

مطالعه آزمایشگاهی افزایش انتقال حرارت نانوسیال پایه آبی اکسید آهن

صدیقه صیدی^۱، عاطفه زارعی^۲ امیرحسین نیکو^۳، محمدرضا ملایری^{۴*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲. دانشجوی دکتری تخصصی، بخش مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۳. استادیار دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

۴. استاد بخش مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

malayeri@shirazu.ac.ir

چکیده

نانوسیالات با افزایش رسانش گرمایی و اغتشاش در لایه مرزی، روشی مؤثر برای بهبود انتقال حرارت و کاهش اتلاف انرژی در تجهیزات حرارتی هستند. عملکرد آن‌ها به نوع سیال پایه، غلظت و ویژگی‌های نانوذرات و شرایط عملیاتی مانند دما و سرعت جریان بستگی دارد. در این پژوهش، تأثیر پارامترهای عملیاتی بر انتقال حرارت نانوسیال اکسید آهن بررسی شد. سرعت جریان بین ۱۷ تا ۳۴ سانتی‌متر بر ثانیه، شار حرارتی ۱۸ تا ۹۳ کیلووات بر متر مربع و دمای توده سیال ۳۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم گردید. نانوذرات با درصدهای وزنی ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۵ پراکنده شده و از سورفکتانت سدیم دودسیل سولفات (SDS) برای پایداری استفاده شد. نتایج نشان داد در دماهای بالاتر از ۴۰ درجه سانتی‌گراد، افزودن نانوذرات اکسید آهن موجب بهبود قابل توجه عملکرد حرارتی نسبت به آب شد و افزایش سرعت جریان و دمای توده، ضریب انتقال حرارت را تقویت کرد. همچنین، انتخاب بهینه غلظت نانوذرات برای شرایط مختلف ضروری است.

واژه‌های کلیدی: نانوسیال، نانوذره اکسید آهن، Fe_3O_4 ، ضریب انتقال حرارت، سرعت، دما

۱. مقدمه

نانوسیالات که از توزیع ذرات نانومتری در سیالات معمولی حاصل می‌شوند، به‌عنوان نسل جدیدی از سیالات نوآورانه با قابلیت‌های چشمگیر در صنایع مختلف شناخته می‌شوند. این سیالات به دلیل خواص منحصربه‌فرد خود، مانند افزایش قابل توجه در انتقال حرارت، در حوزه‌های مختلف از جمله صنایع حرارتی و برودتی، سیستم‌های خنک‌کننده، مبدل‌های حرارتی، و حتی حوزه‌های پزشکی و انرژی مورد توجه قرار گرفته‌اند. حضور ذرات نانومتری در این سیالات، به دلیل ضریب هدایت حرارتی بالای آن‌ها، باعث می‌شود که با توزیع

در سیال پایه، ضریب هدایت حرارتی مؤثر سیال افزایش یابد [۱]. این ویژگی سبب شده است که نانوسیالات به عنوان یکی از گزینه‌های مهم در بهینه‌سازی فرآیندهای انتقال حرارت مطرح شوند. رفتار و عملکرد نانوسیالات به پارامترهای مختلفی از جمله نوع سیال پایه، غلظت و ویژگی‌های نانوذرات مانند اندازه، شکل، جنس و پوشش سطحی، خصوصیات سطح انتقال حرارت و شرایط عملیاتی نظیر دما، سرعت جریان، فشار و شار حرارتی وابسته است. تغییر در هر یک از این پارامترها می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر عملکرد حرارتی نانوسیالات داشته باشد [۲].

بررسی‌های انجام شده در مطالعات مختلف نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات فلزی و اکسید فلزی به سیالات معمولی می‌تواند موجب افزایش ضریب انتقال حرارت شود. در پژوهشی که به بررسی نانوسیال آلومینا پرداخته است، مشخص شد که در زمان‌های کوتاه، حضور و حرکت نانوذرات در سیال موجب افزایش اختلاط میکروسکوپی و تقویت انتقال حرارت شده و در نتیجه ضریب انتقال حرارت نسبت به سیال پایه افزایش می‌یابد. با این حال، در بازه‌های زمانی طولانی‌تر (حدود ۶۰ تا ۱۰۰۰ دقیقه)، این افزایش اولیه به تدریج کاهش یافته و حتی ممکن است افت کند. این رفتار را می‌توان به تجمع احتمالی نانوذرات و تشکیل لایه رسوبی روی سطح انتقال حرارت نسبت داد که موجب افزایش مقاومت حرارتی و در نتیجه کاهش ضریب انتقال حرارت می‌شود [۳،۴]. همچنین، در مطالعه دیگری که به بررسی استفاده از نانوسیال CuO-آب در مبدل‌های حرارتی پرداخته است، نشان داده شد که این نانوسیال در شرایط جوشش همرفتی و جوشش هسته‌ای، عملکرد انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد. با این حال، تجمع ذرات و رسوب آن‌ها در طول زمان می‌تواند کارایی حرارتی را کاهش دهد [۵].

مطالعات گسترده‌ای بر روی نانوسیالات مختلف از جمله آلومینا-آب، اکسید مس-آب و اکسید تیتانیوم-آب انجام شده است. نتایج این پژوهش‌ها حاکی از آن است که افزایش غلظت نانوذرات در سیال پایه، در بسیاری از شرایط می‌تواند ضریب انتقال حرارت را بهبود بخشد. در این میان، نانوسیال آلومینا-آب در برخی مطالعات بیشترین تأثیر مثبت را نشان داده است [۶،۷]. با این حال، بهبود انتقال حرارت با افزایش غلظت همواره خطی و نامحدود نیست و در بسیاری از موارد به پایداری نانوسیال، شرایط عملکردی و کیفیت پراکنش ذرات وابسته است.

یکی از سازوکارهای مهمی که می‌تواند در زمان‌های طولانی موجب کاهش کارایی انتقال حرارت در نانوسیالات شود، پدیده تجمع نانوذرات است. بر اثر برهم‌کنش‌های بین‌ذره‌ای، نانوذرات ممکن است به یکدیگر متصل شده و خوشه‌هایی با اندازه بزرگ‌تر تشکیل دهند. افزایش اندازه ذرات می‌تواند پایداری نانوسیال را کاهش داده و احتمال ته‌نشست رسوب روی سطح انتقال حرارت را افزایش دهد. تشکیل این لایه رسوبی به عنوان یک مقاومت حرارتی اضافی در مسیر انتقال حرارت عمل کرده و در نتیجه می‌تواند باعث کاهش ضریب انتقال حرارت در مقایسه با شرایط پایدار اولیه شود [۸،۹]. برای کاهش این مشکل، از سورفکتانت‌هایی مانند SDS استفاده می‌شود که مانع از ته‌نشین شدن ذرات شده و به پراکندگی مناسب آن‌ها کمک می‌کند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده از SDS به میزان ۰/۵ درصد وزنی می‌تواند پایداری بلندمدت محلول نانوسیالات اکسید آهن را بهبود بخشد [۱۰].

