

مطالعه آزمایشگاهی انتقال حرارت و کاهش درگ در لوله افقی توسط پلی نانوسیال آب/پلی اکریل آمید/مس

مرتضی پوشنده، سید ابوطالب موسوی پارسا*

گروه مهندسی شیمی، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران.

شیوا جوهری

گروه علوم پایه، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران.

مهدی فرامرزی

گروه مهندسی شیمی، واحد گچساران، دانشگاه آزاد اسلامی، گچساران، ایران.

چکیده: افزودن نانوذرات به سیالات پایه موجب بهبود عملکرد حرارتی سیال پایه خواهد شد. از طرفی، افزودن مقادیر اندک پلیمر با وزن مولکولی بالا به جریان توربولنت سیال در خطوط لوله می‌تواند موجب کاهش افت فشار اصطکاکی و نیروی درگ گردد. در این پژوهش مطالعه آزمایشگاهی انتقال حرارت و کاهش درگ در یک لوله افقی گالوانیزه حاوی پلی نانوسیال آب/نانومس و پلی اکریل آمید انجام شده است. از نانوذرات مس با قطر تقریبی ۴۰ نانومتر به عنوان عامل افزایش انتقال حرارت و پلی اکریل آمید به عنوان عامل کاهش درگ استفاده شده است. غلظت‌های مورد مطالعه در این پژوهش ۵-۱۰ ppm پلیمر PAM و ۱-۱۰ درصد وزنی نانومس می‌باشد. از آنالیز FTIR جهت بررسی احتمالی تشکیل پیوندهای شیمیایی جدید بین مولکول‌های پلیمر و نانوذرات استفاده شده است. ابتدا خواص ترموفیزیکی و رئولوژیکی پلی نانوسیالات مورد نظر اندازه‌گیری شده، سپس پدیده کاهش درگ و انتقال حرارت برای آب، محلول پلیمری پلی اکریل آمید/آب، نانوسیال آب/نانومس و پلی نانوسیال آب/پلی اکریل آمید/نانومس بررسی شده است. دمای میانگین توده سیال ورودی در تمام آزمایش‌ها حدود ۳۰ درجه سلسیوس بوده و شار حرارتی ثابت به میزان ۹۰۰ وات به دیواره خارجی لوله اعمال شده است. نتایج بدست آمده نشان داد پلی نانوسیالات مورد بررسی در تمامی غلظت‌های مورد مطالعه از پلیمر و نانوسیالات دارای رفتار نیوتنی بوده‌اند. ویسکوزیته، چگالی و هدایت گرمایی با افزایش غلظت نانوذرات مس افزایش یافت. افزایش عدد رینولدز موجب افزایش درصد بهبود سرعت انتقال حرارت و کاهش درصد درگ شد. بیشترین درصد کاهش درگ در پلی نانوسیالات حاوی ۵۰ ppm پلی اکریل آمید و ۱ درصد وزنی نانومس در عدد رینولدز ۲۹۰۶۴ با ۵۹/۵٪ کاهش درگ و ۲۷/۲٪ بهبود انتقال حرارت مشاهده گردید. حداکثر بهبود سرعت انتقال حرارت در پلی نانوسیال حاوی ۱۰ ppm پلیمر و ۱ درصد وزنی نانومس با ۲۷/۷٪ بهبود انتقال حرارت و ۳۸/۲٪ کاهش درگ اتفاق افتاد.

واژه‌های کلیدی: مطالعه آزمایشگاهی، انتقال حرارت، کاهش درگ، پلی نانوسیال آب/PAM/نانومس، لوله افقی.

KEYWORDS: Experimental study, Heat transfer, Drag reduction, Water/PAM/Nanocopper Polynanofluid, Horizontal pipe.

مقدمه

امروزه یکی از مباحث و چالش‌های اساسی در جابجایی سیالات و نیز کنترل هزینه‌های عملیاتی در صنایع مختلف، پدیده کاهش درگ و بهبود سرعت انتقال حرارت به منظور صرفه جویی در مصرف انرژی می‌باشد. این پدیده در صنایع بزرگ شیمیایی، جابجایی سیالات و نیز فرآیندهای متعدد در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی مشاهده می‌گردد. از ابتدای کشف پدیده کاهش درگ در سال ۱۹۴۸ توسط تامر [۱]، تلاش‌های زیادی برای توجیه مکانیزم‌های واقعی مرتبط با آن و همچنین یافتن راهکارهای مناسب برای کاهش درگ صورت گرفته است. تامر مشاهده کرد که می‌توان با افزودن مقدار بسیار کمی از پلیمر به سیال جاری، افت فشار در جریان تک فازی در درون لوله‌ها را در جریان توربولنت به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. وی گزارش کرد که افزودن مقدار کمی از پلیمرهای با وزن مولکولی بالا به جریان آشفته می‌تواند به شدت اصطکاک دیواره و افت فشار در خطوط اصلی جریان مایعات را کاهش دهد. مزیت اصلی اقتصادی کاهش درگ، صرفه جویی در مصرف انرژی به علت کاهش آشفستگی و افزودن توان پمپاژ می‌باشد. بنابراین، چنانچه کاهنده‌های پلیمری درگ به یک سیال افزوده شوند، می‌توان همان سرعت جریان را با صرف انرژی و هزینه کمتری حفظ نمود. کاهش درگ توسط پلیمرها از طریق مکانیسم‌های مختلفی حاصل می‌شود. یک مکانیسم، تشکیل ساختارهای شبکه پراکنده در آب است که مستقیماً درگ را کاهش می‌دهد [۲]. مکانیسم دیگر، پراکندگی پلیمرها در جریان خارجی است که منجر به کاهش درگ می‌شود [۳]. افزودنی‌های پلیمری نیز می‌توانند بر الگوی جریان تأثیر بگذارند و باعث کاهش بیشتر نیروی درگ گردند [۴]. علاوه بر این، پلیمرها می‌توانند امواج تلاطم را مرطوب کرده و رژیم جریان را تغییر دهند و در نتیجه باعث کاهش درگ شوند [۵]. استفاده از کاهنده‌های درگ پلیمری امولسیون‌ی آب در آب نیز برای افزایش ویسکوزیته و ایجاد مقاومت برشی، به کاهش درگ کمک می‌کند [۶]. به طور کلی، حضور پلیمرها ویژگی‌های جریان را تغییر می‌دهد و منجر به کاهش درگ در مقایسه با آب خالص می‌شود. تاکنون پدیده‌های کاهش درگ و بهبود انتقال حرارت در خطوط لوله، با توجه به کاربردهای گسترده در صنایع، مورد توجه دانشمندان بسیاری قرار گرفته است [۷-۱۷]. کاهش درگ به وسیله‌ی پلیمر از ابتدای مطرح شدن این چالش مورد توجه بوده است، اما افزودن مواد پلیمری به سیالات پایه مشکلاتی از قبیل حل شدن پلیمر در فاز مایع و نیز آلودگی، تغییر خواص سیالات پایه و نیز عدم قابلیت

جداسازی و سازگاری با طبیعت را در پی داشته است. لذا، از سال ۲۰۱۰ به بعد کاهش درگ توسط نانوسیالات نیز مورد توجه تعدادی از محققان واقع شده است [۱۵، ۱۸-۲۶].

اندارتانو و همکاران [۲۷] اثر دما و قطر لوله را بر خواص هیدرودینامیکی کاهش درگ در لوله‌ها مورد بررسی قرار دادند. آنها آزمایشات خود را در دماهای ۱۲، ۲۵، ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس و در لوله‌هایی با قطرهای مختلف بر روی محلول اولیلب هیدروکسی اتیل متیل آمونیوم کلراید^۲ (۹۰۰ پی پی ام) به عنوان سورفکتانت کاتیونی و سدیم سالیسیلات (۵۴۰ پی پی ام) به عنوان سورفکتانت غیر یونی انجام دادند. در این تحقیق اثربخشی کاهش درگ توسط محلول سورفکتانت در لوله‌ای به قطر ۲۵ میلی‌متر و دامنه دمای ۷۵-۶ درجه‌ی سلسیوس مورد بررسی قرار گرفت. آنها در تحقیقات خود دریافتند که محلول سورفکتانت دارای تغییرات کاهش درگ تا دمای ۷۰ درجه‌ی سلسیوس بوده و درجه حرارت تأثیر قابل توجهی بر تغییر طول ورودی هیدرودینامیکی جریان‌های کاهنده درگ حاوی سورفکتانت دارد. همچنین، با افزایش دما میزان کاهش درگ افزایش یافت، که این امر نشان دهنده‌ی تأثیر مستقیم افزایش دما بر کاهش درگ می‌باشد.

ژی-فی و همکاران [۲۸] ویسکوزیته‌ی نانوسیالات حاوی نانوسیلیس با اندازه‌ها و مقادیر pH مختلف را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داد که اندازه‌ی نانوذرات از اهمیت خاصی برای ویسکوزیته‌ی یک نانوسیال برخوردار است. نانو ذرات کوچکتر، ویسکوزیته‌ی بزرگتر و وابستگی بیشتری به کسر حجمی نانوسیال دارد. علاوه بر این، هنگامی که قطر نانوذرات کوچکتر از ۲۰ نانومتر است، ویسکوزیته به شدت به pH نانوسیال مربوط بوده و با تغییر مقادیر pH از ۵ تا ۷ دارای نوسانات محسوسی می‌باشد.

باری و همکاران [۲۹] به بررسی عوامل کاهش درگ به وسیله‌ی پودر آلومینا و سورفکتانت زویترایونیک^۵ در خطوط لوله در یک محیط آبی پرداختند. در این مطالعه از سورفکتانت ۳-نرمال آمونیاک پروپان سولفات استفاده شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش غلظت محلول و عدد رینولدز، درصد کاهش درگ افزایش یافته و ماکزیم مقدار آن حدود ۵۰ درصد بازای غلظت ۵۰۰ ppm بدست آمد. *درزازگا و همکاران* [۲۳] تأثیر افزودن سورفکتانت‌های غیر یونی بر کاهش درگ در نانوسیالات پایه‌ی آبی بر روی یک لوله با قطر ۴ میلی‌متر را بررسی نموده و به تعیین میزان اثرگذاری سورفکتانت‌های غیر یونی بر کاهش درگ در نانوسیال آب/اکسید فلزی پرداختند.

(۱) Indartono et al.

(۳) Jia-Fie et al.

(۵) zwitterionic surfactant

(۲) Olelib Hydroxyethyl Methyl Ammonium Chloride

(۴) Bari et al.

(۶) Drzazga et al.

افزایش خطی آهسته ای را با نرخ برش کمتر از سرعت برش بحرانی نشان داد، در حالی که طبق رفتار سیال قدرت ضخیم شدن برشی بالاتر از نرخ برش بحرانی به نظر می‌رسید. سرعت برش بحرانی با افزایش غلظت نانوذرات افزایش یافت، که نشان داد برای جلوگیری از افزایش قابل توجه ویسکوزیته نانوسیال، باید سرعت تزریق کنترل شود. منحنی رئولوژیکی افزایش نرخ برش تقریباً با منحنی کاهش سرعت برش منطبق بود، که نشان دهنده ضخیم‌شدن برشی نانوسیال‌های مورد مطالعه در این کار گذرا و برگشت‌پذیر بود.

