

مطالعه تجربی تاثیر نسبت پرشدگی، میدان مغناطیسی و زاویه شیب بر عملکرد حرارتی در یک لوله گرمایی نوسانی سه بعدی

دانشجوی دکتری، گروه مکانیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران،
alizadeh.azad@yahoo.com

دانشیار، گروه مکانیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران،
goshayshi@yahoo.com

استادیار، گروه مکانیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران،
bashirnazhad@yahoo.com

دانشیار، گروه مکانیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران،
zahmatkesh5310@mshdiau.ac.ir

علیرضا علیزاده جاجرم

حمیدرضا گشایشی*

کاظم بشیرنژاد

ایمان زحمتکش

چکیده

در این پژوهش عملکرد یک لوله گرمایی نوسانی سه بعدی در زوایای مختلف استقرار از صفر تا ۹۰ درجه با سیال عامل آب مقطر و نانوسیال به صورت تجربی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. نانوسیال Fe_3O_4 با کسر جرمی ۰/۱ درصد تهیه و برای پایداری آن از سورفکتانت تترامتیل آمونیوم هیدرواکسید استفاده شد. ابتدا آزمایشات در شارهای گرمای ورودی مختلف (۳۰ تا ۳۰۰ وات) و نسبت‌های پرشدگی ۵۰ و ۶۰ درصد انجام و نسبت پرشدگی بهینه (۵۰٪) مشخص گردید. سپس با این مقدار، عملکرد حرارتی لوله گرمایی نوسانی در زوایای مختلف بدون حضور و همچنین با اعمال میدان مغناطیسی ارزیابی شد. نتایج آزمایشات نشان داد که نانوذرات Fe_3O_4 می‌توانند عملکرد گرمایی دستگاه را بهبود بخشند. همچنین مشخص شد که نسبت پرشدگی بهینه برای این دستگاه ۵۰ درصد می‌باشد. با افزایش شار گرمای ورودی، مقاومت گرمایی لوله گرمایی کاهش می‌یابد. علاوه بر این نتایج نشان داد که زاویه شیب لوله گرمایی تأثیر قابل توجهی بر عملکرد لوله گرمایی دارد. در حالت افقی عملکرد دستگاه اصلاً مناسب نبود، اما با اعمال میدان مغناطیسی، دستگاه می‌تواند به کار خود ادامه دهد. **واژه های کلیدی:** لوله گرمایی نوسانی سه بعدی، نسبت پرشدگی، زاویه استقرار، نانوسیال مغناطیسی، میدان مغناطیسی، مقاومت گرمایی.

Experimental study of the effect of filling ratio, magnetic field and, inclination angle on thermal performance in a three-dimensional oscillating heat pipe

A. R. Alizadeh
H. R. Goshayeshi
K. Bashirnezhad
I. Zahmatkesh

Department of Mechanical Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad university, Mashhad, Iran
Department of Mechanical Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad university, Mashhad, Iran
Department of Mechanical Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad university, Mashhad, Iran
Department of Mechanical Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad university, Mashhad, Iran

Abstract

In this research, the performance of a three-dimensional oscillating heat pipe in different inclination angles from 0 to 90 degrees with distilled water and ferrofluid as operating fluid has been studied and compared experimentally. Fe_3O_4 ferrofluid was prepared with a mass fraction of 0.1% and tetramethyl ammonium hydroxide surfactant was used for its stability. First Experiments were performed at different input heat input fluxes (30 to 300 watts) and in filling ratios if 50 and 60%, and the optimal filling ratio (50%) was determined. Then with this value, the thermal performance of the oscillating heat pipe was evaluated at different angles without presence and also by applying a magnetic field. The experimental results showed that Fe_3O_4 nanoparticles could improve the thermal performance of the device. It was also found that the optimal filling ratio for this device is 50%. As the inlet heat flux increases, the thermal resistance of the OHP decreases. In addition, the results showed that the inclination angle of the heat pipe has a significant effect on the performance of the OHP. In horizontal mode, the device did not work at all, but by applying a magnetic field, the device can continue to operate.