آمبرین^۱ و کیم^۲ در پژوهش مروری خود نشان دادند که رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی نانوسیالات به شدت تحت تأثیر غلظت نانوذرات، اندازه ذرات، دمای سیال و پایداری سوسپانسیون قرار دارد. آن‌ها همچنین نشان دادند که اگرچه نانوسیالات می‌توانند موجب بهبود انتقال حرارت شوند، اما این بهبود همواره یکنواخت نبوده و به شرایط عملیاتی و کیفیت پراکنش ذرات وابسته است. بنابراین، درک تعادل میان افزایش انتقال حرارت و افت عملکرد ناشی از تجمع ذرات یا ته‌نشینی، برای تحلیل رفتار نانوسیالات ضروری است [۱۱].

شار حرارتی سطحی نیز یکی از پارامترهای مؤثر بر رفتار انتقال حرارت در نانوسیالات، از جمله نانوسیال اکسید آهن، محسوب می‌شود. با افزایش شار حرارتی، گرادیان دمایی در نزدیکی سطح گرم‌شونده افزایش یافته و در نتیجه شدت جابه‌جایی حرارتی بین سطح و سیال تقویت می‌شود. در حضور نانوذرات، این اثر می‌تواند با افزایش برهم‌کنش‌های حرارتی در مقیاس میکروسکوپی و بهبود انتقال انرژی در سیال همراه باشد. با این حال، میزان این بهبود به شرایط عملیاتی نظیر غلظت نانوذرات، دمای سیال و پایداری سوسپانسیون وابسته است. مطالعات نشان داده‌اند که در بازه‌های مشخصی از شرایط عملیاتی، افزایش شار حرارتی می‌تواند منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه شود، هرچند این رفتار به شدت تحت تأثیر شرایط آزمایش و ویژگی‌های پراکنش ذرات قرار دارد [۱۱، ۱۲].

دمای توده سیال نیز از دیگر پارامترهای کلیدی در عملکرد نانوسیالات است، زیرا می‌تواند خواص ترموفیزیکی مانند هدایت حرارتی، ویسکوزیته و پایداری سوسپانسیون را تغییر دهد. با افزایش دمای توده سیال، حرکت مولکولی و انرژی جنبشی ذرات افزایش یافته و این امر می‌تواند موجب تقویت مکانیسم‌های انتقال حرارت از طریق برخوردهای بیشتر ذرات نانو با یکدیگر و با مولکول‌های سیال شود. علاوه بر این، افزایش دما معمولاً باعث کاهش ویسکوزیته نانوسیال می‌شود که به بهبود حرکت سیال، کاهش مقاومت جریان و افزایش ضریب انتقال حرارت کمک می‌کند. به عنوان مثال، در نانوسیال اکسید آهن، افزایش دمای توده سیال می‌تواند موجب بهبود ضریب انتقال حرارت شود، زیرا حرکت ذرات نانو تقویت شده و ویسکوزیته سیال کاهش می‌یابد [۸، ۱۰]. با این حال، افزایش بیش از حد دما ممکن است پایداری نانوسیال را کاهش داده و احتمال تجمع یا ته‌نشینی ذرات را افزایش دهد. در چنین شرایطی، تغییرات خواص ترموفیزیکی و تشکیل احتمالی لایه‌های رسوبی یا عایق بر روی سطح انتقال حرارت می‌تواند کارایی سیستم را کاهش دهد. بنابراین، تنظیم مناسب دمای کاری برای ایجاد تعادل میان بهبود عملکرد حرارتی و جلوگیری از ناپایداری نانوسیال ضروری است [۱۳، ۱۴].

غلظت نانوذرات نیز یکی از عوامل تأثیرگذار مهم بر عملکرد حرارتی نانوسیالات است. افزایش غلظت نانوذرات می‌تواند از طریق افزایش هدایت حرارتی مؤثر و افزایش تعداد ذرات فعال در انتقال انرژی، به بهبود بازده حرارتی کمک کند؛ اما این بهبود تنها تا یک حد مشخص ادامه می‌یابد. در غلظت‌های بالاتر، مشکلاتی مانند افزایش ویسکوزیته، افت فشار، تجمع و ته‌نشینی ذرات و کاهش پایداری نانوسیال به وجود می‌آید که می‌تواند بر کارایی سیستم تأثیر منفی بگذارد. به طور کلی، در حالی که بسیاری از مطالعات به بهبود انتقال حرارت با افزایش غلظت نانوذرات اشاره کرده‌اند، نتایج بعضاً متناقض بوده و نشان می‌دهد که برای دستیابی به تعادل میان بهبود انتقال حرارت و جلوگیری از مشکلات عملیاتی، انتخاب غلظت بهینه ضروری است [۱۱]. در برخی

¹ Ambreen

² Kim

مطالعات، بهترین عملکرد حرارتی در غلظت‌های متوسط مشاهده شده است. برای نمونه، در یک پژوهش، غلظت ۲ درصد حجمی نانوذرات موجب افزایش ۱۱ درصدی ضریب انتقال حرارت نسبت به سیال پایه شد، اما با افزایش غلظت به ۳ و ۴ درصد، ضریب انتقال حرارت به دلیل افزایش ویسکوزیته و افت فشار کاهش یافت [۱۲]. همچنین، در پژوهشی دیگر درباره نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن، گزارش شد که با افزایش غلظت نانوذرات، ضریب انتقال حرارت ابتدا افزایش می‌یابد، اما پس از رسیدن به یک حد خاص، به دلیل تجمع نانوذرات و افزایش ویسکوزیته سیال کاهش پیدا می‌کند [۱۴]. مطالعات بیشتر نیز نشان داده‌اند که افزایش درصد حجمی نانوذرات، به‌ویژه در نانوسیال اکسید آهن، می‌تواند تا محدوده‌ای موجب بهبود خواص حرارتی و تقویت مکانیسم هدایت حرارتی شود، اما در غلظت‌های بالا، افزایش ویسکوزیته و افت فشار ممکن است کارایی حرارتی را محدود کند [۱۳، ۱۵].

