



مروری بر مطالعات تجربی انتقال حرارت نانوسیالات در جریان‌های آرام، مغشوش و جوشش استخری

نوید بزرگان^{۱*}، نریمان بزرگان^۲

۱. استادیار گروه مهندسی مکانیک، واحد آبادان، دانشگاه آزاد اسلامی، آبادان، ایران
۲. گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

*نویسنده مسئول: n.bozorgan@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰

چکیده

راندمان انرژی تجهیزات انتقال حرارت به تغییرات فلاکس حرارتی ایجاد شده در آن‌ها بستگی دارد. استفاده از سیالات متداولی همچون آب و اتیلن گلیکول به‌عنوان سیالات خنک‌کننده در سیستم خنک‌کاری دستگاه‌های مختلف انتقال حرارت، جوابگوی دفع شار حرارتی بسیار بالا (دهها مگا وات بر متر مربع) نیست. امروزه نانو سیالات به‌عنوان سیالات جدید انتقال حرارت و با اضافه کردن نانو ذرات به سیالاتی که انتقال حرارت پایینی دارند و با ایجاد تغییرات در چگالی، گرمای ویژه و ویسکوزیته این سیالات، به منظور افزایش هدایت حرارتی و بهبود عملکرد انتقال حرارت ساخته می‌شوند. در این پژوهش نتایج تحقیقات آزمایشگاهی در مورد انتقال حرارت در نانوسیالات تحت جریان‌های آرام، مغشوش و همچنین جوشش استخری بحث و بررسی می‌شود.

کلمات کلیدی: نانو سیال، ضریب هدایت حرارتی، جریان آرام، جریان مغشوش، جوشش استخری.

مقدمه

با توسعه سریع تکنولوژی مدرن در صنایع مختلف، افزایش انتقال حرارت، کاهش زمان انتقال حرارت، کوچک‌سازی اندازه مبدل-های حرارتی و در نهایت افزایش انرژی و راندمان سوختی یک نیاز جدی است. خنک‌کاری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های موجود در صرفه‌جویی انرژی و افزایش بهره‌وری بسیاری از صنایع مطرح می‌باشد. اولین مانع جدی در فشرده‌سازی و کارآمد کردن دستگاه‌های انتقال حرارت، خواص ضعیف انتقال حرارت سیالات متداولی همچون آب و اتیلن گلیکول می‌باشد. در فرآیندهای انتقال حرارت هدایتی و جابه‌جایی یکی از مشخصه‌های موثر سیال ضریب هدایت حرارتی آن است. بالا بودن این مشخصه بیانگر بالا بودن نرخ انتقال حرارت توسط هر یک از دو مکانیسم یاد شده است. هدایت حرارتی در ذرات جامد حدوداً صدها برابر بیشتر از سیالات رایج در انتقال حرارت می‌باشد. بنابراین ساخت سوسپانسیونی از ذرات ریز جامد در سیالات خالص یک راهکار جدید برای افزایش خواص انتقال حرارت سیالات حامل انرژی می‌باشد. اما سوسپانسیون‌ها با ذرات معلق (فلزی، غیرفلزی و پلیمری) در اندازه‌های میلی‌متری و حتی میکرومتری مشکلاتی همچون اثر ساییدگی ذرات، مسدود کردن مسیر کانال، فرسایش شبکه لوله و کاهش در انتقال ممنتم و افزایش افت فشار را ایجاد می‌کردند. همچنین به مشکلات آن‌ها باید ناپایداری و مشکلات رئولوژیکی را نیز افزود. به‌خصوص اینکه ذرات شدیداً متمایل به ته نشین شدن در سوسپانسیون هستند. راهی که به کمک مهندسی سیالات آمد و به بهبود ویژگی‌های انتقال حرارت سیالات منتهی شد علم نانو تکنولوژی بود. استفاده از ذرات با اندازه نانو متری در سیال خالص پایه برای اولین بار توسط چوی [۱] مطرح شد و او این سوسپانسیون را نانوسیال نامید. نانوسیالات در مقایسه با سوسپانسیون‌های حاوی ذرات میکرومتری و میلی‌متری، پایداری طولانی‌تر و خواص رئولوژیکی بهتری از خود نشان می‌دهند. در ده سال گذشته بسیاری از محققین خواص انتقال حرارت نانو سیالات گوناگون را در کاربردهای مختلف انتقال حرارت بررسی نموده‌اند [۲-۷]. فالکنر و همکاران [۸] با استفاده از نانوسیال در سیستم خنک‌کننده کانال جریان شاهد