Keywords: 3-D oscillating heat pipe, filling ratio, inclination angle, ferrofluid, magnetic field, thermal resistance.

هستند. آن‌ها از لوله‌ای باریک با تعدادی خم U شکل ساخته شده‌اند که توسط یک سیال عامل با نسبت پرشدگی مناسب پر می‌شوند و هوای باقیمانده توسط سیستم خلا تخلیه می‌گردد. به دلیل وجود جوشش و چگالش در حین کارکرد، لوله گرمایی نوسانی قابلیت انتقال گرما با افت دمای کم، و انتقال گرمای بالا در حجم کوچک را دارا است. در این مبادله‌کن‌ها، گرما به تبخیرکن وارد شده که تبخیر مایع و تشکیل حباب‌های بخار موجب حرکت سیال عامل به سمت بالای لوله می‌شوند. با جذب گرما در قسمت چگالنده، سیال مجدداً تقطیر شده و به سمت پایین برمی‌گردد. با تکرار این حرکت نوسانی و گردش فرایند انتقال گرما تداوم می‌یابد. این لوله‌ها امروزه کاربرد فراوانی در صنعت پیدا کرده‌اند و تحقیق درباره بهبود عملکرد آنها همچنان ادامه دارد

۱- مقدمه

بررسی درباره روش‌های افزایش آهنگ انتقال گرما در صنایع مختلف همواره مورد توجه محققین بوده است. در این میان تجهیزات الکترونیکی نیاز به انتقال گرما با آهنگ بالا و در دمای پایین دارند. رقابت برای تولید تجهیزات با اندازه کوچک‌تر و وزن کمتر موجب شده تحقیقات زیادی در این زمینه انجام گردد. توسعه و بهسازی لوله‌های گرمایی که برای انتقال گرما در تجهیزات الکترونیکی به کار می‌روند منجر به اختراع نسل جدیدی از این لوله‌ها به نام لوله‌های گرمایی نوسانی شد [۱]. لوله گرمایی نوسانی به علت استفاده همزمان از انتقال گرمای محسوس و نهان نسبت به لوله‌های گرمایی معمولی کارآمدتر

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: Goshayeshi1655@mshiau.ac.ir و goshayshi@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۰۱/۰۳/۲۲

