مقاله

نانوسیالات؛ محیط‌های نوین انتقال حرارت

رقیه لطفی
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک
گروه نانوتکنولوژی، پژوهشگاه صنعت نفت
lotfir@ripi.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۴/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۶/۲۵

چکیده

در این مقاله نانوسیالات به‌عنوان محیط‌های جدید انتقال حرارت مطالعه و بررسی شده‌اند. در این رهگذر، نخست ویژگی‌ها، مزایا، کاربردها و روش‌های تهیه این گونه‌های جدید از سیالات بررسی و پس از آن، به بخش تجربی کار پرداخته شده است. در بخش تجربی، نانومواد مورد استفاده در تهیهٔ نانوسیالات (نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره) سنتز و با استفاده از آنالیزهای مورد نیاز شناسایی شده‌اند. سپس، نانوسیالات با استفاده از روش دومرحله‌ای تهیه و رسانایی حرارتی آنها با استفاده از دستگاه سنجش رسانایی اندازه گیری شده است. درپایان، با استفاده از سیستم آزمایشگاهی ساخته‌شده، ضریب انتقال حرارت نانوسیالات اندازه‌گیری شده است.

واژگان کلیدی: نانوسیالات، نانولوله‌های کربنی، هدایت حرارتی، ضریب انتقال حرارت

مقدمه

در مبحث سیالات، نانوفناوری می‌تواند به پیشرفت‌های غیرمنتظره‌ای در زمینهٔ سیستم‌های ترکیبی مایع - جامد، برای کاربردهای بی‌شمار مهندسی بیانجامد. از آن جمله می‌توان به مبحث نانوسیالات در زمینهٔ انتقال گرما اشاره کرد. نانوسیالات نوع جدیدی از سیالات انتقال حرارت هستند که مقادیر بسیار کمی از نانوذرات دارند و به‌صورت یکنواخت و پایدار در مایع معلق شده‌اند. پخش مقداری کم، ولی تعداد زیاد، از نانوذرات جامد در سیالات رایج به‌صورت قابل توجهی هدایت گرمایی آنها را تغییر می‌دهد. اندازهٔ متوسط ذرات مورد استفاده در نانوسیالات از ۱ تا ۱۰۰ نانومتر تغییر می‌کند. هدف نانوسیالات حرارتی رسیدن بهبالاترین مقدار ممکن هدایت حرارتی با کمترین مقدار غلظت از کوچکترین نانوذرات (ترجیحاً کمتر از ۱۰ نانومتر) است. ترکیب نانوذرات و مولکول‌های مایع حوزهٔ مشترکی بین مهندسی حرارت و علم نانو به‌وجود می‌آورد. در واقع نانوسیال‌ها سیالاتی با پایهٔ نانوفناوری هستند که توسط تعلیق (پراکنش) پایدار ذراتی با اندازهٔ نانومتری (با اندازه‌هایی حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) در سیالات پایه، که معمولاً مایع می‌باشند، حاصل می‌شوند. نانوذراتی نظیر اکسید آلومینیوم، مس، اکسید مس، اکسید تیتانیوم، اکسید

منیزیم، اکسید روی، طلا، آهن، نقره، سیلیس و نانولوله‌های کربنی در مقالات متعددی مورد پژوهش در حیطهٔ نانوسیالات قرار گرفته‌اند [۱-۸]. از سیالات پایهٔ مورد استفاده در تولید نانوسیالات نیز می‌توان به آب مقطر، آب یون‌زدوده[1]، روغن موتور، استون، اتیلن گلیکول و جز این‌ها اشاره کرد.

نخستین‌بار در سال ۱۹۹۵ م، چوی در مؤسسه تحقیقاتی آرگون امریکا[2]، اصطلاح نانوسیال را برای این گروه جدید از سوسپانسیون‌های جامد - مایع به‌کار برد و ادعا کرد که چنین سیالاتی هم از نظر تهیه و هم از منظر خواص پایداری و انتقالی در مقایسه با سوسپانسیون‌های معمولی جامد - مایع و ماکروسیالات تفاوت‌های فراوانی دارند.

در حالت کلی، اهداف اولیه از تحقیق و توسعهٔ نانوسیالات، کشف خواص منحصر به‌فرد نانوذرات برای توسعهٔ سیالات انتقال حرارت است که حاوی ذرات پراکندهٔ پایدار، با هدایت حرارتی بالا باشند و همچنین شناسایی خواص انتقالی و عملکرد حرارتی نانوسیالات و توسعهٔ فناوری نانوسیال برای افزایش انتقال حرارت در مبادله‌کننده‌های حرارتی صنعتی از اهداف این علم می‌باشد.