آنچه از نتایج کلی مطالعات حاصل می‌گردد، این است که استفاده از کاهنده‌های درگ پلیمری به تنهایی می‌تواند منجر به بهبود افت فشار و در نتیجه کاهش نیروی درگ در خطوط لوله و تجهیزات فرآیندی گردد، ولیکن این ترکیبات نمی‌توانند نقش مؤثری در بهبود سرعت انتقال حرارت در دستگاه‌ها و خطوط انتقال داشته باشند. از طرفی، نانوسیالات فلزی نیز صرفاً توانسته اند نقش برجسته‌ای در بهبود انتقال حرارت در تجهیزات فرآیندی و مبدلهای حرارتی ایفا نمایند، ولیکن نتوانسته‌اند افت فشار و نیروی درگ را بطور همزمان به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش دهند. بنابراین استفاده از پلی نانوسیالات (PNFs)^۹ مناسب، به عنوان گروه جدیدی از سیالات که بتوانند بطور همزمان باعث کاهش قابل ملاحظه نیروی درگ و افزایش چشمگیر سرعت انتقال حرارت گردند، منجر به صرفه جویی در هزینه‌ها و مصرف انرژی و نیز بهبود کارایی دستگاه‌های انتقال حرارت و خطوط انتقال خواهد شد.

پلی نانوسیالات با پراکندگی نانوذرات در پلیمرهای با وزن مولکولی بالا در مایعاتی همانند آب، نفت خام و .. به منظور بهبود سرعت انتقال حرارت و عملکرد جریان مایعات تهیه می‌شوند [۳۳]. انتقال حرارت و افزایش دما را می‌توان با انحلال پلیمرها به تنهایی، مانند پلی آکریل آمیدها^{۱۰} (PAM)، در مایعات در برخی کاربردها کنترل کرد. PAM می‌تواند انتقال حرارت را تا ۲۵ درصد در غلظت ۱۰۰ ppm کاهش دهد [۳۴، ۳۵]. نانوذرات مختلف مانند فلزات، اکسیدهای فلزی و نانولوله‌های کربنی در صورت افزوده شدن به سیالات پایه و پراکندگی یکنواخت در رژیم‌های جریان آشفته، می‌توانند ضریب انتقال حرارت را به میزان قابل توجهی افزایش دهند. لیکن برخی از آنها افت فشار را نیز افزایش می‌دهند. بنابراین، انتخاب نانوذرات و پلیمر مناسب که دارای هم افزایی بالایی جهت کاهش درگ و افزایش سرعت انتقال حرارت، بطور همزمان باشند،

در این کار دو نوع سورفکتانت غیر یونی بنام‌های روکاست^۱ و روکانول^۲ k7 و نانوسیال اکسید مس با پایه‌ی آب مورد آزمایش قرار گرفته و بازی مقادیر عدد رینولدز بین ۸۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰، ضریب اصطکاک تعیین گردید. نتایج حاصله نشان داد که افزودن سورفکتانت‌های غیر یونی باعث کاهش ضریب اصطکاک در آب و نانوسیال پایه آبی شده و حضور نانوذرات اکسید مس در سیستم تأثیر چندانی بر میزان کاهش درگ نداشت.

گیرکنریکی و همکاران^۳ [۳۰] کاهش درگ در جریانی از نانوسیال آب/CuO را مورد مطالعه قرار دادند. در این بررسی آزمایشگاهی از سیالی با پایه‌ی آب و سورفکتانت‌های کاتیونی CTAC^۴ و NaSal^۵ استفاده کرده و این آزمایش را برای غلظت‌های مختلف نانوسیال در لوله‌های با قطرهای مختلف تکرار نمودند، که حداکثر مقدار کاهش درگ برای لوله با قطر ۴ میلی‌متر، به میزان ۷۰-۵۵ درصد و برای لوله با قطر ۸ میلی‌متر، ۴۰-۵ درصد و برای لوله با قطر ۱۲ میلی‌متر، ۲۰ درصد گزارش شد.

وانگ مینگ و همکاران^۶ [۳۱] در یک مطالعه تجربی، اثرات مواد افزودنی نانو پودر نامحلول را برای افزایش جریان مایع در میکروکانال‌ها مورد بررسی قرار دادند. آنها آزمایشات خود را در غلظت‌های مختلف از ۱۰۰ تا ۵۰۰ پی‌پی‌ام برای نانوسیلیس انجام دادند، که نتایج حاصله افزایش میزان کاهش درگ بازی افزایش غلظت نانوسیال در جریان درون لوله را نشان داد.

یانوار و همکاران^۷ [۳۲] اثر جریان نانوسیال را در یک لوله‌ی ماریچ، بر روی کاهش درگ در جریان متلاطم مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، ابتدا نانوسیالاتی با غلظت‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ پی‌پی‌ام را با استفاده از پراکندگی نانوذرات اکسید آلومینیوم در آب خالص تهیه نموده و سپس میزان کاهش درگ را در غلظت‌های مختلف برای رینولدزهای ۴۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰، برای دو نوع لوله‌ی ماریچ و حلقوی شکل در سه زمان مختلف بدست آوردند. نتایج بدست آمده نشان دادند که بیشترین میزان کاهش درگ مربوط به لوله‌ی ماریچ و حدود ۳۸ درصد می‌باشد.

چان یان گو و همکاران^۸ [۲۱] خواص رئولوژیکی و مکانیسم کاهش درگ توسط تعدادی از نانوسیالات حاوی نانوسیلیس به عنوان کاهنده درگ را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داد که تمامی نانوسیال‌های مورد بررسی دارای ویژگی‌های پیچیده و سرعت برش بحرانی بودند. ویسکوزیته نانوسیالات مورد مطالعه

(۱) Rokacet O7

(۳) Gierczycki et al.

(۵) Sodium salycilate

(۷) Yanuar et al.

(۹) Polyanofluids

(۲) Rokanol k7

(۴) Cetyltrimethylammonium chloride

(۶) Ming et al.

(۸) Gu et al.

(۱۰) Polyacrylamide

پراکنده‌ای را در آب تشکیل می‌دهد که به طور مستقیم به کاهش درگ کمک می‌کند [۴۱]. به طور کلی، پلی‌اکریل آمید به عنوان یک پلیمر کاهنده موثر درگ در خطوط لوله عمل کرده و بازده انرژی و توان عملیاتی را بهبود می‌بخشد. همچنین، در این پژوهش، از نانوذرات مس به علت داشتن ضریب هدایت حرارتی بالا و نیز خاصیت تریبولوژیکی مناسب، به منظور بهبود سرعت انتقال حرارت در دستگاه‌های فرآیندی و خطوط لوله استفاده شده است. افزودن نانوذرات مس به سیالاتی مانند آب و محلول - های پلیمری، باعث افزایش ضریب انتقال حرارت همرفتی و بهبود هدایت حرارتی می‌شود [۴۲]. راندمان انتقال حرارت توسط نانوسیالات به دلیل تغییر در آرایش اتمی نانوسیال‌ها بالاتر است، این پدیده باعث می‌شود ریزساختاری مشابه ساختار جامد از خود نشان دهند [۴۳]. بعلاوه، استفاده از نانوذرات مس در لوله‌ها به طور قابل توجهی انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد و بکارگیری درصد‌های بالاتر نانوذرات باعث بهبود بیشتر سرعت انتقال حرارت می‌شود [۴۴]. بنابراین، نانوسیالات حاوی نانومس، از نظر انتقال حرارت در مقایسه با آب خالص، دارای عملکرد بهتری می‌باشند، بخصوص در کسرهای حجمی بالاتر و اندازه‌های کوچکتر از نانوذرات. به طور کلی، مکانیسم کاهش درگ و بهبود انتقال حرارت در خطوط لوله توسط نانوذرات مس شامل افزایش ضریب انتقال حرارت همرفتی و هدایت حرارتی از طریق افزودن این نانوذرات به سیالات پایه است. بنابراین، در این پژوهش اثر متغیرهایی مانند غلظت پلی‌اکریل آمید، غلظت نانوذرات مس و تأثیر عدد رینولدز بر درصد کاهش درگ (DR%)، میزان افزایش عدد ناسلت و سرعت انتقال حرارت، و نیز درصد افزایش عدد ناسلت (E_{Nu} %) توسط پلی‌نانوسیالات آب/PAM/نانومس بررسی شده است.

بخش تجربی

مواد

آب مقطر، نانوذرات مس و پلی‌اکریل آمید^۴ (PAM) موادی هستند که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نانوذرات مس از شرکت ایوانیک دگوسای^۵ آلمان با خلوص ۹۹/۹ درصد خریداری شد. مشخصات این نانوذرات در جدول ۱ و تصویر میکروسکوپی آن در شکل ۱ ارائه شده است.

در این پژوهش، PAM مورد استفاده توسط شرکت مرک تهیه شده است. مشخصات فیزیکی این پلیمر در جدول ۲ آمده است.

می‌تواند خواص انتقال حرارت و جریان مایعات پایه در خطوط لوله را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. بنابراین، پلی‌نانوسیالات را می‌توان به عنوان عامل کاهنده درگ (DRA)^۱ و تقویت کننده سرعت انتقال حرارت در فرآیندهای مختلف بکار برد [۳۵].

اورنگ و قوامی فر و همکاران [۳۶، ۳۷] کاهش درگ و انتقال حرارت توسط پلی‌نانوسیالات آب/پلی‌ایزوبوتیلن^۲ (PIB)/نانوسیلیس را در خطوط لوله افقی و عمودی بررسی نمودند. در این پژوهش‌ها نانوسیلیس با غلظت‌های مختلف در محدوده غلظت ۰/۱ تا ۱ درصد وزنی و پلی‌ایزوبوتیلن در محدوده غلظت ۱۰ تا ۵۰ ppm تهیه شدند. اثر حضور پلیمر و نانوسیلیس بر خواص انتقال حرارت مانند ضریب انتقال حرارت همرفتی و عدد ناسلت و نیز تغییرات عدد رینولدز و کاهش درگ در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. مشکلی که در این تحقیقات مشاهده گردید، عدم سازگاری پلیمر PIB با محیط زیست و خطر آلاینده‌ی آب و سیالات پایه توسط آن بود.

