مرزی به طور یکنواخت توسعه یافته و جریان پس از $x \sim (0.05Re)D$ از لحاظ هیدرودینامیکی و پس از $x \sim (0.05RePr)D$ از لحاظ حرارتی کاملاً توسعه یافته می‌شود. در حالی‌که طول توسعه یافتگی حرارتی برای نانوسیالات افزایش یافته و این افزایش با زیادتر شدن غلظت ذرات، بیشتر نیز می‌گردد. با افزودن نانوذرات به سیال پایه مقدار انتقال حرارت افزایش می‌یابد. دلایل این افزایش را در نانوسیالات به تشدید اغتشاشات چرخابه‌ها، کوچک شدن ضخامت لایه‌ی مرزی، پراکندگی معکوس نانوذرات معلق، افزایش قابل ملاحظه ضریب هدایت حرارتی و نیز ظرفیت حرارتی سیال ربط می‌دهند. به همین دلیل ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیالات را می‌توان تابعی از خواص،

افزایش هدایت حرارتی در غلظت‌های کم بیشتر از هدایت حرارتی در غلظت‌های حجمی بالاتر است دلیل آن ممکن است درصد ویسکوزیته‌ی نانوسیال در غلظت‌های حجمی بالا باشد و به خوبی مشهود است که مدل همیلتون-کراسر اندازه‌ی اثر سایز ذره، دما روی هدایت حرارتی را در نظر نمی‌گیرند در صورتی که هدایت حرارتی به مؤلفه‌هایی از قبیل سایز ذره، سیال پایه، غلظت حجمی، شکل نانوذره و دما بستگی دارد.

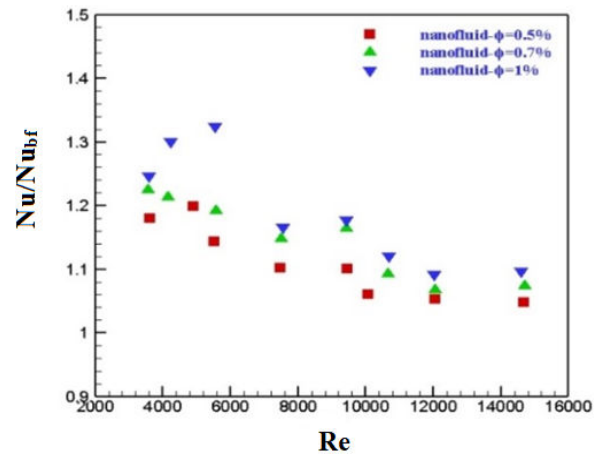


شکل ۱۲- مقایسه‌ی ضریب اصطکاک نانوسیال با معادله‌ی بلازیوس

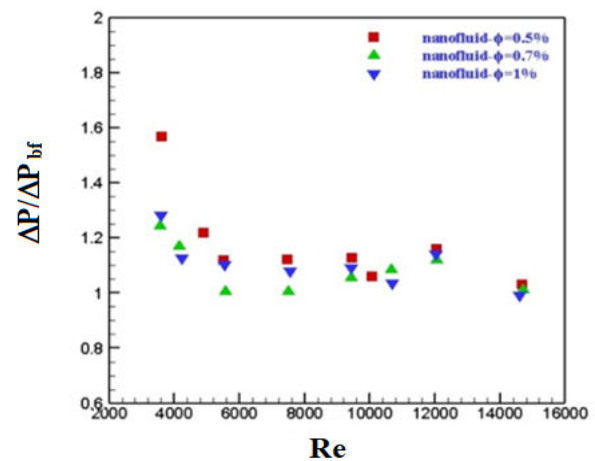


شکل ۱۳- افزایش نسبت هدایت حرارتی به درصد غلظت حجمی نانوسیال

شکل ۱۴ افزایش ویسکوزیته‌ی نسبی بر حسب درصد حجمی را نشان می‌دهد و با مدل‌های بچلر و وانگ اعتبار-سنجی شده است.