هدایت حرارتی سیالات انتقال حرارت متداول همچون روان‌سازها، خنک‌کننده‌های موتور و آب ذاتاً پایین است. با افزایش رقابت، صنایع به بهبود بازدهٔ انرژی سیالات انتقال حرارت با هدایت‌های حرارتی بالاتر از آنهایی که امروزه در دسترس‌اند، نیاز دارند. در واقع مطالعات نظری و تجربی زیادی در مورد هدایت حرارتی سوسپانسیون‌های حاوی ذرات جامد از زمان کار نظری ماکسول، که حدود ۱۰۰ سال پیش منتشر شد، انجام شده است. با این‌حال، مطالعات هدایت حرارتی سوسپانسیون‌ها محدود به ذرات با اندازه‌های میلی‌متر و میکرومتر بوده است. مشکل اصلی این سوسپانسیون‌ها رسوب سریع این ذرات است. اگر سیال برای ممانعت از رسوب به جریان انداخته شود، میکروذرات جدارهٔ لوله را خراب می‌کنند. برخلاف میکروذرات، نانوذرات تا زمان نامشخصی در سوسپانسیون معلق می‌مانند. علاوه بر این میکروذرات برای میکروسیستم‌ها بسیار بزرگ‌اند. این جنبه‌ها، نانوسیالات را به نامزدی قدرتمند برای ارتقای سیستم‌های حرارتی مبدل ساخته است. در حالت کلی فواید نانوسیالات عبارت است از:

انتقال حرارت و پایداری بهبودیافته: مساحت سطوح بسیار بالاتر پودرهای نانو در مقایسه با پودرهای مرسوم قابلیت‌های انتقال حرارت و پایداری سوسپانسیون‌ها را به‌طور قابل توجهی ارتقاء می‌دهد. علاوه بر این، اغلب اتم‌های میکروذرات خیلی پایین‌تر از سطح‌شان هستند و نمی‌توانند به‌سرعت در انتقال حرارت شرکت کنند. اما حدود ۲۰ درصد از اتم‌های نانوذرات با قطر کوچکتر از ۲۰ نانومتر، روی سطح‌شان قرار گرفته که اجازهٔ جذب و انتقال حرارت بالاتری را به آنها می‌دهد.

حداقل گرفتگی: ذرات با اندازهٔ میکرومتر به‌خاطر مشکلات گرفتگی در تجهیزات انتقال حرارت عملی کاربرد ندارند. در حالی‌که نانوسیالات با توجه به خواص ویژهٔ آنها می‌توانند کاربرد موثری داشته باشند.

کاهش میزان ساییدگی: با توجه به اندازهٔ بسیار کوچک نانوذرات، میزان مومنتومی که می‌توانند به جدارهٔ جامد وارد کنند نیز بسیار کوچک خواهد بود. در نتیجه احتمال ایجاد خوردگی در خطوط لوله، پمپ‌ها و مبادله‌کننده‌های حرارتی به‌طرز چشمگیری کاهش خواهد یافت.

پایداری: با توجه به اندازهٔ کوچک ذرات و وزن بسیار کم آنها، احتمال ته‌نشینی کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند بر یکی از معایب ذکرشده برای میکروسیال‌ها غلبه نماید و سبب پایداری نانوسیالات شود. بر اساس مطالعات صورت‌گرفته، با استفاده از عوامل پایدارکننده، نانوسیالات تا ماه‌ها پایدار خواهند بود.

صرفه‌جویی در انرژی و هزینه: چون به‌کارگیری موفقیت‌آمیز نانوسیالات منجر به ساخت مبادله‌کننده‌های حرارتی سبکتر و کوچکتر می‌شود، صرفه‌جویی قابل توجهی را در انرژی و هزینه به‌دست می‌دهند.

کاهش توان پمپ: برای ارتقاء انتقال حرارت به اندازهٔ دوبرابر با یک سیال معمول توان پمپ را باید ۱۰ برابر افزایش داد. اما اگر از سیالی با هدایت حرارتی حدود سه‌برابر استفاده شود انتقال حرارت دوبرابر خواهد شد. لذا نانوسیالات را می‌توان نامزد مناسبی برای نسل آیندهٔ سیال‌های واسطه جهت سیستم‌های انتقال حرارت خواند. همچنین پژوهشگران با به‌کارگیری آنها در پدیده‌های انتقال و مطالعات رئولوژیکی، نتایج حیرت‌آوری را گزارش و مورد بررسی قرار داده‌اند [۹–۱۳]. بسیاری از فرایندهای صنعتی به‌علت حضور سیال و جریان آن، چه در رژیم آرام و چه در رژیم متلاطم، شامل پدیده‌های انتقال می‌باشند. این فرایندها در گسترهٔ وسیعی از دما و فشار صورت می‌پذیرند. با کاهش مقاومت‌های انتقالی سیال، کارایی و بازده بسیاری از این فرایندها افزایش می‌یابد. به‌همین دلیل بوده است که تمایل برای استفاده از سیستم‌های کوچکتر با هزینهٔ تمام‌شدهٔ پایین‌تر و افزایش بازدهی انرژی، روز به‌روز بیشتر می‌شود. نانوسیال‌ها این قابلیت را دارند که مقاومت‌های انتقالی را کاهش دهند و موجب شوند تا صنایعی که از چنین سیالاتی بهره می‌برند، به‌شدت دست‌خوش تغییر شوند. از جملهٔ این صنایع می‌توان به صنایع الکترونیک، پزشکی، حمل و نقل، صنایع غذایی و جز این‌ها اشاره کرد.

