مقاله

مروری بر لوله‌های حرارتی و نقش نانوسیالات در افزایش انتقال حرارت در آنها

علیرضا سام دلیری*
دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب
sam182218@gmail.com

تورج یوسفی
استادیار دانشکدهٔ مهندسی مکانیک
دانشگاه رازی کرمانشاه
tyousefi@ut.ac.ir

حسین احمدی دانش آشتیانی
استادیاردانشکدهٔ فنی و مهندسی
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب
h_a_danesh@azad.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۴/۳۰

چکیده

لوله‌های حرارتی از جمله وسائل انتقال حرارت‌اند که می‌توانند حرارت را از نقطه‌ای به نقطه‌ای دیگر منتقل کنند. نانوسیال نیز نوعی از سیال است که در آن نانوذرات در یک سیال پایه ترکیب شده باشد. اساساً لوله‌های حرارتی از چند قسمت تشکیل شده‌اند که سیال عامل یکی از اجزای تشکیل‌دهندهٔ آنهاست. در این مقاله ساختار تشکیل‌دهندهٔ لوله‌های حرارتی و نحوهٔ عملکرد آنها بیان شده است. همچنین تأثیر خواص سیال عامل و استفاده از نانوسیالات در عملکرد حرارتی لوله‌های حرارتی بررسی و به برخی از مطالعات انجام‌شده در این زمینه اشاره شده است.

واژگان کلیدی: لوله‌های حرارتی، انتقال حرارت، عملکرد حرارتی، سیال عامل، نانوسیال

۱. مقدمه

خنک‌کاری و دفع حرارت تولیدشده در تجهیزات صنعتی یکی از نکات مهم در نگه‌داری، افزایش طول عمر و عملکرد مناسب آنها محسوب می‌شود. استفاده از سیستم‌های خنک‌کنندهٔ مناسب از جمله مهم‌ترین دغدغه‌های کارخانه‌ها و صنایعی است که به نوعی با انتقال گرما روبرو هستند. معمولاً در صنایع مختلف نظیر صنایع الکترونیکی، خودروسازی، لوازم و تجهیزات مورد استفاده در صنایع هوافضا و نظیر آنها حرارت قابل توجهی تولید می‌شود و به دفع و کنترل آنها نیاز است. لوله‌های حرارتی[۱] از جمله وسائل انتقال حرارت‌اند که می‌توانند حرارت را از نقطه‌ای به نقطهٔ دیگر منتقل کنند. از این لوله‌ها در خنک‌سازی وسائل الکترونیک، ایجاد تعادل دمایی در ابزارهای ماهواره‌ای و فضاپیماها، همچنین در تجهیزات تهویه مطبوع، سیستم‌های خورشیدی و خنک‌کاری راکتورهای هسته‌ای استفاده می‌شود [۱]. لولهٔ حرارتی از یک لولهٔ فلزی توخالی ساخته شده و ابتدا و انتهای آن بسته است و سیال عامل درون آن قرار دارد. این لوله‌ها از سه قسمت اواپراتور، آدیاباتیک و کندانسور تشکیل شده‌اند و

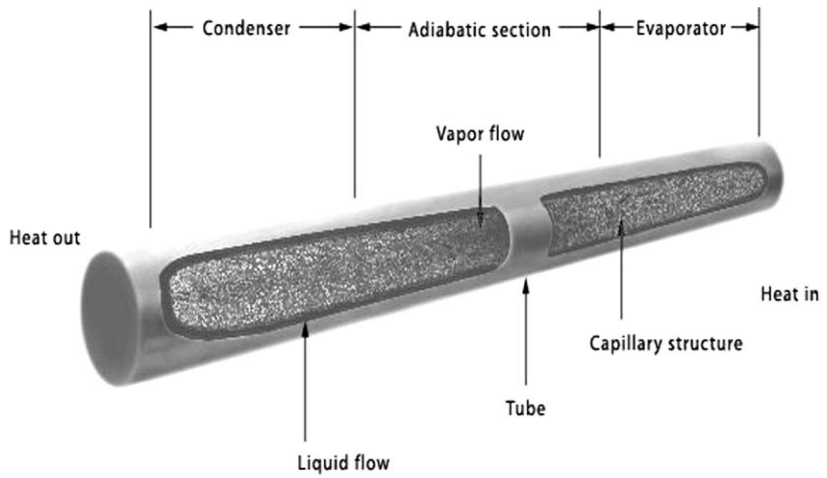
با تبخیر سیال عامل در اواپراتور و چگالش بخار در کندانسور، عمل انتقال حرارت را انجام می‌دهند.