بنابراین، با توجه به اینکه پلی‌نانوسیالات Cu/PAM/DW تا کنون به منظور مطالعه و بررسی افزایش سرعت انتقال حرارت و کاهش درگ (بطور همزمان) در خطوط لوله افقی استفاده نشده است، در این تحقیق به بررسی عملکرد پلی‌نانوسیالات پایه آبی مس/پلی‌اکریل آمید (PAM) به منظور بهبود سرعت انتقال گرما و کاهش نیروی درگ در یک لوله افقی گالوانیزه پرداخته شده است. در این مطالعه از PAM به علت دارا بودن خواص تریبولوژیکی مناسب به منظور کاهش اصطکاک، کاهش افت فشار و نیروی درگ در خطوط لوله، پایداری حرارتی مناسب، پایداری مناسب در محیط‌های اسیدی، غیر سمی بودن، سازگاری زیست محیطی بالا و انحلال پذیری بالای آن در آب به علت داشتن ساختار قطبی و غیر یونی، به عنوان DRA و سورفکتانت استفاده شده است. پلی‌اکریل آمید یک پلیمر کاهنده درگ (DRA) است که در خطوط لوله برای کاهش افت فشار اصطکاک و افزایش بهره‌وری انرژی استفاده می‌شود. مکانیسم کاهش درگ توسط پلی‌اکریل آمید به عوامل مختلفی نسبت داده می‌شود. یکی از این عوامل، تشکیل پیوندهای بین مولکولی است که به کاهش افت فشار و افزایش صرفه جویی در انرژی کمک می‌کند [۲]. عامل دیگر، خاصیت ارتجاعی پلیمر است که با اندازه‌گیری نیروی نرمال و عدد وایزبرگ^۳ نشان داده می‌شود [۳۸]. راندمان پلیمر کاهنده درگ با الاستیسیته آن مرتبط است که با وزن مولکولی و چگالی بار بیشتر افزایش می‌یابد [۳۹]. نرخ کاهش درگ نیز با سرعت جریان و عدد رینولدز افزایش می‌یابد [۴۰]. علاوه بر این، پلیمر ساختارهای شبکه‌ای

(۱) Drag reducing agent
(۳) Weissenberg number
(۵) Evonic Degussa

(۲) Polyisobutylene
(۴) Polyacrylamide

جدول ۳ - بخش‌های مختلف و تجهیزات مورد استفاده در دستگاه آزمایشگاهی

شماره	نام تجهیز
۱	مخزن ذخیره و اختلاط
۲	همزن برقی
۳	پمپ سانتریفیوژ
۴	جریان برگشتی
۵	فلومتر
۶	لوله گالوانیزه به قطر نیم اینچ
۷	گیجهای فشار روغنی ورودی و خروجی
۸	گیجهای دمای روغنی ورودی و خروجی
۹	ترموکوپلهای حرارتی مدل PT100
۱۰	مبدل حرارتی پوسته و لوله ای
۱۱	تابلوی برق (حاوی نشان دهنده های دما، ولتاژ و آمپر)
۱۲	دیمر جهت تنظیم ولتاژ و جریان برق

جدول ۱ - مشخصات نانوذرات مس

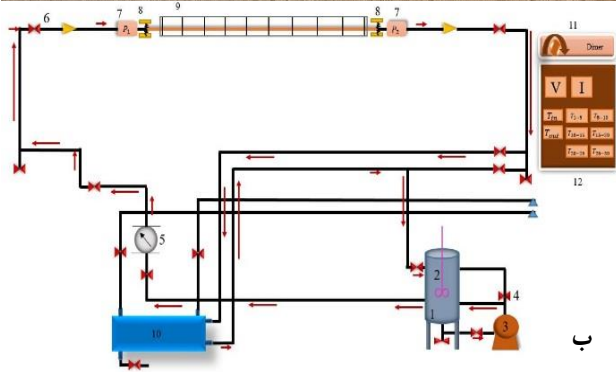
پارامتر	مقدار
رنگ نانوذره	قهوه‌ای
خلوص	۹۹/۹٪
ریخت‌شناسی	کروی
اندازه نانوذره	۴۰nm
چگالی	$1/9 \text{ g/cm}^3$
سطح ویژه	$10 - 14 \text{ m}^2/\text{g}$
ضریب هدایت حرارتی	40.1 W/m.k

جدول ۲ - مشخصات فیزیکی پلیمر پلی اکریل آمید

واحد	مقدار	پارامتر
Kg/mol	$\sim 10^6$	جرم مولکولی
g/cm^3	۱/۱۳	چگالی
W/m.K	۰/۱۳	ضریب هدایت گرمایی

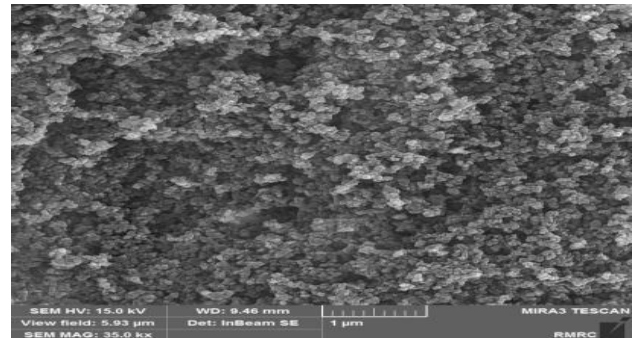


الف



شکل ۲ - الف) تصویر واقعی دستگاه طراحی و نصب شده، ب) شماتیک کلی دستگاه آزمایشگاهی

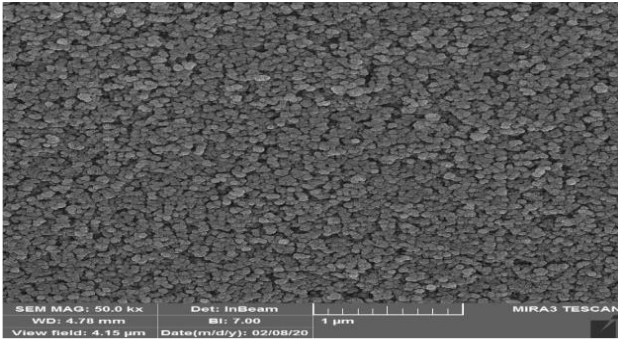
شش کاناله دیجیتالی نشان داده می‌شود. فرآیند گرمایش با شدت ثابت، توسط یک نوار حرارتی که دور لوله در ناحیه آزمایش پیچیده شده است، انجام می‌شود. به منظور خنک کردن سیالات مورد آزمایش، یک مبدل حرارتی پوسته و لوله شامل چهار پاس تیوب و یک پاس پوسته طراحی و نصب شده است. طول ناحیه آزمایش ۳ متر و به قطر نیم اینچ می‌باشد. همانطور که در شکل ۲-الف نشان داده شده است، جهت



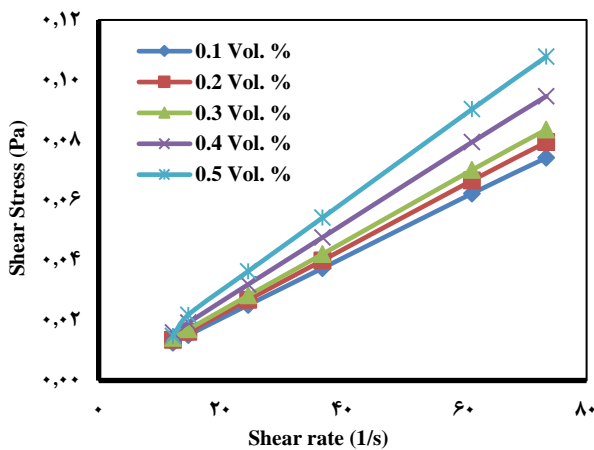
شکل ۱ - تصاویر میکروسکوپ الکترونی نانوذرات مس

دستگاه آزمایشگاهی

تصویر واقعی و شماتیک کلی دستگاه آزمایشگاهی طراحی و نصب شده در این پژوهش، در شکل‌های ۲-الف و ب و مشخصات تجهیزات مورد استفاده در این دستگاه در جدول ۳ ارائه شده است. در این دستگاه از یک مخزن گالوانیزه به حجم حدود ۱۰ لیتر جهت نگهداری و جمع‌آوری سیالات، پمپ سانتریفیوژ (نرخ جریان: $45 \text{ m}^3/\text{h}$ ؛ قدرت: 25 hp) برای تزریق سیالات از مخزن به ناحیه تست که یک لوله افقی گالوانیزه به طول سه متر و قطر داخلی نیم اینچ می‌باشد، استفاده شده است. همچنین، دو عدد فشارسنج روغنی، جهت اندازه‌گیری فشار سیالات که در ورودی و خروجی ناحیه تست روی لوله نصب شده‌اند، دو عدد دماسنج روغنی، به منظور نشان دادن دمای سیالات در ورودی و خروجی ناحیه آزمایش واقع گردیده‌اند و نیز شش عدد ترموکوپل مدل PT100 به منظور نشان دادن دمای دیواره لوله که در طول ناحیه آزمایش با فواصل مساوی نصب گردیده‌اند، دمای نقاط مختلف لوله را به نشان دهنده دیجیتالی منتقل کرده و توسط نشان دهنده



شکل ۳ - تصویر میکروسکوپی پلی نانوسیال آب/PAM/نانومس پایدار شده حاوی ۵۰ ppm پلیمر و ۰/۷۵ درصد وزنی نانومس



شکل ۴ - رفتار رئولوژیکی پلی نانوسیالات Cu/PAM/DW در غلظت‌های مختلف نانوذرات مس بازای غلظت ۵۰ ppm پلی اکریل آمید و دمای ۲۵° C

اندازه‌گیری کاهش درگ

بعد از قرائت مقادیر فشار سیال در ورودی (P_1) و خروجی از ناحیه آزمایش (P_2)، مقادیر افت فشار از معادله ۱ و درصد کاهش درگ با استفاده از معادله ۲ محاسبه گردید.

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (1)$$

$$DR\% = 100 \times \frac{\Delta P_{bf} - \Delta P}{\Delta P_{bf}} \quad (2)$$

که ΔP_{bf} مقدار افت فشار در زمانی است که از آب خالص به عنوان سیال آزمایشی (کار) استفاده شده است و ΔP نشان دهنده افت فشار سیال پایه (محلول پلیمری)، نانوسیال یا PNF در هر آزمایش می باشد. خواص تریبولوژیکی نانو ذرات مس و PAM، منجر به کاهش درگ و ضریب هدایت حرارتی بالای نانوذرات مس باعث افزایش سرعت انتقال حرارت گردیده است.

محاسبات انتقال حرارت

بعد از اندازه‌گیری دمای سیالات ورودی (T_{in}) و خروجی (T_{out})،

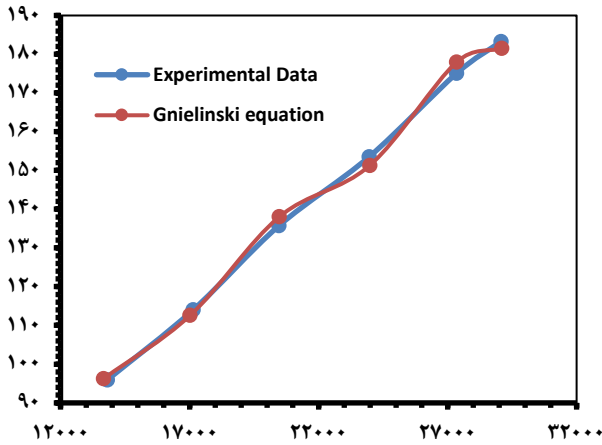
جلوگیری از اتلاف حرارت، ناحیه آزمایش کاملاً با پشم شیشه عایق بندی شده است. همچنین، به منظور از بین بردن اثرات ابتدایی و اطمینان از توسعه یافتگی جریان در طول ناحیه مورد آزمایش، نیم متر از ابتدای لوله خارج از ناحیه تست در نظر گرفته شده است.

