

مطالعه‌ی تجربی بهبود انتقال حرارت ترموسیفون دوفازی بسته تحت میدان الکتریکی با نانوسیال آب/آلومینا

فاطمه محمدپور (دانشجوی کارشناسی ارشد)

سعید زینالی هریس* (دانشیار)

سید مصطفی نوعی (استادیار)

گروه مهندسی شیمی، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۳)
دوری ۳ - ۳۰، شماره ۱/۲، ص. ۱۰۵-۹۷ (پادداشت فنی)

سیستم اصلی این پژوهش یک ترموسیفون دوفازی بسته است. برای بهبود عملکرد حرارتی این دستگاه، از دو عامل فعال و کنش‌پذیر اعمال میدان الکتریکی و تزریق نانو سیال آب/آلومینا استفاده شده است. بدین منظور نانوسیال آب/آلومینا با غلظت‌های مختلف تهیه و در ترموسیفون تزریق شد. سپس میدان الکتریکی با ولتاژهای مختلف به سیستم اعمال، و تغییرات بازده حرارتی و مقاومت حرارتی با تغییر پارامترهای متفاوت تعیین شد. همچنین عدد ناسلت تعریفی ترموسیفون در حالت‌های مختلف محاسبه شد. نتایج تجربی بیان‌گر آن است که بازده حرارتی و عدد ناسلت ترموسیفون با اعمال میدان الکتریکی و افزایش غلظت نانوسیال افزایش یافته ولی مقاومت حرارتی کاهش می‌یابد. البته میزان تغییرات در اثر تزریق نانوسیال بیشتر از تأثیر میدان الکتریکی است به طوری که بیشترین افزایش نسبت عدد ناسلت و بازده حرارتی در حضور میدان الکتریکی در بالاترین غلظت نانوسیال به ترتیب ۳۶ درصد و ۳۸ درصد است.

واژگان کلیدی: بهبود انتقال حرارت، ترموسیفون دوفازی بسته، میدان الکتریکی، نانوسیال آب/آلومینا.

۱. مقدمه

بهبود انتقال حرارت یکی از مواردی است که در توسعه‌ی تکنولوژی جدید مؤثر است، زیرا افزایش فرایندهای صنعتی، نیازمند سیستم‌ها و میدلهای حرارتی با کارایی بالاتری است.^[۱] از جمله شیوه‌های بهبود انتقال حرارت می‌توان به اعمال میدان الکتریکی و استفاده از نانوسیال‌ها اشاره کرد که به ترتیب به عنوان عوامل فعال و کنش‌پذیر در انتقال حرارت مؤثرند.^[۲]

از سال ۱۸۳۱ تا ۱۸۹۲، آنجیر مارچ پرکین و پسرش طرحی به نام لوله‌ی پرکین^۱ ارائه دادند، که اساساً یک لوله‌ی حرارتی بود. لوله‌های حرارتی به علت داشتن هدایت حرارتی بالا و توانایی فوق‌العاده در انتقال حرارت، نرخ سریع انتقال حرارت، توزیع دمای یکنواخت در بدنه، ساختار ساده با هزینه‌ی ساخت اندک، فشردگی، ضریب اطمینان و بازدهی بالا، اتلاف گرمای بسیار پایین، سازگاری با محیط زیست، قابلیت عمل کردن به صورت تقریباً هم‌دما و با مقاومت حرارتی کم در کل طول لوله‌ی گرمایی، قابلیت انتقال حرارت در فاصله‌های محسوس بدون نیاز به نیروی محرکه‌ی خارجی برای گردش، و... بسیار مورد توجه‌اند. از لوله‌های حرارتی در زمینه‌های مختلف مانند

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۸/۲/۱۳۹۱، اصلاحیه ۲۷/۲/۱۳۹۱، پذیرش ۱۱/۲/۱۳۹۲.

صنایع شیمیایی، خودروسازی، مهندسی برق، ذوب برف، گرمایش فضا (برای اثر گل‌خانه‌یی، خانه‌ها و غیره)، خشک‌کن‌ها، دفع‌کننده‌های گرما (برای وسایل الکترونیک، لبنیات، مواد شیمیایی و غیره) و حتی موارد ساده‌تری نظیر صنایع ساخت وسایل خانه کاربرد دارد.^[۳] نانوسیال‌ها با پراکنده کردن ذرات جامد در اندازه‌های نانومتر در سیال‌های ناقل حرارت متداول، تولید می‌شوند و عملکرد دمایی بالایی نسبت به سیال‌های پایه دارند. علت آن است که هدایت حرارتی نانوسیال، از سیال پایه بالاتر است و این شدیداً به اندازه (ابعاد)، شکل، و کسر حجمی نانوذرات و همچنین نوع نانوذرات و سیال پایه وابسته است.^[۴] علاوه بر هدایت حرارتی، برای انتقال حرارت به وسیله‌ی جابه‌جایی باید ذرات فلزی به راحتی توسط سیال جابه‌جا شوند، که به نظر می‌رسد این امر در مورد نانوذرات صادق است.^[۵] در مقایسه با روش‌های موجود برای افزایش انتقال حرارت، نانوذرات پتانسیل بالایی برای افزایش نرخ انتقال حرارت سیالات برای بسیاری از مقاصد دارند.^[۶]

چوبی و ایستمن نشان دادند که ذرات Al_2O_3 و CuO در مقیاس نانو در آب یا اتیلن‌گلیکول ضریب هدایت حرارتی بسیار بالایی نشان می‌دهند. به طوری که افزایش تقریبی 2° درصدی ضریب هدایت حرارتی هنگام مطالعه‌ی ۴ درصد حجمی ذرات ۳۵ نانومتری در اتیلن‌گلیکول مشاهده شد.^[۸] کوئینگ لی طی آزمایشی

نانوسیال آب دیونیزه و ذرات ۳۵ نانومتری مس را در لوله با بار حرارتی ثابت روی دیواره جریان داد و مشاهده کرد که عدد ناسلت با ۱ درصد حجمی ذرات مس در مقایسه با آب ۱۲ درصد افزایش می‌یابد.^[۹] دینگ و همکاران عملکرد نانوسیال، شامل نانو تیوب کربن را مورد مطالعه قرار داده و گزارش کردند که ضریب مؤثر انتقال حرارت حدوداً ۳/۵ برابر آب است.^[۱۰] در صورتی که زینالی هریس از نانوسیال Al₂O₃ با سیال پایه‌ی آب استفاده کرد و این افزایش را کم‌تر از ۴۰ درصد به دست آورد.^[۱۱]

افزایش انتقال حرارت بر اثر افزایش شدت جریان و استفاده از نانوسیال توسط جانگ و همکاران،^[۱۲] و بر اثر کاهش شدت جریان توسط چین و چوانگ^[۱۳] گزارش شده است. بهبود انتقال حرارت ترموسیفون به‌وسیله‌ی نانو توسط شنبدی و همکاران به دست آمد.^[۱۴] در صورتی که نانوسیال‌های اکسید در جریان آشفته هیچ افزایش غیرعادی بروز نداد،^[۱۵] و نشان داد که اگر از خواص ترموفیزیکی به‌طور صحیح استفاده شود، روابط موجود برای انتقال حرارت همرفت قابل پیشگویی است.