در برخی مطالعات، از نانوذرات Fe_3O_4 به دلیل خواص مغناطیسی آن‌ها استفاده شده است. این پژوهش‌ها نشان داده‌اند که این نانوذرات در حضور میدان مغناطیسی قوی‌تر، می‌توانند انتقال حرارت را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشند. به‌ویژه در اعداد رینولدز پایین، اثر میدان مغناطیسی بر افزایش نرخ انتقال حرارت بسیار چشمگیر گزارش شده است. با این حال، در غلظت‌های بالاتر از ۳ درصد حجمی، تجمع ذرات می‌تواند باعث کاهش عملکرد حرارتی شود [۱۴، ۱۵]. همچنین، نتایج نشان داده‌اند که میدان‌های مغناطیسی متناوب با مختل کردن لایه حرارتی و افزایش حرکت ذرات، می‌توانند نرخ انتقال حرارت را بهبود بخشند، هرچند این اثر در فرکانس‌های بالا کاهش می‌یابد. در پژوهشی که به بررسی آزمایشی استفاده از نانوذرات اکسید آهن در آب به‌عنوان سیال کاری پرداخته شده است، عملکرد لوله حرارتی ترموسیفون با استفاده از نانوسیال اکسید آهن و آب مقطر مقایسه شده است. نانوذرات اکسید آهن با روش لیزر پیرولیز تولید شده و در غلظت‌های ۰، ۲ و ۵/۳ درصد حجمی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که افزودن ۵/۳ درصد حجمی نانوذرات اکسید آهن به آب، عملکرد حرارتی لوله حرارتی را به‌طور قابل توجهی بهبود داده است. همچنین، مشخص شد که افزایش زاویه شیب لوله، در زوایای ۴۵ و ۹۰ درجه، و افزایش غلظت نانوذرات موجب کاهش مقاومت حرارتی و افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود. کاهش مقاومت حرارتی نشان‌دهنده پتانسیل بالای نانوسیال اکسید آهن برای استفاده به‌عنوان سیال کاری در لوله‌های حرارتی با عملکرد حرارتی بالاست [۱۳].

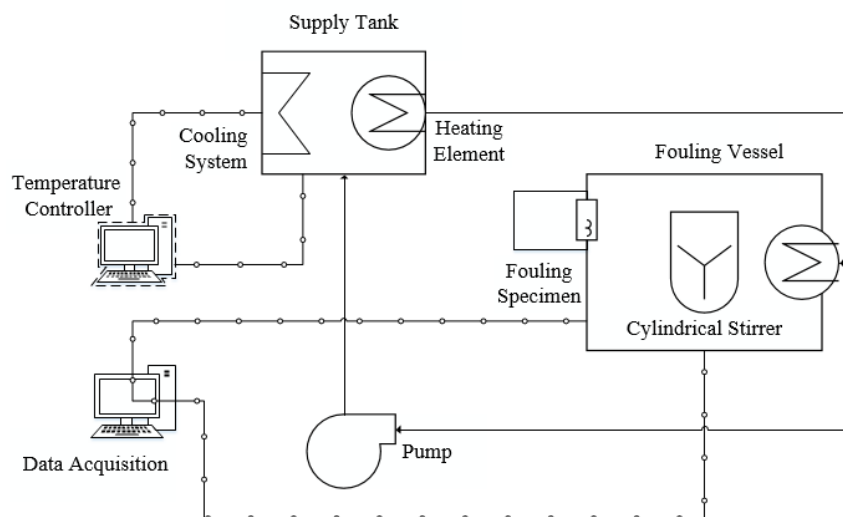
با وجود مطالعات گسترده انجام‌شده درباره نانوسیالات، نتایج گزارش‌شده نشان می‌دهد که عملکرد حرارتی این سیالات به‌شدت به شرایط عملیاتی، غلظت نانوذرات و پایداری سوسپانسیون وابسته است. به‌ویژه در مورد نانوسیال اکسید آهن-آب، اثر پارامترهایی مانند سرعت جریان، شار حرارتی سطحی، دمای توده سیال و غلظت نانوذرات همچنان نیازمند بررسی تجربی دقیق‌تر است. بسیاری از مطالعات پیشین بیشتر بر اثر غلظت، میدان مغناطیسی یا نوع نانوذره تمرکز داشته‌اند، در حالی که اثر دمای توده سیال در کنار سایر پارامترهای عملیاتی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، پژوهش حاضر به بررسی تجربی تأثیر پارامترهای عملیاتی شامل سرعت سیال، دمای توده، شار حرارتی سطحی و غلظت نانوذرات اکسید آهن در سیال پایه آب می‌پردازد. شرایط عملیاتی این کار با بسیاری از مطالعات قبلی متفاوت است، به‌طوری‌که در مطالعات پیشین اثر دمای توده کمتر بررسی شده، در حالی که در این پژوهش این پارامتر نیز مورد توجه قرار گرفته است. هدف اصلی

این تحقیق، تحلیل عمیق‌تر رفتار حرارتی نانوسیال اکسید آهن-آب و بررسی تأثیر شرایط عملیاتی بر ضریب انتقال حرارت و دمای سطح است.