آماده سازی و تهیه پلی نانوسیالات

در این تحقیق، تهیه پلی نانوسیالات به روش دو مرحله‌ای انجام شده است [۱۸]. اولین گام در فرآیند تجربی، آماده‌سازی محلول PAM با مخلوط کردن مقدار مورد نظر از پلیمر بوده است. پلیمر PAM را به مقدار مورد نظر وزن کرده و به حجم مشخصی آب اضافه گردید. محلول را با همزن مغناطیسی و مکانیکی هم زده تا اینکه محلول کاملاً یکنواخت بدست آید. این محلول را سیال پایه می‌نامند. سپس نانوذرات مس را به مقدار مورد نظر وزن کرده و به سیال پایه اضافه گردید. سوسپانسیون غیریکنواخت بدست آمده در این مرحله را مجدداً توسط همزن مغناطیسی و مکانیکی هم زده تا اینکه مخلوط کاملاً همگن بدست آید. از آنجا که این سوسپانسیون هنوز دارای زمان پایداری طولانی نمی‌باشد، آنرا در دستگاه اولترافیلتراسیون گذاشته و بسته به غلظت نانوذرات، زمان مناسب داده می‌شود، تا اینکه پلی نانوسیال کاملاً همگن و یکنواخت با زمان پایداری طولانی بدست آید. در نهایت، پلی نانوسیالات آماده شده جهت انجام آزمایش‌های دینامیکی و سنجش افت فشار و انتقال حرارت در مخزن ذخیره ده لیتری تهیه شده مطابق شکل ۱ ریخته می‌شود. در شکل ۳ تصویر میکروسکوپی پلی نانوسیالات آب/PAM/نانومس حاوی ۵۰ ppm پلیمر و ۰/۷۵ درصد وزنی نانومس که به وسیله هموزنایزر اولتراسونیک کاملاً یکنواخت و پایدار گردیده است، به عنوان نمونه نشان داده شده است.

خواص ترموفیزیکی سیالات

خواص ترموفیزیکی سیالات آماده شده شامل هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه به صورت تجربی با استفاده از تحلیلگر خواص حرارتی مدل KD2 Pro اندازه‌گیری گردید. همچنین، ویسکومتر مدل Brookfield DV-II Pro برای اندازه‌گیری ویسکوزیته و چگالی سنج دیجیتال مدل DMA 4500M برای اندازه‌گیری چگالی سیالات تعیین شد. اندازه‌گیری خواص رئولوژیکی PNFs نشان داد که این سیالات در غلظت‌های در نظر گرفته شده از پلیمر PAM و نانوذرات مس دارای رفتار نیوتنی بوده‌اند. بدین منظور، منحنی تنش برشی بر حسب سرعت برشی در غلظت‌های مختلف نانوذرات مس و بالاترین غلظت مورد مطالعه از پلی اکریل آمید (۵۰ ppm) در دمای ۲۵° C به عنوان نمونه رسم گردید، که نتایج بدست آمده در شکل ۴ نشان داده شده است. خطی بودن این منحنی‌ها نشان می‌دهد که رفتار پلی نانوسیالات مورد مطالعه، در تمامی غلظت‌های مورد بررسی از پلیمر و نانوذرات بصورت نیوتنی بوده است.



شکل ۵ - مقایسه داده‌های تجربی و تئوری عدد ناسلت در رینولدزهای مختلف برای آب.

به عنوان سیال عملیاتی، راه‌اندازی شد. این آزمایشها در شدت جریان‌های ۰/۵، ۰/۶۲۵، ۰/۷۵، ۰/۸۷۵، ۱ و ۱/۰۶۲۵ مترمکعب بر ساعت انجام شد. اعداد رینولدز معادل با شدت جریان‌های ذکر شده، که از معادله ۱۰ محاسبه گردیده است، در دامنه ۱۷۰۰۰ تا ۲۹۰۰۰ بدست آمده‌اند، که همگی در محدوده رژیم جریان آشفته قرار دارند. تمامی آزمایش‌های تجربی و اندازه‌گیری‌ها سه مرتبه تکرار شده و نتایج ذکر شده مقادیر متوسط داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشند. به منظور تعیین دقت دستگاه، نتایج حاصل از آزمایش با معادله گنیلینسکی^۱ مقایسه شد. این رابطه به صورت معادله ۱۳ تعریف می‌گردد.

$$Nu = \frac{(f/2)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/2)^{0.5}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (13)$$

در معادله ۱۳، Nu عدد ناسلت، Re عدد رینولدز، Pr عدد پرانتل و f ضریب اصطکاک داری است. ضریب اصطکاک داری از طریق رابطه‌ای که هالند^۲ برای لوله‌های زبر به صورت معادله ۱۴ تعریف کرده است، محاسبه می‌شود.

$$f \cong -1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/d}{3.7} \right)^{1.11} \right] \quad (14)$$

معادله گنیلینسکی یک رابطه پیچیده است، که برای خطوط لوله و در محدوده عدد رینولدز $5 \times 10^6 < Re < 3 \times 10^3$ و عدد پرانتل $2000 < Pr < 0.5$ معتبر است. دقت این معادله $\pm 10\%$ درصد گزارش شده است. نتایج مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و تئوری در شکل ۵ قابل مشاهده است. تطابق خوب بین داده‌های تئوری و تجربی اعتبار داده‌های آزمایشی را برای سایر نمونه‌ها تأیید می‌کند. داده‌های تجربی حدود $\pm 2/5\%$ درصد با داده‌های تئوری اختلاف داشتند.

دمای نقاط مختلف دیواره لوله ($T_1, T_2, T_3, \dots, T_N$) و قرائت مقادیر ولتاژ (V) و آمپر (I) در هر آزمایش، دمای متوسط سیال در ناحیه آزمایش (T_f)، دمای متوسط دیواره‌های داخلی (T_{wi}) و خارجی لوله (T_{wo})، مقادیر سرعت انتقال حرارت (q)، شار انتقال حرارت جابجایی (q'')، ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط (h_{avg})، عدد ناسلت متوسط (Nu_{avg}) و درصد افزایش عدد ناسلت (E_{Nu}) با استفاده از معادلات زیر تخمین زده می‌شوند.

$$T_{wo} = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_N}{N} \quad (3)$$

$$T_{wi} = T_{wo} - \left(\frac{q \cdot \ln \left(\frac{T_{out}}{T_{in}} \right)}{2\pi l k_{pipe}} \right) \quad (4)$$

$$T_f = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (5)$$

$$h_{(avg)} = \frac{q''}{T_{wi} - T_f} \quad (6)$$

$$Nu (avg) = \frac{h_{avg} d_{out}}{k_f} \quad (7)$$

$$q = V \cdot I \quad (8)$$

$$q'' = \frac{q}{\pi d_{out} l} \quad (9)$$

$$\%E_{Nu} = \frac{Nu_{pnf} - Nu_{bf}}{Nu_{bf}} \times 100 \quad (10)$$

برای محاسبه اعداد رینولدز و پرانتل سیالات پایه، نانوسیالات و پلی نانوسیالات، از معادلات ۱۱ و ۱۲ استفاده می‌شود [۲۲].

$$Re = \frac{\rho_f u_f D}{\mu_f} = \frac{4\rho_f Q_f}{\pi\mu_f D} \quad (11)$$

$$Pr = \frac{\mu_f C_{pf}}{k_f} \quad (12)$$

که ρ_f ، u_f ، μ_f ، C_{pf} و k_f به ترتیب دانسیته، سرعت، ویسکوزیته، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب هدایت حرارتی سیالات عملیاتی می‌باشند.

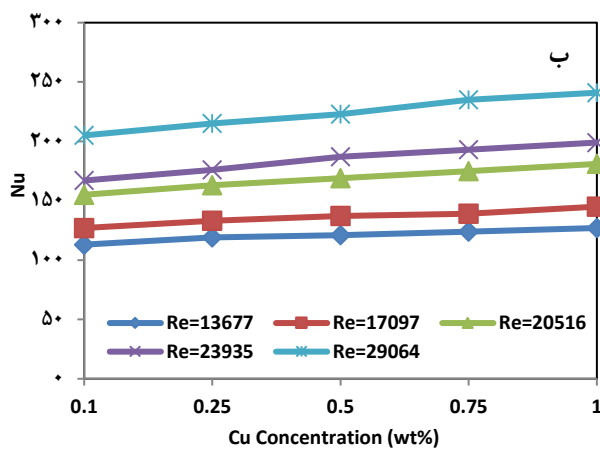
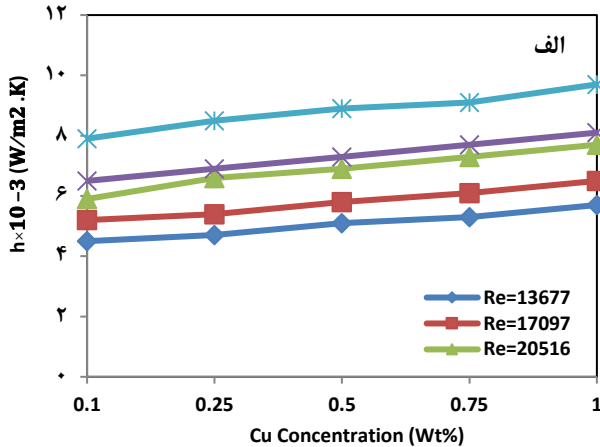
نتیجه‌ها و بحث

بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی و کاهش درگ

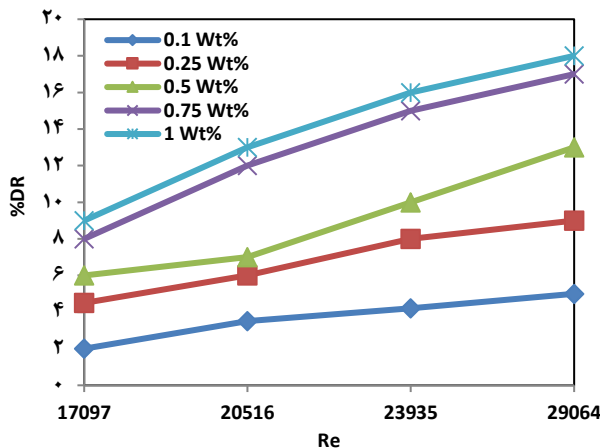
قبل از تعیین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلول پلیمری، نانوسیالات و پلی‌نانوسیالات، صحت و دقت داده‌های حاصل از دستگاه آزمایشگاهی با استفاده از آب به عنوان سیال پایه مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور دستگاه آزمایشگاهی با استفاده از آب مقطر خالص،