تاریخ پذیرش: ۰۱/۰۶/۱۴

[۲]. علیرغم ساختار ساده لوله گرمایی نوسانی، پارامترهای زیادی بر نحوه عملکرد آن تاثیرگذار هستند از جمله: قطر داخلی لوله [۳، ۴]، نسبت پرشدگی [۴، ۵]، شار گرمایی، تعداد دور لوله [۶، ۷]، طول تبخیرکن و چگالنده [۸، ۹]، سیال عامل [۱۰-۱۲]، جنس لوله [۱۳]، شعاع انحنای لوله [۱۴]. عوامل دیگری از قبیل گرانش، میدان مغناطیسی و زاویه استقرار (شیب) نیز بر عملکرد آن موثر هستند [۱۵]. در آزمایشاتی که به منظور بررسی عملکرد گرمایی دستگاه و تاثیر پارامترهای مختلف انجام گرفته، لوله گرمایی نوسانی عمدتاً به صورت عمودی نصب گردیده است. اما در بسیاری از موارد امکان استفاده از مبادله‌کن به صورت عمودی در تجهیزات وجود ندارد، لذا تحقیقات در خصوص امکان استقرار دستگاه در زوایای مختلف (صفر تا ۹۰ درجه) نیز دنبال شد. چارنوساوان و همکاران [۱۶] که نیروی وزن و سپس عامل تعداد دور را بر عملکرد دستگاه در حالت شیب‌دار موثر می‌دانستند، آزمایشات خود را با قطر و تعداد دورهای متفاوت در نسبت پرشدگی ۵۰٪ انجام دادند. نتایج نشان داد که هنگامی که تعداد دور دستگاه از یک مقدار بحرانی بیشتر باشد، عملکرد گرمایی دستگاه با افزایش زاویه از حالت افقی به سمت حالت عمودی بهبود می‌یابد و از زاویه ۶۰ تا ۹۰ درجه بسیار شبیه هم می‌باشد. یانگزی و همکاران [۱۷] اعلام کردند که در محدوده نسبت پرشدگی ۷۰-۵۰٪ زوایای ۹۰-۶۰ درجه بهینه‌ترین حالت هستند. لین و همکاران [۱۸] یک لوله گرمایی نوسانی که به صورت شیارهایی مربعی بر روی صفحه‌ای آلومینیومی ایجاد کرده بودند را در دورها و ابعاد شیارهای مختلف مورد بررسی قرار دادند. در همه حالت‌ها بهترین عملکرد مربوط به حالت عمودی بود. اما در تعداد دور ۲۰ و ضلع کانال ۲ میلی‌متر، مقاومت گرمایی دستگاه در زاویه ۶۰ درجه به میزان خیلی کمی حتی بهتر از حالت عمودی بود و برای ۳۳ دور و ضلع کانال ۱ میلی‌متر، مقاومت گرمایی دستگاه در زوایای ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه بسیار به هم نزدیک بودند. الفتحطانی و همکاران [۱۹] یک لوله گرمایی نوسانی دوبعدی را به صورت انعطاف‌پذیر ساخته و در حالت‌های مختلف شامل تبخیرکن عمودی و چگالنده افقی و شیب‌دار مورد آزمایش قرار دادند. نتایج آزمایشات نشان داد که آرایش‌های مختلف تاثیر چندانی بر عملکرد دستگاه ندارد. استفاده از سیال مغناطیسی Fe_3O_4 و اعمال میدان مغناطیسی جهت بررسی زاویه شیب نیز توسط محمدی و همکاران [۲۰] در یک دستگاه دوبعدی انجام گرفته است. آنها با تغییر زاویه از صفر تا ۹۰ درجه و با گام‌های ۲۲/۵ درجه مقاومت گرمایی دستگاه را در توان‌های ورودی مختلف محاسبه کردند. نتایج بیانگر این بود که در حالت افقی مقاومت گرمایی از بقیه حالت‌ها بیشتر است و برای زوایای بین ۹۰-۲۲/۵ درجه تقریباً ثابت است. در حالت افقی نسبت پرشدگی بهینه هنگام استفاده از آب خالص و همچنین سیال مغناطیسی به عنوان سیال عامل ۵۵٪ و در حضور میدان مغناطیسی ۷۰٪ است. اعمال میدان مغناطیسی موجب بهبود عملکرد گرمایی دستگاه در تمام زوایای استقرار شده است. زینالی و همکاران [۲۱] تاثیر میدان‌های مغناطیسی را در یک ترموسیفون مورد بررسی قرار دادند و اعلام کردند که با افزایش شدت میدان مغناطیسی، راندمان گرمایی دستگاه افزایش می‌یابد. تاثیر میدان مغناطیسی یکنواخت بر عملکرد یک لوله گرمایی نوسانی به صورت عددی توسط مبادرثانی و همکاران [۲۲] انجام شد. آنها با حل معادلات مومنوم، جرم و انرژی به این نتیجه رسیدند که عملکرد لوله گرمایی