۲. معرفی دستگاه آزمایشگاهی و فرآیند آزمایش‌ها

۱.۲. دستگاه آزمایشگاهی

به منظور بررسی دقیق تأثیر پارامترهای عملیاتی بر انتقال حرارت نانوسیال اکسید آهن، دستگاهی طراحی و ساخته شد که می‌توان از آن برای بررسی پارامترهای مختلف مانند نمونه سطح انتقال حرارت، دمای سطح و شار حرارتی، سرعت و غلظت سیال استفاده کرد. در پژوهش‌های قبلی این دستگاه به طور کامل توضیح داده شده است بنابراین در اینجا به اختصار مورد بحث قرار خواهد گرفت [۱۶، ۱۷]. سیستم آزمایشی، همان‌طور که در شکل ۱ به صورت شماتیک نمایش داده شده، یک سیستم دسته‌ای با ظرفیت ۱/۸ لیتر محلول کاری است که از چهار بخش اصلی تشکیل می‌شود: (۱) مخزن رسوب‌گیری، (۲) مخزن تأمین دمای ثابت، (۳) سیستم جمع‌آوری داده‌ها و (۴) پمپ. سیستم دما ثابت برای حفظ دمای سیال نانو و حفظ وضعیت فوق‌اشباع از کویل حرارتی داخلی استفاده می‌کند. دمای سیال توسط ترموکوپل اندازه‌گیری و توسط سیستم کنترلی تنظیم می‌شود. برای همگن‌سازی سیال، از همزن استوانه‌ای با سرعت قابل تنظیم (۱۱ تا ۹۱ سانتی‌متر بر ثانیه) استفاده می‌شود. همچنین، برای جلوگیری از تجمع نانو ذرات در کف مخزن، یک همزن پروانه‌ای کوچک در داخل همزن اصلی قرار دارد. طراحی این سیستم به گونه‌ای صورت گرفته است که امکان فراهم آوردن شرایط کنترل‌شده و دقیقی را برای بررسی فرآیندها فراهم کند. مخزن تأمین دما به‌ویژه برای ایجاد محیطی با دمای ثابت جهت حفظ پایداری محلول درون مخزن رسوب طراحی شده و شامل اجزایی نظیر مخزن آب، المنت گرمایشی برای افزایش دما، سیستم خنک‌کننده برای تنظیم دمای مطلوب، کنترل‌کننده دقیق دما، پمپ برای جریان‌دهی سیال، فن برای تهویه و یک سیستم کنترلی هوشمند برای مدیریت عملکرد اجزا است [۱۶، ۱۷]. شکل ۲، دستگاه آزمایشی استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در این مطالعه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بر اساس قانون سرمایش نیوتن و با استفاده از شار حرارتی اعمال‌شده به سطح گرم‌شونده و اختلاف دمای بین سطح و دمای توده سیال محاسبه شد. استفاده از همزن استوانه‌ای و همزن پروانه‌ای جهت اختلاط مناسب سیال منجر به کاهش گرادیان‌های دمایی موضعی و دستیابی به دمای یکنواخت توده سیال در سیستم آزمایشی گردید.



شکل ۱، شماتیکی از دستگاه آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش

Figure 1. Schematic of the experimental setup



شکل ۲، دستگاه آزمایشی استفاده شده در این پژوهش

Figure 2. Experimental setup used in this study

۲.۲. آماده سازی محلول و فرآیند انجام آزمایش‌ها

در ابتدا با توجه به حجم $1/8$ لیتری مخزن سیال و خلوص بالای ۹۹ درصد وزنی مطلوب از نانوذره اکسید آهن، جرم آن محاسبه می‌شود. طبق مطالعات پیشین که بر روی نانوذره اکسید آهن صورت گرفته است، میزان سورفکتانت SDS بهینه برای حداکثر پایداری نانوسیال، حدوداً $1/7$ برابر میزان نانو ذره است [۱۰]. پس با توجه به جرم نانوذره، جرم سورفکتانت (SDS, Merck, >99%) نیز محاسبه می‌گردد. سپس نانوذره و سورفکتانت در ۵۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه ریخته شده و به مدت ۱۰ دقیقه با توان ۲۰۰ ولتراسونیک^۳ می‌گردد. در نهایت با به حجم رساندن محلول، سیال عملیاتی مورد نظر آماده است. در شکل ۳، نمونه های سیال و

³ Ultrasonic

نانوسیال استفاده شده در این آزمایش به ترتیب از راست، غلظت صفر (آب) و غلظت های ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۵ و ۰/۰۱ درصد وزنی از نانوسیال اکسید آهن در آب مشاهده می گردد.



شکل ۳، نمونه های سیال و نانوسیال استفاده شده به ترتیب از راست، غلظت صفر (آب) و غلظت های ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۵ و ۰/۰۱ درصد وزنی از نانوسیال اکسید آهن در آب

Figure 3. Samples of the base fluid and nanofluids used in this study, from right to left, the samples correspond to pure water (0 wt%) and iron oxide nanofluids with concentrations of 0.001, 0.005, and 0.01 wt%

فرآیند انجام آزمایش به این صورت است که، محلول نانو سیال در مخزن دستگاه آزمایش که در شکل ۱ شماتیکی از آن نشان داده شده است ریخته می شود و پس از رسیدن به دمای توده سیال که از پیش تنظیم شده است، آزمایش شروع می گردد. داده های مربوط به دما، سرعت و شار حرارتی به صورت آنالین و لحظه ای توسط یک سیستم جمع آوری داده^۴ با فرکانس بالا ثبت شدند. سنسورهای دما در محل های ورودی و خروجی و نقاط استراتژیک جریان قرار گرفتند تا دمای توده سیال با دقت کافی و به عنوان نماینده میانگین جریان اندازه گیری شود. در این پژوهش تاثیر پارامترهای عملیاتی (سرعت، دمای توده، غلظت نانوذره و شارحرارتی) بر انتقال حرارت نانوسیال اکسید آهن بررسی شد و برای این منظور در آزمایش های مستقل با ثابت قرار دادن سه پارامتر، پارامتر چهارم مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمایش از سرعت های ۱۷-۳۴ سانتی متر بر ثانیه، دمای توده ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد، شار انتقال حرارت ۱۸، ۳۱، ۶۲ و ۹۳ کیلووات بر مترمربع استفاده می شود. همچنین مطابق شکل ۳ در این آزمایش از مقادیر غلظت نانو ذرات برابر با ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۵ و ۰/۰۱ درصد وزنی استفاده شد.