تفاوت اساسی نانوسیالات با سوسپانسیون‌های معمولی، از اندازهٔ بسیار ریز ذرات پراکنده نشأت می‌گیرد. بسیاری از نیروهای مؤثر در بُعد ماکـرو، با کوچک‌شدن ذرات و سطح بسیار بالای آنها تأثیر خود را از دست می‌دهند و جای خود را به نیروهای بین مولکولی می‌دهند. در مقیاس نانو، نیروهای بین‌مولکولی تأثیر بیشتری نسبت به نیروهای هیدرودینامیکی دارند و با توجه به اینکه خواص موجی شکل (مکانیک کوانتوم) الکترون‌های داخل ماده و اثر متقابل آنها روی یکدیگر از جابه‌جایی مواد در مقیاس نانو تأثیر می‌پذیرد، امکان کنترل و تغییر در خواص ذاتی مواد از جمله خواص گرمایی، الکتریکی، نوری، مغناطیسی و بار هسته و جز این‌ها بدون تغییر در خواص شیمیایی وجود دارد. به‌طور کلی تهیهٔ نانوسیال بوسیله دو فرایند گوناگون انجام می‌گیرد:

۱. فرایند دومرحله‌ای

۲. فرایند یک‌مرحله‌ای

روش دومرحله‌ای با تولید نانوذرات توسط یکی از روش‌های فیزیکی یا شیمیایی آغاز می‌شود و سپس با پراکنش آنها در سیال پایه، نانوسیال حاصل می‌گردد. اما در روش یک‌مرحله‌ای، تولید و پراکنش نانوذرات به‌طور همزمان و مستقیم در سیال پایه صورت می‌گیرد. اغلب نانوسیالاتی که دارای اکسید نانوذرات و نانولوله‌های کربنی هستند، به‌وسیلهٔ روش دومرحله‌ای ایجاد می‌گردند.

فرایند دومرحله‌ای: ابتدا ذرات نانو به‌وسیلهٔ فرایندهای مختلف تولید شده و سپس در سیال پایه پراکنده می‌شوند. این فرایند برای ذرات اکسیدهای فلزی نظیر اکسید آلومینیوم یا اکسید مس و نانولوله‌های کربنی مناسب است. این فرایند نیاز به هم‌زدن طولانی و سریع و استفاده از سیستم فراصوت به‌منظور اطمینان از پراکندگی یکنواخت ذرات دارد. از جمله فوائد روش دومرحله‌ای در بخش تجاری‌کردن تولیدات نانوسیالات می‌باشد. ساخت نانوسیال‌ها با استفاده از روش دومرحله‌ای به‌علت تمایل ذرات به متراکم‌شدن قبل از دستیابی به پراکندگی کامل پیچیده خواهد بود. این تراکم به‌سبب جاذبهٔ نیروی واندروالس بین نانوذرات می‌باشد و این تمایل به متراکم‌شدن ذرات سبب ته‌نشین شدن آنها می‌شود. در حقیقت، تراکم یک پیامد بحرانی برای تمام نانوپودرها می‌باشد. به‌همین ترتیب در غلظت‌های حجمی بالاتر مشکل تراکم ذرات بیشتر می‌شود.

برای نانوسیال‌هایی که شامل فلزاتی با هدایت حرارتی بالا هستند، همچون مس، به‌سبب ممانعت از اکسیداسیون ذرات روش یک‌مرحله‌ای به روش دومرحله‌ای ترجیح داده می‌شود. در این روش، نانوذرات تولید و در یک سیال در یک فرایند یک‌مرحله‌ای پراکنده می‌شوند. یکی از روش‌های یک‌مرحله‌ای تبخیر مستقیم است که برای تولید

نانوذرات غیرمتراکم مس که به‌طور یکنواخت در اتیلن گلیکول پراکنده و به‌صورت پایدار معلق می‌مانند، استفاده می‌شود. این روش شامل چگالش پودرهای نانویی از فاز بخار به‌طور مستقیم در اتیلن گلیکول با فشار بخار پایین در یک محفظهٔ خلأ می‌باشد. روش یک‌مرحله‌ای فیزیکی دیگر، سنتز قوسی نانوذرات غوطه‌ور است که برای تولید نانوسیال‌هایی شامل نانوذرات گوناگون از جمله دی اکسید تیتانیوم و اکسید مس و مس به‌کار رفته است. با این روش، نانوذرات با گرمادادن به مواد جامد از الکترود به‌عنوان قوس جرقه تولید و سپس در یک محفظه خلأ به‌داخل مایع چگالش می‌شوند و بدین گونه نانوسیال تولید می‌شود. با وجود اینکه روش‌های فیزیکی یک‌مرحله‌ای، نانوسیالات را در مقیاس‌های پایین برای اهداف تحقیقاتی تولید می‌کنند، بعید به‌نظر می‌رسد که از آن بتوان به‌عنوان پایه‌ای برای تولیدات وسیع تجاری استفاده کرد؛ زیرا فرایندهایی که شامل یک بخش خلأ هستند، به‌شدت سرعت تولید نانوسیال و نانوذرات را کاهش می‌دهند. علاوه بر این تولید نانوسیال‌ها توسط این چنین روش‌های یک‌مرحله‌ای فیزیکی بسیار پرهزینه خواهد بود.