تحقیق در مورد اثر استفاده از نانوسیال CuO در یک دستگاه مشابه هم به‌صورت تجربی و هم به‌صورت عددی نشان‌گر افزایش انتقال حرارت بوده است.^[۱۶] مطالعه براساس یک رابطه‌ی تجربی در مورد انتقال حرارت لوله‌یی که به‌طور یکنواخت گرم شده نشان داد که استفاده از نانوسیال بسیار مفید بوده و این تنها به خواص ترموفیزیکی آنها وابسته نیست بلکه به مشخصات هندسی میدل حرارتی و شرایط عملکرد بستگی دارد.^[۱۷] در حالت کلی، در جریان آرام استفاده از نانوسیال همیشه باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود ولی نتایج مربوط به جریان درهم بسیار محدود است و مهم به نظر می‌آید.^[۱۷] در خصوص کاربرد نانو تحقیقات دیگری نیز انجام شده که در کل نشان‌گر بهبود عملیات حرارتی ترموسیفون است.^[۱۸-۲۳]

«اعمال میدان الکتریکی» روش دیگری است که در منابع از آن با عنوان عامل بهبود انتقال حرارت یاد شده است.^[۲۴-۲۸] به‌عنوان مثال، باد کورونا^۲ که در هنگام اعمال میدان الکتریکی از عوامل بهبود انتقال حرارت است توسط هاکسبی کشف شد^[۲۴] و سپس کتوک در این زمینه به مطالعه‌ی بیشتری پرداخت.^[۲۵] اولین بار افزایش انتقال حرارت به‌وسیله‌ی الکترو هیدرو دینامیک (EHD)^۳ در سال ۱۹۳۱ گزارش شد. محققین نشان دادند که شدت جابه‌جایی طبیعی در حضور میدان الکتریکی افزایش یافته است.^[۲۶] آنان همچنین اثر میدان الکتریکی را بر انتقال حرارت در مایعات بررسی کرده‌اند.^[۲۷]

با این حال تحقیقات آزمایشگاهی و کاربردهای پتانسیلی این مورد در زمینه‌های گوناگون اولین بار در سال ۱۹۶۰ انجام شد. استتزر^[۲۸] یک تحلیل نظری از پدیده‌ی یون - درگ را بررسی کرد، در حالی که رایبسون^[۲۹] نتایج استتزر را با به‌کار بردن معادله‌ی برنولی بیان کرد و نشان داد که سرعت باد کورونا با مربع ریشه‌ی جریان متناسب است.

اولین بار، مارکو و ولکاف^[۳۰] کاربرد باد کورونا را در افزایش انتقال حرارت بیان کردند. آنها سیمی را تولید کردند که باد کورونا را به وجود آورد؛ در حقیقت آنها اثر تخلیه‌ی هاله‌ی مثبت بر اختلاف فشار و انتقال حرارت جریان آرام یک گاز متراکم در یک لوله را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که ضریب انتقال حرارت در این حالت شش برابر جابه‌جایی آزاد^۴ است. نتایج برای هوا و سایر گازها به‌صورت تابعی از عدد رینولدز و پتانسیل میدان الکتریکی گزارش شده است.

اوبرینو و شاین^[۳۱] با بررسی اثر نوع گاز و فشار دریافتند که افزایش انتقال حرارت تحت الکترو دینامیک و آستانه‌ی فشار اتمسفری رخ نمی‌دهد. بیشینه انتقال حرارت موضعی در فشار اتمسفری، ۸/۵ برابر مقدار آن بدون حضور میدان الکتریکی است.

این مشاهدات کلاسیک منجر به تحقیقات بعدی در زمینه‌ی افزایش انتقال حرارت با استفاده از تکنیک EHD شد.

چندین مطالعه روی افزایش انتقال حرارت توسط EHD در جریان حلقوی^۵ برای سیالات صنعتی مثل روغن میدل،^[۳۲-۳۵] نفت سیلیکون،^[۳۶] سوخت هواپیما^[۳۷-۳۸] و هگزان انجام شده است.^[۳۹] بیشترین محدوده‌ی افزایش در این مطالعات از ۱۰٪ به ۲۳۰٪ گزارش شده است.

پولترو آلن^[۴۰] افزایش انتقال حرارت را در یک میدل پوسته‌ی لوله فشرده بررسی کردند. آزمایشات روی ۱۲ لوله‌ی یک میدل پوسته‌ی لوله فشرده و با اعمال میدان فقط در سمت لوله انجام شده است. از تکنولوژی کاربردی EHD معلوم شد که حاصل این کار افزایش ۵ برابری انتقال حرارت در مقایسه با یک میدل معادل (از نظر طراحی و ترکیب) بود.

در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی، افزایش انتقال حرارت توسط EHD در انتقال حرارت جوش هسته‌یی میدل پوسته‌ی لوله به‌وسیله‌ی کارایانیس^[۴۱] گزارش شده است. در سمت پوسته از سیال R-۱۱۴ و در سمت لوله از آب چرخشی استفاده شده است.

فوجینو^[۴۲] اثر میدان الکتریکی DC را بر جابه‌جایی اجباری جریان آرام برای سیال R-۱۱۳ در حالت مایع تخمین زده است. آزمایشات برای کانال عمودی با صفحات موازی و باریک (۱۲۰ × ۲ mm) انجام شد و به ایجاد جابه‌جایی اجباری برای مایع R-۱۱۳ در جهت رو به بالا انجامید. همچنین وابستگی انتقال حرارت روی سطح الکترو دینامیک نیز بیان شده است.

مطالعه‌ی تجربی اثر تخلیه‌ی هاله بر انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری در یک لوله‌ی حاوی هوا^[۴۳] نشان داد که افزایش انتقال حرارت برای جریان آرام و گذرا با استفاده از یک الکترو دینامیک پذیر است اما با ترکیب دو الکترو دینامیک افزایش انتقال حرارت در جریان آشفته فراهم می‌شود. همچنین محققین افزایش انتقال حرارت توسط EHD را در حالت‌های شامل انواع سطوح به کار برده شده - مثل سیال‌های چندفازی، جابه‌جایی طبیعی و... - بررسی شده است.^[۴۴-۴۵]

بررسی افزایش انتقال حرارت چگالش یک سیال دی‌الکتریک تحت میدان الکتریکی در یک لوله‌ی افقی^[۴۶] نشان داد که ضریب انتقال حرارت تحت میدان الکتریکی افزایش قابل توجهی داشته است. بهینه‌ی انتقال حرارت حدود ۲/۶ برابر بوده است.

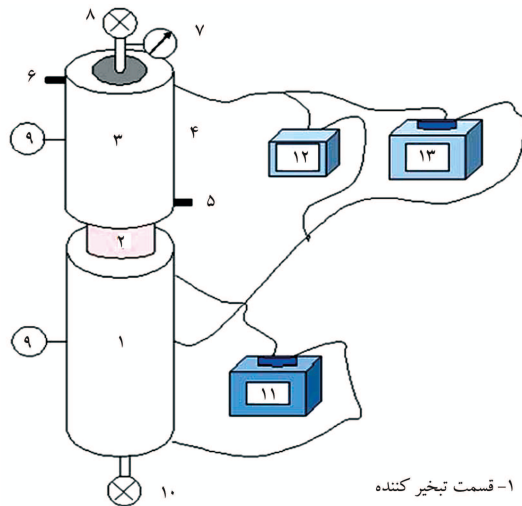
در بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری در یک مجرای مربع شکل و با سیال دی‌الکتریک،^[۴۷] اثر EHD با تزریق یون به داخل جریان بررسی شد. در این تحقیق در جریان آرام و با تزریق یون منفی، عدد ناسلت نسبت به جریان همرفت خالص حدود ۶۰ برابر افزایش یافت.

