

بررسی تجربی عملکرد گرمایی لوله گرمایی نوسانی داخل شیاردار با نانوسیال آب-MWCNT

مریی، گروه تاسیسات حرارتی و برودتی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران، rsakbari@tvu.ac.ir

رستم اکبری کنگرلویی *

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، m.abbasalizadeh@urmia.ac.ir

مجید عباسعلیزاده رنجبری

چکیده

با توجه به اهمیت استفاده از نانو سیال‌ها در لوله‌های گرمایی و عدم ارائه گزارشی درباره استفاده از نانوسیال در لوله گرمایی نوسانی داخل شیاردار (IGOHP)، در این تحقیق به صورت تجربی عملکرد گرمایی IGOHP با نانوسیال آب- نانولوله کربنی چند دیواره (MWCNT) مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها در نسبت پرشوندگی بهینه (۶۰ درصد) در توان‌های گرمایی ۵۰ تا ۳۰۰ وات در چهار کسر حجمی ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴ درصد با نانوسیال آب-MWCNT انجام گردید. نتایج نشان داد که کمترین مقاومت گرمایی در کسر حجمی ۰/۱ درصد به دست آمد و پس از آن افزودن غلظت نانوسیال سبب کاهش عملکرد گرمایی IGOHP شد که دلیل اصلی آن افزایش لزجت نانوسیال می‌تواند باشد. استفاده از نانوسیال آب-1% MWCNT در مقایسه با آب مقطر در IGPHP، به طور متوسط ۱۱ درصد مقاومت گرمایی را کاهش و ۱۲ درصد رسانایی گرمایی مؤثر را افزایش داد. نتایج نشان داد شروع بکار نوسانات در نانوسیال نسبت به آب مقطر زودتر آغاز شده و بهترین عملکرد در توان‌های گرمایی بالاتر رخ داد که دلیل آن می‌تواند در نوسانات زیاد و مداوم دانست. **واژه‌های کلیدی:** مقاومت گرمایی، لوله گرمایی نوسانی، نانوسیال، MWCNT، داخل شیاردار.

An Experimental investigation of Thermal Performance of Inner-Grooved Closed Loop Pulsating Heat Pipes with MWCNT nanofluid

R. Akbari Kangarluei

Department of Heating and cooling installations, faculty Mechanical Engineering, Technical and vocational University (TVU), Tehran, Iran

M. Abbasalizadeh Ranjbari

Department of Mechanical Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran

Abstract:

Due to the importance of using nanofluids in heat pipes and not providing a report on the use of nanofluids in inner groove pulsating heat pipe (IGPHP), In this research, the thermal performance of IGPHP investigated using water- MWCNT (Multi-walled carbon nanotube) nanofluid as a working fluid. Experiments were performed on the optimal filling ratio (60%) and the input heat range of 50-300W in the vertical position in four volume fractions of 0.05, 0.1, 0.2, 0.4% with MWCNT nanofluid. The results showed that the lowest thermal resistance was obtained in the volume fraction of 0.1% and then increasing the concentration of nanofluid increases the thermal resistance of IGOHP, which seems to be the main reason for increasing the viscosity of nanofluid. The results showed that the use of MWCNT 0.1% nanofluid reduced the thermal resistance about 11% and increased the effective thermal conductivity about 12%. The results showed that the fluctuations in nanofluids started earlier than distilled water and the best performance occurred at higher input heat, which can be attributed to the large number of continuous fluctuations.

Keywords: thermal resistance, pulsating heat pipe, nanofluid, MWCNT, inner groove.

۱-مقدمه

روغن و سایر روانکارها، محلول‌های پلیمر و سایر سیال‌های مرسوم می‌باشند. مواد مورد استفاده به عنوان نانوذرات شامل اکسیدهای سرامیک به عنوان مثال Al_2O_3 و CuO ، کاربیدهای فلزی (SiC)، نیتريد ها (AlN, SiN)، فلزها (Al و Cu) غیرفلزات (گرافیت)، نانولوله‌های کربنی (CNT) می‌باشند.

نانو سیالات به دلیل قابلیت عالی در انتقال گرما در دستگاه‌های تبادل گرما به عنوان مایعات انتقال گرما با بازده بسیار بالا استفاده شده است. مطالعات نشان داده است که نانو سیالات می‌توانند به طور قابل توجهی ویژگی‌های انتقال گرما در لوله‌های گرمایی را افزایش دهند [۸]. لوله‌های گرمایی وسایل ساده و کم‌هزینه با ضرایب انتقال گرما فوق‌العاده بالا هستند که قادر به انتقال مقدار زیادی انرژی گرمایی هستند [۹]. لوله‌های گرمایی نوسانی نوع جدیدی از لوله‌های گرمایی هستند که از سه قسمت تبخیرکننده، آدیاباتیک و چگالنده تشکیل شده‌اند و از جمله وسایل انتقال گرما دوفازی می‌باشند که از

به دلیل محدودیت انرژی و منابع مادی، صرفه‌جویی در مصرف انرژی گرمایی، ذخیره‌سازی و انتقال آن به مباحث مهم تحقیقاتی طی چند دهه گذشته تبدیل شده است. اخیراً توجه ویژه‌ای به استفاده از فناوری نانو، به ویژه نانوسیال به منظور افزایش عملکرد فرآیندهای گرمایی [۱] لوله‌های گرمایی [۲]، صفحات خورشیدی [۳] خنک کاری تجهیزات الکترونیکی و الکترونیکی [۴]، روان کننده‌ها، مبدل‌های گرمایی شده است [۵ و ۶].

به دلیل رسانایی گرمایی بالای مواد فلزی نسبت به مایعات و حرکت براونی نانوذرات و تمایل مایعات به داشتن شکل ساختاری جامد در فصل مشترک جامد، از جمله عوامل تقویت رسانایی گرمایی نانو سیالات است [۷]. سیال‌های پایه که برای ساخت نانو سیال‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل آب، اتیلن گلیکول، سردکننده‌ها،

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: rsakbari@tvu.ac.ir

طریق حرکت نوسانی و دائمی مخلوط دوفازی (مایع و بخار) بین تبخیرکننده و چگالنده گرما را انتقال می‌دهند و انتقال گرمای محسوس و نهان هم‌زمان صورت می‌گیرد که خود یک مزیت نسبت به سایر لوله‌های گرمایی متعارف است [۱۰]. PHP^۱ در زمینه‌های مختلف مانند دستگاه‌های انرژی خورشیدی [۱۱]، دستگاه‌های بازیافت گرما [۱۲]، دستگاه‌های خنک‌کننده الکترونیکی [۱۳ و ۱۴]، باتری‌های وسایل نقلیه برقی [۱۵]، مبدل‌های گرمایی [۱۶ و ۱۷] کاربرد بالقوه‌ای دارد. مطالعات مربوط در این زمینه نشان داده است که پارامترهای زیادی بر عملکرد PHPs مؤثر هستند که از جمله آن‌ها به خواص سیال عامل، نسبت پرشوندگی، قطر داخلی، تعداد دور، ساختمان مقطع، ساختار داخلی لوله و زاویه شیب می‌توان اشاره کرد.