یک مزیت روش یک‌مرحله‌ای در ساخت نانوسیال این است که توده‌شدن نانوذرات به حداقل می‌رسد در حالی‌که یک عیب این روش این است که تنها سیالات با فشار بخار کم با این فرایند سازگار می‌باشند. باید توجه داشت که روش دومرحله‌ای برای ساخت نانوسیال از نانوذرات اکسیدی مناسب است، در حالی‌که این روش برای تهیهٔ نانوسیال از نانوذرات فلزی زیاد موفق عمل نمی‌کند. به‌تازگی یک روش شیمیایی تک‌مرحله‌ای برای تولید نانوسیال‌های مس گزارش شده است. در این روش نانوذرات مس با قطر کمتر از ۲۰ نانومتر تولید و در اتیلن گلیکول توسط کاهش یک نمک مس با هیپوفسفیت سدیم پراکنده می‌شوند. پلی وینیل پیرولیدون نیز به‌عنوان پلیمر محافظ و پایدارکننده جهت ممانعت از تراکم ذرات افزوده می‌شود. نانوسیال‌های مس تولیدشده توسط این روش شیمیایی تک‌مرحله‌ای، افزایش هدایت حرارتی مشابهی را نسبت به روش فیزیکی یاد شده نشان می‌دهند. یک اشکال که به هر دو روش فیزیکی و شیمیایی تک‌مرحله‌ای وارد است، استفاده از سیستم بسته با کنترل محدود بر روی پارامترهای مهم موجود، از جمله آنهایی که روی اندازهٔ ذرات تأثیر دارند، می‌باشد. با امکان استفاده از یک سیستم پیوسته برای روش شیمیایی تک‌مرحله‌ای، قابلیت ادامه حضور این روش افزایش می‌یابد. با توجه به این مطالب، اخیراً فرایند نیمه‌پیوسته برای تولید تک‌مرحله‌ای نانوسیال‌های با پایهٔ اتیلن گلیکول حاوی ذرات مس‌اندود شده توسط یک لایهٔ آلی بسیار نازک (۱۰ تا ۲۰ نانومتر) توسعه یافته است که در آن ذرات از لحاظ شیمیایی با سیال میزبان همسازی دارند و به‌موجب آن، پایداری سوسپانسیون تخمین زده می شود.

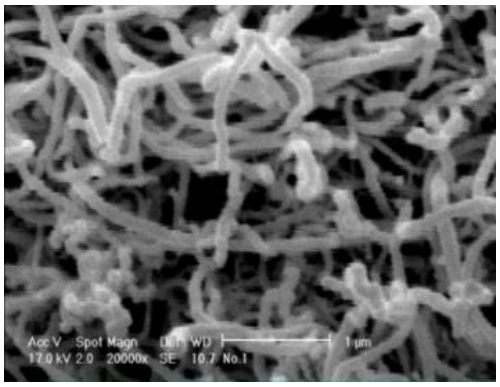
در این مقاله ابتدا سنتز و شناسایی نانومواد مورد استفاده مورد بحث قرار می‌گیرد. سپس روش تولید نانوسیالات به روش دومرحله‌ای، که در این کار استفاده شده‌است، ذکر می‌گردد. دستگاه اندازه‌گیری هدایت حرارتی و جزئیات سیستم آزمایشگاهی ساخته‌شده برای تعیین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی توضیح داده می‌شود و در نهایت داده‌های به‌دست آمده مورد بررسی قرار می گیرد.

بخش تجربی

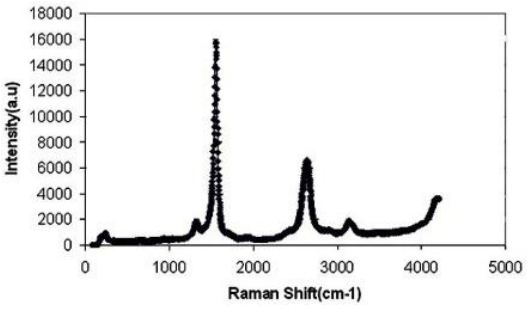
نانومواد مورد استفاده

در این مقاله از نانولوله‌های کربنی به‌عنوان نانومواد جهت تولید نانوسیالات استفاده شده است [۱۴]. نانولوله‌های کربنی توسط روش رسوب شیمیایی فاز بخار[۳] مخلوط ۲۰ درصد متان در هیدروژن در حضور کاتالیست اکسید منیزیم - کبالت - مولیبدن[۴] در دمای ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد در پژوهشگاه تولید می‌شوند. تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری[۵] نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره[۶] و نیز تصویر رامان آن در شکل ۱ نشان داده شده‌است.

به‌منظور پراکنده‌شدن بهتر نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره، می‌توان آنها را با گروه‌های عامل‌دار قطبی کرد. یک گرم از نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره در ۴۰ سانتی‌متر مکعب از مخلوط غلیظ اسید نیتریک و اسید سولفوریک با نسبت حجمی یک به سه ریخته و برای یک ساعت در دمای ۴۰ درجهٔ سانتی‌گراد فراصوت می‌کنیم. سپس نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره با آب بدون یون شستشو داده می‌شود تا pH آن به حدود ۷ برسد. آنگاه نانوذرات خیس برای ۱۲ ساعت در دمای ۱۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد خشک می‌شوند. طول متوسط نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره عاملدار[۷] به‌دست آمده ۱۵۰ تا ۲۰۰ نانومتر می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۱. نمایی از الف)تصویر SEM