نوسانی با اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت کاهش می‌یابد. ماملی و همکاران [۲۳] برای بررسی تاثیر توان ورودی بر زاویه استقرار در یک لوله گرمایی نوسانی دو بعدی، با تغییر زاویه دستگاه از حالت افقی به قائم نتیجه گرفتند که در نسبت پرشدگی ۷۰٪ مقاومت گرمایی دستگاه در تمام زوایا (به جز حالت افقی) تقریباً مشابه هم هستند اما همواره در نسبت پرشدگی ۵۰٪ در تمام توان‌های ورودی و در تمام زوایا مقاومت گرمایی کمترین مقدار خود را دارد. در این حالت، با افزایش توان ورودی (تا زمان شروع نوسانات) مقاومت گرمایی دستگاه در تمام زوایا (به جز حالت افقی) تقریباً مشابه هم هستند و با شروع عملکرد عادی دستگاه و نوسانات، ناگهان مقاومت گرمایی در زاویه ۱۵ درجه افزایش می‌یابد. بیشتر شدن گرمای ورودی منجر به خشک شدگی سریع‌تر تبخیرکن در زوایای شیب کم و در نتیجه افزایش مقاومت گرمایی می‌شود. در حالت افقی دستگاه کمترین بازده را دارد. عملکرد دستگاه در زوایای ۷۵ و ۹۰ درجه بسیار شبیه هم می‌باشد. استفاده از نانوسیال‌های مغناطیسی به خصوص به منظور بررسی تاثیر میدان مغناطیسی بر عملکرد گرمایی دستگاه‌ها نیز مورد توجه محققین می‌باشد [۲۴-۲۷]. گشایشی و همکاران [۲۸] تاثیر زاویه استقرار در بازه صفر تا ۹۰ درجه را بر عملکرد گرمایی یک لوله گرمایی نوسانی دو بعدی مورد بررسی قرار دادند. آنها جهت بررسی تاثیر میدان مغناطیسی، از نانوذرات Fe_2O_3 در نفت سفید استفاده کردند. نتایج نشان داد که استفاده از نانوسیال به ویژه در حضور میدان مغناطیسی باعث بهبود عملکرد گرمایی دستگاه می‌شود و بهترین عملکرد دستگاه در زاویه شیب ۷۵ درجه نسبت به افق می‌باشد. تلاش برای بهبود عملکرد گرمایی دستگاه در حالت افقی توسط صدیقی و همکاران [۸] پیگیری شد. دستگاه در حالت افقی اصلاً شروع به کار نکرد اما با نصب یک شاخه اضافی بر روی تبخیرکن مشاهده کردند که دستگاه می‌تواند کارکرد قابل قبولی داشته باشد اگرچه در هر دو سیستم عملکرد دستگاه در زوایای ۳۰ و ۶۰ درجه خیلی به هم نزدیک بود اما همچنان بهترین عملکرد دستگاه در حالت عمودی می‌باشد. مارکال و همکاران [۲۹] یک لوله گرمایی نوسانی مسطح را در زوایای صفر تا ۹۰ درجه و در نسبت‌های پرشدگی ۸۵-۱۰٪ با گام ۱۵٪ مورد آزمایش قرار دادند. نتایج بیانگر این بود که دستگاه در حالت عمودی در تمام نسبت‌های پرشدگی کار می‌کند اما در حالت افقی یا بطور صحیح کار نمی‌کند یا اصلاً شروع به نوسان نمی‌کند. در جدیدترین تحقیقات نیز کیو و همکاران [۳۰] لوله گرمایی نوسانی سه بعدی ۳ و ۶ دور ساختند و عملکرد دستگاه را در زوایا و نسبت‌های پرشدگی مختلف مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در توان‌های پایین، دستگاه در زاویه ۶۰ درجه کمترین مقاومت گرمایی را دارد و پس از آن در تمام زوایا عملکرد دستگاه مشابه هم خواهد بود. همچنین اکبری و همکاران [۳۱] از لوله مسی با شیارهای داخلی جهت ساخت لوله گرمایی نوسانی دو بعدی استفاده کرده و آن را با آب مقطر در زوایای شیب مختلف و نسبت‌های پرشدگی متفاوت مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان داد که در حالت عمودی، کمترین مقاومت گرمایی در نسبت پرشدگی ۶۰٪ حاصل می‌شود. همچنین در توان ورودی بیشتر از ۲۰۰ وات، مقاومت گرمایی دستگاه از زاویه ۱۵ درجه و بیشتر تقریباً با حالت عمودی برابر است.