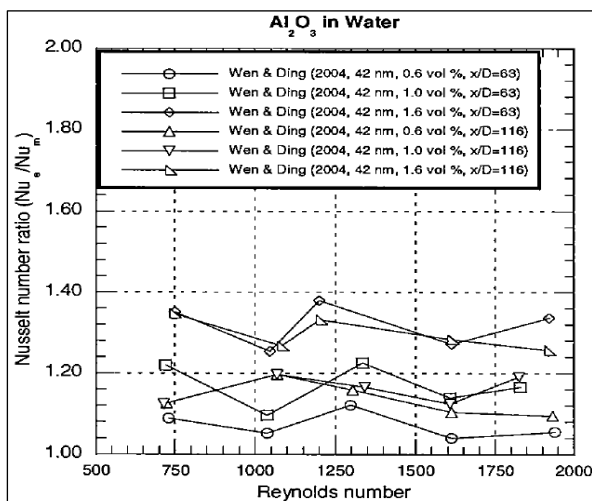


افزایش میزان خنک‌کنندگی بودند. تسای و همکاران [۹] از نانو سیالات با اندازه‌های مختلف (۲-۳ و ۱۵-۷۵ نانومتر) در یک لوله حرارتی استفاده کردند و مقاومت حرارتی را بین ۰/۱۷ تا ۰/۲۱۵ کلوین بر وات محاسبه نمودند. کیم و همکاران [۱۰] نانو ذرات مس، اکسید مس و آلومینا را در سیستم جذبی محلول آب آمونیاک به کار بردند. آن‌ها مشاهده نمودند که در غلظت‌های حجمی ۱٪ نانو ذرات مس و ۱۸/۷٪ آمونیاک، حداکثر نسبت جذب موثر با افزایش در حدود ۳/۲۱ برابر ایجاد می‌گردد. نویی ان و همکاران [۱۱] از نانو سیال آلومینا در سیستم خنک‌کنندگی الکترونیکی استفاده نمودند. هنگامی که غلظت حجمی ۶/۸٪ بود آنگاه ضریب انتقال حرارت ۴۰٪ افزایش یافته بود. آن‌ها در تحقیقات از نانو ذرات ۳۶ و ۴۷ نانومتری استفاده کرده و نشان دادند که در غلظت‌های حجمی یکسان استفاده از نانو ذرات کوچکتر باعث افزایش بیشتر ضریب انتقال حرارت می‌شود. سریکان و همکاران [۱۲] با افزودن نانو ذرات به سیالات برش توانستند عملکرد حرارتی آن‌ها را افزایش دهند. آن‌ها با پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت سیال برش، دمای تولید شده در فرآیند ماشین‌کاری را محاسبه و با نتایج تجربی مقایسه نمودند. این محققان با شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار انسیس نشان دادند که با افزودن نانو ذرات به سیال برش می‌توان عملکرد ماشین‌کاری را افزایش داد، به طوری که با افزودن نانو ذرات به سیال برش، ظرفیت انتقال حرارت تا حدود ۶٪ افزایش خواهد یافت. محمد و همکاران [۱۳] با مطالعه عددی، تاثیر انواع نانو سیالات را بر روی عملکرد مبدل حرارتی میکرو کانال بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که نانو سیالات آلومینیوم و نقره بیشترین ضریب انتقال حرارت و کمترین افت فشار را در مقایسه با نانو سیالات دیگر دارند. تاکنون تحقیقات تئوری و تجربی بسیاری در مورد افزایش انتقال حرارت در نانو سیالات انجام شده است و نتایج متفاوت آن‌ها مبین نیاز به تحقیقات وسیع‌تر و جامع‌تر می‌باشد. در این پژوهش با بررسی نتایج تجربی گروه‌های تحقیقاتی مختلف و با استفاده از نتایج بدست آمده از آزمایشگاه ملی آرگون آمریکا [۱۴] در مورد انتقال حرارت نانو سیالات در جریان‌های آرام، مغشوش و جوش استخری بحث و بررسی می‌شود.

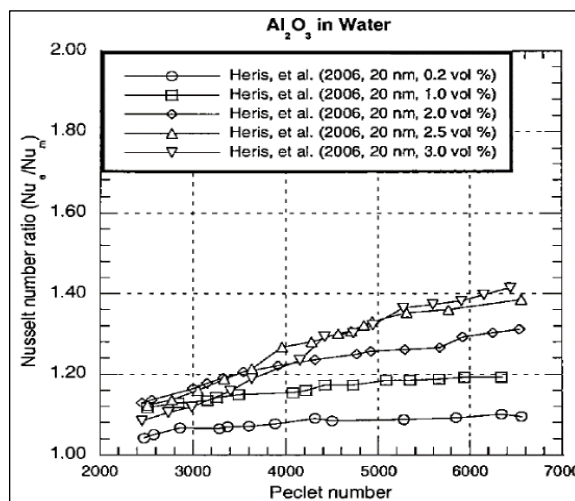
تحقیقات تجربی در انتقال حرارت نانو سیالات

افزایش انتقال حرارت در جریان آرام

میزان افزایش انتقال حرارت نانو سیالات در مقایسه با سیال پایه در جریان‌های آرام و مغشوش و در اندازه‌های مختلف نانو ذرات و پارامترهای مختلف (به خصوص در اعداد رینولدز مختلف) به طور تجربی توسط محققان مختلف بررسی شده است. میزان



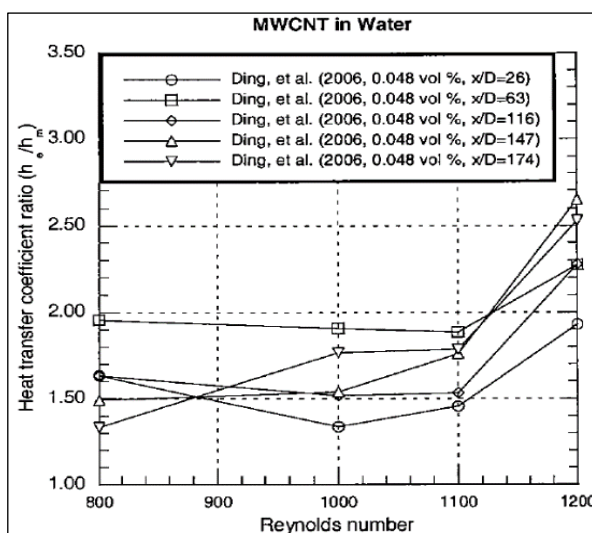
شکل ۲: انتقال حرارت جریان آرام در نانو سیال آب حاوی آلومینا [۱۶]