بررسی تأثیر EHD بر چگالش R-۱۳۴a در کنار یک گاز غیرقابل چگالش^[۴۸] نشان داد که حضور EHD باعث افزایش ضریب انتقال حرارت، و حضور گاز غیر قابل چگالش موجب کاهش این ضریب می‌شود. بررسی‌های تجربی بیان‌گر آن است که در غلظت‌های بالای گاز، اثر EHD تا حد زیادی کاهش می‌یابد اما در غلظت‌های پایین تأثیر آن قابل توجه است.

در این مطالعه به‌منظور بررسی تأثیر همزمان اعمال میدان الکتریکی به‌عنوان عامل فعال و تأثیر تزریق نانوسیال عامل آب/آلومینا به‌عنوان عامل کنش‌پذیر، یک سیستم حرارتی طراحی و ساخته شده است. نحوه‌ی تغییرات بازده حرارتی، مقاومت حرارتی و عدد ناسلت تعریفی یک ترموسیفون دوفازی بسته برحسب غلظت‌های مختلف نانوسیال، شدت‌های مختلف میدان الکتریکی و توان‌های حرارتی مختلف مطالعه و تعیین شده است.

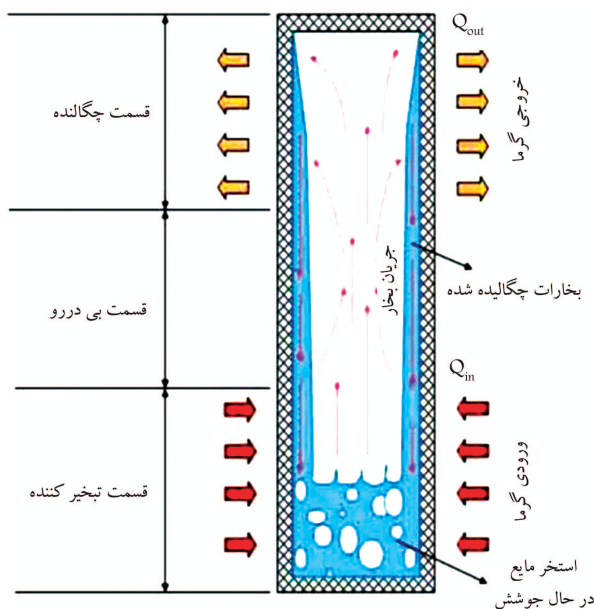
۲. سیستم آزمایش

سیستم مورد آزمایش یک ترموسیفون عمودی از جنس آلیاژی از آلومینیوم و دارای سه قسمت تبخیرکننده، آدیاباتیک و چگالنده است. شمایی از این دستگاه در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین شمایی کلی از کار یک لوله‌ی حرارتی در شکل ۲ نشان داده شده است.^[۴۹]



- ۱- قسمت تبخیر کننده
- ۲- قسمت آدیاباتیک
- ۳- قسمت چگالنده
- ۴- چگالنده از نوع پوسته-لوله
- ۵- ورودی آب سرد
- ۶- خروجی آب سرد
- ۷- فشار سنج
- ۸- سیر خلاء
- ۹- دماسنج
- ۱۰- شیر ورود سیال عامل به داخل لوله
- ۱۱- منبع تغذیه الکتریکی
- ۱۲- آمپرسنج
- ۱۳- منبع ولتاژ اعمالی

شکل ۱. شماتیک دستگاه مورد آزمایش.



شکل ۲. شماتیکی از یک لوله‌ی حرارتی.^[۴۹]

طول بدنه‌ی اصلی ترموسیفون ۴۰ سانتی‌متر و قطر داخلی آن ۴ سانتی‌متر است؛ طول بخش‌های تبخیرکننده، آدیاباتیک و چگالنده نیز به ترتیب ۲۰، ۵ و ۱۵ سانتی‌متر است. در قسمت کندانسور پوسته‌ی به قطر ۴۵mm برای خنک‌کردن سیال عامل تعبیه شده است. از آب شهری به عنوان سیال عامل برای خنک‌کردن در بخش چگالنده استفاده شد. دمای آب ورودی و خروجی به وسیله‌ی دماسنجی با دقت $\pm 0.1^\circ\text{C}$ اندازه‌گیری شد؛ بدین منظور آب از قسمت پایین وارد میبدل شده و از قسمت بالایی خارج می‌شود. به علت نوسان زیاد آب شهری، ابتدا آب در مخزنی در بالای دستگاه ذخیره شده و به وسیله‌ی یک شیر به مقدار ثابت وارد سیستم شده است.

همچنین از یک فشارسنج برای اندازه‌گیری فشار داخل ترموسیفون استفاده شد که محدوده‌ی آن برابر $5 \text{ bar} \sim -1$ بود. شیرری در قسمت فوقانی لوله‌ی حرارتی به منظور ایجاد خلاء، و شیرری در پایین آن برای تزریق سیال به داخل لوله‌ی حرارتی تعبیه شده است. همچنین در تمامی آزمایشات داخل لوله‌ی حرارتی شرایط خلاء نسبی برابر با 9 bar برقرار بود که در اثر انجام آزمایش و افزایش مقدار بخار، فشار به مقدار ناچیزی که قابل اغماض است افزایش می‌یافت.

سراسر لوله‌ی حرارتی به منظور جلوگیری از اتلاف حرارت، با استفاده از پتوی هندی عایق‌پچی شد. روی سطح لوله‌ی حرارتی در قسمت‌های تبخیرکننده و کندانسور، ترموکوپل‌هایی تعبیه شده که به وسیله‌ی عایق از بدنه‌ی لوله مجزا می‌شد. به منظور اندازه‌گیری دما از ترموکوپلی با دقت اندازه‌گیری $\pm 0.1^\circ\text{C}$ استفاده شد که قبل از استفاده کالیبره شده بود؛ برای اندازه‌گیری جریان مورد نیاز به منظور اعمال توان ورودی به سیستم نیز از آمپرسنجی با دقت $\pm 0.1 \text{ A}$ استفاده شد.

انرژی گرمایی منبع گرم از طریق تبخیرکننده به سیال منتقل شده و سبب تبخیر سیال گشته و در قسمت چگالنده به سیال سرد که جریان آب سرد است منتقل می‌شود. به منظور گرم‌کردن لوله‌ی حرارتی (منبع حرارت گرم) المنت‌های حرارتی با توان‌های ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ وات مورد استفاده قرار گرفت. میدان الکتریکی، از یک منبع الکتریکی ولتاژ بالای AC اعمال شد. در این دستگاه تبخیرکننده یک الکتروود، و چگالنده الکتروود دیگر بودند که به وسیله‌ی قسمت آدیاباتیک از هم جدا شدند. در این تحقیق حالت غیاب میدان و اعمال ولتاژهای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلوولت در توان‌های ورودی مختلف ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ وات و سیالات عامل آب/آلومینا با غلظت‌های متفاوت بررسی، و نتایج با هم مقایسه شدند.