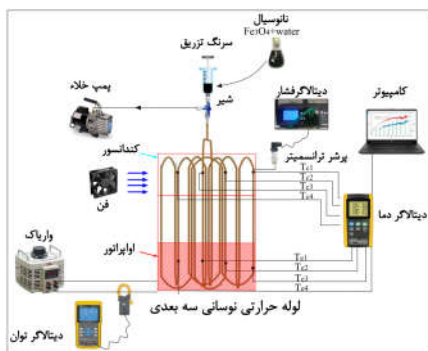
برای پایداری نانوسیالات، محققین سورفکتانت‌های مختلفی را

دو عدد گرمکن استیل، یکی به صورت کمربندی به دور قسمت استوانه‌ای و دیگری به صورت تخت روی لوله‌های تبخیرکن نصب شده است. این المنت‌های گرمایی (با توان ۱۳۰۰ وات) شامل سیم کروم-نیکل هستند که یک روکش استیل بر روی آنها کار شده است. به منظور بررسی تاثیر میزان گرمای ورودی بر عملکرد دستگاه، لازم است که مقدار گرمای ورودی قابل تغییر و کنترل باشد. لذا از یک دستگاه واریاک با قابلیت تغییر ولتاژ در بازه صفر تا ۲۵۰ ولت استفاده شده است. میزان گرمای ورودی از المنت گرمایی به تبخیرکن از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_{in} = \dot{V} I \quad (1)$$

با تنظیم دستگاه در یک ولتاژ معین و اندازه‌گیری شدت جریان توسط آمپر متر، می‌توان گرمای ورودی را محاسبه کرد. در این آزمایش از یک دستگاه واتمتر ساخت شرکت لوترون مدل DW-6092 استفاده شده که مستقیماً مقدار توان اعمال شده به دستگاه را اندازه‌گیری می‌کند.

تمام قسمت‌های تبخیرکن از داخل و خارج توسط پنبه نسوز به ضخامت ۱ اینچ به خوبی پوشانده شد تا تلفات گرمایی به حداقل برسد. جهت تخلیه هوای داخل دستگاه از پمپ خلا مدل TW-1A استفاده شده که قابلیت ایجاد خلا تا فشار حدود ۱۰ پاسکال را دارد. از یک پرشر ترانسدمتر خلاء مدل MADECO-MD5X (۱- تا ۴+ اتمسفر) به همراه یک عدد دستگاه داده‌بردار^۱ جهت ثبت مقادیر فشار هر ۵ یکبار در طی مدت زمان آزمایش استفاده شد. ضمناً جهت تست عدم نشتی، ابتدا دستگاه تحت فشار مثبت ۳ اتمسفر قرار گرفت و پس از اطمینان از عدم نشتی، مراحل آماده‌سازی آزمایشات انجام گردید.



شکل ۲- طرحواره دستگاه و اتصال تجهیزات اندازه‌گیری

خنک کردن چگالنده توسط یک فن به قطر ۲۰ سانتیمتر و سرعت وزش ۸ متر در ثانیه، انجام می‌شود. سرعت وزش هوا توسط دستگاه آنومتر^۲ مدل Lutron-AM4206 اندازه‌گیری شده است. دبی هوای عبوری از روی لوله‌های چگالنده ۱۵ مترمکعب در دقیقه می‌باشد. دمای هوای عبوری از روی لوله‌ها توسط یک حسگر ترموکوپل نوع K اندازه‌گیری و ثبت شده است.

برای اندازه‌گیری دمای چگالنده و تبخیرکن، ۸ عدد ترموکوپل در نقاط مختلف بر روی لوله‌های تبخیرکن و چگالنده به خوبی نصب

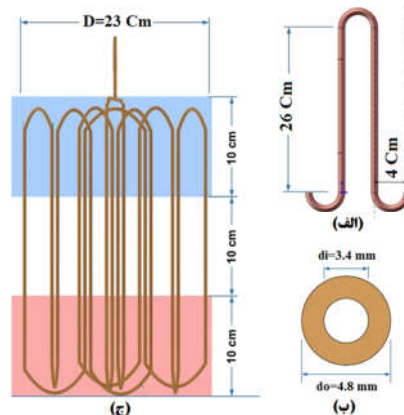
مورد آزمایش قرار داده‌اند. یکی از بهترین پایدارکننده‌ها برای نانوذرات Fe_3O_4 استفاده از تترامیتیل هیدروکسید آمونیوم می‌باشد [۳۲-۳۴] که در این تحقیق نیز برای پایداری نانوسیال از این ماده استفاده شده است.