۳. نتایج

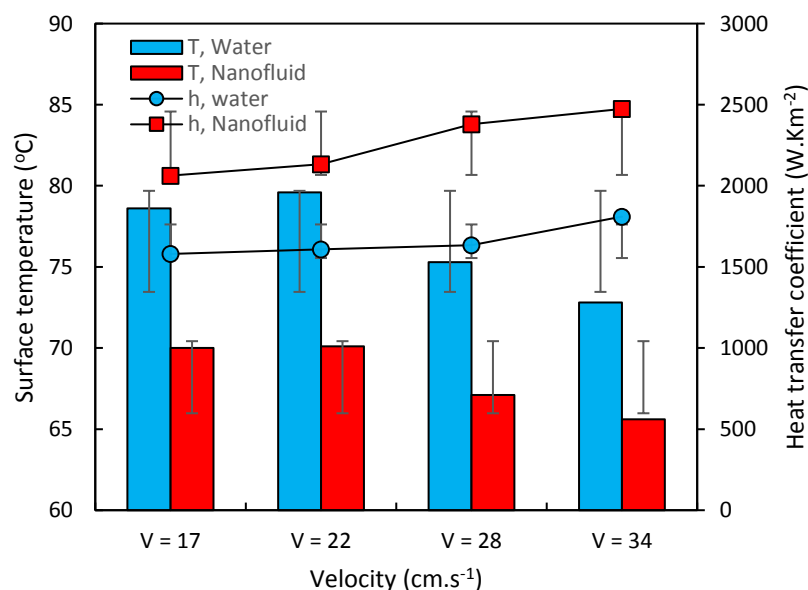
۱.۳. تاثیر سرعت جریان سیال

شکل ۴ تغییرات دمای سطح و ضریب انتقال حرارت را برای آب خالص و نانوسیال اکسید آهن (۰/۰۱ درصد وزنی) در بازه سرعتی ۱۷ تا ۳۴ سانتی متر بر ثانیه نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش سرعت جریان، دمای سطح در هر دو سیال روند کاهشی داشته است. در آب خالص، افزایش سرعت از ۱۷ به ۳۴ سانتی متر بر ثانیه منجر به کاهش دمای سطح از ۷۸/۵ به ۷۲/۸ درجه سانتی گراد شد. این در حالی است که نانوسیال

^۴ Data acquisition system

در تمامی سرعت‌ها دمای سطح کمتری را ثبت کرده و در سرعت بیشینه، دمای سطح را به $65/6$ درجه سانتی‌گراد کاهش داده است که نشان‌دهنده توانایی بالاتر نانوسیال در دفع حرارت از سطح است. مطابق با نتایج شکل ۴ که با رفتار شناخته‌شده انتقال حرارت جابجایی سازگار است، ضریب انتقال حرارت با افزایش سرعت (و به تبع آن عدد رینولدز) روند صعودی دارد. در آب خالص، افزایش سرعت باعث بهبود ۱۶ درصدی ضریب انتقال حرارت (از 1570 به 1820 وات بر مترمربع بر کلونین شده است. اما در نانوسیال، این بهبود بسیار چشمگیرتر بوده و با افزایش سرعت، ضریب انتقال حرارت با ۲۱ درصد رشد به مقدار 2480 وات بر مترمربع بر کلونین رسیده است.

تحلیل این نتایج نشان می‌دهد که افزایش سرعت علاوه بر تقویت جابه‌جایی اجباری (از طریق افزایش عدد رینولدز)، به همگن‌سازی بهتر نانوذرات در جریان و جلوگیری از تجمع موضعی آن‌ها کمک می‌کند. در سرعت‌های بالاتر، نانوذرات با نفوذ بهتر به لایه مرزی حرارتی و افزایش اختلاط میکروسکوپی، سهم بیشتری در انتقال حرارت ایفا می‌کنند. به طوری که میزان بهبود ضریب انتقال حرارت نانوسیال نسبت به آب از ۳۰٪ در سرعت پایین به ۳۶٪ در سرعت بالا افزایش یافته است. این امر تأیید می‌کند که تأثیر مثبت حضور نانوذرات اکسید آهن در سرعت‌های بالاتر و جریان‌های آشسته‌تر نمود بیشتری دارد.



شکل ۴، تأثیر سرعت جریان بر دمای سطح و ضریب انتقال حرارت آب خالص و نانوسیال اکسید آهن با ۰/۰۱ درصد وزنی و با مقادیر ثابت دمای بالک 40 درجه سانتی‌گراد و شار حرارتی 62 کیلووات بر مترمربع

Figure 4. Effect of flow velocity on the surface temperature and heat transfer coefficient of pure water and iron oxide nanofluid (0.01 wt%) at a constant bulk temperature of 40 °C and a surface heat flux of 62 kW/m²

۲.۳. تأثیر شار حرارتی

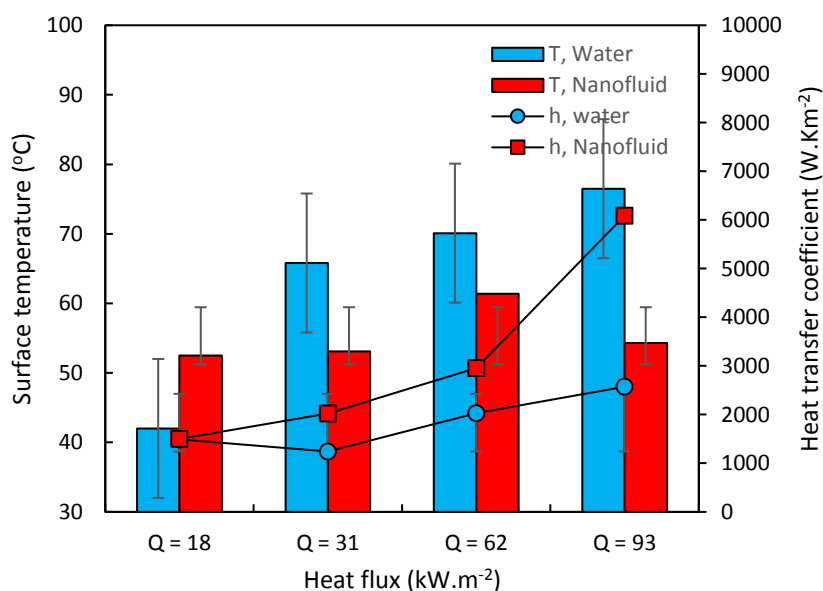
شکل ۵ تأثیر شار حرارتی سطحی را بر دمای سطح و ضریب انتقال حرارت در سرعت ثابت 17 سانتی‌متر بر ثانیه نشان می‌دهد. نتایج نشان‌دهنده یک رفتار غیرخطی در نانوسیال اکسید آهن نسبت به آب خالص است. در آب خالص، با افزایش شار حرارتی از 18 به 93 کیلووات بر مترمربع، دمای سطح از 42 به 76 درجه

سانتی گراد افزایش یافته و ضریب انتقال حرارت با یک شیب ملایم از حدوداً ۱۵۵۰ به ۲۹۸۰ وات بر مترمربع بر کلون رسیده است که ناشی از تقویت جابه‌جایی طبیعی در کنار جابه‌جایی اجباری است. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال با افزایش شار حرارتی یک روند صعودی مستمر و منظم را نشان می‌دهد و از مقدار تجربی ۱۵۵۰ وات بر مترمربع بر کلون در شار ۱۸ کیلووات بر مترمربع به حدود ۶۱۰۰ وات بر مترمربع بر کلون در شار ۹۳ کیلووات بر مترمربع افزایش می‌یابد. این روند صعودی منظم با فیزیک شناخته‌شده انتقال حرارت همخوانی کامل دارد، چرا که با افزایش شار حرارتی، دمای لایه مرزی افزایش یافته که به نوبه خود منجر به کاهش لزجت محلی سیال پایه می‌گردد. این کاهش لزجت در کنار تقویت حرکت براونی نانوذرات در دماهای بالاتر، انتقال حرارت را تسهیل کرده و منجر به بهبود مستمر، منظم و غیرنوسانی ضریب انتقال حرارت همرفتی می‌گردد. همچنین بر اساس قانون سرمایش نیوتن، ضریب انتقال حرارت به صورت معادله (۱) تعریف می‌شود:

$$h = \frac{q''}{(T_s - T_b)} \quad (1)$$

بنابراین با افزایش شار حرارتی، مقدار صورت رابطه (۱) افزایش یافته و در نتیجه ضریب انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد.