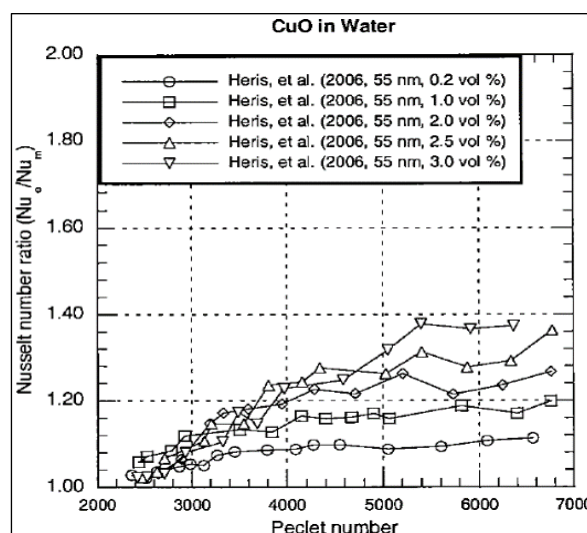
شکل ۱: انتقال حرارت جریان آرام در نانو سیال آب حاوی آلومینا [۱۵]



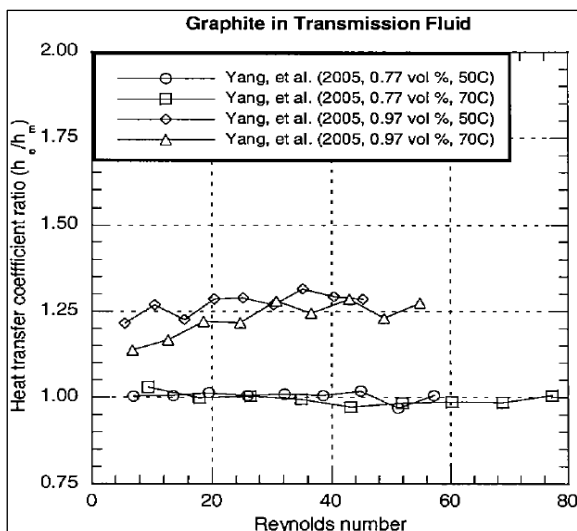
افزایش انتقال حرارت نانو سیال آب حاوی نانو ذرات آلومینا تحت جریان آرام در حال گذر به جریان مغشوش در شکل (۱) نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب هدایت حرارتی در حدود ۱۵٪، میزان انتقال حرارت جابه‌جایی در حدود ۴۰٪ افزایش یافته است. بنابراین افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی بیشتر از افزایش انتقال حرارت هدایتی می‌باشد و با افزایش غلظت نانو ذرات، این میزان افزایش بیشتر نیز می‌شود. بسیاری از محققان بر هم کنش‌های موجود میان نانو ذرات با سیال پایه را علت اصلی این موضوع می‌دانند. نتایج گروه‌های مختلف تحقیقاتی در میزان افزایش انتقال حرارت نانو سیال آب حاوی آلومینا در رینولدزهای بالاتر در شکل (۲) نشان داده شده است. با مقایسه شکل‌های (۱) و (۲) مشاهده می‌گردد که میزان افزایش انتقال حرارت در غلظت‌های حجمی کمتر از ۲٪ تقریباً یکسان بوده ولی افزایش انتقال حرارت در غلظت‌های بیشتر از ۲٪ در نتایج شکل (۲) در مقایسه با شکل (۱) بیشتر می‌باشد. بنابراین عدد رینولدز نانو سیال در میزان افزایش انتقال حرارت تاثیر گذار بوده و با مقایسه نتایج مشاهده می‌گردد که در غلظت‌های حجمی بیشتر از ۲٪ افزایش عدد رینولدز تاثیر بیشتری بر میزان افزایش انتقال حرارت می‌گذارد. اکنون با افزودن نانو ذرات اکسید مس و آلومینا در اندازه‌های مختلف (۲۰ و ۵۵ نانومتری) به سیال پایه آب، با در نظر گرفتن نانو ذرات مختلف (از نظر جنس و اندازه) میزان افزایش انتقال حرارت سیال پایه بررسی می‌شود. با توجه به شکل‌های (۳) و (۴) مشخص می‌گردد که اندازه نانو ذرات تاثیر کمی روی میزان افزایش انتقال حرارت در جریان آرام دارد. همچنین در شکل (۴) مشاهده می‌شود که با افزودن نانو لوله‌های کربنی چند جداره به آب میزان انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش می‌یابد. این شکل نشان می‌دهد که در $\frac{x}{D}$ های بیشتر، میزان افزایش انتقال حرارت بیشتر می‌باشد. نتایج بررسی انتقال حرارت بر روی نانو سیال آب با سورفکتانت سدیم دودسیل بنزن سولفونات حاوی نانولوله‌های کربنی چند جداره در شکل (۵) نشان داده شده است. این محققان تحقیقات خود را در رینولدزهای خیلی پایین و در غلظت‌های حجمی نسبتاً بالا انجام داده‌اند. نتایج آن‌ها بیانگر این است که در رینولدزهای خیلی پایین با افزایش غلظت حجمی نانو ذرات نسبت ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد که این رفتار معکوس در رینولدزهای بالا می‌باشد. اکنون تاثیر سیال پایه بر میزان افزایش انتقال حرارت نانو سیال بحث و بررسی می‌شود. شکل (۶) نشان می‌دهد که در غلظت‌های حجمی پایین نانو ذرات گرافیت (کمتر از ۱٪) در روغن مخصوص گیربکس اتوماتیک (سیال پایه) انتقال حرارت تقریباً افزایش نیافته است و در درصد حجمی ۱٪ تا ۲۵٪ انتقال حرارت افزایش یافته است. با توجه به شکل (۷)، به منظور بررسی تاثیر سیال پایه در افزایش انتقال حرارت در نانو سیال از روغن‌های ترکیبی به عنوان سیال پایه حاوی نانو ذرات گرافیت استفاده شده است. مشاهده می‌گردد که با وجود تغییر در سیال پایه، نتایج شکل‌های (۶) و (۷) با همدیگر همخوانی دارند و این بیانگر این است که دما تاثیر ضعیفی در میزان افزایش انتقال حرارت داشته است. همچنین با افزایش دما میزان افزایش انتقال حرارت کاهش یافته است.