در تحقیقات قبلی عمدتاً تاثیر شیب و میدان مغناطیسی در دستگاه‌های مسطح دوبعدی انجام شده و این موضوع در لوله‌های گرمایی نوسانی سه‌بعدی ندرتاً مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق یک دستگاه سه بعدی با هندسه استوانه‌ای شکل و با تعداد ۱۱ دور ساخته شده و اثر شیب برای اولین بار بر روی عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این تاثیر همزمان میدان مغناطیسی و شیب نیز تاکنون برای دستگاه‌های سه‌بعدی انجام نشده که در این تحقیق مورد آزمایش قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا در یک حالت پایه با انجام آزمایشات، نسبت پرشدگی بهینه تعیین گشته و سپس بر اساس آن، عملکرد گرمایی دستگاه سه بعدی در زوایای مختلف شیب و با سیال عامل آب مقطر، نانوسیال و همچنین اعمال میدان مغناطیسی، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مشخصات دستگاه و تجهیزات اندازه‌گیری

به منظور انجام آزمایشات مورد نظر، ابتدا یک لوله گرمایی نوسانی بسته دارای شکل هندسی استوانه ساخته شد (شکل ۱).



شکل ۱- (الف) مشخصات هر دور لوله، (ب) سطح مقطع لوله، (ج) ابعاد لوله گرمایی نوسانی

این دستگاه دارای تعداد ۱۱ دور (شکل U) در قسمت تبخیرکن می‌باشد که قطر هر خم ۴ سانتیمتر است. سایر مشخصات دستگاه در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات دستگاه

L=7 m	طول کل لوله
10 Cm	طول تبخیرکن چگالنده، آدیباتیک
$D_i=3.4 \text{ mm}$	قطر داخلی لوله
$D_o=4.8 \text{ mm}$	قطر خارجی لوله
63.88 Cm^3	حجم داخل دستگاه
H=30 Cm	ارتفاع دستگاه
D= 23 Cm	قطر استوانه

¹ Data logger

² Anemometer

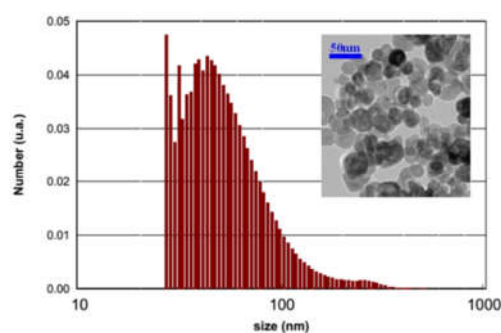
شده‌اند (شکل ۲). دماها توسط یک دستگاه داده‌بردار ۱۲ کاناله مدل Lutron-BTM-4208SD در یک کارت حافظه هر ۵ ثانیه یکبار ذخیره می‌گردد.

۲-۲- روش تهیه نانوسیال و مشخصات آن

در این تحقیق از نانوسیال مغناطیسی به عنوان سیال عامل استفاده شده است. برای تهیه نانوسیال از آب مقطر به عنوان سیال پایه و از نانوذرات Fe_3O_4 با قطر متوسط ۲۰-۳۰ نانومتر استفاده گردیده است. خواص فیزیکی نانوذرات در جدول ۲ آورده شده است. تصویر میکروسکوپ الکترونی نانوذرات و پراکندگی تعداد نانوذرات در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. همان گونه که در تصویر نیز دیده می‌شود بیشتر ذرات تقریباً کروی شکل بوده و دارای ساختار تجمعی هستند.