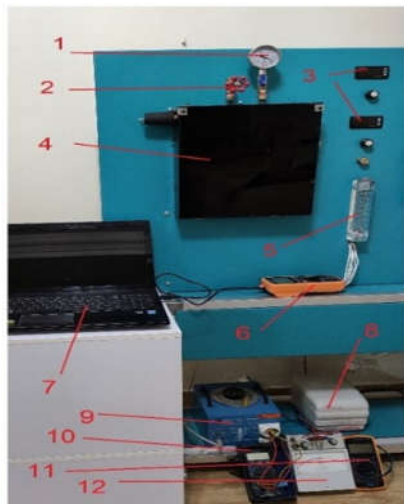
نتایج بررسی روی سیال عامل نشان داد عملکرد انتقال گرمای PHP با سیالات عامل مختلف عمدتاً به خصوصیات گرمایی-فیزیکی مایعات در حال کار، خواص انتقال فاز بخار مایع، فعل‌وانفعالات مولکولی و مقاومت اضافی در برابر انتقال جرم مربوط می‌شود [۱۸]. تجزیه و تحلیل حرکت حباب‌ها و ستون‌های بخار نشان می‌دهد که فعل‌وانفعالات قوی بین حرکات مختلف حباب یا ستون بخار وجود دارد و تغییرات فاز در بخش تبخیر یا چگالش نیز نقش مهمی در جریان سیال درون PHP دارد [۱۹]. بسیاری از محققان اثرات برخی از پارامترهای ترموفیزیکی مربوط به سیال عامل، مانند نقطه‌جوش، گرمای نهان تبخیر، کشش سطحی، رسانایی گرمایی و لزجت پویا را مورد مطالعه قرار دادند و نتایج آن‌ها نشان داد لزجت دینامیکی پایین و کشش سطحی و رسانایی گرمایی بالا عملکرد گرمایی PHP را بهبود می‌بخشد. در توان‌های گرمایی ورودی کمتر، نقطه‌جوش پایین سیال عامل، برای شروع سریع‌تر راه‌اندازی مطلوب‌تر است. باین‌حال در توان‌های گرمایی بالاتر، برخی از مشکلات مانند خشک‌شدگی را ایجاد می‌کند [۲۰].

ریل و همکاران [۲۱] یک مطالعه تجربی در مورد عملکرد انتقال گرمای PHP حلقه باز با ۵ درصد وزنی نانوسیال آب-مس انجام دادند. نتایج نشان داد رسانایی گرمایی به‌اندازه ۲۰٪ افزایش یافت. گشایشی و همکاران [۲۲] تأثیر نانوذرات اکسید آهن در نفت سفید در لوله گرمایی نوسانی صاف مسی واقع در یک میدان مغناطیسی برای توان گرمایی ورودی مختلف (۱۰-۹۰ وات) را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که نانوذرات اکسید آهن می‌توانند مقاومت گرمایی و متعاقب آن عملکرد گرمایی و همچنین ضریب کلی انتقال گرمای لوله را به‌ویژه در حضور میدان مغناطیسی بهبود دهند. نتایج تجربی شینگ و همکاران [۲۳] نشان داد که استفاده از نانوسیال آب-MWNT در PHP در غلظت کمتر ۰/۳ درصد وزنی از شروع بکار بهتری نسبت به آب برخوردار است. علاوه بر این نتایج نشان داد که عملکرد انتقال گرمای PHP می‌تواند با استفاده از نانو سیالات MWNTs هیدروکسیله در غلظت پایین به‌طور قابل‌توجهی بهبود یابد. وقتی توان ورودی تا ۱۰۰ وات افزایش می‌یابد، مقاومت گرمایی ۰/۱ درصد وزنی نانوسیال در مقایسه با آب خالص ۳۴ درصد کاهش می‌یابد. نتایج بررسی استفاده از نانوسیال اکسید آهن -آب در غلظت‌های ۹۰، ۲۷۰ و ۴۵۰ ppm نشان

داد که افزودن یک نانوسیال مغناطیسی می‌تواند عملکرد PHP را بهبود بخشد و در حضور میدان مغناطیسی، مقاومت گرمایی با افزایش گرمای ورودی کاهش می‌یابد. هنگامی که گرمای ورودی از ۲۰ به ۵۵ وات افزایش یافت، افت چشمگیری در مقاومت گرمایی مشاهده شد. علاوه بر این، ذرات نانوسیال تحت تأثیر میدان مغناطیسی به‌طور ایمن بر روی دیواره رسوب کردند و با رسوب لایه‌ای از نانوذرات بر روی سطح لوله، نقاط جوش را افزایش می‌دهد [۲۴]. نتایج بررسی ریزاد تانسن و همکاران [۲۵] درباره استفاده از نانوسیال آب-نانولوله‌های کربنی چند دیواره (MWCNTs) با غلظت‌های مختلف در لوله گرمایی نوسانی صاف (داخل لوله کاملاً صاف بود) نشان داد که عملکرد گرمایی ارتباط معنی‌داری با توزیع فشار دارد و به‌شدت به تعداد نوسانات فشار با زمان بستگی دارد، به‌طوری‌که نانوسیال آب-MWCNTs در غلظت ۰/۲٪ حداکثر تعداد نوسان و مقاومت گرمایی کم را در همه توان‌های ورودی به تبخیرکننده داشت. نتایج بررسی نظری و همکاران [۲۶] با استفاده از نانوسیال اکسید گرافن - آب در چهار غلظت اکسید گرافن (۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ گرم در لیتر) در PHP نشان داد که افزودن اکسید گرافن باعث افزایش رسانایی گرمایی و گرانشی سیال پایه می‌شود. علاوه بر این، استفاده از اکسید گرافن می‌تواند مقاومت گرمایی PHP را تا ۴۲٪ کاهش دهد. همچنین غلظت زیاد (۱/۵ گرم در لیتر) نانوسیال باعث کاهش عملکرد گرمایی PHP در مقایسه با آب خالص می‌شود که دلیل آن افزایش لزجت دینامیکی نانوسیال است. نتیجه تحقیق محسنی و همکاران [۲۷] با استفاده از نانوسیال آب-Fe₃O₄ در غلظت ۱٪ با نسبت پرشوندگی‌های مختلف نشان داد که لوله گرمایی نوسانی در نسبت پرشوندگی ۵۰٪ بهترین عملکرد را داشته و با استفاده از نانوسیال مقاومت گرمایی ۲۰٪ کاهش یافته است.