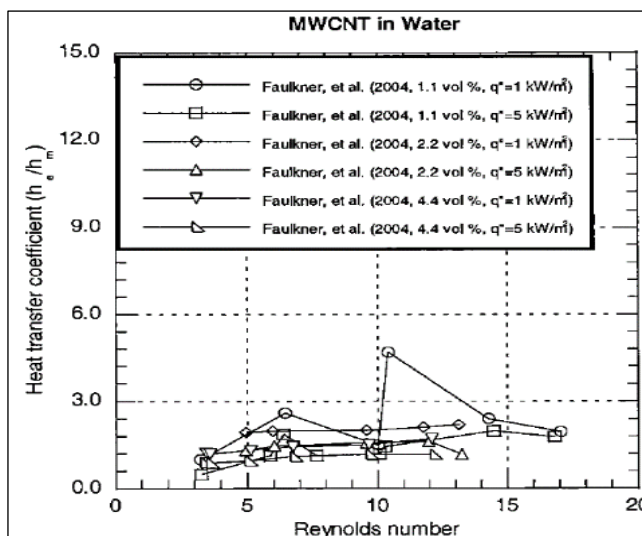
شکل ۴: انتقال حرارت جریان آرام در نانو سیال آب حاوی (MWCNT) [۱۷]



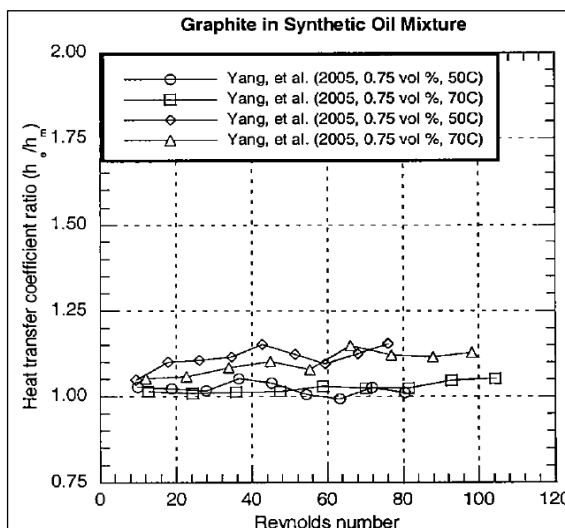
شکل ۳: انتقال حرارت جریان آرام در نانو سیال آب حاوی اکسید مس [۱۷]



شکل ۶: انتقال حرارت جریان آرام در نانوسیال روغن مخصوص گیربکس اتوماتیک حاوی گرافیت [۱۹]



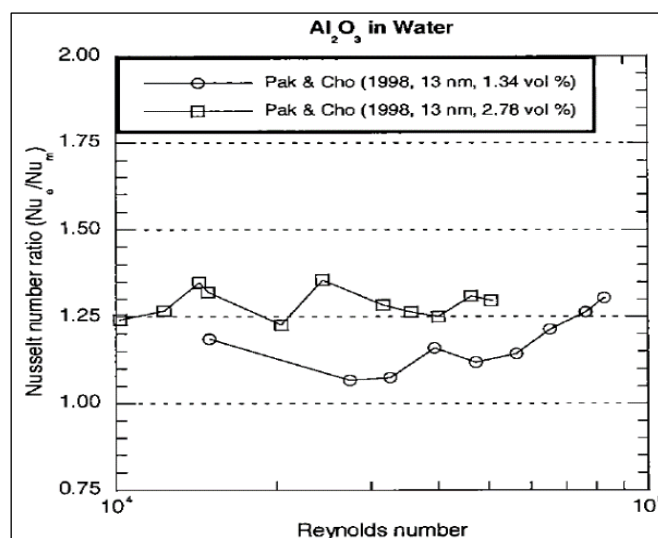
شکل ۵: انتقال حرارت جریان آرام در نانو سیال آب با سورفکتانت سدیم دودسیل بنزن سولفونات حاوی نانولوله‌های کربنی چند جداره [۱۸]



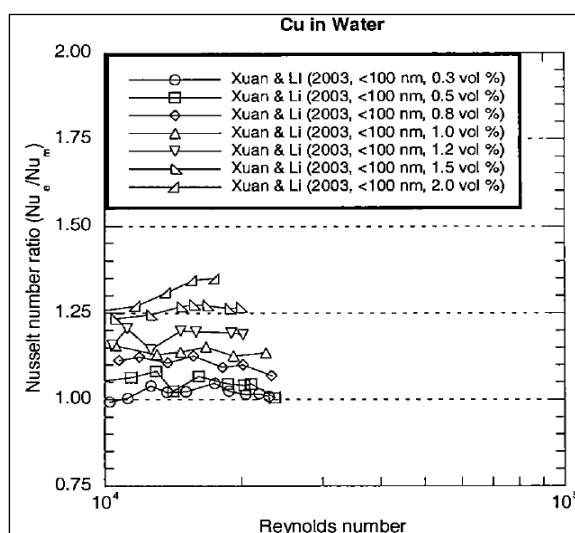
شکل ۷: انتقال حرارت جریان آرام در نانو سیال روغن ترکیبی حاوی گرافیت [۱۹]

افزایش انتقال حرارت در جریان مغشوش

انتقال حرارت نانو سیالات (آب/آلومینا، آب/دی‌اکسید تیتانیوم، آب/مس) در جریان مغشوش توسط دو گروه تحقیقاتی بررسی گردید و نتایج تحقیقات آن‌ها در شکل‌های (۸) تا (۱۰) نشان داده شده است [۲۰-۲۲]. نتایج این محققان بیانگر این است که در جریان مغشوش عدد رینولدز تاثیر بسیار ناچیزی در میزان افزایش انتقال حرارت داشته و عامل تاثیرگذار غلظت حجمی نانو ذرات می‌باشد. بیشترین میزان افزایش انتقال حرارت در نانو سیال حاوی نانو ذرات مس (به دلیل ضریب هدایت حرارتی بالای مس) رخ داده است. تحقیقات انجام شده تایید می‌کند که میزان افزایش انتقال حرارت نانو سیالات در جریان‌های مغشوش تابعی از غلظت حجمی نانو ذرات می‌باشد.