(۱) Gnielinski equation

(۲) Haaland equation



شکل ۶- اثر غلظت نانوذرات مس بر انتقال حرارت در عدد رینولدزهای مختلف (الف) تغییرات عدد ناسلت، (ب) تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی



شکل ۷- تغییرات درصد کاهش درگ نانوسیال آب/نانومس با عدد رینولدز

به علت داشتن ریخت‌شناسی کره سخت و فلز بودن نانوذرات مس، در اثر برخورد با سطح داخلی لوله زبری آن را کاهش داده، بخشی از خلل و فرج موجود در سطح داخلی لوله را پر کرده و از این طریق باعث صاف شدن سطح داخلی لوله می‌گردد [۱۸]. با صاف‌تر شدن

بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال آب/نانومس

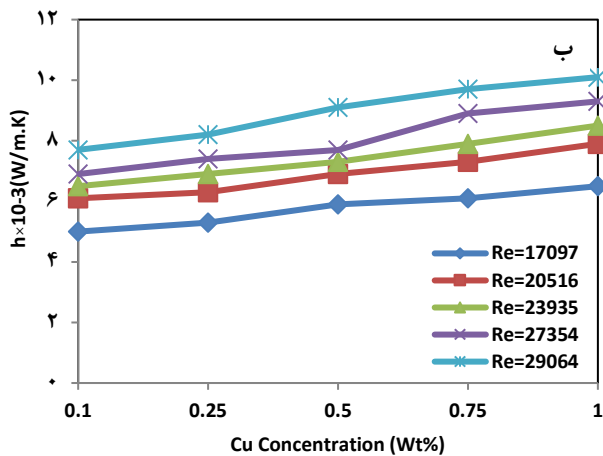
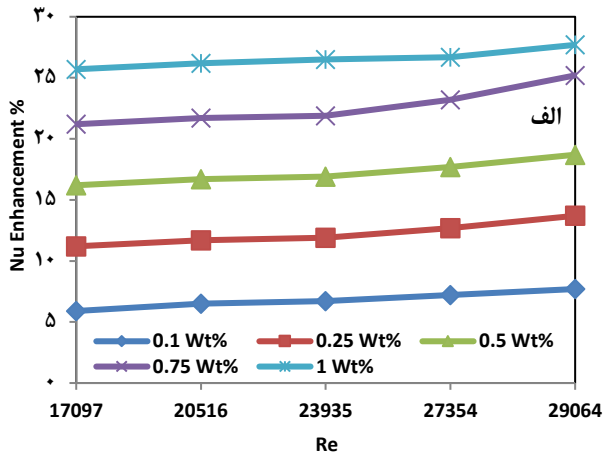
روند تغییرات عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آب/نانومس و درصد بهبود آنها نسبت به عدد ناسلت آب خالص بررسی شده و نتایج در شکل‌های ۶-الف و ب ارائه شده است. این بررسی در اعداد رینولدز ۱۷۰۰۰ تا ۲۹۰۰۰ انجام شده است. سیال مورد آزمایش، نانوسیال آب/نانومس با غلظت‌های ۰/۱ تا ۱ درصد وزنی از نانوذرات مس بود. دمای توده سیال ورودی به ناحیه تست، در تمام آزمایش‌ها حدود ۳۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد. در تمام آزمایش‌ها شار حرارتی ثابت ۹۰۰ وات بر دیواره لوله اعمال شد.

طبق نتایج حاصله، افزایش عدد رینولدز، به علت افزایش میزان توربولنسی سیالات، سبب کاهش دمای دیواره لوله می‌شود. با کاهش دمای دیواره مقدار منجر ضریب انتقال حرارت جابجایی طبق معادله ۶ کاهش یافته و در نتیجه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش می‌یابد (مطابق شکل ۶-الف). با توجه به معادله ۷، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با عدد ناسلت رابطه مستقیم دارد، بنابراین عدد ناسلت نیز با افزایش عدد رینولدز افزایش یافته است (مطابق شکل ۶-ب). افزودن نانوذرات مس به مایعات، باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و هدایت حرارتی نانوسیال گردیده و در نتیجه سعت انتقال حرارت و عدد ناسلت نیز بهبود یافته‌اند [۴۲].

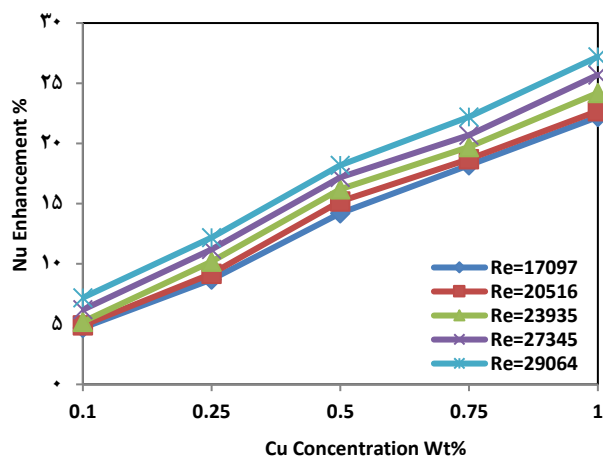
کاهش درگ توسط نانوسیال آب/نانومس

اختلاف فشار ورودی و خروجی جریان نانوسیال آب/نانومس در رینولدزهای مختلف (۱۷۰۰۰ تا حدود ۲۹۰۰۰) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بصورت درصد کاهش درگ در شکل ۷ نشان داده شده است. با افزودن نانوذرات مس به سیال پایه، اختلاف فشار ورودی و خروجی جریان داخل لوله کاهش یافت و پدیده کاهش درگ نسبت به آب خالص مشاهده شد. طبق شکل (۷)، با افزایش عدد رینولدز در یک غلظت مشخص از نانوذرات مس، درصد کاهش درگ افزایش یافت. علت این امر خاصیت تریبولوژیکی نانوذرات مس عملکرد آنها به مثابه کره سخت می‌باشد [۱۸]. با توجه به شکل ۶-ب، می‌توان دریافت که در یک عدد رینولدز ثابت، افزایش غلظت نانومس موجب افزایش درصد کاهش درگ گردیده است. البته، میزان بهبود درصد کاهش درگ تا غلظت ۰/۷۵ درصد وزنی قابل ملاحظه بوده و افزایش بیشتر غلظت تأثیر چندانی بر بهبود روند کاهش درگ نداشته است. بنابراین، می‌توان غلظت ۰/۷۵ درصد وزنی از نانوذرات مس را به عنوان غلظت بهینه نانوسیالات آب/نانومس معرفی نمود.

مکانیسم کاهش درگ توسط نانوذرات مس، اصلاح سطح داخلی لوله می‌باشد. زمانی که نانوذرات مس درون فاز مایع پراکنده شده و در رژیم جریان توربولنت در خط لوله جریان می‌یابند،



شکل ۸. عملکرد حرارتی پلی نانوسیال آب مقطر/پلی اکریل آمید/نانومس حاوی ۱۰ ppm پلیمر: الف) تغییرات ناسلت با عدد رینولدز در غلظت‌های مختلف نانوذرات مس، ب) تغییرات ضریب هدایت حرارتی با غلظت در رینولدزهای مختلف.



شکل ۹ - بهبود عدد ناسلت پلی نانوسیال آب مقطر/پلی اکریل آمید/نانومس حاوی ۵۰ ppm پلیمر با غلظت نانوذرات مس.

سطح لوله، ضریب اصطکاک کاهش یافته و میزان کاهش درگ نیز افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت نانوذرات مس، خاصیت صاف‌کنندگی نانوسیال بیشتر شده و کاهش درگ نیز افزایش یافته است [۱۸].

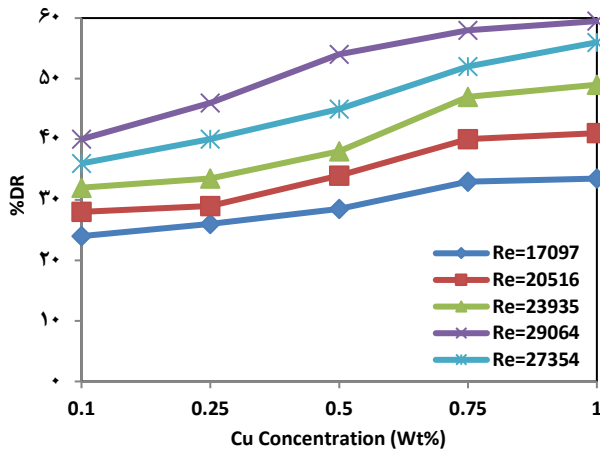
بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی توسط پلی نانوسیال آب/پلی اکریل آمید/نانومس

نتایج حاصل از بررسی انتقال حرارت در پلی نانوسیال آب/پلی اکریل آمید/نانومس بصورت درصد افزایش عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در شکل‌های ۸-الف و ب، به عنوان نمونه در غلظت‌های ۱۰ و ۵۰ ppm از پلی اکریل آمید ارائه گردیده است. پلی نانوسیالات تهیه شده شامل سیال پایه پلیمری آب/پلی اکریل آمید (با غلظت ۱۰ تا ۵۰ ppm) و نانوذرات مس با غلظت ۰/۱ تا ۱ درصد وزنی می‌باشند. تمام آزمایش‌ها تحت شار حرارتی ثابت ۹۰۰ وات و دمای توده سیال ۳۰ درجه سلسیوس انجام شدند. طبق شکل ۸-الف، در پلی نانوسیال حاوی ۱۰ ppm پلی اکریل آمید و ۱ درصد وزنی نانومس، ماکزیمم افزایش عدد ناسلت، حدود ۲۷/۷ درصد، نسبت به آب بدست آمد. همچنین، مطابق شکل ۸-ب ماکزیمم ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در پلی نانوسیال حاوی ۱۰ ppm پلی اکریل آمید و یک درصد وزنی نانوذرات مس در عدد رینولدز ۲۹۰۶۴ که دارای بیشترین میزان توربولنسی می‌باشد، حاصل گردید.

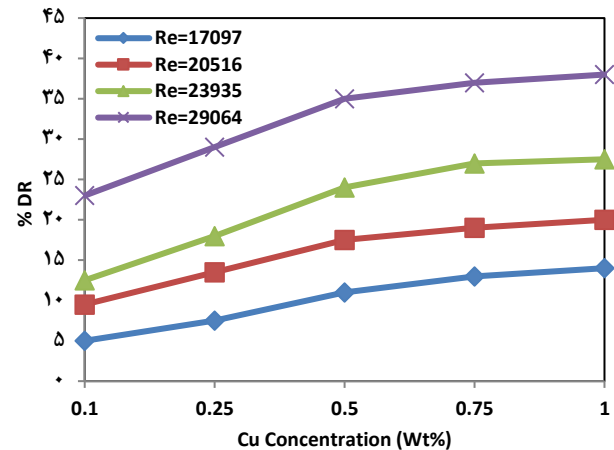
با افزایش غلظت پلیمر، ضریب انتقال حرارت و میزان افزایش عدد ناسلت در پلی نانوسیالات کمی کاهش می‌یابد. زیرا مولکول‌های پلیمر دور نانوذرات مس را احاطه کرده و باعث کاهش ضریب هدایت آنها می‌گردند. مطابق شکل ۹ در پلی نانوسیال با غلظت ۵۰ ppm پلیمر و ۱ درصد وزنی نانومس، عدد ناسلت حدود ۲۷/۲ درصد نسبت به آب افزایش یافته است، که حدود ۰/۵ درصد کاهش را نسبت به غلظت ۱۰ ppm از پلیمر نشان می‌دهد. بنابراین، می‌توان دریافت که در یک غلظت ثابت از نانوذرات مس، با افزایش غلظت پلیمر درصد بهبود عدد ناسلت کاهش می‌یابد.