جدول ۲- خواص فیزیکی نانوذرات Fe_3O_4

خلوص	میانگین سایز نانوذرات	رنگ	مورفولوژی	چگالی توده‌ای
٪۹۸	۲۰-۳۰ نانومتر	سیاه	کروی	۰/۸۴g/cm ³



شکل ۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی و پراکندگی تعداد نانوذرات بر حسب اندازه آنها

اگرچه نانوذرات موجب افزایش رسانایی گرمایی نانوسیال می‌شوند اما از طرفی افزایش غلظت نانوذرات، هم موجب بیشتر شدن لزجت سیال خواهد شد و همچنین می‌تواند رسوب و ته‌نشینی را تسریع نماید. از طرفی در حضور میدان مغناطیسی، افزایش غلظت نانوذرات موجب افزایش مقاومت گرمایی دستگاه خواهد شد [۳۵]. محدوده غلظت مناسب برای لوله گرمایی نوسانی ۲-۱ گرم در لیتر می‌باشد [۳۶]. [۳۷]. در این تحقیق نانوسیال با کسر جرمی ۰/۱ درصد تهیه شده است. کسر جرمی نانوذره به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$wt = \frac{m_{np}}{m_{np} + m_{bf}} \times 100 \quad (2)$$

برای تهیه نانوسیال مغناطیسی مورد استفاده در این آزمایش از روش دو مرحله‌ای به شرح زیر [۳۸] استفاده شده است:

ابتدا نانوذرات توسط یک آسیاب دستی کمی آسیاب شد تا ذرات کلوخه شده از هم جدا شوند، سپس نانوذرات به اندازه یک گرم توسط یک ترازوی دیجیتال توزین شد. نانوذرات به یک لیتر آب مقطر اضافه شده و چند دقیقه به صورت دستی هم زده شدند. PH محلول با افزودن مواد قلیایی به ۱۰ رسانده شد. پس از آن سورفکتانت تترامتیل آمونیوم هیدروکسید با نسبت ۱:۳ نسبت به نانوذرات به مخلوط اضافه گردید.

محلول بدست آمده به مدت ۱۰ دقیقه توسط یک همزن مغناطیسی^۱ به خوبی هم زده شد. سپس محلول در دستگاه حمام اولتراسونیک با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۶۰ دقیقه قرار داده شد. نانوذرات توسط یک آهنربا در پایین ظرف نگه داشته شده و محلول از ذرات جدا شده و چندین مرتبه با آب مقطر شسته شد تا سورفکتانت و مواد قلیایی اضافه آن گرفته شود. در نهایت، نانوذرات دوباره با ۱۰۰۰ سی سی آب مقطر مخلوط شده (PH=7) و به مدت ۱۰ دقیقه با همزن مغناطیسی هم زده شد و ۳۰ دقیقه نیز در حمام اولتراسونیک قرار گرفت.

به منظور بررسی صحت مغناطیسی بودن نانوسیال تهیه شده، مطابق شکل ۴ هنگامی که آهنربا به ظرف حاوی نانوسیال نزدیک می‌شود، نانوذرات به سمت آهنربا جذب می‌شوند که نشان دهنده مغناطیسی بودن نانوسیال تهیه شده است.



شکل ۴- تست مغناطیسی بودن نانوذرات با آهنربا

۲-۳- ایجاد میدان مغناطیسی

برای بررسی تاثیر میدان مغناطیسی بر عملکرد لوله گرمایی نوسانی، از ۱۱ عدد آهنربای نئودیمیوم بلوکی به ابعاد ۷*۱۵ و ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شده است. شدت میدان مغناطیسی آهنرباها توسط دستگاه گوس‌متر اندازه‌گیری شد که مقدار آن برابر با ۶۰ میلی تسلا (۶۰۰ گوس) می‌باشد. با توجه به اینکه دستگاه دارای ۱۱ دور می‌باشد لذا تعداد ۱۱ عدد آهنربا بر روی لوله‌های تبخیرکن قرار داده شدند. نحوه استقرار آهنربا در مجاورت لوله به گونه‌ای بود که خطوط میدان مغناطیسی آهنربا در امتداد مسیر جریان سیال قرار گیرند (شکل ۵).