مطالعه تجربی زی و همکاران [۲۸] به‌منظور بررسی عملکرد انتقال گرمای PHP با سیالات عامل هیبریدی، مخلوط‌های اتانول آب و نانوذرات گرافن (۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ mg/ml) انجام شد و نتایج تجربی آن‌ها نشان داد که استفاده از گرافن مقاومت گرمایی را تا ۲۵٪ کاهش دهد و افزودن ۱ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر گرافن منجر به افزایش مقاومت گرمایی شد که به لزجت دینامیکی بالاتر و تجمع نانوذره‌ها نسبت داده شد. زافر و همکاران [۲۹] به‌صورت تجربی و عددی به بررسی عملکرد گرمایی لوله گرمایی نوسانی چهار دور با استفاده از غلظت وزنی ۰/۱ درصد نانوذرات ترکیبی Al₂O₃-CuO، ۰/۱ درصد وزنی نانوذرات ترکیبی SiO₂-CuO و آب پرداختند. نتایج نشان داد که مقاومت گرمایی نانوسیال ترکیبی آب و SiO₂-CuO، ۵۷٪ پایین‌تر از آب مقطر به دست آمد. باین‌وجود به ترتیب ۸۰ و ۶۰ درصد، رسانایی گرمایی و لزجت نانوسیال ترکیبی Al₂O₃-CuO نسبت به نانوسیال ترکیبی SiO₂-CuO بیشتر بود. افزایش لزجت در نانو سیالات ترکیبی Al₂O₃-CuO مانع حرکت سیال عامل در PHP می‌شود، بنابراین مقاومت گرمایی را افزایش می‌دهد. در همین حال، نانو سیالات ترکیبی برای شروع بکار نوسان‌ها نسبت به آب به نیروی گرمایشی کمتری نیاز دارند. استفاده از لوله‌های داخل شیاردار در لوله‌های گرمایی نوسانی یکی دیگر از روش‌های افزایش کارایی آن‌ها است. نتایج بررسی اکبری و همکاران [۳۰] نشان داد که مقاومت گرمایی لوله نوسانی داخل شیاردار در تمام زوایای کارکرد به‌طور متوسط ۲۱ درصد کمتر از لوله گرمایی

¹ pulsating heat pipe



شکل ۲- قسمت‌های مختلف دستگاه:

- ۱- فشارسنج
- ۲- شیر تخلیه و پر کردن
- ۳- نشان‌دهنده‌های دما
- ۴- مجموعه لوله گرمایی نوسانی ۵- دبی سنج
- ۶- دیتالاگر
- ۷- لپ‌تاپ
- ۸- تثبیت‌کننده ولتاژ
- ۹- واریاک
- ۱۰- ولت‌متر
- ۱۱- آمپر متر
- ۱۲- وات سنج

لوله گرمایی نوسانی داخل شیردار از سه قسمت اصلی تبخیرکننده، آدیباتیک و چگالنده تشکیل شده است که طول آن‌ها به ترتیب ۱۰۵، ۸۵ و ۱۱۰ میلی‌متر می‌باشد. از آب مقطر و نانوسیال آب-نانولوله کربنی چند دیواره (MWCNT) به‌عنوان سیال عامل و از لوله مسی با تعداد ۴ دور (U شکل) که این تعداد دور بر اساس تعداد دور ناحیه تبخیرکننده می‌باشد، استفاده شده است. گرما به‌وسیله المان‌های گرمایی از جنس کروم نیکل روکش‌دار که به دور لوله مسی در ناحیه تبخیرکننده پیچیده شده، اعمال شده است. برای ورود شار گرمایی متغیر از واریاک DEREIX SA PARIS همراه با وات سنج GANZ-HEVA2 با دقت ۰/۵ و آمپر متر و ولت‌متر استفاده شده است. از حسگر دمایی PT ۱۰۰ مدل jumo که دقت اندازه‌گیری در آن‌ها ۰/۱ درجه سلسیوس و زمان پاسخ‌دهی حدود ۰/۰۵ ثانیه و از دیتالاگر با دقت ۰/۱ درجه سلسیوس جهت ثبت دماها در هر ۰/۵ ثانیه استفاده شده است. جهت اندازه‌گیری دبی آب در چگالنده از روتامتر (LUNA(0/03-0/35) با دقت ۴٪ استفاده گردید. از پمپ خلأ VALUE مدل VE115N به‌منظور تخلیه لوله گرمایی از هوا استفاده شد که این سیستم توانایی ایجاد فشار خلأ تا حدود ۱۰ kPa را دارد. از یک خلاسنج عقربه‌ای برای اندازه‌گیری و کنترل میزان خلأ همچنین اطمینان از عدم وجود نشتی در سیستم استفاده گردیده است. دقت اندازه‌گیری خلاسنج ۲ kPa است. سیستم خلأ به‌منظور تخلیه لوله گرمایی از هوا و پر کردن آن با سیال عامل استفاده شده است. برای

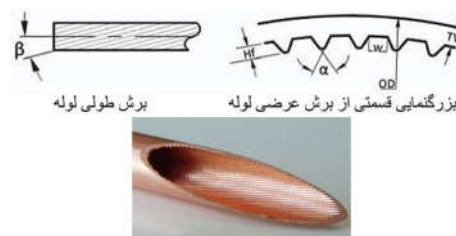
نوسانی صاف است.

تحقیق‌های زیادی در باره اهمیت استفاده از نانو سیال‌ها در فن-آوری‌های نوین مخصوصاً در لوله‌های گرمایی نوسانی انجام شده است. پژوهش‌های انجام‌شده قبلی در مورد استفاده از نانوسیال در لوله گرمایی نوسانی صاف می‌باشد. پس با توجه به اینکه تاکنون هیچ‌گونه پژوهشی درباره استفاده از نانوسیال‌ها در لوله گرمایی نوسانی داخل شیردار (IGPHP¹) گزارش نشده است بنابراین هدف از این پژوهش استفاده از نانوسیال آب-نانو لوله کربنی چند دیواره (MWCNT) و مقایسه عملکرد گرمایی آن با آب مقطر در لوله گرمایی نوسانی داخل شیردار مورد نظر است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- دستگاه و تجهیزات جانبی آن

در لوله گرمایی نوسانی داخل شیردار از لوله‌های مسی داخل شیردار شکل ۱ با مشخصات فنی جدول ۱ استفاده شده است.



شکل ۱- لوله مسی و مشخصات شیرهای داخل لوله مسی

جدول ۱- مشخصات شیرهای داخل لوله مسی

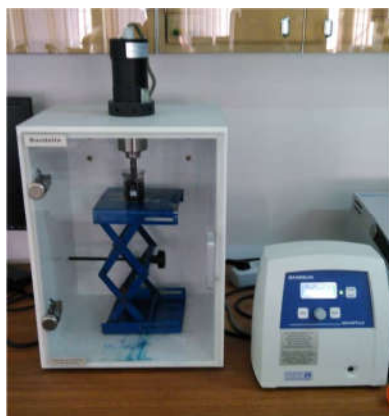
تعداد شیر	زاویه مارپیچ β (درجه)	زاویه رأس دندانه α (درجه)	عمق شیار H_f (mm)	ضخامت لوله (mm)	قطر خارجی OD (mm)
۳۰	۱۸	۵۳	۰/۲	۰/۲۸	۴/۷۶

در شکل ۲ دستگاه ساخته‌شده و تجهیزات مورد استفاده در آن و در شکل ۳ طرحواره دستگاه، ترتیب و محل قرارگیری آن‌ها، ابعاد و اندازه‌های دستگاه و محل قرارگیری حسگرهای دما مشاهده می‌شود.

¹ inner groove pulsating heat pipe



شکل ۴- نانوسپال‌های آماده‌سازی شده جهت انجام آزمون‌ها با درصد‌های حجمی مختلف بعد از ۱۲ ساعت.