با بررسی نتایج، می‌توان دریافت در پلی نانوسیالات مورد بررسی، به دلیل استفاده از پلیمر در غلظت‌های بسیار کم اثر نانوذرات مس غالب بوده و رفتار پلی نانوسیال از نظر حرارتی بیشتر شبیه به نانوسیال است. تنها تفاوت این است، که عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در پلی نانوسیال به دلیل حضور پلیمرهای با هدایت حرارتی پایین، مقداری کمتر از نانوسیال می‌باشد.

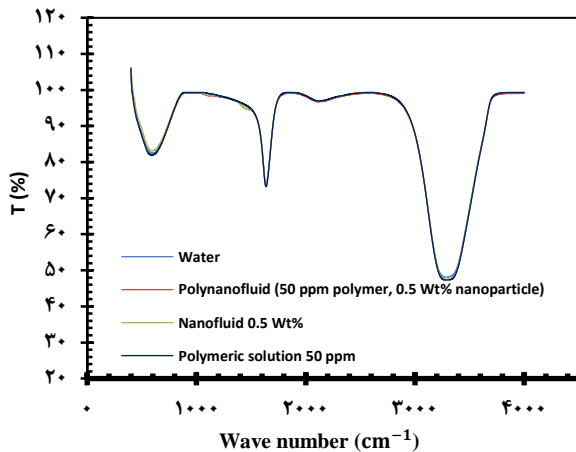
(۱) Smoothing



شکل ۱۱ - تغییرات کاهش درگ توسط پلی نانوسیال آب مقطر/پلی اکریل آمید/نانومس حاوی ۵۰ ppm پلیمر با غلظت نانومس در رینولدزهای مختلف



شکل ۱۰ - تغییرات درصد کاهش درگ توسط پلی نانوسیال پلی اکریل آمید/آب مقطر/نانومس حاوی ۱۰ ppm پلیمر با غلظت نانو مس بازای رینولدزهای مختلف



شکل ۱۲ - نتایج تست FTIR برای آب، نانوسیال، محلول پلیمری و پلی نانوسیال

به منظور مشخص شدن پیوندهای احتمالی بین اجزاء پلی نانوسیالات آب/PAM/نانومس، از آزمون اسپکترومتری تبدیل فوریه مادون قرمز^۱ (FTIR) استفاده شد. این تست، در صورت بوجود آمدن پیوندهای شیمیایی جدید، آن‌ها را مشخص می‌کند. نتایج این تست در شکل ۱۲ قابل مشاهده است.

با توجه هم‌پوشانی نمودارها در آنالیز FTIR، می‌توان دریافت که با افزودن شدن پلیمر و نانوذرات مس به سیال پایه آبی، هیچ گونه پیوند شیمیایی جدیدی بین مولکول‌های آن‌ها ایجاد نشده است.

مقایسه عملکرد حرارتی و کاهش درگ

به علت بالا بودن ضریب هدایت حرارتی نانوذرات مس و نیز خاصیت تریبولژیکی آنها، افزودن نانوذرات مس به آب می‌تواند باعث بهبود عملکرد حرارتی و کاهش درگ در خطوط لوله گردد.

کاهش درگ توسط محلول پلی نانوسیال آب/پلی اکریل آمید/نانومس

شکل‌های ۱۰ و ۱۱، نتایج حاصل از بررسی درصد کاهش درگ و ضریب اصطکاک محلول پلی نانوسیال آب/پلی اکریل آمید/نانومس را با غلظت‌های ۱۰ و ۵۰ ppm پلیمر و ۰/۱ تا ۱ درصد وزنی نانومس، در اعداد رینولدز مختلف نشان می‌دهند.

مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱، در غلظت‌های ۱۰ و ۵۰ ppm از پلیمر PAM، روند افزایشی درصد کاهش درگ با غلظت نانوذرات مس و عدد رینولدز مشابه عملکرد نانوسیالات آب/نانومس بوده و غلظت ۰/۷۵ وزنی نانوذرات را می‌توان به عنوان غلظت بهینه معرفی نمود. زیرا شیب افزایش میزان کاهش درگ به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. با افزایش غلظت نانوذرات مس، ضریب درگ کاهش یافته و میزان کاهش آن با افزایش عدد رینولدز بیشتر شده است. علت این امر را می‌توان به افزایش توربولنسی جریان در خط لوله نسبت داد.

با مقایسه نتایج حاصله، در یک غلظت ثابت از نانومس، افزایش غلظت پلیمر موجب بهبود درصد کاهش درگ شده است. از طرفی، در یک غلظت ثابت از پلیمر، با افزایش غلظت نانوذرات مس نیز کاهش درگ بهبود یافت. با افزایش غلظت نانوذره تا ۰/۷۵ درصد وزنی افزایش قابل ملاحظه درصد کاهش درگ مشاهده شد. با افزایش بیشتر غلظت وزنی نانوذره، میزان افزایش کاهش درگ به مقدار کمتری اتفاق افتاد. بنابراین، می‌توان غلظت ۰/۷۵ درصد وزنی از نانوذرات مس را به عنوان غلظت بهینه در نظر گرفت. می‌توان گفت، افزودن نانوذرات مس به پلی نانوسیال دارای دو نقش موثر در کاهش درگ می‌باشد: ۱- افزایش مقاومت جریان به دلیل حرکت براونی ذرات و ۲- کاهش مقاومت جریان با محافظت از زنجیره پلیمری در برابر شکستگی ناشی از برش [۴۵].

(۱) Fourier Transform Infrared Spectrometer

همچنین، مطابق شکل ۱۳-ب در این شرایط نانوسیالات و پلی نانوسیالات دارای عملکرد مشابه و بالاترین عدد ناسلت، و محلول پلیمری دارای کمترین عدد ناسلت بوده است. با توجه به اینکه در پلی نانوسیالات مورد بررسی مقدار ناچیزی پلیمر وجود دارد، عدد ناسلت پلی نانوسیالات آب/پلی اکریل آمید/نانومس و نانوسیالات آب/نانومس بسیار بهم نزدیک هستند. بنابراین، می توان گفت تعیین میزان غلظت پلیمر در پلی نانوسیالات به نوع کاربرد پلی نانوسیال بستگی دارد. اگر عملکرد حرارتی بهتر مد نظر باشد، باید از غلظت کمتر پلیمر استفاده کرد، اما زمانی که عملکرد کاهش درگ بهتر مطلوب باشد، باید از غلظت بیشتر پلیمر استفاده کرد.

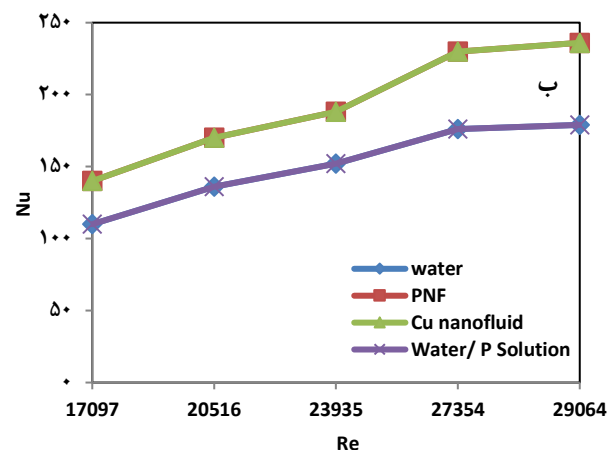
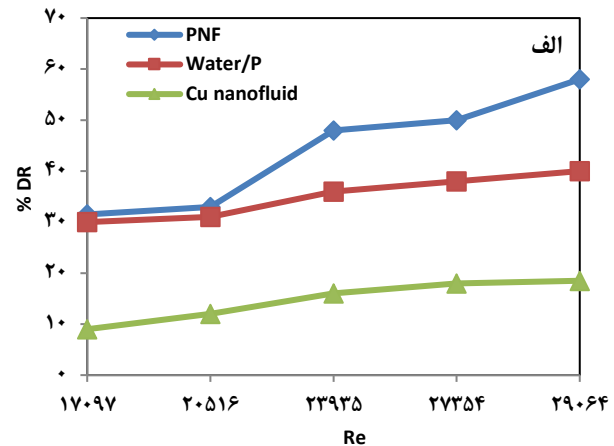
مقایسه نتایج با سایر پژوهش ها

نتایج این مطالعه آزمایشگاهی با نتایج حاصل از سایر پژوهش ها در جدول ۴ مقایسه شده است. مقایسه نتایج بدست آمده نشان می دهد که افزودن همزمان نانوذرات مس و پلیمر PAM می تواند به طور قابل توجهی باعث بهبود سرعت انتقال گرما و کاهش درگ در جریان توربولنت گردد.

نتیجه گیری

در این پژوهش نانوذرات مس به عنوان جزء بهبود دهنده انتقال حرارت و پلیمر پلی اکریل آمید به عنوان عامل کاهش درگ مورد استفاده قرار گرفت. خواص ترمو فیزیکی محلول پلیمری پلی اکریل آمید/آب، نانوسیال آب/نانومس و پلی نانوسیال آب/پلی اکریل آمید/نانومس اندازه گیری شد. کاهش درگ و میزان سرعت انتقال حرارت بطور جداگانه برای آب خالص، محلول پلیمری آبی، نانوسیال آب/نانومس و پلی نانوسیال آب/پلی اکریل آمید/نانومس مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت اثر حضور همزمان پلیمر PAM و نانوذرات مس بر کاهش درگ و انتقال حرارت در پلی نانوسیالات تهیه شده بررسی و مقایسه گردید. مهمترین نتایج بدست آمده عبارتند از:

- ۱- مطالعه رفتار رئولوژیکی پلی نانوسیالات آب/پلی اکریل آمید/نانومس نشان داد که عملکرد آنها در تمامی غلظت های مورد مطالعه از پلیمر پلی اکریل آمید و نانوذرات مس بصورت نیوتنی بوده است.
- ۲- در تمامی محلول ها و سوسپانسیون های ساخته شده، افزایش عدد رینولدز سبب کاهش دمای دیواره لوله شد و با کاهش دمای دیواره، ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش یافت. از آنجا که ضریب انتقال حرارت جابه جایی با عدد ناسلت رابطه مستقیم دارد، بنابراین عدد ناسلت نیز با افزایش عدد رینولدز افزایش پیدا کرد.
- ۳- با افزودن نانوذرات مس به سیالات پایه، اختلاف فشار ورودی و خروجی جریان داخل لوله کاهش یافته و پدیده کاهش درگ نسبت به آب خالص مشاهده شد. با افزایش عدد رینولدز در یک غلظت مشخص، درصد کاهش درگ افزایش یافت.