نکته حائز اهمیت، تأثیر نانوسیال بر کنترل دمای سطح در شارهای حرارتی بالا است. در شار حرارتی بیشینه (۹۳ کیلووات بر مترمربع)، نانوسیال توانسته است دمای سطح را نسبت به آب خالص، ۲۲ درجه سانتی گراد (از ۷۶ به ۵۴ درجه) کاهش دهد. این بهبود عملکرد در شارهای بالا ناشی از افزایش هدایت حرارتی مؤثر سیال و بهبود برهم‌کنش‌های بین ذره‌ای در نزدیکی لایه مرزی است.



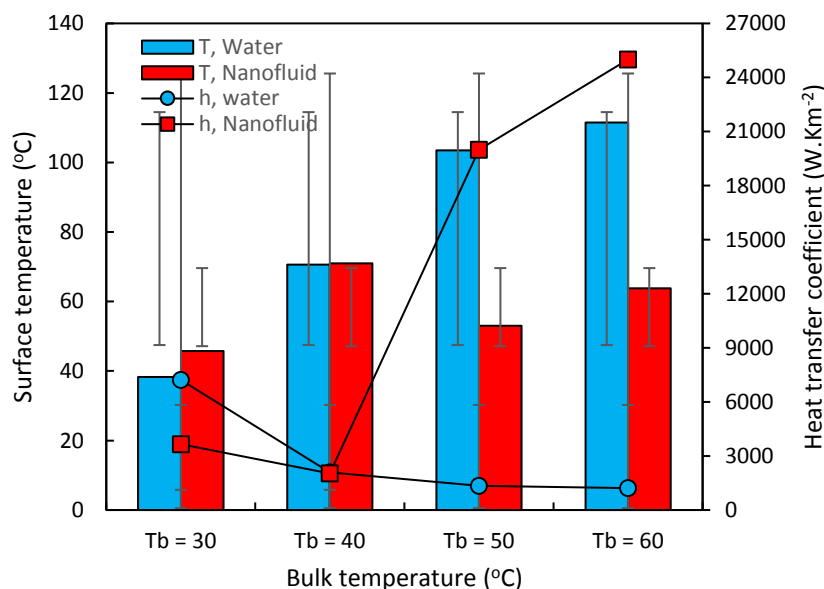
شکل ۵. تأثیر شار حرارت سطحی بر دمای سطح و ضریب انتقال حرارت آب خالص و نانو سیال اکسید آهن با مقادیر ثابت دمای بالک ۴۰ درجه سانتی گراد، غلظت ۰/۰۱ درصد وزنی و سرعت سیال ۱۷ cm.s⁻¹

Figure 5. Impact of surface heat flux on the surface temperature and heat transfer coefficient of pure water and iron oxide nanofluid at a constant bulk temperature of 40 °C, a nanoparticle concentration of 0.01 wt%, and a flow velocity of 17 cm.s⁻¹

۳.۳. تاثیر دمای توده سیال

تاثیر دمای توده سیال بر عملکرد حرارتی نانوسیال اکسید آهن در شکل ۶ نشان داده شده است. با افزایش دمای توده سیال برای آب خالص، ضریب انتقال حرارت کاهش داشته است و دمای سطح نیز از ۴۰ تا حدود ۱۲۰ درجه سانتی گراد افزایش پیدا کرده است.

نانو سیال در دمای توده سیال پایین، عملکرد حرارتی کمی ضعیف تر به نسبت آب داشته است و با افزایش دما، روند بهبود ضریب انتقال حرارت آن به نسب آب بیشتر شده است. در دماهای توده سیال بالا، ضریب انتقال حرارت نانوسیال اکسید آهن به صورت قابل توجهی بالاتر از سیال پایه بوده است که علت آن افزایش انرژی جنبشی ذرات است که باعث تقویت مکانیسم‌های انتقال حرارت از طریق برخوردی مکرر ذرات نانو با یکدیگر و با مولکول‌های سیال می‌شود. شایان ذکر است که در دمای توده سیال ۴۰ درجه سانتی‌گراد، همپوشانی جزئی در ضریب انتقال حرارت مشاهده می‌شود. این رفتار را می‌توان به ماهیت نانوسیال در دماهای پایین نسبت داد، جایی که افزایش لزجت سیال پایه به دلیل حضور نانوذرات، مانع از افزایش شدید انتقال حرارت می‌گردد. با این حال، با افزایش دمای توده سیال به ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد، نانوسیال رفتار بهبودیافته خود را در مقایسه با آب خالص باز می‌یابد که ناشی از افزایش تحرک ذرات و کاهش اثرات لزجت در دماهای بالاست.



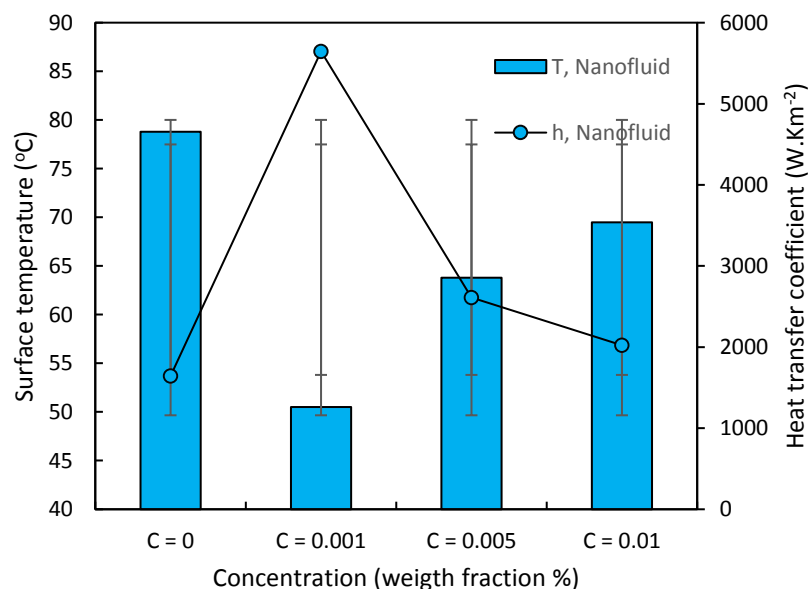
شکل ۶، تاثیر دمای توده سیال بر دمای سطح و ضریب انتقال حرارت آب خالص و نانو سیال اکسید آهن با مقادیر ثابت شار حرارتی ۶۲ کیلووات بر متر مربع، غلظت ۰/۰۱ درصد وزنی و سرعت سیال 17 cm.s^{-1}