شکل ۵- دستگاه پروب التراسونیک استفاده شده در پژوهش حاضر

۲-۳- نحوه انجام آزمایش:

برای پر کردن لوله گرمایی نوسانی با سیال عامل ابتدا با استفاده از پمپ خلأ، سیستم از هوا و گازهای غیرقابل چگالش تخلیه شد و بر اساس نسبت پرشوندگی مشخص سیستم با سیال عامل شارژ گردید. در این تحقیق آزمایش‌ها با درصد پرشوندگی‌های ۰.۴۰، ۰.۵۰، ۰.۶۰ و ۰.۷۰ با توان‌های گرمایی ورودی ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ وات انجام گردید و پس از آن داده‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند تا اینکه بهترین درصد پرشوندگی انتخاب شود. پس از تعیین نسبت پرشوندگی بهینه آزمایش‌ها با همان توان‌های گرمایی ذکر شده فوق برای بررسی تأثیر استفاده از نانوسپال آب-MWCNT در عملکرد گرمایی IGPHP انجام گردید.

۳- محاسبات

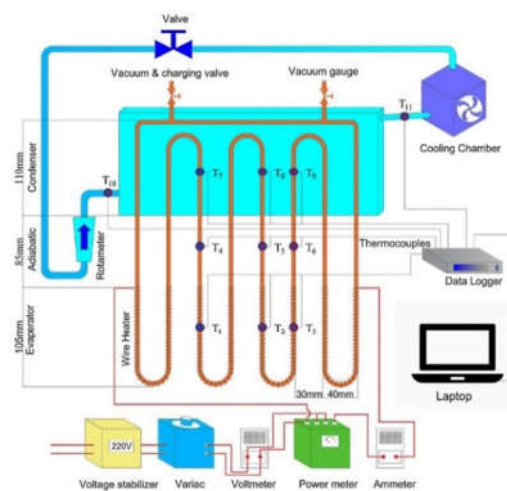
در محاسبات مربوط به لوله‌های داخل شیاردار از قطر هیدرولیک D_h بجای قطر داخلی استفاده می‌شود و مقدار آن بر اساس رابطه (۱) تعیین می‌شود [۳۱].

$$D_h = \frac{4A \cos \beta}{NS} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، A سطح مقطع نفوذ سیال، S محیط تر شده یک شیار، β و N به ترتیب زاویه مارپیچ و تعداد شیارها هستند. با استفاده از مشخصات لوله داخل شیاردار از جدول ۱ مقدار قطر هیدرولیکی آن برابر با ۲/۶۵ میلی‌متر است.

طراحی لوله گرمایی نوسانی باید به‌گونه‌ای باشد تا عمل پمپ

جلوگیری از تلفات گرمایی در ناحیه تبخیرکننده و آدیاباتیک و اثرات دمای محیط در چگالنده، کل سیستم به‌طور کامل عایق‌بندی شد و از آب به‌عنوان سیال خنک‌کننده در چگالنده استفاده شده است.



شکل ۳- محل قرارگیری حسگرهای دما و مشخصات سیستم

۲-۲- آماده‌سازی نانوسپال

نانو لوله کربنی چند دیواره (MWCNT) با گرید تجاری NC7000 از شرکت Nanocyl بلژیک تهیه شد. مشخصات برجسته این نانولوله‌ها در جدول ۲ آورده شده است. قطر تقریبی این نانولوله‌ها همان‌طوری که در جدول ذکر شده است ۹/۵ نانومتر و طول آن‌ها ۱/۵ میکرون می‌باشد.

جدول ۲- مشخصات نانوذره MWCNT

Type	تصویر TEM
Purity: > 90%	
Outside diameter: 9.5 nm	
Length: 1.5 μm	
SSA: 250-300 m2/g	
Color: black	
True density: ~1.7 g/cm3	
Volume resistivity: 10-4 Ω.cm	

نانوذره‌های MWCNT به‌وسیله یک پروب اولتراسونیک (شکل ۵) در سیال پایه آب مقطر به‌خوبی پخش و جداسازی شده‌اند. محلول نهایی کاملاً همگن بوده و پایداری مطلوبی از خود نشان داد. نانوسپال‌ها در کسر حجمی‌های ۰.۰۵، ۰.۱، ۰.۲ و ۰.۴ درصد تهیه شدند. شکل ۴ نانوسپال‌های حاوی آب مقطر و MWCNT را نشان می‌دهد که درصد حجمی هر یک از آن‌ها بر روی تصویر درج شده است. برای آماده‌سازی نانوسپال‌ها پروب التراسونیک مارک Bandelin ساخت کشور آلمان با توان ناخالص ورودی ۳۰ وات بکار گرفته شد. مدت‌زمان کل اعمال ارتعاشات التراسونیک ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شد. پس از این مدت‌زمان جدایش مطلوب و موردنظر اتفاق افتاده و نانوسپال همگن حاصل شد. شکل ۴ نانوسپال‌های آماده‌سازی شده جهت انجام آزمون‌ها با درصد‌های حجمی مختلف را بعد از ۱۲ ساعت نشان می‌دهد.

$$h_c = \frac{Q}{A_c(T_c - T_v)} \quad (9)$$

$$h_c = \frac{Q}{A_c(T_v - T_c)} \quad (10)$$

در روابط (۹) و (۱۰)، A_c ، T_c ، T_v ، A_c ، T_c ، T_v بترتیب دمای اشباع سیال عامل، سطح چگالنده و سطح تبخیر کننده می‌باشد.

۴- تحلیل عدم قطعیت

عدم قطعیت کلی هریک از متغیرها برای عدم قطعیت تکرار و ابزار از رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$u_{total} = \sqrt{u_{tools}^2 + u_{rep}^2} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، u_{total} عدم قطعیت کلی u_{tools} عدم قطعیت ابزار و u_{rep} عدم قطعیت تکرار آزمایش‌ها می‌باشد. برای محاسبه عدم قطعیت توان گرمایی ورودی و مقاومت گرمایی از رابطه عدم قطعیت ترکیبی استاندارد استفاده شده است. محاسبات در نسبت پرشوندگی ۶۰ درصد در حالت قائم و توان گرمایی ۲۰۰ وات انجام شده است. با توجه به رابطه‌های (۴) و (۵) عدم قطعیت استاندارد برای توان گرمایی و مقاومت گرمایی را می‌توان از روابط (۱۲) و (۱۳) محاسبه کرد [۳۶].

$$U_Q = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial V} u_V\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial I} u_I\right)^2} \quad (12)$$

$$U_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial T_c} u_{T_c}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial T_e} u_{T_e}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial Q} u_Q\right)^2} \quad (13)$$

با توجه باینکه Ku ضریب پوششی و U پهنای عدم قطعیت می‌باشد بنابراین به ازای $Ku=2$ ، بیشینه مقدار پهنای عدم قطعیت از رابطه (۱۴) قابل محاسبه است:

$$U_{max} = U.Ku \quad (14)$$

در جدول ۲ مقدار بیشینه عدم قطعیت برای پارامترهای اصلی آورده شده است.