شکل ۱۳ - مقایسه عملکرد محلول پلیمری آب/پلی اکریل آمید، نانوسیال آب/نانومس و پلی نانوسیال آب/پلی اکریل آمید/نانومس در شرایط بهینه: الف) کاهش درگ در رینولدزهای مختلف، ب) عدد ناسلت در رینولدزهای مختلف

افزودن پلیمر PAM به نانوسیالات باعث افزایش خاصیت تریبولوژیکی پلی نانوسیال گردیده و میزان کاهش درگ را افزایش می دهد. از طرفی، وجود مولکول های پلیمر در نانوسیال به مقدار جزئی باعث کاهش عملکرد حرارتی پلی نانوسیالات نسبت به نانوسیالات در غلظت های یکسان نانوذرات توسط محلول پلیمری، نانوسیال و پلی نانوسیال در شرایط بهینه، با یکدیگر مقایسه شدند. در شکل های ۱۳-الف و ب درصد کاهش درگ و عملکرد حرارتی (برحسب عدد ناسلت) در محلول پلیمری آب/PAM، نانوسیالات آب/نانومس و پلی نانوسیالات آب/PAM/نانومس با همدیگر مقایسه شده اند.

با توجه به نتایج آزمایشگاهی بدست آمده در دامنه غلظت های مورد مطالعه، ماکزیمم کاهش درگ توسط پلی نانوسیال آب/پلی اکریل آمید/نانومس، شامل غلظت های ۵۰ ppm از پلیمر PAM و ۱ درصد وزنی نانومس در عدد رینولدز ۲۹۰۶۴ بدست آمده است. شکل ۱۳-الف نشان می دهد که در این شرایط این پلی نانوسیال به دلیل اثر هم افزایی پلی اکریل آمید و نانومس بهترین عملکرد جهت کاهش درگ را داشته است.

جدول ۴ - مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از سایر پژوهش‌ها

نویسندگان و مرجع	نانوذره	پلیمر	غلظت پلیمر و نانوذرات	سیال پایه	دما (°C)	ماکزیمم درصد کاهش درگ	ماکزیمم درصد افزایش سرعت انتقال حرارت
پژوهش حاضر	-	PAM	۵۰-۱۰ ppm	آب	۳۰	۴۰	-
پژوهش حاضر	نانومس	-	۱-۰/۱ درصد وزنی	آب	۳۰	۱۸/۵	۳۱/۸
پژوهش حاضر	نانومس	PAM	نانوذره: ۱-۰/۱ درصد وزنی پلیمر: ۱۰ تا ۵۰ ppm	آب	۳۰	۵۹/۵	۲۷/۷
مولا و همکاران [۴۶]	-	PIB	۴ تا ۳۰ ppm	نفت خام	۲۵	۴۰	-
السورکچی و همکاران [۴۷]	-	PIB	۱۸۴ ppm	روغن	۲۵	۵۵	-
عزمی و همکاران [۴۸]	SiO ₂	-	≤ 4vol.%	آب	۳۰	۳۲/۷	۱۷/۱
پورانفرد و همکاران [۱۸]	SiO ₂	-	۰/۱ تا ۱ درصد وزنی	آب	۲۵	۲۴	-
اورنگ و همکاران [۳۶]	SiO ₂	PIB	نانوذره: ۰/۱ تا ۱ درصد وزنی پلیمر: ۱۰ تا ۵۰ ppm	آب (لوله افقی)	۲۵	۵۸	۲۶/۴
قوامی فر و همکاران [۳۷]	SiO ₂	PIB	نانوذره: ۰/۱ تا ۱ درصد وزنی پلیمر: ۱۰ تا ۵۰ ppm	آب (لوله عمودی)	۲۵	۶۳/۹۶	۳۰/۷۵
فروویلات و همکاران [۴۹]	SiO ₂	-	۳۴-۵ درصد وزنی	آب	۲۰-۷۰	-	۱۰-۶۰
دوانگ تانگشوک و وانگ وایز [۵۰]	TiO ₂	-	۰/۲ درصد حجمی	آب	۲۵	-	۶-۱۱
دوانگ تانگشوک و وانگ وایز [۵۱]	TiO ₂	-	۰/۲-۲ درصد وزنی	آب	-	-	۲۶

ناشی از زبری سطح توسط نانوذرات مس و تضعیف انرژی گردابه‌های موجود در جریان آشفته توسط پلی اکریل آمید می‌باشد.

۹- با توجه به ناچیز بودن غلظت PAM در پلی‌نانوسیال آب/PAM/نانومس، عدد ناسلت پلی‌نانوسیال و نانوسیال بسیار بهم نزدیک بودند. بنابراین، می‌توان گفت تعیین میزان غلظت پلیمر در پلی‌نانوسیال به نوع کاربرد پلی‌نانوسیال بستگی دارد. اگر عملکرد حرارتی بهتری مد نظر باشد، باید از غلظت کمتر پلیمر PAM استفاده کرد، اما زمانی که عملکرد کاهش درگ مد نظر باشد، باید از غلظت بیشتر پلیمر استفاده کرد.

۱۰- بیشترین درصد کاهش درگ و افزایش سرعت انتقال حرارت در پلی‌نانوسیالات حاوی ۵۰ ppm پلیمر PAM و ۱ درصد وزنی نانوذرات مس، در ماکزیمم عدد رینولدز مورد مطالعه، به ترتیب ۵۹/۵٪ و ۲۷/۲٪ مشاهده گردید.

۱۱- ماکزیمم درصد کاهش درگ و افزایش انتقال حرارت در پلی‌نانوسیالات حاوی ۱۰ ppm پلیمر PAM و ۱ درصد وزنی نانوذرات مس، در بیشترین عدد رینولدز، به ترتیب ۳۸/۲٪ و ۲۷/۷٪ بدست آمد.

۴- مکانیسم کاهش درگ توسط نانوذرات مس، اصلاح سطح داخلی لوله می‌باشد و زمانی که نانوذرات مس درون فاز مایع پراکنده می‌شوند و همراه با فاز مایع در خط لوله جریان می‌یابند، خلل و فرج موجود در سطح لوله را پر کرده و از این طریق زبری لوله را کاهش می‌دهند.

۵- در پلی‌نانوسیالات مورد بررسی، به دلیل استفاده از پلیمر PAM در غلظت‌های بسیار پایین، اثر نانوذرات غالب بوده و رفتار پلی‌نانوسیال آب/PAM/نانومس از نظر حرارتی بیشتر شبیه به عملکرد نانوسیال آب/نانومس مشاهده گردید.

۶- در یک غلظت معین از نانوذرات مس، افزایش غلظت پلیمر PAM موجب کاهش ضریب اصطکاک و به موازات آن بهبود درصد کاهش درگ گردید.

۷- در یک غلظت ثابت از PAM، با افزایش غلظت نانوذرات مس نیز کاهش درگ بهبود یافت. با افزایش بیشتر غلظت وزنی نانوذرات به بیش از ۰/۷۵ درصد وزنی، میزان افزایش کاهش درگ به مقدار کمتری اتفاق افتاد. بنابراین، غلظت بهینه نانوذرات مس جهت بهبود سرعت انتقال حرارت، ۰/۷۵ درصد وزنی تعیین گردید.

۸- نتایج آنالیز FTIR برای سیالات مورد مطالعه، نشان داد هیچ پیوند شیمیایی جدیدی بین پلی اکریل آمید و نانومس ایجاد نشد. همچنین، افزایش درصد کاهش درگ در پلی‌نانوسیال مورد مطالعه، نتیجه هم‌افزایی پلیمر PAM و نانوذرات مس بود. عملکرد هم‌افزایی PAM و نانومس، شامل صاف شدن سطح داخلی لوله و پر شدن خلل و فرج

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱

حروف یونانی		فهرست نمادها	
دانسیتته (gr cm^{-3})	ρ	دما ($^{\circ}\text{C}$)	T
ویسکوزیته (cP)	μ	ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{J g}^{-1} \text{K}^{-1}$)	C_p
افت فشار (Pa)	ΔP	قطر لوله (m)	D
زیروندها		درصد کاهش درگ	DR%
توده سیال	b	ضریب اصطکاک	f
ورودی	in	سرعت (ms^{-1})	u
خروجی	out	طول لوله (m)	l
دیواره بیرونی	wo	ضریب هدایت حرارتی ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	k
دیواره داخلی	wi	درصد وزنی	wt%
تعداد سنسورها	N	شدت جریان حجمی ($\text{m}^3 \text{hr}^{-1}$)	Q
سیال پایه	bf	ضریب انتقال حرارت جابجایی ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)	h
پلی نانوسیال	pnf	سرعت انتقال حرارت ورودی (W)	q
آزمایشگاهی	exp	شار حرارتی ورودی (W m^{-2})	q"
اعداد بدون بعد		پلی نانوسیالات	PNFs
عدد رینولدز	Re		
عدد ناسلت	Nu		

مراجع

- [1] Hoyt J., [Drag Reduction by Polymers and Surfactants](#). *Viscous Drag Reduction in Boundary Layers*, **123**: 413-432 (1990).
- [2] Jing X., Liu Y., Zhao W., Pu J., [Synthesis and Drag Reduction Properties of a Hydrophobically Associative Polymer Containing Ultra-Long Side Chains](#). *BMC chemistry*, **17**(1): 1-9 (2023).
- [3] Lin B., Hu H.B., Jiang L., Li Z., Xie L., [Development and Drag-Reducing Performance of a Water-Soluble Polymer Coating](#). *Physics of Fluids*, **35**(6) (2023).
- [4] Abdulrahman A.A., Kadhim B.J., Shnain Z.Y., Majidi H.S., Alwaiti A.A., Al-Sheikh F., [Experimental and Numerical Analysis of Oil-Water Flow with Drag Reducing Polymers in Horizontal Pipes](#). *Fluid Dynamics & Materials Processing*, **19**(10) (2023).
- [5] Zhao M., Liu S., Dai C., Yan R., Li Y., Liu P., [Development and Drag Reduction Behaviors of a Water-in-Water Emulsion Polymer Drag Reducer](#). *ACS Applied Polymer Materials*, **5**(5): 3707-3716 (2023).
- [6] Alsarkh, A. Salah M., [Multiphase Flow Production Enhancement Using Drag Reducing Polymers](#). *Polymers*, **15**(5): 1108 (2023).
- [7] Savins J., [Drag Reduction Characteristics of Solutions of Macromolecules in Turbulent Pipe Flow](#). *Society of Petroleum Engineers Journal*, **4**(03): 203-214 (1964).
- [8] Seyer F.A. Metzner A., [Turbulence Phenomena in Drag Reducing Systems](#). *AIChE Journal*, **15**(3): 426-434 (1969).