ب) رامان نانولوله‌های کربنی

تهیهٔ نانوسیالات

بنابر آزمایش‌های انجام‌شده، بهترین روش برای پراکنده‌کردن نانوذرات در سیال پایه به روش دومرحله‌ای بدین صورت است که ابتدا مقدار مورد نیاز نانوذرات، سورفکتانت[۸] و سیال پایه طبق مقدار مورد نیاز نمونه و کسر حجمی نانوذره و سورفکتانت تعیین می‌شود. سپس سیال پایه را دو قسمت کرده در یک قسمت سورفکتانت حل می‌شود و در قسمت دیگر نانوذرات پراکنده می‌شوند. قسمت حاوی نانوذرات کاملاً توسط همزن مغناطیسی همزده شده و سپس در حمام اولتراسونیک قرار داده می‌شود تا ذرات کاملاً پراکنده شوند. آنگاه مخلوط سیال پایه و سورفکتانت به سوسپانسیون اضافه می‌شود و برای مدت زمان مشخصی در حمام باقی می‌ماند. زمان باقی‌ماندن در حمام اولتراسونیک یکی از فاکتورهای مهم در پایداری و خواص نهایی نانوسیال می‌باشد. البته طبق بررسی‌های انجام‌شده زمان باقی‌ماندن در حمام اثری مشابه توان اولتراسونیک دارد. نوع و مقدار سورفکتانت، دما و اسیدیته از دیگر عوامل مؤثر در پایداری و خواص حرارتی نانوسیال می‌باشد. برای تولید نانوسیالات آب - نانولولهٔ کربنی از سورفکتانت‌هایی مانند صمغ عربی[۹]، سدیم دودسیل سولفات[۱۰]، یا سدیم دودسیل بنزن سولفونات[۱۱] می‌توان استفاده کرد. البته در مورد نانوسیالات عامل‌دار احتیاج به هیچ سورفکتانتی نیست.

یک فرایند تولید نانوسیالات آب و نانولولهٔ کربنی تک‌دیوارهٔ عامل‌دار شده به این صورت است که نمونهٔ حاوی درصد وزنی معلوم از نانوذره داخل حمام اولتراسونیک برای دو ساعت قرار می‌گیرد و به حجم مورد نظر رسانده شده و pH آن نیز تنظیم می‌شود.

اندازه‌گیری هدایت حرارتی

هدایت حرارتی با استفاده از دستگاه KD2 انجام می‌شود. این دستگاه از روش سیم داغ حالت ناپایدار استفاده می‌کند. تصویری از این دستگاه در شکل ۲ نایش داده شده است. دستگاه KD2 سه حسگر مختلف دارد. یکی سوزن تکی شش سانتی‌متری که بهترین حسگر برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی بیشتر نمونه‌ها از جمله مایعات است. حسگر

دوم سوزن تکی ۱۰ سانتی‌متر است که دقت کمتری دارد و عمدتاً برای مواد سخت استفاده می شود و حسگر سوم یک سوزن دوگانهٔ۳۰ میلی‌متری است که برای اندازه‌گیری نفوذپذیری و یا ظرفیت حرارتی استفاده می‌شود. این حسگر فقط برای مایعات با لزجت بالا قابل استفاده است. برای همهٔ آزمایش‌ها از حسگر شش سانتی‌متری استفاده شده است. برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی به‌وسیلهٔ KD2 نکات زیر حائز اهمیت است:

اگر دمای محیط با دمای سوزن متفاوت باشد، سوزن باید با دمای محیط قبل از آغاز خواندن به تعادل برسد. در شرایط آزمایشگاهی باید به نمونه‌ها و حسگرها اجازه داد تا قبل از آغاز آزمایش‌ها به دمای محیط برسد. پانزده تا بیست دقیقه یک حدس اولیه منطقی است. همچنین بین آزمایش‌ها نیز باید زمان کافی داد تا دوباره به تعادل برسد، پانزده دقیقه خیلی زیاد نیست. اگر مدل کاملاً به داده‌ها برازش داده شود، آنگاه ضریب تعیین (r^2) برابر با یک خواهد شد. یک سری خوب داده‌ها با مقادیر r^2 بیش از ۰/۹۹۹۰ تنظیم می‌شود مگر در هدایت‌های حرارتی خیلی پایین (مثلاً مواد عایق). حتی در این صورت نیز مقادیر r^2 قابل قبول بیش از ۰/۹۹۵۰ می‌باشد. اگر r^2 کوچکتر از این مقادیر باشد، باید داده‌ها را کنار گذاشت، پانزده دقیقه صبر کرد و دوباره آزمایش را انجام داد. حسگرها باید کاملاً در نمونه فرو روند و نباید گوشه‌های ظرف حاوی نمونه را لمس کنند. دمای ثابت با استفاده از سیرکولاتور ایجاد می‌شود و برای اینکه چرخش سیال سیرکولاتور سبب حرکت حسگر دستگاه نشود، از یک شیشه دوجداره استفاده شده است که لولهٔ آزمایش حاوی نمونه در قسمت داخلی قرار می‌گیرد و سیال سیرکولاتور از فضای بین دیواره‌ها پمپ می‌شود. شکل ۳ تصویری از نحوهٔ قرارگرفتن سیرکولاتور و دستگاه KD2 را نشان می‌دهد.