بخش قابل توجهی از توانایی انتقال حرارت در یک لولهٔ حرارتی به ویژگی‌های سیال عامل موجود در آن بستگی دارد. استفاده از سیالاتی با خواص حرارتی مناسب، سبب بالابردن عملکرد لوله‌های حرارتی می‌شود. در این مطالعه اجزای تشکیل‌دهندهٔ یک لولهٔ حرارتی بیان و نحوهٔ عملکرد آنها تشریح می‌شود. همچنین عملکرد حرارتی یک لولهٔ حرارتی و پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار حرارتی لوله‌های حرارتی بیان و مطالعات انجام‌شده دربارهٔ آنها با استفاده از نانوسیالات[۲] به‌عنوان سیال عامل، ارائه و نقش نانوسیالات در انتقال حرارت در لوله‌های حرارتی بیان می‌شود.

۲. لوله‌های حرارتی

لوله‌های حرارتی لوله‌هایی هستند که می‌توانند حرارت را از نقطه‌ای به نقطهٔ دیگر منتقل کنند. ایدهٔ اولیهٔ استفاده از یک لوله برای انتقال حرارت در سال ۱۸۳۱ م توسط پرکینز[۳] مطرح شد. او با استفاده از یک لولهٔ فولادی، سیستمی ابداع کرد که در آن آب در فشار بالا و در یک فاز عمل می‌نمود[۱]. بعد از آن گاگلر[۴] در سال ۱۹۴۲ م ایدهٔ ساخت لولهٔ حرارتی به‌عنوان وسیله‌ای برای انتقال حرارت را بیان کرد تا آنکه گروور[۵] در سال ۱۹۶۴ آن را اختراع کرد و عنوان لولهٔ حرارتی را بر آن نهاد [۱].

لوله‌های حرارتی از ۳ قسمت اواپراتور، آدیاباتیک و کندانسور تشکیل شده‌اند. یک لولهٔ حرارتی از یک لولهٔ فلزی توخالی ساخته شده که ابتدا و انتهای آن بسته است؛ سطح داخلی آن دارای یک مادهٔ فتیله‌ای است و سیال عامل درون لوله قرار دارد و تحت خلأ کار می‌کند. گرمای اعمال شده به اواپراتور موجب تبخیر سیال عامل شده و بخار تولیدشده در اثر اختلاف فشار به سمت دیگر لوله حرکت می‌کند و وارد کندانسور می‌شود. در این ناحیه، بخار اشباع گرمای نهان خود را از دست می‌دهد و تقطیر رخ می‌دهد. پس از چگالش در کندانسور، سیال عامل از طریق ساختار فتیله‌ای و توسط نیروی مویینگی به اواپراتور بازمی‌گردد و این چرخه ادامه می‌یابد تا گرما به‌طور پیوسته از ناحیهٔ گرم به ناحیهٔ سرد منتقل شود (شکل ۱).