Figure 6. Effect of bulk fluid temperature on the surface temperature and heat transfer coefficient of pure water and iron oxide nanofluid at a constant heat flux of 62 kW/m^2 , a nanoparticle concentration of 0.01 wt%, and a flow velocity of 17 cm.s^{-1}

۴.۳. تاثیر غلظت نانو ذرات

همانطور که قبلاً بیان شد، آزمایش‌های پارامترهای عملیاتی برای نانوسیال اکسید آهن در غلظت نانو ذره ثابت ۰/۰۱ درصد وزنی انجام شده است. به منظور بررسی تاثیر میزان نانوذره بر عملکرد حرارتی نانوسیال، غلظت‌های دیگری نیز در شکل ۷ مورد بررسی قرار گرفت. به منظور جداسازی دقیق تأثیر غلظت نانوذرات بر

ویژگی‌های انتقال حرارت، یک مطالعه پارامتریک سیستماتیک انجام شد که در آن سایر پارامترهای عملیاتی شامل شار حرارتی، دمای بالک و سرعت سیال ثابت نگه داشته شدند. این رویکرد تضمین می‌کند که تغییرات مشاهده‌شده در ضریب انتقال حرارت، صرفاً ناشی از تغییرات خواص نانوسیال و برهم‌کنش‌های نانوذره-سیال است. لازم به ذکر است که حضور نانوذرات موجب تغییر خواص ترموفیزیکی سیال پایه از جمله هدایت حرارتی و لزجت می‌شود که این تغییرات بر اعداد بدون بعد نظیر رینولدز و پرانتل اثر گذاشته و در نهایت رفتار ضریب انتقال حرارت را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مطابق با نتایج ارائه‌شده در شکل ۷، مشاهده می‌شود که با افزایش کسر وزنی نانوذرات از ۰/۰۰۱ به ۰/۰۱، ضریب انتقال حرارت روند کاهشی داشته و متعاقب آن دمای سطح افزایش یافته است. اگرچه حضور نانوذرات در غلظت‌های بسیار پایین (۰/۰۰۱) به دلیل افزایش هدایت حرارتی و تقویت جابجایی موجب بهبود انتقال حرارت می‌شود، اما افزایش غلظت به مقدار ۰/۰۱ منجر به افت عملکرد سیستم شده است. این رفتار را می‌توان به پدیده تجمع نانوذرات و تشکیل خوشه‌های بزرگتر در غلظت‌های بالاتر نسبت داد. با افزایش تعداد ذرات در واحد حجم، احتمال برخورد و چسبندگی ذرات افزایش یافته که این امر منجر به کاهش پایداری سوسپانسیون و ته‌نشینی ذرات می‌گردد. تشکیل لایه‌ای از ذرات تجمع‌یافته بر روی سطح حرارتی نه تنها باعث ایجاد یک مقاومت حرارتی اضافی (رسوب سطحی) می‌شود، بلکه با افزایش لزجت محلی در لایه مرزی، از انتقال حرارت موثر جلوگیری می‌کند. در نتیجه، در غلظت ۰/۰۱، اثرات منفی ناشی از ناپایداری و تجمع ذرات بر مزایای ناشی از افزایش هدایت حرارتی غلبه کرده و موجب کاهش ضریب انتقال حرارت همرفتی می‌گردد.



شکل ۷، تاثیر غلظت نانوذره اکسید آهن بر دمای سطح و ضریب انتقال حرارت نانو سیال اکسید آهن با مقادیر ثابت شار حرارتی ۶۲ کیلووات بر مترمربع، دمای بالک ۴۰ درجه سانتی گراد و سرعت سیال 17 cm.s^{-1}

Figure 7. Impact of iron oxide nanoparticle concentration on the surface temperature and heat transfer coefficient of iron oxide nanofluid at a constant heat flux of 62 kW/m^2 , a bulk temperature of 40°C , and a flow velocity of 17 cm.s^{-1}

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر پارامترهای عملیاتی بر انتقال حرارت نانوسیال اکسید آهن بررسی شده است. سرعت جریان در بازه‌ی ۱۷ تا ۳۴ سانتی‌متر بر ثانیه، شار حرارتی سطحی در محدوده‌ی ۱۸ تا ۹۳ کیلووات بر مترمربع و دمای توده سیال بین ۳۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین، غلظت نانوذرات در درصدهای وزنی ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۵ و ۰/۰۱ بررسی شد. نتایج نشان داد استفاده از نانو سیال اکسید آهن ضریب انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. به طور کل پارامترهای عملیاتی باید بهینه شوند در محدوده‌های مختلف که بیشترین ضریب انتقال حرارت را داشته باشند. در زیر نتایج به دست آمده از این پژوهش را به صورت خلاصه ذکر می‌گردد.