سیال عملگر مورد استفاده در این تحقیق نانوسیال آب/دی‌اکسید آلومینیوم بوده که تأثیر غلظت‌های مختلف آن (۲، ۲/۵ و درصد حجمی) در شدت میدان‌های مختلف روی انتقال حرارت بررسی شده است. برای انجام این آزمایش، پس از ایجاد خلاء و وارد کردن نانوسیال مورد نظر در یک غلظت مشخص، مقدار گرمایی که مد نظر آن دوره آزمایش بوده به سیستم اعمال شد. بر اثر اعمال گرما دمای فضای ترموسیفون افزایش یافت و بعد از حدود ۲۰ دقیقه ثابت و پایدار شد. طی این مدت جریان آب خنک‌کننده در قسمت چگالنده با دبی ثابتی برقرار بود. بعد از

از طرفی چرچیل و ازو برای یک لوله که از پایین گرم و از بالا سرد می‌شود، مجدداً زمانی صرف پایدار شدن سیستم شد و دوباره دماها قرارت و ثبت شد. به همین ترتیب میدان‌ها با شدت بیشتر اعمال شد و نتایج حاصله جمع‌آوری شد. بعد از این که در یک شدت گرمای مشخص، میدان‌های مختلف اندازه‌گیری قرار گرفت، حرارت بیشتری به سیستم اعمال شد و همین روند ادامه داشت. لازم به ذکر است هر آزمایش ۳ بار تکرار شد. با توجه به نتایج نزدیک به هم میانگین نتایج به عنوان نتیجه‌ی اصلی مد نظر قرار گرفت. در این آزمایشات، دمای تبخیرکننده، چگالنده و دمای ورودی و خروجی آب اندازه گرفته شد. با استفاده از این داده‌ها، بازده حرارتی ترموسیفون، مقاومت حرارتی ترموسیفون و نسبت عدد ناسلت در حضور میدان الکتریکی به غیاب میدان محاسبه شده و نمودار تغییرات این پارامترها براساس تغییرات میدان الکتریکی رسم شده است.

۳. معادلات حاکم

به منظور برآورد تأثیر میدان الکتریکی، غلظت نانوسیال و توان‌های اعمال شده روی بخش تبخیرکننده‌ی ترموسیفون روابطی مورد استفاده قرار می‌گیرند که در ادامه به آنها اشاره می‌شود. بازده حرارتی برای ترموسیفون مطابق رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود: [۵۰]

$$\eta = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \quad (1)$$

در این رابطه، Q_{in} مقدار حرارت ورودی به سیستم توسط گرمکن الکتریکی است: [۵۱]

$$Q_{in} = VI \quad (2)$$

در این رابطه V ولتاژ اعمال شده و I جریان عبوری از گرمکن الکتریکی است. همچنین مقدار حرارت خالص خروجی از سیستم مطابق رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شود: [۵۱]

$$Q_{out} = \dot{m}C_p(T_o - T_i) \quad (3)$$

که در آن \dot{m} دبی جرمی آب سرد، C_p ظرفیت حرارتی آب سرد، T_o دمای خروجی و T_i دمای ورودی آب سرد است. برای به دست آوردن مقاومت حرارتی ترموسیفون از رابطه‌ی ۴ استفاده شد: [۵۲]

$$R = \frac{\Delta\theta}{Q_{in}} \quad (4)$$

که در آن $\Delta\theta$ اختلاف دمای سطح تبخیرکننده و چگالنده است. عدد ناسلت برای لوله‌ی حرارتی حاوی نانوسیال نیز مطابق رابطه‌ی ۵ تعریف می‌شود: [۵۳]

$$Nu = \frac{Q_{net,conv}}{Q_{net,cond}} \quad (5)$$

که در آن $Q_{net,cond}$ انتقال حرارت هدایت خالص بوده و از رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید:

$$Q_{net,cond} = \frac{\pi}{4} d^2 k \frac{\Delta\theta}{l} \quad (6)$$

در این رابطه l طول لوله حرارتی، k ضریب هدایت حرارتی نانوسیال و d قطر لوله‌ی حرارتی است.

$$Nu = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{net,cond}} \quad (7)$$

بنابراین عدد ناسلت برابر است با:

$$Nu = \frac{\dot{m}C_p(T_o - T_i)}{\frac{\pi}{4} d^2 k \frac{\Delta\theta}{l}} \quad (8)$$

که در آن تنها کمیتی که نیاز به محاسبه دارد، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال (k) است. برای به دست آوردن این کمیت مدل‌های زیادی ارائه شده، که هرکدام برای شرایط خاصی قابل استفاده‌اند. به همین منظور برای حذف این کمیت رابطه‌ی ۹ تعریف می‌شود:

$$r = \frac{Nu_E}{Nu_o} = \frac{\left(\frac{T_o - T_i}{\Delta\theta}\right)_E}{\left(\frac{T_o - T_i}{\Delta\theta}\right)_o} \quad (9)$$