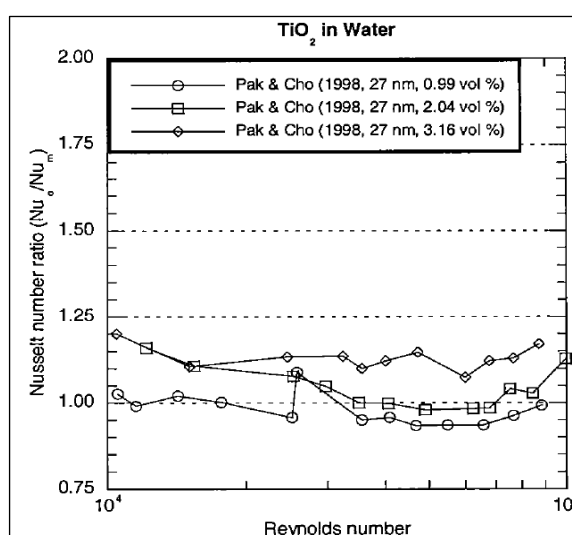


شکل ۸: انتقال حرارت جریان مغشوش در نانو سیال آب حاوی آلومینا [۲۰]



شکل ۱۰: انتقال حرارت جریان مغشوش در نانو سیال

آب/مس [۲۲]



شکل ۹: انتقال حرارت جریان مغشوش در نانو سیال آب

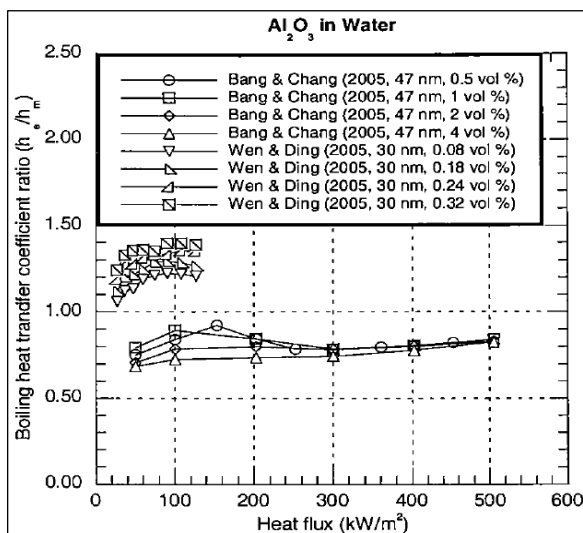
حاوی دی اکسید تیتانیوم [۲۱]

افزایش انتقال حرارت در جوشش استخری

پیشرفت‌های روز افزون در ساخت نیمه هادی‌های مینیاتوری موجب افزایش قابل ملاحظه شار حرارتی خروجی از این دستگاه‌ها شده است. به عنوان مثال پیش‌بینی می‌شود که شار حرارتی خروجی از دستگاه‌های مورد استفاده در صنایع نظامی و فضایی در حد ۱۰۰۰ وات بر سانتی‌متر مربع خواهد بود. در حال حاضر انتظار می‌رود که نانو سیالات به دلیل برخورداری از ضرایب هدایت حرارتی بسیار بالا و توانایی بهبود انتقال حرارت نسبت به سیالات پایه، گزینه مناسبی برای برآورده کردن این نیاز باشد. بنابراین لازم است که نتایج تحقیقات انجام شده در مورد جوشش نانو سیالات بحث و بررسی شوند. نتایج حاصل از تحقیقات آزمایشگاهی بر روی فرآیند جوشش استخری نانو سیال آب حاوی ذرات آلومینا در سطح خارجی لوله‌های با قطر کوچک در شکل (۱۱) نشان داده شده است. با توجه به شکل نسبت افزایش انتقال حرارت در تمام موارد (نانو سیالات با غلظت‌های حجمی و اندازه‌های مختلف نانوذرات) زیر یک بوده است. همچنین مشاهده می‌گردد که نسبت افزایش انتقال حرارت با افزایش غلظت حجمی نانو ذرات کاهش نموده در صورتی که هدایت حرارتی افزایش می‌یابد. بسیاری از محققان معتقدند که عملکرد ضعیف