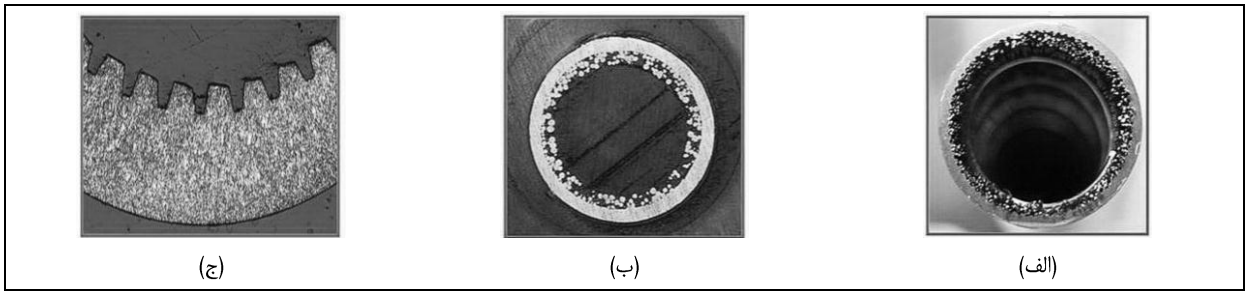


شکل ۱. نمایی شماتیک از یک لولهٔ حرارتی

یک لولهٔ حرارتی از لحاظ اجزای تشکیل‌دهندهٔ شامل سه قسمت است: یک قسمت ظاهری که همان سطح خارجی لوله است؛ قسمت دوم آن ساختار داخلی[۶] لوله است که با استفاده از خاصیت مویینگی موجب انتقال مایع از قسمت کندانسور به اواپراتور می‌شود و نهایتاً قسمت سوم که سیال عامل است و درون لوله تزریق شده است.

موادی که در ساخت لوله های حرارتی به‌کار می‌روند، آلیاژ فلزاتی خاص همچون آلومینیوم، فولادهای ضدزنگ و مس می‌باشد [۱]. ساختار داخلی ممکن است به‌صورت یک زیربافت در سطح داخلی لوله تعبیه شده باشد و جنس آن از پشم شیشهٔ بافته‌شده یا فلز سفت‌شده یا پودرهای اسفنجی فلزی و یا سیم‌های درگیر باشد. درحالت دیگر ممکن است داخل لوله به‌صورت شیاردار طراحی شده باشد؛ گاه نیز ممکن است ترکیبی از این دو حالت (شیاردار و بافته‌شده با هم) طراحی شود [۲].

نوع دیگری از لوله‌های حرارتی وجود دارند که ساختاری داخلی درون آنها قرار ندارد. این نوع لوله‌ها به ترموسیفون[۷] معروفند و معمولاً به‌صورت عمودی قرار می‌گیرند. در ترموسیفون‌ها سیال پس از تبخیر در اواپراتور به‌سمت کندانسور حرکت می‌کند. در کندانسور، سیال پس از چگالش، توسط نیروی جاذبه و با تماس به دیوارهٔ داخلی ترموسیفون به‌سمت اواپراتور حرکت می‌کند. به‌همین دلیل در ترموسیفون‌ها، اواپراتور در قسمت پایین و کندانسور در قسمت بالایی قرار دارد.



شکل ۲. انواع ساختار داخلی در یک لولهٔ حرارتی

الف) ترکیب الیاف روی شیارهای داخلی لوله، ب) سیم‌های فلزی و الیاف بافته‌شده، ج) شیارهای محوری در سطح داخلی لوله

شکل ۳. نمایی شماتیک از الف) ترموسیفون، ب) لولهٔ حرارتی [۱]

۲-۱. عملکرد یک لولهٔ حرارتی

لوله‌های حرارتی در محدودهٔ دمایی مختلفی کار می‌کنند. نوعی از لوله‌های حرارتی در محدودهٔ کمتر از ۴۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد کار می‌کنند که به آنها لوله‌های دماپایین می‌گویند. لوله‌های بالاتر از ۴۰۰ درجه به لوله‌های دمابالا معروفند که تا ۱۲۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد بیشتر از آن نیز عمل می‌کنند [۱]. مقاومت حرارتی کلی یک لولهٔ حرارتی طبق رابطهٔ ۱ تعریف می‌شود:

$$R = \frac{T_{evp} - T_{con}}{Q} \qquad (۱)$$

به‌طوری‌که در این رابطه R مقاومت حرارتی یک لولهٔ حرارتی و Q بار ورودی اعمالی در لوله است. مقدار $T_{evp} - T_{con}$ همان تفاضل دمایی بین منبع گرم و سرد است که T_{evp} میانگین دمایسطح لوله در قسمت اواپراتور و T_{con} میانگین دمای سطح لوله در کندانسور است [۱]. هر چقدر تفاضل دمایی در طول لوله کمتر باشد، مقاومت حرارتی لولهٔ حرارتی کمتر بوده و عملکرد حرارتی آن بهتر می‌شود.

۲-۲. محدودیت‌های یک لولهٔ حرارتی

از جمله قابلیت‌های لوله‌های حرارتی این است که می‌توانند با توجه به کاربردهای مختلف، در بارهای حرارتی ورودی کم یا زیاد عمل کنند. این توانایی انتقال حرارت سبب شده است تا لوله‌هایی با بار حرارتی ورودی پایین (در حد چند وات) و یا در نرخ‌های حرارتی بالا (چندین کیلووات) طراحی و استفاده شوند [۲]. از اینرو عملکرد مناسب لوله‌های حرارتی با توجه به کاربرد وسیع‌شان، مهم‌ترین ویژگی آنها محسوب می‌شود. همهٔ لوله‌های حرارتی به‌هنگام کارکرد با محدودیت‌هایی مواجهند که این محدودیت‌ها بیشترین میزان انتقال حرارت در یک لولهٔ حرارتی را معین می‌کنند. خاصیت موییینگی و جوشش سیال مهم‌ترین آنها به‌حساب می‌آید [۳]. همچنین لزجت و فشار بخار در لوله‌های حرارتی دارای حد و مرز می‌باشد. لوله‌های حرارتی از لحاظ محل انحناء و شکل نیز محدوده‌ای دارند که به ساختار داخلی، سیال عامل و هندسهٔ لوله بستگی دارد [۱]. محفظهٔ یک لولهٔ حرارتی نیز باید در برابر سوراخ شدن و اختلاف فشار در طول دیواره مقاوم باشد و علاوه بر آن توانایی انتقال حرارت از خود به سیال را با ضریب بالایی داشته باشد. آنچه در همهٔ لوله‌های حرارتی مشترک است این است که سیال عامل بین اواپراتور و کندانسور با یک تفاضل دمایی در حرکت است و سیال عامل به‌عنوان واسطهٔ اصلی حمل‌ونقل گرما نقش ویژه‌ای در انتقال حرارت دارد.

۳. خواص سیال عامل و استفاده از نانوسیالات

انتخاب سیال عامل مناسب یکی از ملاحظات لوله‌های حرارتی است که در رفتار حرارتی آن تأثیرگذار است. خصوصیاتی نظیر پایداری حرارتی مناسب، سازگاری با ساختار داخلی لوله، قابیت ترشدگی مناسب با ساختار فتیله‌ای، گرمای نهان بالا، خاصیت هدایت حرارتی بالا و خواص ترموفیزیکی مناسب از جمله مواردی است که در انتخاب سیال و در نتیجه عملکرد مناسب لوله‌های حرارتی مؤثر است [۱].