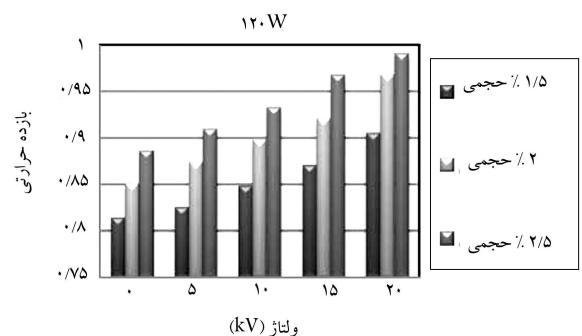
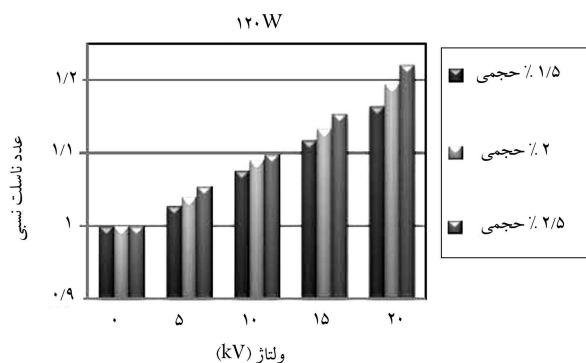
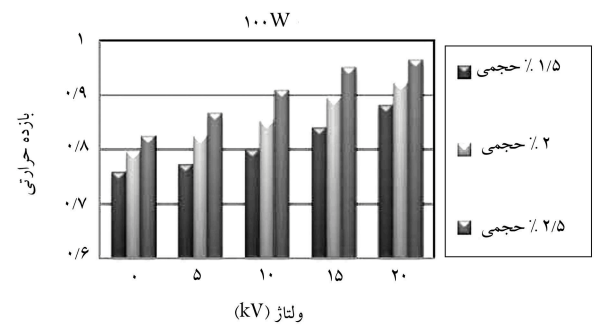
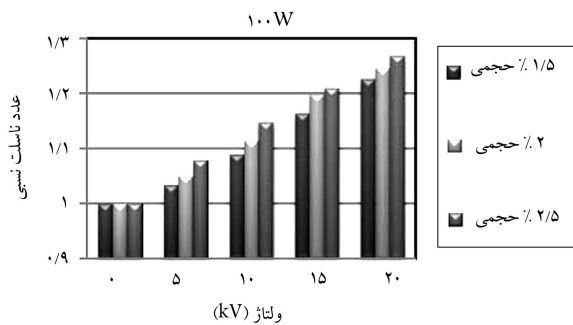
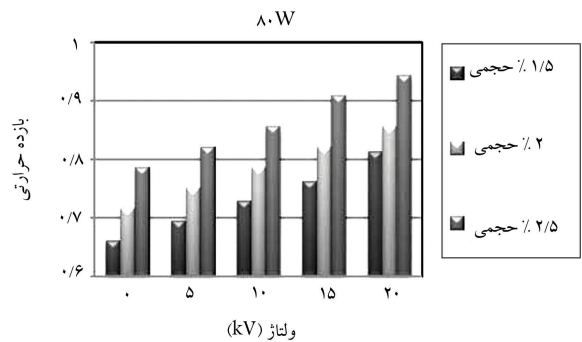
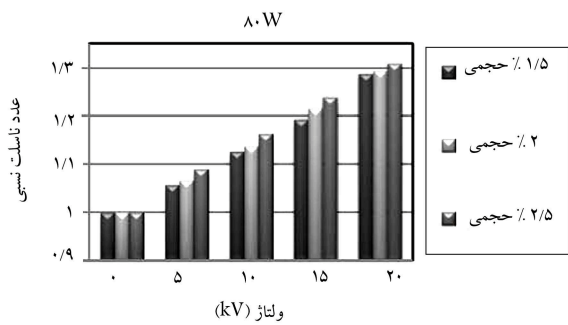
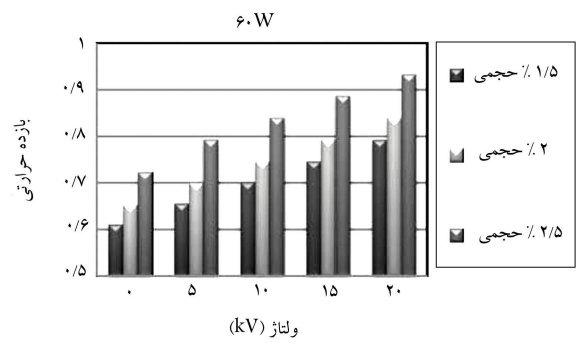
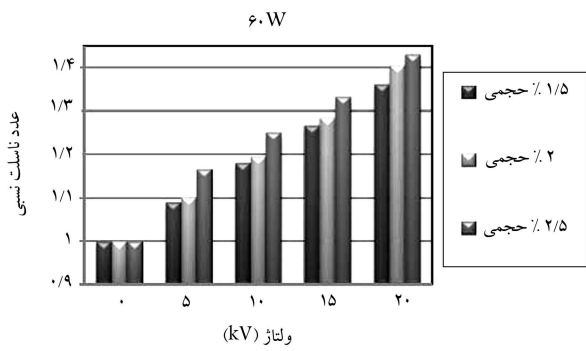
در حقیقت این رابطه (کمیت r) نسبت عدد ناسلت در حضور میدان الکتریکی (Nu_E) به عدد ناسلت در غیاب میدان (Nu_o) است. لازم به ذکر است که «ضریب هدایت حرارتی» از ویژگی‌های سیال، و مستقل از شرایط جریان است. با استفاده از رابطه‌ی ۹ تأثیر معادلات مختلف برای تعیین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال، که تفاوت‌های زیادی با هم دارند، حذف می‌شود.

۴. نتایج تجربی و بحث

در این تحقیق آزمایش‌ها با اعمال میدان الکتریکی با شدت‌های مختلف در ولتاژهای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلوولت روی ترموسیفون دوفازی بسته انجام گرفته است. سیال عملگر در این سیستم نانو سیال آب/دی‌اکسید آلومینیوم با غلظت‌های ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد حجمی، و شدت توان‌های ورودی به سیستم ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ وات بود. پس از اندازه‌گیری پارامترهای قابل اندازه‌گیری تغییرات بازده حرارتی، مقاومت حرارتی و نسبت عدد ناسلت برای غلظت‌های مختلف نانوسیال و شدت‌های مختلف میدان الکتریکی محاسبه و بررسی شد. در شکل‌های ۳ و ۴ تغییرات بازده حرارتی و نسبت عدد ناسلت در حضور میدان الکتریکی به عدد ناسلت در غیاب میدان الکتریکی برحسب ولتاژ اعمالی برای غلظت‌های مختلف نانوسیال نشان داده شده است.

چنان که مشاهده می‌شود، افزایش غلظت نانوسیال و افزایش شدت میدان موجب بهبود بازده حرارتی و نسبت عدد ناسلت می‌شود. نانوذرات در موارد مختلف بر افزایش بازده تأثیر دارند؛ داشتن ابعاد کوچک و سطح انتقال حرارت بالا، داشتن ضریب هدایت حرارتی بیشتر نسبت به سیال پایه، افزایش برخورد و برهمکنش بین سیال و دیواره تحت شار حرارتی ثابت، افزایش اغتشاش و ایجاد لایه‌ی منفذدار و بهبود ترشوندگی از جمله‌ی این مواردند.

چون ابعاد نانوذرات بسیار کوچک است سطحی که دارای مقدار مشخصی نانوذرات است، نسبت به سطوح دارای موادی با ابعاد بزرگ‌تر، بیشتر است و در نتیجه انتقال حرارت با سرعت و شدت بیشتری انجام می‌شود. همچنین سیال پایه ضریب هدایت حرارتی بسیار کمی دارد، و حضور نانوذرات در آن گاهی ضریب هدایت حرارتی را تا ۶۰ برابر افزایش می‌دهد. همچنین سبکی و ریز بودن نانوذرات باعث



شکل ۴. تغییرات نسبت عدد ناسلت نسبت به میدان الکتریکی در غلظت‌های مختلف نانوسیال آب/آلومینا در توان‌های ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ وات.

شکل ۳. تغییرات بازده حرارتی نسبت به میدان الکتریکی در غلظت‌های مختلف نانوسیال آب/آلومینا در توان‌های ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ وات.

اثرگذاری بر نانوذرات و شکستن حباب‌ها، تسهیل حرکت حباب از روی سطح داغ بر افزایش بازده تأثیرگذار است. [۵۵،۵۴]

با افزایش میدان الکتریکی، تخلیه‌ی کورونا در الکتروود ولتاژ بالا سبب یونیزه شدن مولکول‌های بخار اطراف الکتروود را یونیزه می‌کند، سپس الکتروود از جریان یون اشعه‌ی ساطع می‌کند و باد کورونا ایجاد می‌شود که باعث افزایش آشفستگی سطح چگالشی می‌شود و در نتیجه انتقال حرارت چگالنده افزایش می‌یابد. تعداد حباب‌ها را

راحتی حرکت این مواد در سیال می‌شود و با ایجاد اغتشاش به بهبود انتقال حرارت کمک می‌کنند. علاوه بر این، لایه‌ی منفذداری که روی سطح ترموسیفون تشکیل می‌شود باعث ایجاد حباب‌های ریز با سطح انتقال حرارت بیشتر می‌شود که به بهبود بازده مؤثر می‌انجامد.

میدان الکتریکی نیز از روش‌های مختلف مانند باد کورونا، کاهش نوسانات دمایی و در نتیجه کاهش زمان لازم برای پایدار شدن سیستم، افزایش اغتشاش با

جدول ۱. مقادیر بیشینه‌ی افزایش بازده حرارتی ترموسیفون برای نانوسیال آب/آلومینا نسبت به آب خالص برای توان‌های ورودی مختلف.