جدول ۲- بیشینه مقدار عدم قطعیت برای پارامترهای اصلی

پارامترها	نماد	بیشینه مقدار عدم قطعیت
دمای تبخیرکننده	T_e	٪ ۳/۱۶
دمای چگالنده	T_c	٪ ۲/۲۵
توان گرمایی ورودی	Q	٪ ۰/۵
مقاومت گرمایی	R	٪ ۴/۸
برسانایی گرمایی مؤثر	K_{eff}	٪ ۴/۷۵

۵- بحث و نتیجه گیری

در ابتدا آزمایش‌ها بر اساس نسبت پرشوندگی‌های مختلف در حالت قائم انجام گردید تا اینکه بهترین نسبت پرشوندگی در این حالت انتخاب شود. پس از آن به ازای نسبت پرشوندگی بهینه در حالت قائم، آزمایش‌ها برای بررسی تأثیر استفاده از نانوسیال آب- MWCNT و مقایسه آن با آب مقطر در عملکرد گرمایی IGPHP انجام گردید. لازم به ذکر است که از دمای متوسط به دست آمده از تکرار آزمایش‌ها در رسم نمودارها استفاده شده است.

کردن سیال خودبده خود صورت گیرد. برای این منظور قطر داخلی لوله باید از قطر بحرانی لوله کمتر باشد. برای بدست آوردن قطر بحرانی از مقدار بحرانی عدد اوتوس استفاده می‌شود. بر طبق رابطه (۲) نسبت نیروی گرانش به نیروی کشش سطحی مایع در یک لوله را عدد اوتوس گویند. مقدار بحرانی عدد اوتوس (مقداری که سرعت حد برابر صفر می‌شود) تقریباً برابر با ۴ است بنابراین مقدار قطر بحرانی را از رابطه (۳) می‌توان به دست آورد [۳۲].

$$Eo = \frac{D_{crit} g (\rho_{liq} - \rho_{vap})}{\sigma} \leq 4 \quad (2)$$

$$D_{crit} \approx 2 \times \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{liq} - \rho_{vap})}} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، D_{crit} حداکثر قطر داخلی، σ کشش سطحی، ρ_{liq} چگالی فاز مایع، ρ_{vap} چگالی فاز بخار سیال عامل و g شتاب گرانش می‌باشند؛ بنابراین با توجه به خواص سیال عامل مقدار قطر بحرانی حدود ۵ میلی‌متر به دست می‌آید که قطر هیدرولیکی لوله مورد استفاده کمتر از قطر بحرانی است.

برای بررسی و مقایسه عملکرد گرمایی لوله‌های گرمایی از مقاومت گرمایی استفاده می‌شود که از رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$R_t = \frac{T_e - T_c}{Q} \quad (4)$$

در رابطه ۴، T_c و T_e به ترتیب متوسط دمای دیواره خارجی تبخیرکننده و چگالنده، Q گرمای منبع تغذیه گرمایی است که توسط تبخیرکننده وارد لوله گرمایی نوسانی می‌شود. مقدار Q از طریق رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$Q = (1 - \phi) V.I \quad (5)$$

در رابطه (۵)، I ، V و ϕ به ترتیب مقادیر ولتاژ ورودی، جریان و ضریب افت گرما می‌باشند. گرمای ورودی از طریق تبخیرکننده به سیال عامل منتقل شده و سیال عامل این گرما را در ناحیه چگالنده به آب منتقل می‌کند که مقدار گرمای خروجی از طریق آب از رابطه (۶) به دست می‌آید:

$$Q_{out} = \dot{m}.c_p.(T_{out} - T_{in}) \quad (6)$$

در رابطه (۶)، \dot{m} جرمی آب ورودی به چگالنده، C_p ظرفیت گرمایی آب در فشار ثابت، T_{out} دمای آب خروجی از چگالنده و T_{in} دمای ورودی به چگالنده است. علاوه بر مقاومت گرمایی، از رسانایی گرمایی مؤثر نیز برای نشان دادن عملکرد گرمایی لوله‌های گرمایی نوسانی استفاده می‌شود که با رابطه (۷) تعیین می‌گردد [۳۳]:

$$K_{eff} = \frac{Q}{A} \frac{L_{eff}}{T_c - T_e} = \frac{1}{R_t} \frac{L_{eff}}{A} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، L_{eff} طول مؤثر بین تبخیرکننده و چگالنده است که توسط رابطه (۸) به دست می‌آید [۳۴]:

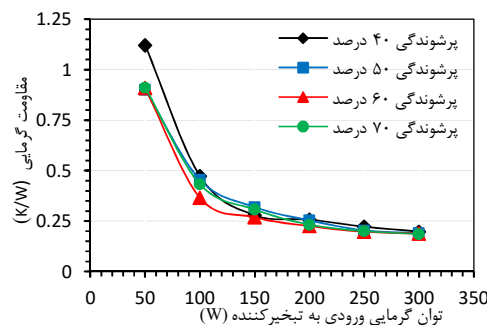
$$L_{eff} = \frac{1}{2}(L_e + L_c) + L_a \quad (8)$$

در رابطه (۸)، L_c ، L_a ، L_e به ترتیب طول تبخیرکننده، آدیاباتیک و چگالنده هستند.

از رابطه‌های (۹) و (۱۰) بترتیب می‌توان مقدار ضریب انتقال گرمای جابجایی را در تبخیرکننده و چگالنده بدست آورد [۳۵]:

۵-۱- انتخاب بهترین نسبت پرشوندگی

بر اساس گزارشهای پژوهشهای انجام گرفته در لوله‌های گرمایی نوسانی، نسبت پرشوندگی بهینه در محدوده ۴۰ تا ۷۰ درصد قرار دارد. بنابراین برای انتخاب بهترین نسبت پرشوندگی آزمایش‌ها در حالت قائم به ازای پرشوندگی‌های ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد انجام گردید که نتایج محاسبه مقاومت گرمایی در توان‌های گرمایی مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طوری که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، هنگامی که شار گرمایی بسیار کم است، به علت کافی نبودن نیروی لازم، حرکت نوسانی در لوله گرمایی اتفاق نمی‌افتد. بنابراین زمانی که شار گرمایی از کمترین مقدار موردنیاز برای شروع نوسانات بیشتر شد، حرکت‌های نوسانی سیال عامل شروع می‌شود. به دلیل انتقال حباب‌های بخار همراه با مایع به چگالنده مقدار انتقال گرما افزایش یافته و مقاومت گرمایی کاهش می‌یابد. با افزایش شار گرمایی ورودی به تبخیرکننده، دامنه نوسانات گسترده‌تر می‌شود تا آنجا که سیال در داخل لوله گرمایی نوسانی علاوه بر نوسانات موضعی تمایل حرکت روبه‌جلو نیز پیدا می‌کند که این امر سبب چرخش سیال در لوله گرمایی نوسانی می‌گردد و سبب افزایش انتقال گرما به چگالنده شده و مقاومت گرمایی بیشتر کاهش می‌یابد. بر اساس شکل ۶ کمترین مقاومت گرمایی در پرشوندگی ۶۰ درصد اتفاق افتاده و نسبت به بقیه عملکرد گرمایی بهتری دارد؛ بنابراین در ادامه جهت بررسی عملکرد گرمایی IGPHP به ازای سیال عامل مختلف در این نسبت انجام گردید.