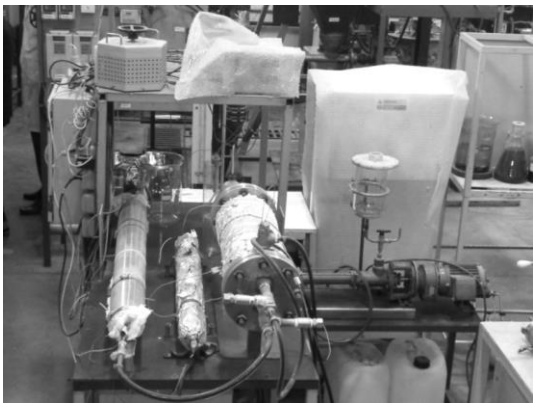
شکل ۲. نمایی از دستگاه KD2

شکل ۳. تصویری از نحوهٔ قرارگرفتن دستگاه KD2و سیرکولاتور

سیستم آزمایشگاهی برای بررسی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی

این سیستم آزمایشگاهی شامل یک قسمت آزمایش، یک پمپ، یک منبع ذخیره و یک مبادله‌کنندهٔ پوسته و لوله است. یک لولهٔ مسی صاف به قطر داخلی ۱۱/۴۲ میلی‌متر و طول ۱ میلی‌متر به‌عنوان بخش آزمایش استفاده شده است. المنتی از جنس نیکل - کروم به قطر ۱/۳۵ میلی‌متر به‌دور لوله پیچیده شده و با جریان الکتریکی متناوب که توسط یک واریاک[۱۲] تنظیم می‌شود، سطح لوله را گرم می‌کند. عایق سرامیکی به ضخامت تقریبی ۱۵۰ میلی‌متر از اتلاف حرارت جلوگیری می‌کند. برای اندازه‌گیری دمای سطح لوله پنج ترموکوپل‌های نوع k[۱۳] در فواصل برابر قرار داده شده‌اند و دو ترموکوپل دیگر نیز دمای ورودی و

خروجی توده سیال را اندازه می‌گیرند. پمپ دبی جریان را بین ۱/۱۵ تا ۶ لیتر بر دقیقه تنظیم می‌کند. جریان خروجی از قسمت آزمایش وارد یک مبدل پوسته و لوله به قطر ۳۰ و طول ۵۰ اینچ می‌شود. جریان قسمت آزمایش وارد لوله‌های مبدل به قطر داخلی ۰/۴ اینچ و قطر خارجی ۰/۵ اینچ می‌شود و برای خنک کردن آن سیال سیرکولاتور وارد پوسته مبدل می‌شود تا شرایط پایدار ایجاد شود. تصویری از سیستم آزمایشگاهی در شکل ۴ نشان داده شده‌است.



شکل ۴. دستگاه تعیین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی

داده‌های آزمایشگاهی برای هدایت حرارتی نانوسیالات

هدایت حرارتی نانوسیالات گوناگون که با استفاده از KD2 با حسگر شش سانتی‌متری اندازه‌گیری شده در جدول ۱ گزارش شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، هدایت حرارتی نانوسیالات تهیه‌شده از نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره در هر دو حالت عاملدار - غیرعاملدار (همراه با سورفکتانت) نسبت به سیال پایه (آب) افزایش داشته است. به‌عنوان نمونه در دمای ۱۷ درجهٔ سانتی‌گراد ضریب هدایت حرارتی از ۰/۵۹ در سیال پایه به ۰/۶۵ وات بر متر مربع کلوین و ۰/۷۵ برای نانوسیال تهیه شده با سورفکتانت SDS با درصد وزنی ۰/۲ و ۱ و مقدار ۰/۷۰ وات بر متر مربع کلوین و ۰/۷۴ برای نانوسیال تهیه شده از نانولوله‌های عاملدار افزایش می‌یابد. همچنین روند افزایشی ضریب هدایت با دما برای سیال پایه و نانوسیال در دو دمای ۱۷ و ۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد (باوجود نزدیک بودن دو دما) کاملاً مشهود است. همچنین با مقایسه داده‌های مربوط به نانوسیال تهیه‌شده با سورفکتانت SDS و نانوسیال تهیه‌شده از نانولوله‌های عاملدار در درصد وزنی ۰/۲ نتیجه‌گیری می‌شود که نانوسیال تهیه‌شده از نانولوله‌های عاملدار ضریب هدایت حرارتی را بیشتر از نانوسیال تهیه شده با سورفکتانت SDS افزایش می‌دهد.

جدول ۱. داده‌های هدایت حرارتی نانوسیالات

برحسب وات بر متر مربع کلوین

سیال/ نانوسیال	درصد وزنی نانوذره	۱۷ درجهٔ سانتی‌گراد	۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد
آب	۰	۰/۵۹	۰/۶۲
آب / نانولولهٔ تک‌دیواره + سورفکتانت SDS	۰/۲	۰/۶۵	۰/۶۷
	۰/۷	۰/۷۰	۰/۷۳
	۱	۰/۷۵	۰/۷۹
آب / نانولولهٔ تک‌دیوارهٔ عاملدار	۰/۱۲	۰/۷۰	۰/۷۱
	۰/۲	۰/۷۱	۰/۷۳
	۰/۲۵	۰/۷۲	۰/۷۳
	۰/۳	۰/۷۴	۰/۷۸

داده‌های آزمایشگاهی برای ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیالات

با استفاده از سیستم آزمایشگاهی ساخته‌شده، ضریب انتقال حرارت متوسط نانوسیالات آب/SWNT با سورفکتانت‌های مختلف تعیین شده است. لازم به‌ذکر است در این آزمایش با توجه به المنت‌های استفاده‌شده در مبدل و دمای نقطه‌ای بالا، گروه‌های عاملی در نانولوله‌های عاملدار جدا گشته و لذا ضریب انتقال حرارت آنها مورد بررسی قرار نگرفت. جدول ۲ میانگین مقادیر به‌دست آمده برای ضریب انتقال حرارت برای نانوسیالات با سورفکتانت‌های مختلف را در اعداد رینولدز مختلف و دماهای متوسط متفاوت نشان می‌دهد. همان‌گونه از جدول برمی‌آید در تمامی دماها و اعداد رینولدز ضریب انتقال حرارت نانوسیالات تهیه شده از

نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره نسبت به سیال پایه (آب) افزایش داشته است. به‌عنوان نمونه در عدد رینولدز ۱۵۹۲ و در دمای ۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد ضریب انتقال حرارت سیال پایه برابر ۶۲۹ وات بر متر مربع کلوین است، در حالی‌که در نانوسیالات با سورفکتانت‌های SDS، CTAB و GA این رقم به ۶۵۳، ۶۷۴ و ۶۶۰ وات بر متر مربع کلوین افزایش می‌یابد. همچنین لازم به‌ذکر است بر حسب عدد رینولدز (آرام و درهم بودن جریان) نسبت افزایش ضریب انتقال حرارت با سورفکتانت‌های مختلف تغییر می‌کند. به‌عنوان مثال در عدد رینولدز ۱۵۹۲ سورفکتانت CTAB بیشترین مقدار افزایشو سورفکتانت SDS کمترین مقدار افزایش در ضریب انتقال حرارت را نشان می دهد، در حالی که در عدد رینولدز ۳۴۲۵ سورفکتانت SDS بیشترین مقدار افزایش و سورفکتانت GA کمترین مقدار افزایش در ضریب انتقال حرارت را نشان می دهد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله نانوسیالات به‌عنوان محیط‌های جدید انتقال حرارت معرفی شدند و خواص آنها، کاربردها و نحوهٔ تهیهٔ آنها مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در بخش تجربی به سنتز و شناسایی نانولوله‌های کربنی، به‌عنوان نانومواد جهت تهیه نانوسیالات پرداخته شد. در ادامه ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات تهیه‌شده بررسی و نتیجه‌گیری شد که افزودن نانولوله‌های کربنی به سیال پایه سبب افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌گردد. در نهایت ضریب انتقال حرارت نانوسیالات اندازه‌گیری و نتیجه‌گیری شد که افزودن نانولوله‌های کربنی سبب بهبود ضریب انتقال حرارت نیز می‌شود. همچنین با توجه به عدد رینولدز، نرخ افزایش ضریب انتقال حرارت متفاوتی در سورفکتانت‌های گوناگون مشاهده شد.

جدول ۲. داده‌های ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیالات

عدد رینولدز	سیال / نانوسیال	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (وات بر متر مربع کلوین)		
		۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد	۲۷ درجهٔ سانتی‌گراد	۳۳ درجهٔ سانتی‌گراد
۱۵۹۲	آب	۶۲۹	۷۶۷	۹۳۱
	آب / نانولولهٔ تک‌دیواره + SDS	۶۵۳	۸۰۰	۱۰۱۱
	آب / نانولولهٔ تک‌دیواره + سورفکتانت CTAB	۶۷۴	۸۲۴	۱۰۴۷
	آب / نانولولهٔ تک‌دیواره + سورفکتانت GA	۶۶۰	۸۱۱	۱۰۲۲
۳۴۲۵	آب	۱۲۹۴	۱۵۵۲	۱۷۳۳
	آب / نانولولهٔ تک‌دیواره + سورفکتانت SDS	۱۴۲۴	۱۶۷۴	۱۷۴۷
	آب / نانولولهٔ تک‌دیواره + سورفکتانت CTAB	۱۳۴۲	۱۶۳۳	۱۷۴۰
	آب / نانولولهٔ تک‌دیواره + سورفکتانت GA	۱۳۱۱	۱۵۶۱	۱۷۲۱

مآخذ

[1] Xuan, Y., Q. Li. "Investigation on convective heat transfer and flow features of Nanofluids." *ASME Journal of Heat Transfer* 125 (2003): 151-55.

[2] Wen, D., Y. Ding. "Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47 (2004): 5181-88.

[3] Heris, S.Z., S.G. Etemad, M.N. Esfahany. "Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer." *International Communications Heat Fluid Flow* 33 (2006): 529-35.

[4] Heris S.Z., M.N. Esfahany, S.G. Etemad. "Experimental investigation of convective heat transfer of Al2O3/water nanofluid in circular tube." *International Journal of Heat Fluid Flow* 28 (2) (2007): 203-10.

[5] Xuan Y., W. Roetzel. "Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43 (2000): 3701-07.

[6] Yu W., S.U.S. Choi. "The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model." *Journal of Nanoparticle Research* 5 (2003): 167-71.

[7] Hamilton R.L., O.K. Crosser. "Thermal conductivity of heterogeneous two component systems." *I&EC Fundamentals* 1 (1962): 187-91.

[8] Yang Y., Z.G. Zhang, E.A. Grulke, W.B. Anderson, G. Wu. "Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48 (2005): 1107-16.