آب، الکل، متانول، روغن و اتیلن گلیکول سیالات رایج مورد استفاده در لوله‌های حرارتی هستند [۱]. در بین خصوصیات مختلف سیال عامل می‌توان قابلیت هدایت حرارتی سیال را به‌عنوان مهم‌ترین عامل مؤثر در انتقال حرارت در یک لولهٔ حرارتی به‌شمار آورد. سیالات مرسوم انتقال حرارت در لوله‌های حرارتی خواص هدایت حرارتی پایینی دارند، به‌همین دلیل در دهه‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای روی خواص ترموفیزیکی سیال و افزایش خاصیت انتقال حرارت آنها صورت گرفته است. یکی از روش‌های افزایش هدایت حرارتی سیال، افزودن ذرات ریزجامد با ضریب هدایت حرارتی بالاتر به سیال می‌باشد. این ایده نخستین‌بار توسط ماکسول[۸] در سال ۱۸۷۳ م بیان شد [۴]. ماکسول با افزودن ذرات ریز کروی به سیال ضریب هدایت حرارتی مؤثر سیال را مدلسازی کرد. پس از او دانشمندان دیگر مدل‌های متنوعی برای ضریب انتقال حرارت محلول‌ها ارائه کردند اما مهم‌ترین مشکل این محلول‌ها کلوخه‌شدن، ته‌نشینی و ناپایداری آنها بود که عملاً استفاده از آنها را غیرممکن می‌ساخت.

به مرور زمان تحقیقات بیشتر و گسترده‌تری در این زمینه انجام شد تا آنکه مؤسسهٔ ملی مطالعاتی آرگون[۹] با انجام تحقیقات فراوان روی سیالات و ذرات در ابعاد میکرو و نانو نوع جدیدی از سیالات به نام نانوسیالات را معرفی کرد. نانوسیالات سیالاتی هستند که در آنها ذرات ریز در ابعاد نانو بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر پخش شده‌اند [۴]. آزمایش‌های

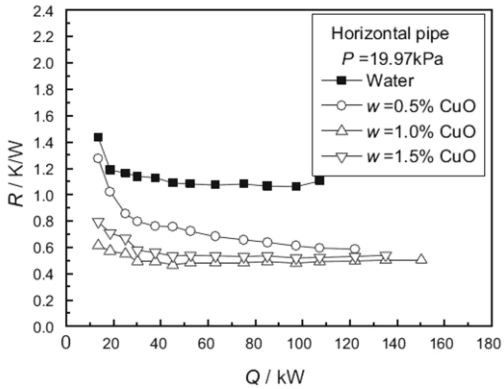
مختلف بر روی نانوسیالات نشان‌دهندهٔ توانایی بالای انتقال حرارت در آنها می‌باشد. چویی[10] و همکاران در سال ۱۹۹۵ مدر مؤسسهٔ آرگون به آزمایش نانوذرات مس در آب پرداختند که نتیجهٔ آزمایش آنها، افزایش انتقال حرارت قابل ملاحظه‌ای را برای نانوسیال مس نشان داد. نانوسیال مس در آزمایش آنها نرخ انتقال حرارت دستگاه انتقال حرارت را تا ۲ برابر افزایش داد [۵]. پس از آن آزمایش‌ها و تحقیقات مختلفی روی نانوسیالات انجام شد که توانایی بالای انتقال حرارت این سیال را نشان داد [۴]. بالابودن توانایی هدایت حرارتی نانوسیالات موجب شد تا استفاده از آنها به‌عنوان سیال انتقال حرارت مورد توجه قرار گیرد.

٤. عملکرد لوله‌های حرارتی با استفاده از نانوسیالات

پس از معرفی نانوسیالات، این ماده به‌عنوان سیال عامل در لوله‌های حرارتی آزمایش شد. در آزمایش‌های مختلف، آثار مختلفی از نانوسیالات نظیر اثر نوع نانوسیال، غلظت نانوسیال، اندازهٔ نانوذرات، زاویهٔ قرارگیری لولهٔ حرارتی، زمان واکنش لولهٔ حرارتی، استفاده از نانوسیالات هیبریدی، اثر میزان پرشدگی نانوسیال و جز این‌ها در لوله‌های حرارتی بررسی شده است. لوله های حرارتی در این آزمایش‌ها عملکرد حرارتی متفاوتی داشتند. در این قسمت به بررسی نقش نانوسیالات بر لوله‌های حرارتی پرداخته و به برخی مطالعات انجام شده در این زمینه اشاره می‌شود.