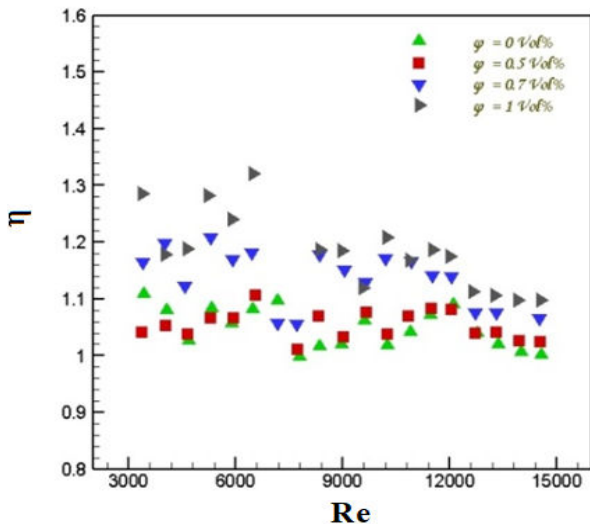
شکل ۱۴- نسبت مقایسه‌ی عدد ناسلت نانوسیال به ناسلت سیال پایه
شکل ۱۵- نسبت افت فشار به سیال پایه را نشان می‌دهد که در حدود ۱۶ درصد جهت غلظت حجمی ۱ درصد است.



شکل ۱۵- مقایسه‌ی اختلاف فشار نانوسیال به اختلاف فشار سیال پایه همانطورکه در شکل ۱۴ مشخص است افزایش عدد رینولدز سبب کاهش ضریب اصطکاک در تمامی حالات خواهد شد که دلیل آن این است که با افزایش عدد رینولدز، دبی جریان و در پی آن سرعت متوسط جریان افزایش می‌یابد و با توجه به اینکه ضریب اصطکاک با مجذور سرعت جریان رابطه‌ی عکس دارد، لذا کاهش ضریب اصطکاک با افزایش عدد رینولدز بدیهی است.

شکل ۱۶ افزایش نسبت هدایت حرارتی بر حسب درصد غلظت حجمی را نشان می‌دهد و با استفاده از مدل همیلتون-کراسر و چوی (رابطه‌ی ۱۷) اعتبارسنجی شده است و روشن است که نسبت هدایت حرارتی برای نانوسیال از یک بیشتر و با افزایش درصد غلظت حجمی افزایش پیدا می‌کند و نسبت

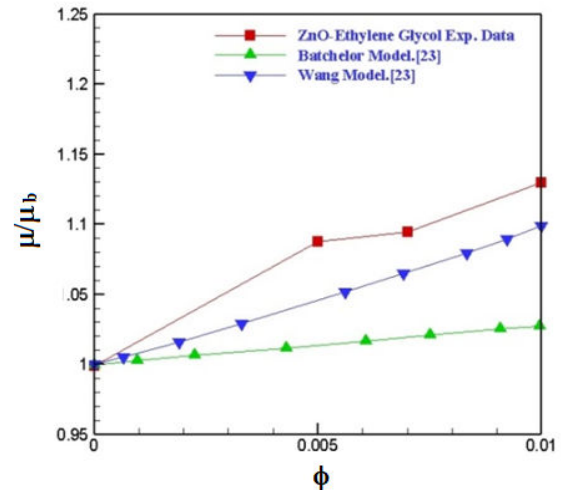
است. شکل ۱۸ ماکزیمم بازدهی عملکرد مربوط به غلظت حجمی ۱ درصد در حدود ۱/۳۲ و همچنین جهت غلظت ۰/۵ درصد بین ۱/۰۳ تا ۱/۲۰ می‌باشد. در نتیجه ماکزیمم ناسلت در غلظت حجمی ۰/۷ درصد در رینولدز ۶۳۰۰ در حدود ۱۹/۸ درصد می‌باشد و همچنین ماکزیمم افزایش انتقال حرارت در غلظت حجمی ۱ درصد در حدود ۳۳/۲ درصد در رینولدز ۷۲۰۰ است.