توان ورودی (w)	درصد کلی بیشینه افزایش	درصد بیشینه افزایش ناشی از میدان الکتریکی	درصد بیشینه افزایش ناشی از نانوسیال
۶۰	۳۷٫۳	۲۳٫۳	۱۴
۸۰	۲۹٫۸	۱۹٫۳	۱۰٫۵
۱۰۰	۲۵٫۲	۱۸٫۲	۷
۱۲۰	۲۱	۱۴	۷

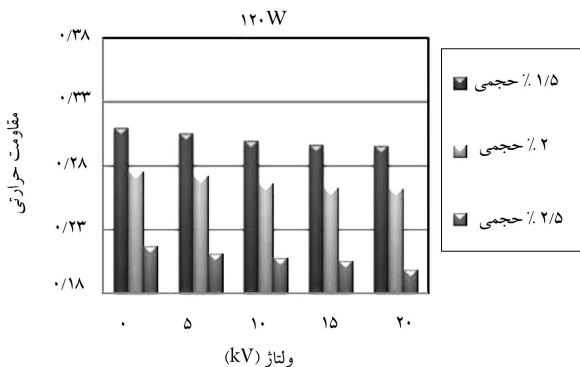
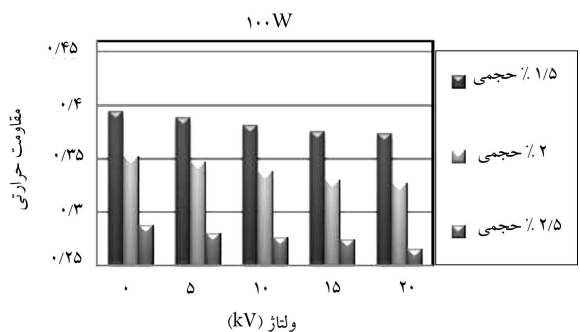
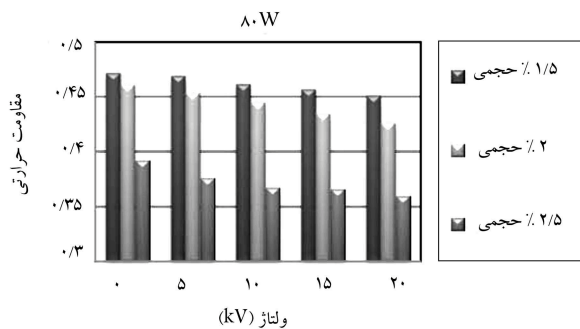
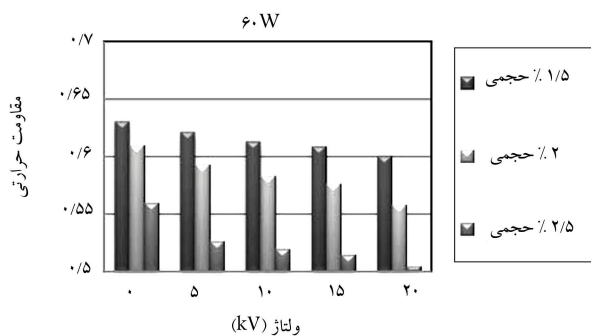
جدول ۲. مقادیر بیشینه‌ی افزایش بازده نسبت عدد ناسلت برای توان‌های ورودی مختلف.

توان ورودی (W)	درصد بیشینه تغییرات نسبت عدد ناسلت
۶۰	۴۳
۸۰	۳۱
۱۰۰	۲۷
۱۲۰	۲۲

با شکستن و از بین بردن حباب‌های بزرگ‌تر افزایش می‌دهد و در نتیجه، قطر انفصالی حباب‌ها کاهش می‌یابد و به ایجاد اغتشاش بیشتر می‌انجامد. در جداول ۱ و ۲ به ترتیب مقادیر افزایش بازده حرارتی و نسبت عدد ناسلت با توجه به تغییر غلظت و میدان ارائه شده است.

در شکل ۵ تغییرات مقاومت حرارتی نسبت به ولتاژ برای غلظت‌های مختلف نانوسیال نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود با اعمال میدان الکتریکی و افزایش غلظت نانوسیال مقاومت حرارتی ترموسیفون مورد بررسی کاهش می‌یابد؛ البته کاهش مقاومت حرارتی بر اثر افزایش نانوذرات بیشتر از تأثیر میدان الکتریکی است. علت کاهش مقاومت حرارتی آن است که مقاومت اصلی لوله‌ی حرارتی ناشی از تشکیل حباب در سطح مشترک مایع - جامد است. هرچه قطر حباب‌ها بیشتر باشد، مقاومت حرارتی بیشتری ایجاد می‌شود و این خود به کاهش شدت انتقال حرارت می‌انجامد. این در حالی است که ذرات نانو و میدان اعمالی باعث شکستن حباب‌ها و کاهش قطر آنها شده و مقاومت حرارتی کاهش می‌یابد. [۵۵]

علاوه بر غلظت نانوسیال و شدت میدان الکتریکی، نتایج نشان داد که افزایش گرمای ورودی نیز بر افزایش بازده لوله‌ی حرارتی و نسبت عدد ناسلت و کاهش مقاومت حرارتی لوله مؤثر است. با افزایش توان ورودی، جنبش نانوذرات بیشتر می‌شود و در نتیجه دمای کندانسور نیز افزایش خواهد یافت. با افزایش دمای کندانسور، اختلاف دمای بین کندانسور و آب سرد بیشتر می‌شود و در نتیجه انتقال حرارت افزایش می‌یابد. این امر سبب افزایش اختلاف دمای آب ورودی و خروجی و در نتیجه افزایش بازده می‌شود. با افزایش توان ورودی مقدار بخار ایجاد شده در کندانسور بیشتر می‌شود که خود به انتقال میزان حرارت بیشتر به آب سرد و افزایش بازده می‌انجامد. افزایش توان ورودی و در نتیجه افزایش جنبش نانوذرات، منجر به بمباران شدیدتر حباب‌های تشکیل شده روی سطح و کاهش مقاومت می‌شود.



شکل ۵. تغییرات مقاومت حرارتی ترموسیفون حاوی نانوسیال نسبت به میدان الکتریکی، برای غلظت‌های مختلف نانوذرات آلومینا در توان‌های ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ وات.

۵. تحلیل خطا

بررسی‌های تجربی برای تعیین حداکثر در محاسبه‌ی بازده حرارتی، مقاومت حرارتی نسبت عدد ناسلت به وسیله‌ی اندازه‌گیری‌های تجربی انجام گرفته است. این بررسی‌ها تأثیر خطای اندازه‌گیری را در نتیجه‌ی نهایی نشان می‌دهد. برای تخمین خطا از

$$E_{M_i} = \frac{X_i}{M} \frac{\partial M}{\partial X_i} E_{X_i} \quad (10)$$

که در آن، پارامتر قابل اندازه‌گیری، M کمیت محاسبه شده از روی پارامترهای قابل اندازه‌گیری؛ E_{X_i} (حداقل کمیت اندازه گرفته شده) / (دقت اندازه‌گیری) = خطای اندازه‌گیری؛ E_{M_i} حداکثر خطای ممکن در محاسبه‌ی یک کمیت.