٤-١. اثر نوع و غلظت نانوسیال در انتقال حرارت لولهٔ حرارتی

با توجه به اینکه نانوسیالات محلولی از نانوذرات و یک سیال پایه هستند و توانایی هدایت حرارتی نانوذرات مختلف با یکدیگر متفاوت است، قابلیت انتقال حرارت چند نوع نانوسیال نیز با هم فرق می‌کند. این تفاوت توانایی انتقال حرارت نانوسیالات در آزمایش‌های تجربی انجام‌شده در لوله‌های حرارتی نیز مشاهده شده است. به‌عنوان مثال آزمایش نانوسیالات آلومینا[11]، دی اکسید تیتانیوم[12]، اکسید مس[13] گرادیان دمایی یک لولهٔ حرارتی را به‌ترتیب ۵، ۳ و ۵ درصد کاهش داد [۶]. آزمایش دیگری روی یک لولهٔ حرارتی نشان داد نانوسیال سیلیس[14] موجب بالارفتن مقاومت حرارتی یک لولهٔ حرارتی شده در حالی‌که در همان آزمایش استفاده از نانوسیال آلومینا با کاهش مقاومت حرارتی همراه بوده است [۷]. غلظت نانوسیال یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر عملکرد حرارتی لوله‌های حرارتی است. در مطالعات تجربی غلظت‌های متفاوت نانوسیال آزمایش شد که نتایج آنها نشان می‌دهد با افزایش غلظت نانوسیال، عملکرد حرارتی لوله‌های حرارتی افزایش داشته است [۸، ۱۲، ۱۳]. شکل ۴ تأثیر استفاده از نانوسیال اکسید مس در یک لولهٔ حرارتی را نشان می‌دهد که با افزایش غلظت نانوسیال، مقاومت حرارتی لولهٔ حرارتی کاهش نشان داده است [۸]. آزمایش‌های مختلف بر روی لوله‌های حرارتی نشان می‌دهد که افزایش غلظت نانوسیال تا غلظت بحرانی، با افزایش راندمان لولهٔ حرارتی همراه است. غلظت بحرانی غلظتی است که پس از آن افزایش غلظت نانوسیال موجب کاهش انتقال حرارت ماکزیمم در لولهٔ حرارتی می‌شود.



شکل ٤. اثر غلظت نانوسیال بر مقاومت حرارتی لولهٔ حرارتی

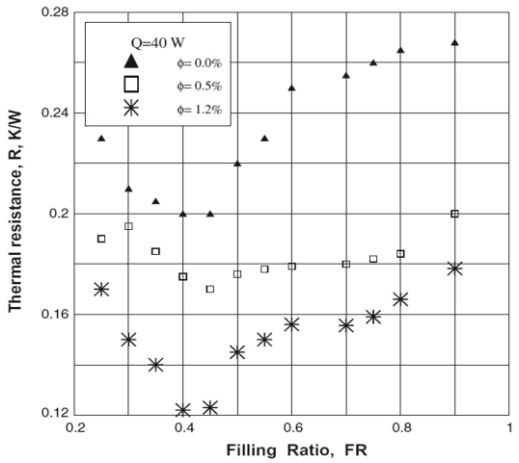
٤-٢. اثر نانوسیال بر زمان واکنش در لولهٔ حرارتی

زمان واکنش لوله‌های حرارتی به تغییرات دمای سطح لوله نسبت به مقاومت حرارتی آن تعریف می‌شود، به‌طوری‌که

گرادیان دمایی در لوله به مقدار ثابتی برسد. نتایج مطالعهٔ تجربی حاجیان و همکاران در لولهٔ حرارتی نشان داد که استفاده از نانوسیال نقره با غلظت ۵۰ پی. پی. ام.، زمان واکنش لولهٔ حرارتی را ۲۰ درصد نسبت به آزمایش آب مقطر به‌عنوان سیال عامل لولهٔ حرارتی کاهش داده است [۹].