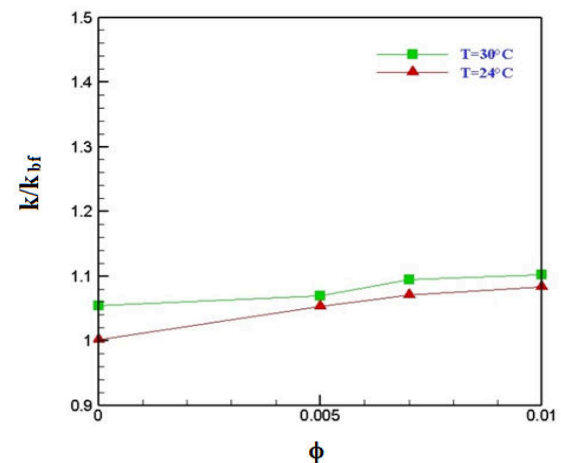
شکل ۱۸- مقایسه‌ی فاکتور عملکرد حرارتی با رینولدزهای مختلف جهت غلظت‌های حجمی مختلف

۵. نتیجه‌گیری

در مقاله‌ی حاضر، تأثیر تماس بین نانوذرات و سیال پایه به عنوان یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در انتقال حرارت نانوسیالات بررسی شده است. بدین صورت که با افزودن سه غلظت متفاوت نانواکسیدروی به سیال پایه اتیلن گلیکول $0.5\% \leq \phi \leq 1\%$ ، کاربرد نانوسیالات به عنوان سیال خنک کننده در مبدل حرارتی دو لوله‌ی تحت شرایط جریان مغشوش بحث و بررسی گردید. در ابتدا میزان کاهش سطح انتقال حرارت و دبی جرمی سیال خنک کننده در مبدل حرارتی دولوله‌ی با افزودن غلظت‌های حجمی متفاوت به سیال پایه اتیلن گلیکول بررسی شد. سپس ضریب اصطکاک و افت فشار نانوسیال در مبدل حرارتی دولوله‌ی محاسبه گردید. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ماکزیمم بازدهی عملکرد مربوط به غلظت حجمی ۱ درصد بوده است و همچنین ماکزیمم افزایش انتقال حرارت در غلظت حجمی



شکل ۱۶- مقایسه‌ی نسبت ویسکوزیته نسبی با مدل بچلر و وانگ به غلظت حجمی نانوسیال



شکل ۱۷- نسبت هدایت حرارتی نانوسیال به درصد غلظت حجمی برای دماهای مختلف

شکل ۱۷ افزایش هدایت حرارتی با بالا رفتن دامنه‌ی دمایی را نشان می‌دهد، در دماهای بالا در سیالات، از هم گسیختگی نانوذرات و پراکندگی آنها در سیال پایه به سادگی رخ می‌دهد و حرکات کاتوره‌ای همراه با افزایش دما و انتقال انرژی درون سیال خیلی سریع راه می‌افتد.

۴. ۱. محاسبه‌ی معیار ارزیابی عملکرد

برای بررسی همزمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار می‌توان از عاملی به نام معیار ارزیابی عملکرد استفاده کرد که تعریف آن مشابه رابطه نشان داده شده است. هر چه این نسبت بالاتر از یک باشد بهتر است و در مواردی که از یک بزرگتر است از نظر اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشد. در شکل ۱۸ کسرهای حجمی متفاوت با یکدیگر مقایسه شده