تأثیر تمام خطاها در محاسبه‌ی کمیت نهایی در قالب معادله‌ی ۱۱ بیان می‌شود: [۵۰]

$$\text{Max} E_M = \pm \left[\left(\frac{X_1}{M} \frac{\partial M}{\partial X_1} E_1 \right)^2 + \left(\frac{X_2}{M} \frac{\partial M}{\partial X_2} E_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{X_n}{M} \frac{\partial M}{\partial X_n} E_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

که در آن E_M نشان‌دهنده‌ی حداکثر خطای حاصل در تخمین کمیت است.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر شدت میدان الکتریکی و غلظت نانوسیال بر بازده حرارتی، مقاومت حرارتی و نسبت عدد ناسلت تعریفی ترموسیفون در حضور میدان الکتریکی به عدد ناسلت در غیاب میدان برای یک ترموسیفون دوفازی بسته مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله بیان می‌دارد که با افزایش غلظت نانوسیال و افزایش شدت میدان الکتریکی انتقال حرارت ترموسیفون بهبود می‌یابد، به طوری که داده‌های تجربی نشان‌دهنده‌ی افزایش بازده حرارتی و نسبت عدد ناسلت، و کاهش مقاومت حرارتی در ترموسیفون با سیال عامل نانوسیال آب/آلومینا است. بیشینه افزایش بازده حرارتی برابر با ۳۸ درصد و بیشینه کاهش مقاومت حرارتی برابر با ۴۳ درصد در بالاترین غلظت مورد استفاده و بالاترین میدان الکتریکی اعمال شده به دست آمد. بیشترین میزان افزایش نسبت عدد ناسلت در حضور میدان الکتریکی به حالت بدون میدان الکتریکی برابر با ۳۶ درصد است.

این مطالعه‌ی مقدماتی بیان‌گر بهبود خواص حرارتی ترموسیفون دوفازی بسته در نتیجه‌ی استفاده‌ی هم‌زمان از نانوسیال و اعمال میدان الکتریکی است. البته تعیین دقیق و کامل سازوکار بهبود انتقال حرارت بر اثر افزایش نانوسیال به ترموسیفون، و همچنین سازوکار، نحوه و میزان اعمال میدان الکتریکی روی خواص حرارتی ترموسیفون نیاز به مطالعات بیشتر و کامل‌تری در این زمینه است.

۱.۵. تعیین بیشینه خطای محاسبه‌ی بازده حرارتی

با توجه به رابطه‌ی ۱۱، بیشینه خطای محاسبه‌ی بازده حرارتی از روی کمیت‌های اندازه‌گیری شده تعیین می‌شود:

$$\text{Max} E_\eta = \pm \left[E_m^2 + E_{(T_{out}-T_{in})}^2 + E_I^2 \right]^{1/2} = \pm \left[(2,03 \times 10^{-2})^2 + (1,8 \times 10^{-2})^2 + (5,5 \times 10^{-2})^2 \right]^{1/2} = \pm 0,0276 \quad (12)$$

در نتیجه بیشینه خطای بازده حرارتی ۲/۸ درصد خواهد بود.

۲.۵. تعیین بیشینه خطای محاسبه‌ی مقاومت حرارتی

با توجه به رابطه‌ی مقاومت حرارتی، بیشینه خطای آن از روی کمیت‌های اندازه‌گیری شده تعیین می‌شود:

$$\text{Max} E_R = \pm \left[2E_{(T_{evap}-T_{cond})}^2 + 2E_{(T_{out}-T_{in})}^2 \right]^{1/2} = \pm \left[(1,8 \times 10^{-2})^2 + (1,8 \times 10^{-2})^2 \right]^{1/2} = \pm 0,0254$$

در نتیجه بیشینه خطای بازده حرارتی ۲/۵٪ خواهد بود.

پانویس‌ها

1. Perkins-tube
2. Corona wind
3. electro Hydro dynamic
4. free convection
5. annular

منابع (References)

1. Bergles, A. E., "Recent development in convective heat transfer augmentation", Appl. Mech. Rev., **26**, pp.675-682, (in Persian) (1973).
2. Daungthongsuk, W. and Wongwises, S. "A critical re-

- view of convective heat transfer of nanofluids”, *J. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **11**, pp. 1-23 (2005).
3. Salehi, H., “Experimental investigation of effect of magnetic field on nano fluid’s operation in thermosyphon”, Master’s Thesis, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran (2008).
 4. Faghri, A., *Heat Pipe Science and Technology*, Taylor & Francis, USA (1995).
 5. Murshed, S.M.S., Leong, K.C. and Yang, C. “A combined model for the effective thermal conductivity of nano fluids”, *Applied Thermal Engineering*, **29** pp. 2477-2483 (2009).
 6. Lee, S., Choi, U.S. and Eastman, J.A. “Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles”, *J. Heat Transfer*, **121**, pp. 280-288 (1999).
 7. Qing, X. “Model for thermal conductivity of nanofluids”, *J. Applied Physics Letters*, **307**, pp. 313-318 (2003).
 8. Eastman, J.A. and Choi, U.S. “Anomalously increased effective thermal conductivities of thylene glycol-based nano fluid containing copper nano particles”, *J. Applied Physics Letters*, **78**, pp. 718 (2001).
 9. Li, Q. and Xuan, Y. “Convective heat transfer performance of nanofluids”, Njing University of Science & Technology, China (2001).
 10. Ding, Y., Alias, H., Wen, D. and Williams, R.A. “Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids)”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **49**(1-2), pp. 240 (2006).
 11. Zeinali Heris, S., Naser Esfahany, M. and Etemad, S.Gh. “Experimental investigation of convective heat transfer of Al₂O₃/water nanofluid in circular tube”, *J. Heat and Fluid Flow*, **28**, pp. 203-210 (2007).
 12. Jung, J.-Y., Oh, H.-S. and Kwak, H.-Y. “Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **52**(1-2), pp. 466-472 (2009).
 13. Chein, R. and Chuang, J. “Experimental microchannel heat sink performance studies using nanofluids”, *Int. J. Thermal Sci.*, **46**(1), pp. 57-66 (2007).
 14. Shanbedi, M., Zeinali Heris, S., Baniadam, M. and Amiri, A. “The effect of multi-walled carbon nanotube (MWCNT)/water nanofluid on thermal performance of a two-phase closed thermosyphon”, *Exp. Heat Transf.*, **25**(4), pp. 1-15 (2013).
 15. Williams, W., Buongiorno, J. and Hu, L.-W. “Experimental investigation of turbulent convective heat transfer and pressure loss of alumina/water and zirconia/water nanoparticle colloids (nanofluids) in horizontal tubes”, *J. Heat Transfer*, **130**(4), pp. 042412-042417 (2008).
 16. Pantzali, M.N., Mouza, A.A. and Paras, S.V. “Investigating the efficacy of nanofluids as coolants in plate heat exchangers (PHE)”, *Chemical Engineering Science*, **64**, pp. 3290-3300 (2009).
 17. Mansour, R.B., Galanis, N. and Nguyen, C.T. “Effect of uncertainties in physical properties on forced convection heat transfer with nanofluids”, *Appl. Therm. Eng.*, **27**(1), pp. 240-249 (2007).
 18. Huminic, G., Huminic, A., Morjan, I. and Dumitrache, F. “Experimental study of the thermal performance of thermosyphon heat pipe using iron oxide nanoparticles”, *Int J Heat Mass Transf.*, **54**(1-3), pp. 656-661 (2011).
 19. Trisaksri, V. and Wongwises, S. “Nucleate pool boiling heat transfer of TiO₂-R141b nanofluids”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **52**, pp. 1582-1588 (2009).
 20. Noie, S.H., Zeinali Heris, S., Kahani, M. and Nowee, S.M. “Heat transfer enhancement using Al₂O₃/Water nanofluid in a two-phase closed thermosyphon”, *Int. J. Heat Fluid Flow*, **30**(4), pp. 700-705 (2009).
 21. Khandekar, S., Joshi, Y.M. and Mehta, B. “Thermal performance of closed two-phase thermosyphon using nanofluids”, *Int. J. of Thermal Sci.*, **47**, pp. 659-662 (2008).
 22. Paramatthanuwat, T., Boothaisong, S., Rittidech, S. and Booddachan, K. “Heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon using de ionized water mixed with silver nano, heat mass transf”, *Waerme und Stoffuebertragung*, **46**, pp. 281-285 (2010).
 23. Paramatthanuwat, T., Rittidech, S. and Pattiya, A. “A correlation to predict heat-transfer rates of a two-phase closed thermosyphon (TPCT) using silver nanofluid at normal operating conditions”, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **53**, pp. 4960-4965 (2010).
 24. Hauksbee, F. *Physico-Mechanical Experiments on Various Subjects*, 1 st ed., London, pp. 46-47 (1709).
 25. Chattock, P. “On the velocity and mass of ions in the electric wind in air”, *Phill. Mag. Jsci*, **48**, pp. 401-420 (1899).
 26. Senftleben, H. “Die einwirkung elektrischer and magnetischer felder auf das warmelever-mogen von Gassen”, *Physik Zs.*, **32**(14), pp. 550 (1931).
 27. Salehi, M. “Single-phase and phase-change heat transfer enhancement in subcompact channels using an applied electric field”, Ph.D.Thesis, University of Maryland, College Park (1988).
 28. Stuetzer, O.M. “Ion drag pressur generation”, *J. Appl. Phys*, **30**, pp. 984-994 (1959).
 29. Robinson, M. “Movement of air in the electric wind of the corona discharge”, *Transaction of the American Institution of Engineers*, **80**, pp. 143-150 (1961).
 30. Macro, S.M. and Velkoff, H.R. “Effect of electrostatic fields on free convection heat transfer from a flat plate”, ASME Paper No. 63-HT-9 (1963).
 31. Obrien, R.J. and Shine, A.J. “Effect of electrostatic fields on free convection heat transfer from a flat plate”, *ASME J.Heat Transfer*, **89**, pp. 114-115 (1967).
 32. Lee, C.J. “Heat transfer with electrostatic field”, M. S. Thesis, TUMER 67-5, Tufts university, Medford, Mass. (1967).
 33. Poulter, R. “Electrohydrodynamic interactions with laminar and transitional flow forced connection heat transfer in tubes”, Ph. D. Thesis, University of Newcastle-upon-Type (1970).
 34. Fernandez, J.L. “Electrohydrodynamic enhancement of forced convection heat transfer in tubes”, Ph.D. Thesis, Univercity of Bristol, U.K. (1975).