٤-۳. تأثیر میزان پرشدگی نانوسیال در مقاومت حرارتی و عملکرد یک لولهٔ حرارتی

از جمله عوامل مؤثر بر عملکرد حرارتی لوله‌های حرارتی میزان پرشدگی[15] سیال درون لوله می‌باشد. بنابر تعریف، میزان پرشدگی سیال، نسبت حجم سیال به حجم اواپراتور در لولهٔ حرارتی تعریف می‌شود. در مطالعات تجربی میرشاهی، رحیمی [۱۰] و سرمستی و همکاران [۱۱]، بهترین مقدار پرشدگی سیال درون لولهٔ حرارتی بین ۴۵ تا ۵۵ درصد گزارش شده است. ام. جی. موسی[16] درصد پرشدگی نانوسیال در لولهٔ حرارتی را آزمایش کرد که در آزمایش‌های او بهترین مقدار پرشدگی نانوسیال ۴۵ درصد حجم اواپراتور می‌باشد [۱۲].



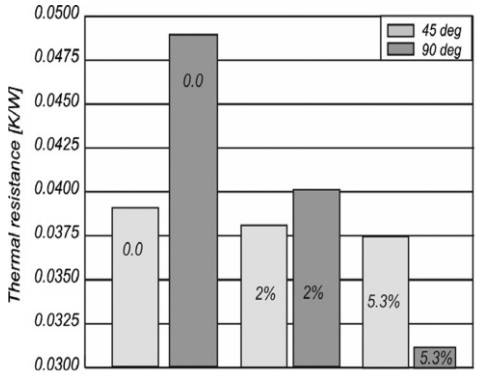
شکل ۵. اثر میزان پرشدگی نانوسیال بر مقاومت حرارتی [۱۲]

٤-٤. اثر زاویهٔ قرارگیری نانوسیال

لوله‌های حرارتی به‌صورت افقی، عمودی یا زوایایی بین این دو حالت قرار می‌گیرند. نتایج آزمایش هومینیک و همکاران[17] روی لولهٔ حرارتی در زوایای ۴۵ و ۹۰ نشان می‌دهد در غلظت‌های پایین نانوسیال، زاویهٔ ۴۵ درجه عملکرد بهتری نسبت به زاویهٔ ۹۰ درجه داشته است. با افزایش غلظت، زاویهٔ ۹۰ درجه، رفتار حرارتی بهتری نشان داده است [۱۳]. همچنین آزمایش نانوسیال اکسید مس روی لولهٔ حرارتی شیب‌دار نشان داد، لولهٔ حرارتی در زاویهٔ ۴۵ درجه بهترین عملکرد را داشته است [۸].

٤-۵. اثر نانوسیالات هیبریدی بر عملکرد لولهٔ حرارتی

در نانوسیالات هیبریدی، چند نوع نانوذره با هم مخلوط و در یک سیال پایه ترکیب شده است. آزمایشی روی لولهٔ حرارتی نشان داد استفاده از این نانوسیال در لوله‌های حرارتی موجب بهبود عملکرد حرارتی لولهٔ حرارتی نشده است. در این آزمایش مشاهده شد نانوسیال هیبریدی نقره و اکسید آلومینیوم دمای سطح لوله را نسبت به آزمایش آب مقطر و استون افزایش داد.



شکل ٦. اثر زاویهٔ قرارگیری لوله بر مقاومت حرارتی [۱۳]

نانوسیالات هیبریدی نسبت به نانوسیالات معمولی عملکرد حرارتی پایین‌تری داشتند و موجب افزایش مقاومت حرارتی لوله حرارتی شدند [۱۴].