- در شرایط عملیاتی یکسان (شار حرارتی، دمای توده و سرعت جریان ثابت)، استفاده از نانوسیال اکسید آهن بر پایه آب در مقایسه با سیال پایه در اغلب دماهای توده سیال موجب بهبود عملکرد حرارتی می‌شود، اگرچه در دماهای پایین‌تر سیال (مانند حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد) این بهبود چندان محسوس نیست.
- با افزایش سرعت جریان، ضریب انتقال حرارت در هر دو سیال افزایش می‌یابد، اما نرخ افزایش این ضریب برای نانوسیال نسبت به سیال پایه بیشتر است که می‌تواند ناشی از تغییر خواص ترموفیزیکی سیال و تقویت مکانیزم‌های انتقال حرارت در حضور نانوذرات باشد.
- توانایی انتقال حرارت نانوسیال اکسید آهن به دمایی که در آن به کارگرفته می‌شود بسیار وابسته بوده به طوری که در دماهای بالا (۵۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد)، ضریب انتقال حرارتی تا بیش از ۸ برابر نسبت به ضریب انتقال حرارت آب دارد.
- با وجود این که افزایش نانوذره اکسید آهن به آب، موجب افزایش ضریب انتقال حرارت آن می‌شود، اما غلظت آن پارامتر مهمی بوده که باید در شرایط عملیاتی مورد نظر بهینه شود. در این پژوهش در محدوده شرایط عملیاتی و غلظت نانوذره‌ی بررسی شده، افزایش غلظت نانوذره از ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۱ درصد وزنی محلول، موجب کاهش بیش از ۵۰ درصدی ضریب انتقال حرارت شد.

مراجع

- [1] Sajjadi, S. M., & Tavakoli, A. (2019). Calculation of the Thermal Conductivity Coefficient of Water and TiO₂ Nanofluid with Different Models. *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 18(104), 22-30. (In Persian)
- [2] Vafaei, S., & Borca-Tasciuc, T. (2014). Role of nanoparticles on nanofluid boiling phenomenon: Nanoparticle deposition. *Chemical Engineering Research and Design*, 92(5), 842–856.
- [3] Choi, S. U., & Eastman, J. A. (1995). *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles* (Report No. ANL/MSD/CP-84938). Argonne National Lab (ANL).
- [4] Salari, E., Peyghambarzadeh, M., Sarafraz, M., & Hormozi, F. (2016). Boiling heat transfer of alumina nano-fluids: Role of nanoparticle deposition on the boiling heat transfer coefficient. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 60(4), 252-258.

- [5] Nikkah, V., Sarafraz, M. M., Hormozi, F., & Peyghambarzadeh, S. M. (2015). Particulate fouling of CuO–water nanofluid at isothermal diffusive condition inside the conventional heat exchanger-experimental and modeling. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 60, 83–95.
- [6] Dibaei Bonab, M. H., Shafiee, M. B., & Nobakhti, M. H. (2013). Experimental investigation of forced convective heat transfer of Fe₃O₄ nanofluid under an alternating magnetic field. *Journal of Nano-materials*, 13(5), 62–71. (In Persian)
- [7] Nazari, M., Maleki, S., Shiva, S., Shakeri, M., & Amin, A. (2018). Experimental investigation of forced convective heat transfer of nanofluid in a curved tube. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 50(2), 347–358. (In Persian)
- [8] Nikoo, A. H., Malayeri, M. R., & Al-Janabi, A. (2016). Modification of heat transfer surfaces to reduce crystallization fouling based on polar component of surface energy. *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 15(88), 48-58. (In Persian)
- [9] Nikoo, A. H., & Malayeri, M. R. (2017). Studying the effect of surface properties on fouling formed on modified surfaces. *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 16(90), 86-104. (In Persian)
- [10] Shalbafan, M., Esmaeilzadeh, F., & Vakili-Nezhaad, G. R. (2020). Enhanced oil recovery by wettability alteration using iron oxide nanoparticles covered with PVP or SDS. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 607, 125509.
- [11] Ambreen, T., & Kim, M. H. (2018). Heat transfer and pressure drop correlations of nanofluids: A state of art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 564–583.
- [12] Pandey, S. D., & Nema, V. K. (2012). Experimental analysis of heat transfer and friction factor of nanofluid as a coolant in a corrugated plate heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 38, 248–256.
- [13] Humenic, G., Humenic, A., Morjan, I., & Dumitrache, F. (2011). Experimental study of the thermal performance of thermosyphon heat pipe using iron oxide nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(1–3), 656–661.
- [14] Zhang, X., & Zhang, Y. (2021). Heat transfer and flow characteristics of Fe₃O₄-water nanofluids under magnetic excitation. *International Journal of Thermal Sciences*, 163, 106826.
- [15] Dibaei, M., & Kargarsharifabad, H. (2017). New achievements in Fe₃O₄ nanofluid fully developed forced convection heat transfer under the effect of a magnetic field: An experimental study. *Journal of Heat and Mass Transfer Research*, 4(1), 1–11.
- [16] Zarei, A., & Malayeri, M. R. (2023). Deposition of CaSO₄ on structured surfaces during convective heat transfer for utilization in micro heat exchangers. *Experimental Heat Transfer*, 36(7), 1–21.
- [17] Zarei, M., & Molayari, M. (2022). Effect of operating parameters on the formation of calcium sulfate crystallization fouling on heat transfer surfaces. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 41(2), 327–339. (In Persian)

Experimental investigation of enhanced heat transfer of water-based iron oxide nanofluid

Sedigheh Seydi¹, Atefeh Zarei², Amir Hossein Nikoo³, Mohammad Reza Malayeri^{4,*}

1. M.Sc. Student, Department of Chemical Engineering, School of Chemical and Petroleum Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran
2. Ph.D. Student, Department of Chemical Engineering, School of Chemical and Petroleum Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran
3. Assistant Professor, Department of Chemical, Petroleum, and Gas Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran
4. Professor, Department of Chemical Engineering, School of Chemical and Petroleum Engineering, Shiraz University, Shiraz

Malayeri@shirazu.ac.ir

ABSTRACT

Nanofluids enhance heat transfer and reduce energy losses in thermal systems by increasing thermal conductivity and intensifying disturbances in the boundary layer. Their performance depends on the type of base fluid, the concentration and properties of nanoparticles, and operating conditions such as temperature and flow velocity. In this study, the effect of operational parameters on the heat transfer performance of an iron oxide nanofluid was investigated. The flow velocity ranged from 17 to 34 cm·s⁻¹, the surface heat flux from 18 to 93 W·m⁻², and the

bulk fluid temperature from 30 to 60 °C. Nanoparticles were dispersed at weight fractions of 0.001, 0.005, and 0.01, and sodium dodecyl sulfate (SDS) was used as a surfactant to ensure stability. The results showed that at bulk temperatures above 40 °C, the addition of iron oxide nanoparticles significantly improved the thermal performance compared with water. Moreover, increasing the flow velocity and bulk temperature enhanced the heat transfer coefficient of the nanofluid. The results also indicate that optimizing nanoparticle concentration according to operating conditions is essential.

Keywords: Nanofluid, iron oxide nanoparticle, Fe_3O_4 , heat transfer coefficient, velocity, temperature