- [9] Paterson R.W. Abernathy F., [Turbulent Flow Drag Reduction and Degradation with Dilute Polymer Solutions](#). *Journal of Fluid Mechanics*, **43(4)**: 689-710 (1970).
- [10] Zhang Y., Zhou F., Kang J., [Flow and Heat Transfer in Drag-Reducing Polymer Solution Flow Through the Corrugated Tube and Circular Tube](#). *Applied Thermal Engineering*, **174**: 115185 (2020).
- [11] Varnaseri M. Peyghambarzadeh S., [The Effect of Polyacrylamide Drag Reducing Agent on Friction Factor and Heat Transfer Coefficient in Laminar, Transition and Turbulent Flow Regimes in Circular Pipes with Different Diameters](#). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **154**: 119815 (2020).
- [12] Escudier M., Presti F., Smith S., [Drag Reduction in the Turbulent Pipe Flow of Polymers](#). *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, **81(3)**: 197-213 (1999).
- [13] Fossa M. Tagliafico L., [Experimental Heat Transfer of Drag-Reducing Polymer Solutions in Enhanced Surface Heat Exchangers](#). *Experimental thermal and fluid science*, **10(2)**: 221-228 (1995).
- [14] Virk P., [Drag Reduction in Rough Pipes](#). *Journal of fluid mechanics*, **45(2)**: 225-246 (1971).
- [15] Quan Q., Wang S., Wang L., Shi Y., Xie J., Wang X., Wang S., [Experimental Study on the Effect of High-Molecular Polymer as Drag Reducer on Drag Reduction Rate of Pipe Flow](#). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **178**: 852-856 (2019).
- [16] Yang S.-Q., Ding D., [Drag Reduction Induced by Polymer in Turbulent Pipe Flows](#). *Chemical Engineering Science*, **102**: 200-208 (2013).
- [17] Ma G., Li X., Wang X., Liu G., Jiang L., Yang K., [Preparation, Rheological and Drag Reduction Properties of Hydrophobically Associating Polyacrylamide Polymer](#). *Journal of dispersion science and technology*, **40(2)**: 171-178 (2019).
- [18] Pouranfard A., Mowla D., Esmailzadeh F., [An Experimental Study of Drag Reduction by Nanofluids Through Horizontal Pipe Turbulent Flow of a Newtonian Liquid](#). *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **20(2)**: 633-637 (2014).
- [19] Abdulbari H.A. Ming F., [Drag Reduction Properties of Nanofluids in Microchannels](#). *The Journal of Engineering Research [TJER]*, **12(2)**: 60-67 (2015).
- [20] Pouranfard A., Mowla D., Esmailzadeh F., [An Experimental Study of Drag Reduction by Nanofluids in Slug Two-Phase Flow of Air and Water Through Horizontal Pipes](#). *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **23(3)**: 471-475 (2015).
- [21] Gu C., Qiu R., Liu S., You Z., Qin R., [Shear Thickening Effects of Drag-Reducing Nanofluids for Low Permeability Reservoir](#). *Advances in Geo-Energy Research*, **4(3)**: 317-325 (2020).
- [22] Raei B., Peyghambarzadeh S., Asl R.S., [Experimental Investigation on Heat Transfer and Flow Resistance of Drag-Reducing Alumina Nanofluid in a Fin-and-Tube Heat Exchanger](#). *Applied Thermal Engineering*, **144**: 926-936 (2018).

- [23] Drzazga M., Gierczycki A., Dzido G., Lemanowicz M., [Influence of Nonionic Surfactant Addition on Drag Reduction of Water Based Nanofluid in a Small Diameter Pipe](#). *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **21(1)**: 104-108 (2013).
- [24] Hussein A.M., Bakar R.A., Kadirgama K., Sharma K.V., [Heat Transfer Enhancement Using Nanofluids in an Automotive Cooling System](#). *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **53**: 195-202 (2014).
- [25] Mohebbi A., [Prediction of Specific Heat and Thermal Conductivity of Nanofluids by a Combined Equilibrium and Non-Equilibrium Molecular Dynamics Simulation](#). *Journal of Molecular Liquids*, **175**: 51-58 (2012).
- [26] Paryani S., Ramazani SA A., [Investigation of the Combination of TiO₂ Nanoparticles and Drag Reducer Polymer Effects on the Heat Transfer and Drag Characteristics of Nanofluids](#). *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **96(6)**: 1430-1440 (2018).
- [27] Indartono Y., Usui H., Suzuki H., Komoda Y., [Temperature and Diameter Effect on Hydrodynamic Characteristic of Surfactant Drag-Reducing Flows](#). *Korea-Australia Rheology Journal*, **17(4)**: 157-164 (2005).
- [28] Jia-Fei Z., Zhong-Yang L., Ming-Jiang N., Ke-Fa C., [Dependence of Nanofluid Viscosity on Particle Size and PH Value](#). *Chinese Physics Letters*, **26(6)**: 066202 (2009).
- [29] Bari H.A., Yunus R.B., Hadi T.S., [Aluminum Powder and Zwitterionic Surfactants as Drag Reducing Agents in Pipe Lines](#). *American Journal of Applied Sciences*, **7(10)**: 1310 (2010).
- [30] Gierczycki A., Drzazga M., Lemanowicz M., Dzido G., [Drag Reduction in the Flow of CuO Based Nanofluid](#). *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, (2015).
- [31] Ming F.L.W., Abdulbari H.A., Latip N.B.A., Heidarini S., [Insoluble Nano-Powders Additives Enhancing the Flow of Liquid In Microchannel: Effect of Particle Size](#). *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, **11(4)**: 2146Y2152 (2016).
- [32] Yanuar Y., Mau S., Waskito K.T., Putra O.A., Hanif R., [Drag Reduction of Alumina Nanofluid in Spiral Pipe with Turbulent Flow Conditions](#). in *AIP Conference Proceedings*. *AIP Publishing*, (2017).
- [33] Moser R.D., Kim J., Mansour N.N., [Direct Numerical Simulation of Turbulent Channel Flow up to \$Re \tau = 590\$](#) . *Physics of fluids*, **11(4)**: 943-945 (1999).
- [34] Peyghambarzadeh S., Hashemabadi S., Saffarian H., Shekari F., [Experimental Study of the Effect of Drag Reducing Agent on Pressure Drop and Thermal Efficiency of an Air Cooler](#). *Heat and Mass Transfer*, **52**: 63-72 (2016).
- [35] Raei B., Shahraki F., Peyghambarzadeh S., [Experimental Study of the Effect of Drag Reducing Agent on Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics](#). *Experimental Heat Transfer*, **31(1)**: 68-84 (2018).

- [36] Orang M., Pouranfard A., [Experimental, Comparative and Statistical Study of Heat Transfer and Drag Reduction of Water/Polyisobutylene/nanoSiO₂ Poly-Nanofluid Through a Horizontal Pipe](#). *Chemical Engineering Research and Design*, **183**: 466-477 (2022).
- [37] Ghavamifard S., Pouranfard A., Shamsi M., [Experimental and Numerical Study of Drag Reduction and Heat Transfer Enhancement in a Vertical Pipe Using Water/Polyisobutylene/Nano-SiO₂ Polynanofluids](#). *Journal of Dispersion Science and Technology*, 1-12 (2023).
- [38] Alsarakji I.H., Al-Sarkhi A., El-Qanni A., Mukhaimar A., [Drag Reducing Polymers in Multi-phase Flow Pipelines: Energy-Saving and Future Directives](#). (2023).
- [39] Abubakar A., Al-Wahaibi T., Al-Wahaibi Y., Al-Hashmi A.R., Al-Ajmi A., [Roles of Drag Reducing Polymers in Single-and Multi-Phase Flows](#). *Chemical engineering research and design*, **92(11)**: 2153-2181 (2014).
- [40] Eshrati M., Al-Wahaibi T., Al-Hashmi A.R., Al-Wahaibi Y., Al-Ajmi A., Abubakar A., [Significance of Polymer Elasticity on Drag Reduction Performance in Dispersed Oil-in-Water Pipe Flow](#). *Chemical Engineering Research and Design*, **182**: 571-579 (2022).
- [41] Edomwonyi-Otu L.C., Gimba M.M., Yusuf N., [Drag Reduction with Biopolymer-Synthetic Polymer Mixtures in Oil-Water Flows: Effect of Synergy](#). *Engineering Journal*, **24(6)**: 1-10 (2020).
- [42] Zhang L., Qu P., Jing Y., Yao X., Wang W., [Micro-mechanism Analysis of Heat conductivity Enhancement of Argon-based Copper Nanofluids](#). in *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. (2023).
- [43] Hussein H.Q., Khalaf A.F., Al-Tajer A.M., Hammoodi K.A., Basem A., [Numerical Investigated to Improve Heat Transfer in a Pipe Using Nanofluid](#). *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, **9(4)** (2022).
- [44] Al-Ogaili M.F., Rava M., Rasheed A.H., Othman M.H.D., Shehab M.A., Alktranee M., [Heat Transfer Enhancement in Parallel Flow Double Pipe Heat Exchanger Using Aluminum Oxide and Copper Oxide Nanofluids](#). (2023).
- [45] Li X., Pan J., Shi J., Chai Y., Hu S., Han Q., Jing D., [Nanoparticle-Induced Drag Reduction for Polyacrylamide in Turbulent Flow With High Reynolds Numbers](#). *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **56**: 290-298 (2023).
- [46] Mowla D. Naderi A., [Experimental Study of Drag Reduction by a Polymeric Additive in Slug Two-Phase Flow of Crude Oil and Air in Horizontal Pipes](#). *Chemical Engineering Science*, **61(5)**: 1549-1554 (2006).
- [47] Alsarakji I., Al-Sarkhi A., Atiqullah M., Alhems L., El Nakla M., [Study of Oil-Soluble and Water-Soluble Drag Reducing Polymers in Multiphase Flows](#). *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **96(4)**: 1012-1028 (2018).

- [48] Azmi W., Sharma K.V., Sarma P.K., Mamat R., Anuar S., Rao V.D., [Experimental Determination of Turbulent Forced Convection Heat Transfer and Friction Factor with SiO₂ Nanofluid](#). *Experimental Thermal and Fluid Science*, **51**: 103-111 (2013).
- [49] Ferrouillat S., Bontemps A., Ribeiro J.P., Gruss J.A., Soriano O., [Hydraulic and Heat Transfer Study of SiO₂/Water Nanofluids in Horizontal Tubes with Imposed Wall Temperature Boundary Conditions](#). *International journal of heat and fluid flow*, **32(2)**: 424-439 (2011).
- [50] Duangthongsuk W. Wongwises S., [Heat Transfer Enhancement and Pressure Drop Characteristics of TiO₂-Water Nanofluid in a Double-Tube Counter Flow Heat Exchanger](#). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **52(7-8)**: 2059-2067 (2009).
- [51] Duangthongsuk W. Wongwises S., [An Experimental Study on the Heat Transfer Performance and Pressure Drop of TiO₂-Water Nanofluids Flowing Under a Turbulent Flow Regime](#). *International journal of heat and mass transfer*, **53(1-3)**: 334-344 (2010).