۵. جمع‌بندی

در این مقاله ساختار لوله‌های حرارتی، اجزای تشکیل‌دهنده و نحوهٔ عملکرد آنها بیان شد. عملکرد حرارتی لوله‌های

حرارتی به مقدار قابل توجهی به خواص سیال عامل استفاده شده در آنها بستگی دارد. سیالاتی با خاصیت انتقال حرارت بالاتر موجب بالارفتن عملکرد حرارتی این لوله‌ها می‌شود. مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد استفاده از نانوسیالات در لوله‌های حرارتی سبب بهبود انتقال حرارت در آنها شده است. با توجه به کاربردهای مختلف لوله‌های حرارتی، استفاده از نانوسیالات در لوله‌های حرارتی می‌تواند گام مناسبی برای بهبود عملکرد این لوله‌ها به‌عنوان یکی از وسائل انتقال حرارت در صنعت باشد.

۶. مآخذ

[1] Reoy, D., P. Kew. "Heat Pipes Theory, Design and Applications", 5th ed., Oxford: Botherworth-Heineman Publications, 2006.

[2] Mochizochi, M., T. Nguyen, K. Moshiko, Y. Saito, T. Nguyen, W. Vijit, "A Reveiw of Heat Pipe Application Including New Opportunities." Frontier in Heat Pipes (FHP), 2011, pp.1-15

[3] Senthilkumar, R, S. Vaidyanathan, B. Sivaraman. "Performance analysis of heat pipe using copper nanofluid with aqueuos solution of n-Butanol." *World Academy of Science*, Engineering and Technology, 74, 2011, pp. 971-976.

[4] Das, S.K, S.U.S. Choi, W. Yu, T. Prodeep. *Nanofluid Science and Technology*, New Jersey: John wiley & sons Inc, 2008.

[5] Choi S.U.S. "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles", *ASME FED*, 231, 1995, pp. 99-105.

[6] Shafahi, M., V. Bianco, K. Vafai, O. Manca. "An investigation of the thermal performance of cylindrical heat pipes." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 2010, pp. 376-383.

[7] Qu, J, H. Wu. "Thermal performance comparison of oscillating heat pipes with SiO_2 /water and Al_2O_3/water nanofluids." *International Journal of Thermal Science*, 50, 2011, pp. 1954-1962.

[8] Wang, P.Y., X.J. Chen, Z.H. Liu, Y.P. Liu, "Application of nanofluid in an inclined mesh wicked heat pipes." *Thermochimica Acta*, 539, 2012, pp. 100-108.

[9] Hajian, R., M. Layeghi, K. Abbaspour Sani. "Experimental study of nanofluid effects on the thermal performance with response time of heat pipe." *Energy Conversion and Management*, 56, 2012, pp. 63-68.

[10] Mirshahi, H., R. Rahimi. "Experimental study on the effect of heat loads, fill ratio and extra volume on performance of a partial-vacuumed thermosyphon." Ir*anian Journal of Chemical Engineering*, 2009, pp. 15-26.

[11] Sarmasti Emami, M.R, S.H. Noei, M. Khoshnoodi. "Effect of aspect ratio and filling ratio on thermal performance of an inclined two-phase closed thermosyphon." *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, 32:B1, 2008, pp. 39-51.

[12] Mousa M.G. "Effect of nanofluid concentration on the thermal performance of circular heat pipe." *Ain Shams Engineering Journal*, 2011, pp. 39-51.

[13] Huminic, G, A. Huminic, I. Morjan, F. Dumitrache. "Experimental study of the thermal performance of thermosyphon heat pipe using iron oxide nanoparticles." *Int J of Heat and Mass Transfer*, 2011, pp. 656-661.

[14] Han, W.S, S. H. RHI. “Thermal characteristics of grooved heat pipe with hybrid nanofluids.” *Thermal Science*, 2011, pp. 195-206.

پی‌نوشت

1. heat pipe
2. nanofluid
3. Perkins
4. Gagler
5. Grover
6. Wick structure
7. Thermosyphon
8. Maxwell
9. Argone National Laboratory
10. Choi et al
11. Al_2O_3
12. TiO_2
13. CuO
14. SiO_2
15. Filling Ratio
16. M. G. Mousa
17. Huminic et al.