[9] Ma X., F. Su, J. Chen, T. Bai, Z. Han. "Enhancement of bubble absorption process using a CNTs-ammonia binary nanofluid." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 36 (2009): 657-60.

[10] Sara O.N., F. İçer, S. Yapici, B. Sahin. "Effect of suspended CuO nanoparticles on mass transfer to a rotating disc electrode." *Experimental Thermal and Fluid Science* 35 (2011): 558-64.

[11] Nagy E., T. Feczkó, B. Koroknai, "Enhancement of oxygenmass transfer rate in the presence of nanosized particles." *Chemical Engineering Science* 62 (2007): 7391-98.

[12] Namburu P.K., D.P. Kulkarni, D. Misra Debendra, K. Das. "Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture." *Experimental Thermal and Fluid Science* 32 (2007): 397-402.

[13] Kathiravan R., R. Kumar, A. Gupta, R. Chandra, P.K. Jain. "Mass transfer characteristics of multiwalled carbon nanotube (CNT) based nanofluids." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54 (2011): 1289-96.

[14] Iijima S., "Helical microtubules of graphitic carbon." *Nature* 354 (1991): 56-58.

پی‌نوشت

۱. آب دیونیزه یا آب یون‌زدوده، آب مقطری است که علاوه بر گذراندن مراحل تقطیر، توسط رزین‌های تبادلگر یونی یا روش‌های دیگر (مثل اسمز معکوس) یون‌زدایی نیز شده باشد. در واقع آب یون‌زدوده همان آب مقطر است که قبل یا طی تقطیر و یا حتی بعد از آن، با افزودن مراحلی مثل گذراندن از رزین تبادلگر یونی میزان یون‌های آن به کمترین مقدار رسیده باشد [ویراستار].

2. Argonne National Laboratory

۳. انباشت به‌روش تبخیر شیمیایی یا رسوب شیمیایی فاز بخار از جمله روش‌های شیمیایی لایه‌نشانی است که در تولید لایه‌های بسیار خالص میکروبلورین در فناوری نیمه‌رساناها به‌کار می‌رود. غالباً انباشت روی زیرلایه‌ای از مادهٔ مشابه انجام می‌شود. این انباشت ممکن است از واکنش‌هایی چون آتش‌کافت (که در آن از دمای زیاد برای تجزیهٔ ماده استفاده می‌شود) و یا نورکافت (که در آن از نور فرابنفش برای تجزیهٔ ترکیب‌های گازی استفاده می‌شود) انجام شود [ویراستار].

4. Co-Mo/MgO

5. TEM

6. SWNT

7. FSWNT

۸. سورفکتانت (surfactant)، مخفف عبارت surface active agent، ماده‌ای است که در صورت اختلاط با آب، کشش سطحی آب را به‌میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. سورفکتانت‌ها معمولاً ترکیباتی آلی هستند که دارای گروه‌های هیدروفوبیک و هیدروفیلیک می‌باشند. بنابراین معمولاً به‌طور ناچیز در آب و حلال‌های آلی حل می‌شوند. این مواد کشش سطحی آب را به‌وسیلهٔ جذب سطحی فصل مشترک هوا و آب کاهش می‌دهند. همچنین سبب کاهش کشش فصل مشترک آب و روغن به‌وسیلهٔ جذب سطحی فصل مشترک مایع - مایع می‌شوند [ویراستار].

۹. صمغ عربی، که از درختی به نام صمغ سنگالی به‌دست می‌آید، سفیدرنگ و محلول در آب است و عمدتاً شامل هیدرات‌های کربن می‌باشد. صمغ عربی یا صمغ آکاسیا ماده‌ای طبیعی است که از دو گونه آکاسیا به نام‌های Acasia senegal، Acasia seyal استخراج می‌شود. از صمغ عربی در صنایع غذایی به‌عنوان پایدارکننده استفاده می‌شود. از این صمغ در گذشته استفاده‌های فراونی می‌شده است. صمغ عربی ترکیب پیچیده‌ای از ساکاریدها و گلیکو پروتئین‌هاست که مهم‌ترین خواص صمغ از این ترکیب‌ها می‌باشد. این صمغ خوراکی است [ویراستار].

10. SDS

11. SDBS

۱۲. واریاک یا اتوترانسفورمر متغیر برای تغییر آسان ولتاژ خروجی از یک ولتاژ متناوب ثابت ورودی ساخته شده است. واریاک یک دستگاه پربازده و بی‌دردسر برای کنترل ولتاژ متناوب و دیگر موارد مربوط به ولتاژ متناوب مثل شدت نور، سرعت موتور و خروجی منابع تغذیه متغیر است.

۱۳. ترموکوپل نوع K از فلزهای نیکل و کرم (با نام تجاری کرومل)، و نیکل و آلومینیوم (با نام تجاری آلومل) ساخته می‌شود. این ترموکوپل قیمت ارزانی دارد و از معروف‌ترین ترموکوپل‌های چندمنظوره است. محدودهٔ عملکرد دمایی آن بین ۱۸۰- تا ۱۳۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد است و معمولاً در دماهای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. ترموکوپل نوع K به‌سبب استفاده از مس خاصیت ضداکسیداسیون دارد؛ لذا استعمال آن در کوره‌هایی که در احتمال اکسیداسیون در آنها وجود دارد، مناسب است [ویراستار].