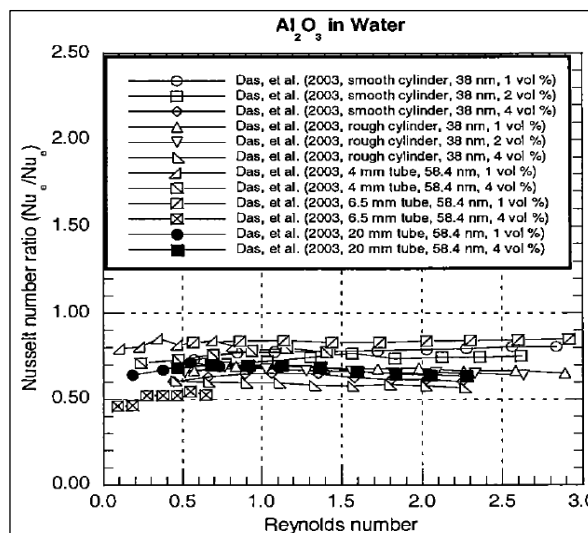


حرارتی به این علت می‌باشد که نانو ذرات از سوسپانسیون خارج شده‌اند و بر روی سطوح حرارت دیده ته‌نشین می‌شوند. اگر چه مطابق شکل (۱۱) با افزودن نانو ذرات به سیال پایه، میزان انتقال حرارت کاهش یافته است اما برخی نتایج تجربی نشان می‌دهند که شار حرارتی بحرانی افزایش یافته است [۲۳]. این افزایش شار حرارتی بحرانی می‌تواند این عملکرد ضعیف حرارتی را در برخی موارد جبران سازد (به طور کلی عدد ناسلت در فرآیند انتقال حرارت جوشش در مقایسه با انتقال حرارت تک فازی بسیار بیشتر بوده و کاهش عدد ناسلت با افزودن نانو ذرات تاثیر زیادی بر روی ضریب انتقال حرارت کلی ندارد). در شکل (۱۲) نتایج دو گروه تحقیقاتی در مورد فرآیند جوشش نانو سیال آب حاوی آلومینا از سطوح افقی نشان داده شده است. پارامترهای در نظر گرفته شده در تحقیقات بانگ و چانگ [۲۴] تقریباً شبیه پارامترهای تحقیقاتی مندرج در شکل (۱۱) بوده و تقریباً آن‌ها به نتایج یکسانی رسیده‌اند. با توجه به شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نتیجه گرفته می‌شود که با افزایش غلظت حجمی نانو ذرات به سیال پایه، علی‌رغم افزایش هدایت حرارتی انتقال شاهد کاهش حرارت (کاهش نسبت ضریب انتقال حرارت نانو سیال به سیال پایه) می‌باشیم. نظر به شکل (۱۲)، ون و دینگ [۲۵] نشان دادند که در درصد‌های غلظت حجمی زیر ۰/۳۲٪ در فرآیند جوشش نانو سیالات، انتقال حرارت افزایش یافته است. به عبارتی دیگر با افزایش غلظت حجمی نانو ذرات تا حدود ۰/۳۲٪ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. بنابراین فرآیند جوشش استخری نانو سیالات در غلظت‌های بسیار کم نانو ذرات (زیر ۰/۳۲٪) تاثیر مثبتی در افزایش انتقال حرارت دارد.



شکل ۱۲: انتقال حرارت جوشش استخری Al_2O_3 در آب از

یک سطح افقی [۲۵]



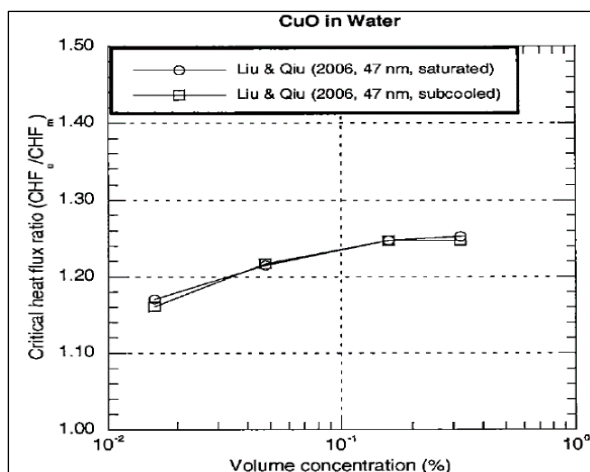
شکل ۱۱: انتقال حرارت جوشش استخری Al_2O_3 در آب [۲۵]

افزایش شار حرارتی بحرانی در جوشش استخری

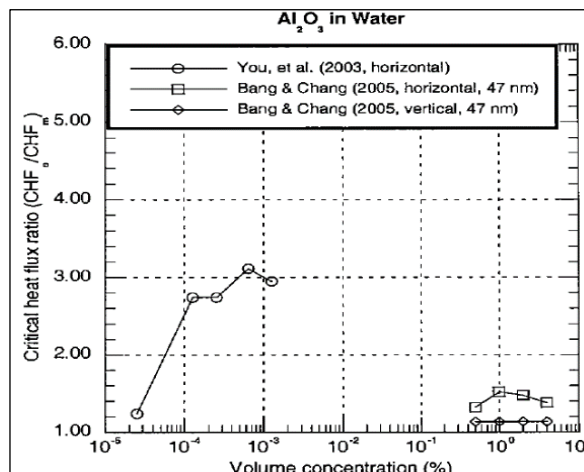
شار حرارتی بحرانی در جوشش استخری و با شروع شدن حالت گذر به فاز بخار با ضریب انتقال حرارت پایین و در دمای سطح بالا، پدیدار می‌گردد. بنابراین یکی از پارامترهای با اهمیت در فرآیند جوشش شار حرارتی بحرانی است که در این بخش در مورد نانو سیالات مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در شکل (۱۳) نتایج دو گروه تحقیقاتی در غلظت‌های حجمی مختلف نانو ذرات نشان داده شده است. این نتایج افزایش شار حرارتی بحرانی در فرآیند جوشش استخری نانو سیال آب حاوی نانو ذرات آلومینا را نشان می‌دهد به صورتی که در غلظت‌های حجمی بسیار پایین (میان ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۰۱) افزایش بالایی در حدود ۲۰٪ مشاهده می‌شود. این نتایج با نتایج افزایش انتقال حرارت در فرآیند جوشش استخری در غلظت‌های حجمی بسیار پایین (زیر ۰/۳۲٪) کاملاً همخوانی دارند. با توجه به شکل‌های (۱۳) و (۱۴) افزایش شار حرارتی بحرانی در نانو ذرات آب/آلومینا و آب/اکسیدمس در غلظت‌های حجمی نسبتاً بالا تقریباً یکسان می‌باشد [۲۴-۲۷]. دو گروه تحقیقاتی میزان افزایش شار حرارتی بحرانی در نانو سیال آب/سیلیکا در غلظت‌های حجمی نسبتاً بالا را بررسی نمودند و نتایج آن‌ها در شکل (۱۵) نشان داده شده است [۲۸ و ۲۹]. واسیلو