- [14] GJ. Lee, CK. Kim, MK. Lee, CK. Rhee, S. Kim, C Kim. "Thermal conductivity enhancement of ZnO nanofluid using a one-step physical method." *Thermochimica acta*, **542** (2012) 24-27.
- [15] R. Saleh, N. Putra, SP. Prakoso, WN. Septiadi, "Experimental investigation of thermal conductivity and heat pipe thermal performance of ZnO nanofluids." *International Journal of Thermal Sciences*, **63** (2013) 125-132.
- [16] W, Yu, H .Xie, L. Chen, Y. Li. "Investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluid." *Thermochimica Acta*, **1-2** (2009) 92-96.
- [17] BG. Lipták. *Instrument Engineers' Handbook, Volume One: Process Measurement and Analysis*. Vol. 1. CRC press, 2003.
- [18] ASTM Committee E-20 on Temperature Measurement. *Manual on the use of thermocouples in temperature measurement*. Vol. 470. ASTM International, 1981.
- [19] SMS. Murshed, KC. Leong, C. Yang. "Enhanced thermal conductivity of TiO₂-water based nanofluids." *International Journal of thermal sciences*, **4** (2005) 367-373.
- [20] KS. Suganthi, KS. Rajan. "Temperature induced changes in ZnO-water nanofluid: zeta potential, size distribution and viscosity profiles." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **25-26** (2012) 7969-7980.
- [21] RL. Hamilton, OK. Crosser. "Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems." *Industrial & Engineering chemistry fundamentals*, **3** (1962) 187-191.
- [22] W. Yu, SUS. Choi. "The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model." *Journal of nanoparticle research*, **5** (2003) 167-171.
- [23] X. Wang, X. Xu, SUS. Choi. "Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture." *Journal of thermophysics and heat transfer*, **4** (1999): 474-480.
- [24] V. Gnielinski. "New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow." *International chemical engineering*, **2** (1976) 359-367.
- [25] TL. Bergman *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons, 2011.
- [26] BS. Petukhov. "Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties." In *Advances in heat transfer*, **6** (1970) 503-564..
- [27] SEB. Maiga, CT. Nguyen, N. Galanis, G. Roy, "Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube." *Superlattices and Microstructures*, **3-6** (2004) 543-557.
- ۱ درصد است. همچنین با افزایش دما شیب منحنی مربوط به هدایت حرارتی نیز افزایش یافته و این بدان معنا است که در دماهای بالاتر اثر غلظت نانوذرات بر ضریب هدایت حرارتی بیشتر است.
- ### سپاسگزاری
- نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز به واسطه حمایت از این کار تحقیقاتی، اعلام می نمایند.
- ### مرجع‌ها
- [1] SK .Das, SU .Choi, W .Yu, T .Pradeep, *Nanofluids: science and technology*. John Wiley & Sons, 2007.
- [2] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae. "Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles. Dispersion of Al₂O₃, SiO₂ and TiO₂ ultra-fine particles." (1993).
- [3] JA. Eastman, SUS. Choi, S. Li, W. Yu, L. J. Thompson, "Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles." *Applied physics letters*, **6** (2001) 718-720.
- [4] SK. Das, N. Putra, P. Thiesen, W. Roetzel. "Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids." *J. Heat Transfer*, **4** (2003) 567-574.
- [5] BC. Pak, YI. Cho, "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles." *Experimental Heat Transfer an International Journal*, **2** (1998) 151-170.
- [6] Y .Xuan, Q. Li, "Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids." *J. Heat transfer*, **1** (2003) 151-155.
- [7] D. Wen, Y. Ding. "Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions." *International journal of heat and mass transfer*, **24** (2004) 5181-5188.
- [8] SZ .Heris, SG. Etemad, MN. Esfahany, "Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer." *International communications in heat and mass transfer*, **4** (2006) 529-535.
- [9] Y. Yang, ZG. Zhang, EA. Grulke, WB. Anderson, G. Wu, "Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow." *International journal of heat and mass transfer*, **6** (2005) 1107-1116.
- [10] S. Lee, SUS. Choi, S. Li, JA .Eastman. "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles." (1999).
- [11] Eastman, J. A., U. S. Choi, S. Li, L. J. Thompson, and S. Lee. "Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids." *Argonne National Lab., IL (United States)* (1996).
- [12] J. Jeong, C. Li, Y. Kwon, J. Lee, SH. Kim, R. Yun, "Particle shape effect on the viscosity and thermal conductivity of ZnO nanofluids." *International journal of refrigeration*, **8** (2013) 2233-2241.
- [13] M .Kole, TK. Dey. "Effect of prolonged ultrasonication on the thermal conductivity of ZnO-ethylene glycol nanofluids." *Thermochimica Acta*, **535** (2012) 58-65.