شکل ۶- تغییرات مقاومت گرمایی به ازای پرشوندگی‌های مختلف در حالت ۹۰ درجه

۵-۲- بررسی تاثیر استفاده از نانوسیال در لوله‌های

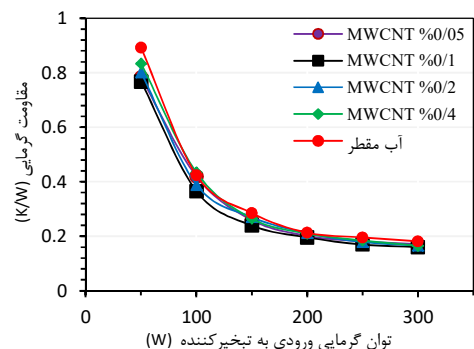
گرمایی نوسانی داخل شیاردار

برای بررسی تأثیر استفاده از نانوسیال آب-MWCNT در IGPHP ابتدا آزمایش‌ها به وسیله آب مقطر با نسبت پرشوندگی ۶۰ درصد در حالت قائم در توان‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ انجام گردید و پس‌از آن در همان نسبت پرشوندگی با توان‌های مذکور، نانوسیال آب-MWCNT تهیه شده در چهار کسر حجمی ۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۲، ۰/۴ درصد انجام گردید. نتایج آزمایش‌ها به صورت نمودارهای زیر بیان شده است.

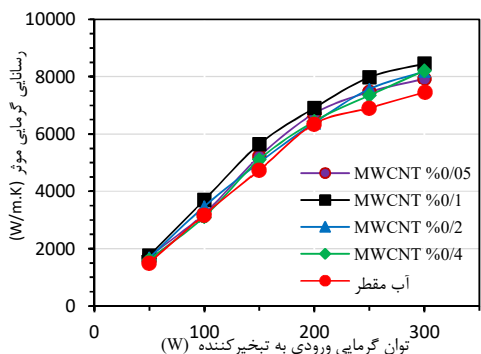
شکل ۷ مقاومت گرمایی کسر حجمی‌های نانوسیال آب-MWCNT با آب مقطر در IGPHP را نشان می‌دهد. همان‌طوری که شکل ۷ نشان می‌دهد از بین چهار کسر حجمی افزوده شده به سیال پایه در IGPHP، کمترین مقاومت گرمایی در کسر حجمی ۰/۱ درصد مشاهده می‌گردد

و بعد از آن اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه باعث شده است که مقاومت گرمایی افزایش یابد که از دلایل اصلی آن می‌توان به افزایش لزجت سیال اشاره کرد. ابتدا به دلیل بالا بودن رسانایی گرمایی نانوذرات لوله‌های کربنی با افزایش کسر حجمی نانوسیال تا کسر حجمی ۰/۱ درصد، رسانایی گرمای نانوسیال افزایش یافته و در نتیجه مقاومت گرمایی کاهش یافته است. بعد از آن افزایش کسر حجمی نانوسیال باعث شده است که رسانایی گرمای مؤثر کاهش یابد که دلیل آن افزایش لزجت سیال است. لزجت سیال عامل یکی از عوامل مهم در عملکرد لوله‌های گرمایی نوسانی است. با توجه به اینکه اضافه کردن نانوذرات باعث افزایش لزجت سیال پایه می‌شود و همچنین زبری سطح ناشی از وجود شیارهای داخل لوله باعث می‌شود حرکت‌های نوسانی سیال با نیروی مقاوم بیشتری مواجه شده و سرعت و فرکانس حرکت نوسانی سیال محدود گردد. در نتیجه بعد از کسر حجمی ۰/۱ درصد مقاومت گرمایی در IGPHP افزایش و رسانایی گرمایی مؤثر کاهش می‌یابد؛ بنابراین در IGPHP، نانوسیال با غلظت کمتر دارای انتقال گرمایی بهتری است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که غلظت کمتر برای به دست آوردن عملکرد گرمایی بهتر در IGPHP ارجحیت دارد.

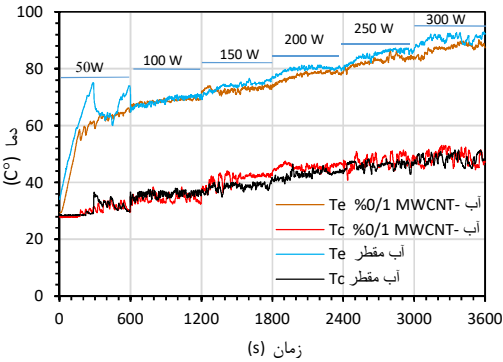
شکل ۸ مقدار رسانایی گرمایی مؤثر را به ازای کسر حجمی‌های مختلف نانوسیال آب-MWCNT در IGPHP نشان می‌دهد. همان‌طوری که شکل ۸ نشان می‌دهد بیشترین رسانایی گرمایی مؤثر در کسر حجمی ۰/۱ درصد اتفاق افتاده است که در پاراگراف بالا به دلایل آن اشاره شد.



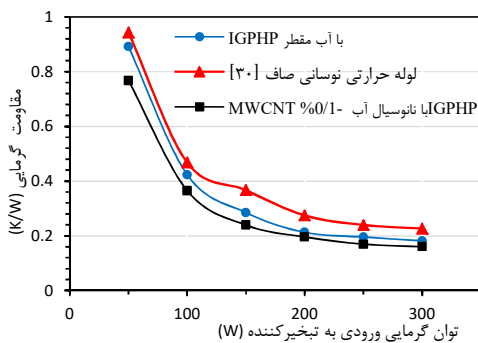
شکل ۷- مقاومت گرمایی کسر حجمی‌های نانوسیال آب-MWCNT با آب مقطر در IGPHP



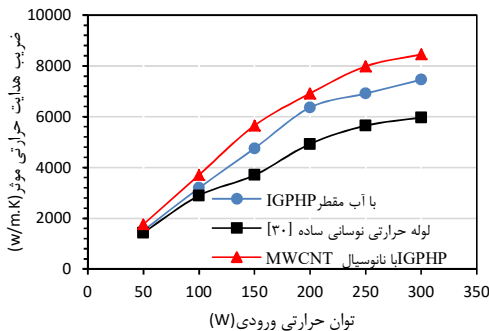
شکل ۸- رسانایی گرمایی مؤثر کسر حجمی‌های نانوسیال آب-MWCNT با آب مقطر در IGPHP



شکل ۹- دمای تبخیرکننده و تقطیرکننده نانوسیال آب- MWCNT با کسر حجمی ۰/۱ درصد و آب مقطر در IGPHP



شکل ۱۰- مقاومت گرمایی لوله گرمایی نوسانی صاف و IGPHP با سیال آب مقطر و IGPHP با نانوسیال آب- MWCNT%0/1



شکل ۱۱- رسانایی گرمایی مؤثر بین لوله گرمایی نوسانی صاف و IGPHP با سیال آب مقطر و IGPHP با نانوسیال آب- MWCNT%0/1

۶- نتیجه گیری

استفاده از نانو سیالها در لوله‌های گرمایی نوسانی از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق به صورت تجربی عملکرد گرمایی لوله گرمایی نوسانی داخل شیاردار با آب مقطر و نانوسیال آب- نانولوله کربنی چند دیواره (MWCNT) مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در نسبت پرشوندگی بهینه (۶۰ درصد) در توان‌های گرمایی ۵۰ تا ۳۰۰ وات با نانوسیال آب- MWCNT در چهار کسر حجمی ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲،