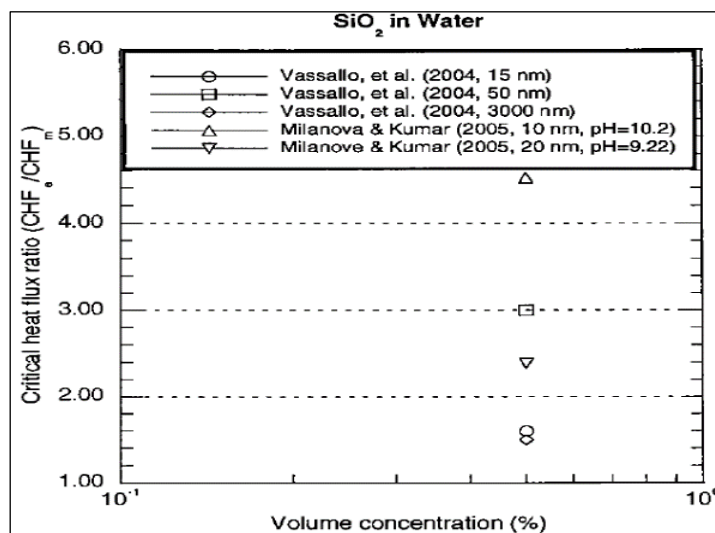
و همکاران [۲۸] بر روی ذرات با اندازه‌های ۱۵ تا ۳۰۰۰ نانومتر تحقیقات نمودند و دریافتند که میزان افزایش شار حرارتی بحرانی در بزرگترین و کوچکترین ذره تقریباً یکسان است. نتایج آن‌ها در غلظت‌های حجمی بالا با نتایج نشان داده شده در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) همخوانی دارند. اما نتایج آن‌ها در ذره با قطر ۵۰ نانومتر که تقریباً هم‌اندازه ذرات نشان داده شده در این شکل‌ها است با نتایج دیگر محققان متفاوت است. همچنین شکل (۱۵) نشان می‌دهد که میزان افزایش شار حرارتی بحرانی به pH سیال بستگی دارد به صورتی که با افزایش pH میزان افزایش شار حرارتی بحرانی می‌تواند تا حدود ۳۵۰٪ نیز افزایش یابد.



شکل ۱۴: شار حرارتی بحرانی آب حاوی نانو ذرات اکسید مس از یک جت روی سطح افقی [۲۵]



شکل ۱۳: شار حرارتی بحرانی آب حاوی نانو ذرات آلومینا در صفحه مسطح [۲۴]



شکل ۱۵: شار حرارتی بحرانی آب حاوی نانو ذرات سیلیکا از یک سیم نیکروم در حالت افقی [۲۸]

نتیجه‌گیری

یکی از شاخه‌های علم نانو تکنولوژی مربوط به استفاده از نانوذرات با خواص حرارتی بسیار بالا در سیالات پایه دارای خواص حرارتی پایین‌تر می‌شود که محصول آن سوسپانسیونی با خواص حرارتی بالاتر از سیال اولیه است. در صورت کاربردی شدن استفاده از نانو سیال یکی از مشکلات اصلی صنایع که انتقال حرارت ناکافی دستگاه‌ها و سیالات مختلف است برطرف می‌گردد و



در مواردی می‌توان با بهبود عملکرد حرارتی سیال ظرفیت دستگاه‌های موجود را افزایش داد که این خود منجر به افزایش ظرفیت واحد عملیاتی می‌شود. بنابراین در پژوهش حاضر با بررسی نتایج تجربی گروه‌های تحقیقاتی مختلف، انتقال حرارت در نانوسیالات تحت جریان‌های آرام و مغشوش و همچنین جوشش استخری بحث و بررسی گردید. از مهم‌ترین نتایج بدست آمده در پژوهش حاضر می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ۱- میزان افزایش انتقال حرارت نانوسیال آب/آلومینا در غلظت‌های حجمی کمتر از ۲٪ تقریباً یکسان بوده ولی افزایش انتقال حرارت در غلظت‌های بیشتر از ۲٪ بیشتر می‌باشد.
- ۲- در غلظت‌های حجمی پایین نانو ذرات گرافیت (کمتر از ۱٪) در روغن مخصوص گیربکس اتوماتیک (سیال پایه) انتقال حرارت تقریباً افزایش نیافته است اما در درصد حجمی ۱٪ میزان انتقال حرارت در حدود ۲۵ درصد افزایش داشته است.
- ۳- تحقیقات انجام شده تایید می‌کند که میزان افزایش انتقال حرارت نانوسیالات در جریان‌های مغشوش تابعی از غلظت حجمی نانو ذرات می‌باشد.
- ۴- فرآیند جوشش استخری نانوسیالات در غلظت‌های بسیار کم نانو ذرات (زیر ۰/۳۲٪) تاثیر مثبتی در افزایش انتقال حرارت دارد.
- ۵- میزان افزایش شار حرارتی بحرانی به pH سیال بستگی دارد به صورتی که با افزایش pH میزان افزایش شار حرارتی بحرانی می‌تواند تا حدود ۳۵۰٪ افزایش یابد.