35. Newton, D.C. and Allen, P.H.G. "Senftleben effect in insulating oil under uniform electric stress", *Left. Heat Mass Transfer*, **4**, pp. 9-16 (1977).
36. Levy, E.K. "Effect of electrostatic field on forced convection heat transfer", M.S. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass. (1969).
37. Pouiter, S. and Richardson, A.T. "Electrohydrodynamic enhancement of heat transfer with single phase dielectric fluids in tubes", Aero. Res. Council Rept. ARC 36 345/HMT 392, London (1975).
38. Poulter, R. and Miller, I.A. "Heat transfer enhancement in shell/tube heat exchanger employing electrostatic fields", *Proc. 1 st U. K. National Heat Transfer Conf., Leeds*, **2**, pp. 707-716 (1984).
39. Miller, I.A. "Electrohydrodynamic enhancement of forced convection heat transfer to low viscosity liquids flowing in annuli", Ph. D. Thesis, University of Bristol (1981).
40. Poulter, R. and Allen, P.H.G. "Electrohydrodynamically augmented heat and mass transfer in the shell/tube heat exchanger", *Proc. Eighth Int. Heat Transfer Conf., San Francisco*, **6**, pp. 2963 (1986).
41. Karayiannis, T.G., Collings, M.W. and Allen, P.H.G. "Electrohydrodynamic enhancement of nuclear boiling heat transfer in heat exchanger", *J. Heat Technol.*, **7**(2), pp.15-24 (1989).
42. Fujino, T., Yakoyama, Y. and Mori, Y.H. "Augmentation of laminar forced convection heat transfer by application of a traverse electric field", *J. Heat Transfer*, **111**, pp. 345-351 (1989).
43. Ohadi, M.M., Nelson, D.A. and Zia, S. "Heat transfer enhancement of laminar and turbulent pipe flow via corona discharge", *Int. J. Heat Mass Transfer*, **34**(4/5), pp. 1175-1187 (1991).
44. Allen, P.H.G. and Karayiannis, T.G. "Electrohydrodynamic enhancement of heat transfer and fluid flow", *Heat Recovery System and CHP*, **15**(5), pp. 389 -423 (1995).
45. Seyed-Yagoobi, J. and Brayan, H.E., *Enhancement of Heat Transfer and Mass Transport in Single-Phase and Two Phase Flows with Electrohydrodynamics*, Advances in Heat Transfer, Academic press, **33**, New York, NY (1999).
46. Chen, C., Lan, G., Zhang, G. and Zhang, X. "Electrohydrodynamic enhancement condensation of dielectric liquid on the horizontal enhanced tube", Arbin University of Science and Technology, Harbin 150080 China, Heilongjiang Electric Power Science and Research Institute (2009).
47. Grassi, W. and Testi, D. "Electrohydrodynamic convective heat transfer in a square duct", LOTHAR (Low Gravity and Thermal Advanced Research Laboratory), Department of Energetics, L. Poggi, University of Pisa, Pisa, Italy (2009).
48. Omidvarborna, H., Mehrabani-Zeinabad, A. and Nasr Esfahany, M. "Effect of electrohydrodynamic (EHD) on condensation of R-134a in presence of non-condensable gas", Department of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran (2009).
49. Noie, S.H. "Heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon", *Applied Thermal Engineering*, **25**, pp. 495-506 (2005).
50. Noie, S.H., Zeinali Heris, S., Kahani, M. and Nowee, S.M. "Heat transfer enhancement using Al₂O₃/water nanofluid in a two-phase closed thermosyphon", *J. Heat and Fluid Flow*, **30**(4), pp.700-705 (2009).
51. Noie, S.H. "Heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon", *J. Applied Thermal Engineering*, **25**, pp. 495-506 (2005).
52. Khandekar, S. Joshi, Y.M. and Mehta, B. "Thermal performance of closed two-phase thermosyphon using nanofluid", *J. Thermal Sciences*, **47**, pp. 659-667 (2008).
53. Maki, S., Tagawa, T. and Ozoe, H. "Enhanced convection or quasi-conduction states measured in a superconducting magnet for air in a vertical cylindrical enclosure heated from below and cooled from above in a gravity field", *J. Heat Transfer*, **124**, pp. 667 (2002).
54. Macro, S.M. and Velkoff, H.R. "Effect of electrostatic fields on free convection heat transfer from a flat plate", ASME Paper No. 63-HT-9 (1963).
55. Tsai, C.Y., Chien, H.T. and Ding, P.P. "Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance", *J. Materials Letters*, **58**, pp. 1461-1465 (2004).
56. Young, H.D., *Statistical Treatment of Experimental Data*, New York, McGraw-Hill (1962).
57. Holman, J.P., *Experimental Methods for Engineers*, 5th ed. New York, McGraw-Hill (1989).