شکل ۹ دمای تبخیرکننده و چگالنده و اختلاف دمای بین آن‌ها را برای آب مقطر و بهترین کسر حجمی نانوسیال در کسر حجمی ۰/۱ درصد نشان می‌دهد این نمودار به ازای ۶۰۰ ثانیه برای هر توان گرمایی ورودی ترسیم شده است. همان طوری که از شکل مشخص است اضافه کردن نانوذره به سیال پایه تاثیر مثبتی بر عملکرد گرمایی IGPHP می‌گذارد. چون اختلاف دمای بین چگالنده و تبخیرکننده در استفاده از نانوسیال نسبت به آب مقطر کاهش یافته است که نتیجه آن کاهش مقاومت گرمایی می‌باشد. بطور کلی استفاده از نانوذرات با رسانایی گرمایی بالا در نانوسیال سبب می‌شود که رسانایی گرمایی نانوسیال افزایش و گرمای انتقالی نیز افزایش یابد و در نتیجه باعث شروع بکار زودتر نوسانات در نانوسیال نسبت به آب مقطر شود. همچنین با افزایش توان‌های گرمایی ورودی مقدار اختلاف دمای بین تبخیرکننده و چگالنده در نانوسیال نسبت به آب مقطر کمتر شود.

شکل ۱۰ و ۱۱ بترتیب مقاومت گرمایی و رسانایی گرمایی مؤثر بین لوله گرمایی نوسانی صاف [۳۰] و IGPHP با سیال آب مقطر و IGPHP با نانوسیال آب- MWCNT%0/1 را نشان می‌دهد. نتیجه محاسبات شکل ۱۰ نشان داد که استفاده از نانوسیال آب- MWCNT%0/1 در مقایسه با آب مقطر در IGPHP، به طور متوسط ۱۱ درصد مقاومت گرمایی را کاهش داد و همچنین با توجه شکل ۱۱ استفاده از نانوسیال آب- MWCNT%0/1 در مقایسه با آب مقطر در IGPHP، به طور متوسط ۱۲ درصد رسانایی گرمایی مؤثر را افزایش داد. به عنوان مثال بر اساس شکل ۱۱ در توان گرمایی ۲۵۰ وات مقدار رسانایی گرمایی مؤثر در لوله گرمایی نوسانی صاف (W/m.K) 5645 و در IGPHP با آب مقطر (W/m.K) 6912 و در IGPHP با نانوسیال آب- MWCNT%0/1 (W/m.K) 7796 به دست آمد. همچنین مقایسه نتیجه به دست آمده از منبع ۳۰ و IGPHP با سیال عامل آب مقطر نشان داد که استفاده از لوله داخل شیاردار در لوله گرمایی نوسانی حدود ۲۱ درصد مقاومت گرمایی را کاهش می‌دهد. به نظر می‌رسد یکی از دلایل اصلی آن این است که شیارهای داخل لوله تاثیر بسزایی در افزایش سطح تبادل گرما و در نتیجه در افزایش انتقال گرما دارد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تاثیر شیاردار کردن یک لوله ساده مورد استفاده در لوله‌های گرمایی نوسانی بیشتر از تاثیر افزودن نانوذرات به IGPHP است؛ که برای بررسی بیشتر لازم است تاثیر همزمانی استفاده از نانوسیال در دو لوله گرمایی نوسانی صاف و داخل شیاردار انجام گردد؛ که در پژوهش‌های آینده به آن پرداخته می‌شود.

۰/۴ درصد انجام گردید که خلاصه اهم نتایج به صورت زیر بیان می‌گردد.

- ۱- بررسی تأثیر استفاده از نانوسیال آب-MWCNT در IGPHP به ازای نسبت پرشوندگی بهینه ۶۰ درصد در حالت قائم در توان‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ با چهار کسر حجمی ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴ درصد انجام گردید.
- ۲- نتایج نشان داد که از بین چهار کسر حجمی افزوده شده به سیال پایه در IGPHP، کمترین مقاومت گرمایی در کسر حجمی ۰/۱ درصد حاصل شد و بعدازآن اضافه کردن نانوذرات باعث شد که مقاومت گرمایی افزایش یابد؛ که به نظر می‌رسد دلیل اصلی آن افزایش لزجت نانوسیال باشد.
- ۳- بهترین عملکرد در توان‌های گرمایی بالاتر رخ داد که دلیل آن تعداد نوسانات زیاد و مداوم با سرعت بالا می‌تواند می‌باشد.
- ۴- نتیجه محاسبات نشان داد که استفاده از نانوسیال آب- MWCNT%0/1 در مقطر در IGPHP به‌طور متوسط ۱۱ درصد مقاومت گرمایی را کاهش داد.
- ۵- استفاده از نانوسیال آب- MWCNT%0/1 در IGPHP به‌طور متوسط ۱۲ درصد رسانایی گرمایی مؤثر را افزایش داد. به‌عنوان مثال در توان گرمایی ۲۵۰ وات مقدار رسانایی گرمایی مؤثر در آب مقطر (W/m.K) ۶۹۱۲ و در نانوسیال آب- MWCNT%0/1، ۷۷۹۶ بدست آمد.

۷- نمادها

Cp	گرمای ویژه (J/kg K)
D	قطر (m)
Dh	قطر هیدرولیکی (m)
A	سطح مقطع (m ²)
k	رسانایی گرمایی (W/m.K)
h	ضریب جابجایی (W/m ² .K)
L	طول (m)
m	دبی جرمی (kg/s)
ϕ	ضریب افت گرما
p	فشار (pa)
Q	آهنگ گرما (W)
T	دما (C)
σ	کشش سطحی (N/m)