مراجع

- [1] Choi, S.U.S., (1995). Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, developments and applications of non-Newtonian flows. ASME, FED, MD, 231, pp 99-105.
- [2] Dharmakkan, N., Srinivasan, P.M., Muthusamy, S., Jomde, A., Shamkuwar, S., Sonawane, C., Sharma, K., Alrubaie, A.J., El Shafay, A.S., Panchal, H., (2023). A case study on analyzing the performance of microplate heat exchanger using nanofluids at different flow rates and temperatures. Case Studies in Thermal Engineering, 44, p 102805.
- [3] Alklaibi, A.M., Mouli, K.V.C., Sundar, L.S., (2023). Experimental investigation of heat transfer and effectiveness of employing water and ethylene glycol mixture based Fe₃O₄ nanofluid in a shell and helical coil heat exchanger. Thermal Science and Engineering Progress, 40, p 101739.
- [4] Izadi, M., Alshehri, H.M., Hosseinzadeh, F., Rad, M.S., Hamida, M.B.B., (2023). Numerical study on forced convection heat transfer of TiO₂/water nanofluid flow inside a double-pipe heat exchanger with spindle-shaped turbulators. Engineering Analysis with Boundary Elements, 150, pp 612-623.
- [5] Kalantari, D., Tafakhori, M., Ghanbari, M., Biparva, P., Peyghambarzadeh, S.M., (2023). Intensification of thermal efficiency of a cross-flow heat exchanger under turbulent flow conditions using CuFe₂O₄/water nanofluid. International Journal of Thermal Sciences, 185, p 108107.
- [6] Demir, H., Dalkilic, A.S., Kürekci, N.A., Duangthongsuk, W., Wongwises, S., (2011). Numerical investigation on the single phase forced convection heat transfer characteristics of TiO₂ nanofluids in a double-tube counter flow heat exchanger. International Communications in Heat and Mass Transfer, 38(2), pp 218-228.
- [7] Godson, L., Raja, B., Lal, D.M., Wongwises, S.E.A., (2010). Enhancement of heat transfer using nanofluids—an overview. Renewable and sustainable energy reviews, 14(2), pp 629-641.
- [8] Faulkner, D., Khotan, M., Shekarriz, R., (2003). Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. IEEE, San Jose, CA, United States, pp 223-230.
- [9] Tsai, C.Y., Chien, H.T., Ding, P.P., Chan, B., Luh, T.Y., Chen, P.H., (2004). Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance. Materials Letters, 58(9), pp 1461-1465.
- [10] Kim, J.K., Jung, J.Y., Kang, Y.T., (2006). The effect of nano-particles on the bubble absorption performance in a binary nanofluid. International journal of refrigeration, 29(1), pp 22-29.



- [11] Nguyen, C.T., Roy, G., Gauthier, C., Galanis, N., (2007). Heat transfer enhancement using Al₂O₃-water nanofluid for an electronic liquid cooling system. *Applied Thermal Engineering*, 27(8-9), pp 1501-1506.
- [12] Srikant, R.R., Rao, D.N., Subrahmanyam, M.S., Krishna, V.P., (2009). Applicability of cutting fluids with nanoparticle inclusion as coolants in machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 223(2), pp 221-225.
- [13] Mohammed, H.A., Bhaskaran, G., Shuaib, N.H., Saidur, R., (2011). Heat transfer and fluid flow characteristics in microchannels heat exchanger using nanofluids: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), pp 1502-1512.
- [14] Yu, W., France, D.M., Choi, S.U., Routbort, J.L., (2007). Review and assessment of nanofluid technology for transportation and other applications (No. ANL/ESD/07-9). Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States).
- [15] Wen, D., Ding, Y., (2004). Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions. *International journal of heat and mass transfer*, 47(24), pp 5181-5188.
- [16] Heris, S.Z., Etemad, S.G., Esfahany, M.N., (2006). Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer. *International communications in heat and mass transfer*, 33(4), pp 529-535.
- [17] Ding, Y., Alias, H., Wen, D., Williams, R.A., (2006). Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(1-2), pp 240-250.
- [18] Faulkner, D.J., Rector, D.R., Davidson, J.J., Shekarriz, R., (2004), January. Enhanced heat transfer through the use of nanofluids in forced convection. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 4711, pp 219-224.
- [19] Yang, Y., Zhang, Z.G., Grulke, E.A., Anderson, W.B., Wu, G., (2005). Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow. *International journal of heat and mass transfer*, 48(6), pp 1107-1116.
- [20] Pak, B.C., Cho, Y.I., (1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer an International Journal*, 11(2), pp 151-170.
- [21] Xuan, Y., Li, Q., (2003). Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids. *J. Heat transfer*, 125(1), pp 151-155.
- [22] Xuan, Y., Li, Q., Hu, W., (2003). Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids. *AIChE Journal*, 49(4), pp 1038-1043.
- [23] Das, S.K., Putra, N., Roetzel, W., (2003). Pool boiling characteristics of nano-fluids. *International journal of heat and mass transfer*, 46(5), pp 851-862.
- [24] Bang, I.C., Chang, S.H., (2005). Boiling heat transfer performance and phenomena of Al₂O₃-water nano-fluids from a plain surface in a pool. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(12), pp 2407-2419.
- [25] Wen, D., Ding, Y., (2005). Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based γ -alumina nanofluids. *Journal of Nanoparticle Research*, 7, pp 265-274.
- [26] You, S.M., Kim, J.H., Kim, K.H., (2003). Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer. *Applied physics letters*, 83(16), pp 3374-3376.
- [27] Liu, Z.H., Qiu, Y.H., (2007). Boiling heat transfer characteristics of nanofluids jet impingement on a plate surface. *Heat and Mass Transfer*, 43, pp 699-706.
- [28] Vassallo, P., Kumar, R., D'Amico, S., (2004). Pool boiling heat transfer experiments in silica-water nano-fluids. *International journal of heat and mass transfer*, 47(2), pp 407-411.
- [29] Milanova, D., Kumar, R., (2005). Role of ions in pool boiling heat transfer of pure and silica nanofluids. *Applied Physics Letters*, 87(23).