زیرنویس‌ها

c	چگالنده
e	تبخیرکننده
t	گرمایی
vap	بخار
eff	مؤثر
in	ورودی
out	خروجی
liq	مایع

crit بحرانی
v اشباع

۸- مراجع

- [1] Sarafraz M., Nikkhah V., Nakhjavani M., Arya A., Fouling formation and thermal performance of aqueous carbon nanotube nanofluid in a heat sink with rectangular parallel microchannel, *Appl Therm Eng.* Vol. 23, pp. 29-39, 2017.
- [2] Liu Z-H., Li Y-Y., A new frontier of nanofluid research – application of nanofluids in heat pipes, *Int J Heat Mass Transf.* Vol. 55, pp. 6786-6797, 2012.
- [۳] فرشاد س. ع. و شیخ الاسلامی م.، بررسی عددی افزایش انتقال گرما نانوسیال در گردآورنده خورشیدی صفحه تخت با قراردادن نوار پیچشی چندکاناله در داخل لوله. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۵۰، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۹، صفحه ۱۴۱-۱۴۹.
- [4] Sarafraz M., Arya A., Hormozi F., Nikkhah V. On the convective thermal performance of a CPU cooler working with liquid gallium and CuO/water nanofluid: a comparative study, *Appl Therm Eng.* Vol. 112, pp. 1373-1381, 2017.
- [۵] معصوم پور ب.، عطایی زاده م.، نصحی دهنوی ا.، حاج عبداللهی ح.، تأثیر نانوذرات بر بهینه‌سازی چند هدفه مبادله‌کن گرمایی پوسته و لوله. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۵۰، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹، صفحه ۲۱۷-۲۲۴.
- [6] Salari E., Peyghambarzadeh S., Sarafraz M., Hormozi F., Nikkhah V. Thermal behavior of aqueous iron oxide nanofluid as a coolant on a flat disc heater under the pool boiling condition, *Heat Mass Transf.* Vol. 53, pp. 265-275, 2017.
- [7] Das S. K., Choi S. U., Patel H. E., Heat Transfer in Nanofluids a Review. *Heat transfer engineering*, vol. 27, pp. 3-19, 2006.
- [8] Buschmann M. H., Nanofluids in thermosyphons and heat pipes: overview of recent experiments and modelling approaches, *Int J Therm Sci.* Vol. 72, pp. 1-17, 2013.
- [9] Zohuri B., Other types of heat Pipes Heat pipe design and technology: modern applications for practical thermal management, *Springer International Publishing*, Cham, pp. 431-449, 2016.
- [10] Jo J., Kim J., Kim S.J., Experimental investigations of heat transfer mechanisms of a pulsating heat pipe, *Energy Conversion and Management*, Vol. 181, pp. 331-341, 2019.
- [11] Alhuyi Nazari M., Ahmadi M.H., Ghasempour R., Shaffi M.B., Mahian O., Kalo-girou S., Wongwises S., A review on pulsating heat pipes: from solar to cryogenic applications, *Appl. Energy*, Vol. 222, pp. 475-484, 2018.
- [12] Jin H., Lin G., Zeiny A., Bai L., Cai J., Wen D., Experimental study of transparent oscillating heat pipes filled with solar absorptive nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 139, pp. 789-801, 2019.
- [13] Zhao J., Jiang W., Rao Z., Thermal performance investigation of an oscillating heat pipe with external expansion structure used for thermal energy recovery and storage, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 132, pp. 920-928, 2019.
- [14] Salari E., Peyghambarzadeh S., Sarafraz M., Hormozi F., Nikkhah V., Thermal behavior of aqueous iron oxide nanofluid as a coolant on a flat disc heater under the pool boiling condition, *Heat and Mass Transfer*, vol. 53, pp. 265-275, 2017.
- [15] Wang H., Qu J., Peng Y., Sun Q., Heat transfer performance of a novel tubular oscillating heat pipe with sintered copper particles inside flat-plate evaporator and high-power LED heat sink application, *Energy Convers. Manage.* Vol. 189, pp. 215-222, 2019.
- [16] Wei A., Qu J., Qiu H., Wang C., Cao G., Heat transfer characteristics of plug-in oscillating heat pipe with binary-

- tube, *Journal of Enhanced Heat Transfer*, Vol. 6 No.2, pp. 161-178, 1999.
- [32]Khandekar S., *Thermo-hydrodynamics of closed loop pulsating heat pipes*, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany, 2004.
- [33]Sun C., Tseng C., Yang Wu K., S., Wang C., Investigation of the evacuation pressure on the performance of pulsating heat pipe, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 85 pp. 23-28, 2017.
- [34] Qu J., Wang Q., Experimental study on the thermal performance of vertical closed-loop oscillating heat pipes and correlation modeling, *Applied Energy*, Vol. 112, pp.1154-1160, 2013.
- [35]Liang Q., T. Hao, Wang K., Ma X., Lan Z., Wang Y., Startup and transport characteristics of oscillating heat pipe using ionic liquids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 94, pp. 1-13, 2018.
- [36]Douglas C. M., *Design and analysis of experiments*, John Wiley and sons. 2001
- fluid mixtures for electric vehicle battery thermal management, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 135, pp. 746-760, 2019 .
- [17]Jafari Mosleh H., Bijarchi M.A. , Shafii M.B. , Experimental and numerical investi- gation of using pulsating heat pipes instead of fins in air-cooled heat exchangers, *Energy Convers. Manage*, Vol. 181, pp. 653-662, 2019.
- [18] Cui X. , Qiu Z. , Weng J. , Li Z. , Heat transfer performance of closed loop pulsating heat pipes with methanol-based binary mixtures. *Exp. Therm. Fluid Sci.* Vol. 76, pp. 253-263, 2016.
- [19]Haizhen Xian ,Wenjin Xu,Yuning Zhang,Xiaoze Du,Yongping Yang, Experimental investigations of dynamic fluid flow in oscillating heat pipe under pulse heating. *Applied Thermal Engineering* , Vol. 88, Pages pp. 376-383, 2015.
- [20]Nazaria M. A., Ahmadi M. H., Ghasempour R., Shafii M. B., How to improve the thermal performance of pulsating heat pipes: A review on working fluid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 91, pp. 630-638, 2018.
- [21]Riehl R.R., Santos N.D., Water-copper nanofluid application in an open loop pulsating heat pipe, *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 42, pp. 6-10, 2012.
- [22]Goshayeshi H. R., Goodarzi M., Safaei M. R, Dahari M., Experimental Study on the Effect of Inclination Angle on Heat Transfer Enhancement of a Ferrofluid in a Closed Loop Oscillating Heat Pipe under Magnetic Field. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 74, pp. 265-270, 2016.
- [23]Xing M., Yu J., Wang R., Performance of a vertical closed pulsating heat pipe with hydroxylated MWNTs nanofluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 112, pp. 81-88, 2017.
- [24]Kang Sh.-W., Wang Y. Ch., Liu Y.-C., Lo H.-M., Visualization and thermal resistance measurements for a magnetic nanofluid pulsating heat pipe, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 126, pp. 1044-1050, 2017.
- [25]Tanshen MR., Munkhbayar B., MJ. Nine, Chung H, Jeong H., Effect of functionalized MWCNTs/water nanofluids on thermal resistance and pressure fluctuation characteristics in oscillating heat pipe, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 48 , pp. 93-98, 2013.
- [26]Nazaria M. A., Ghasempour R., Ahmadi M. H., Heydarian G., Shafii M. B., Experimental investigation of graphene oxide nanofluid on heat transfer enhancement of pulsating heat pipe, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 91, pp. 90-94, 2018.
- [۲۷] محسنی فدردی ح., گشایشی ح., علوی س. م., ا. علیزاده جاجرم ح., خسروداد م., بررسی آزمایشگاهی عملکرد حرارتی یک لوله گرمایی نوسانی سه بعدی همراه با نانوسیال اکسید آهن در معرض میدان مغناطیسی و تبخیرکن شیاردار شده. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، دوره ۵۱، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰، صفحه ۱۹۱-۱۹۹.
- [28]Xu Y., Xue Y., Qi H., Cai W., Experimental study on heat transfer performance of pulsating heat pipes with hybrid working fluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 157, pp. 119727, 2020.
- [29]Zufar M., Gunnasegaran P., Kumar H.M., Ng K.C., Numerical and experimental investigations of hybrid nanofluids on pulsating heat pipe performance, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 146, pp. 118887, 2020.
- [30]Akbari Kangarluei R., Abbasalizadeh Ranjbari M., Ramezanpour A., An experimental comparison of thermal performance: Smooth and inner-grooved closed loop pulsating heat pipes in different angles, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 125, pp. 105306, 2021
- [31]Kedzierski M.A., Goncalves J.M., Horizontal convective condensation of alternative refrigerants within a micro-fin