۲-۴- روش انجام آزمایش

پس از ساخت دستگاه با لوله‌های مسی، المنت گرمایی الکتریکی بر روی آن نصب گردید. ترموکوپل‌ها بر روی لوله‌های تبخیرکن و چگالنده نصب شدند و سپس تمام قسمت‌های المنت به خوبی توسط عایق پنبه نسوز به ضخامت ۱ اینچ پوشانده شدند. برای هدایت بهتر جریان هوا بر روی قسمت چگالنده یک کانال به ابعاد سطح مقطع ۳۰*۲۰ سانتیمتر بر روی دستگاه نصب گردید. پرشر ترانسمیتر نیز بر روی یکی از لوله‌های چگالنده نصب گردید. سایر تجهیزات اندازه‌گیری نیز همانگونه که در شکل ۶ نشان داده شده به دستگاه متصل گردیدند.

¹ magnetic stirrer

۳- صحت داده ها و عدم قطعیت

از آنجایی که هر یک از تجهیزات اندازه‌گیری دارای دقت مشخص و محدودی می‌باشد، لذا مقادیر اندازه‌گیری شده نیز با مقداری خطا همراه خواهند بود. لذا محاسبه پارامترهای مرتبط با این کمیت‌ها نیز دقیق نخواهد بود. بنابراین لازم است عدم قطعیت ناشی از اندازه‌گیری تعیین گردد. در واقع با محاسبه عدم قطعیت، بازه‌ای که میزان دقیق پارامتر مورد نظر در آن محدوده قرار دارد، مشخص می‌گردد. عدم قطعیت یک کمیت محاسبه شده مانند M را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد [۴۰]:

$$U_{M_i} = \frac{x_i}{M} \frac{\partial M}{\partial x_i} U_{x_i} \quad (8)$$

که x_i پارامتر قابل اندازه‌گیری و M کمیت محاسبه شده از روی پارامترهای قابل اندازه‌گیری می‌باشند. U_{x_i} خطای اندازه‌گیری است که برابر است با دقت اندازه‌گیری تقسیم بر حداقل کمیت اندازه‌گیری شده. U_{M_i} حداکثر خطای ممکن در محاسبه یک کمیت می‌باشد. تاثیر کلیه خطاها برای محاسبه کمیت نهایی با معادله زیر بیان می‌شود:

$$\text{Max. } U_M = \pm \left[\left(\frac{x_1}{M} \frac{\partial M}{\partial x_1} U_{x1} \right)^2 + \left(\frac{x_2}{M} \frac{\partial M}{\partial x_2} U_{x2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{x_n}{M} \frac{\partial M}{\partial x_n} U_{xn} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

در نتیجه حداکثر عدم قطعیت برای شار گرمای ورودی و مقاومت گرمایی به شرح ذیل بدست می‌آیند:

$$\text{Max. } U_Q = \pm \left[(U_I)^2 + (-U_V)^2 \right]^{1/2} = \pm 0.03231 \approx \pm 3.23\%$$

$$\text{Max. } U_R = \pm \left[(U_{\Delta T})^2 + (U_Q)^2 \right]^{1/2}$$

$$= \pm 0.03269 \approx \pm 3.27\%$$

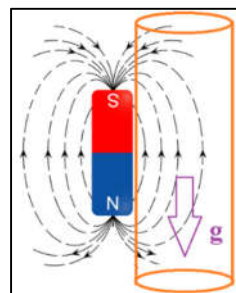
بنابراین عدم قطعیت گرمای ورودی 3.23% و مقاومت گرمایی 3.27% می‌باشد. دقت هر یک از تجهیزات در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- دقت تجهیزات آزمایشگاهی

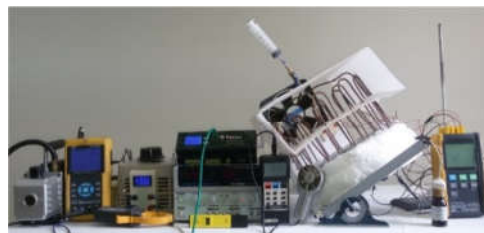
واحد	دقت	ابزار
بار	۰.۰۰۱	فشارسنج دیجیتال
ولت	۱	اتوترانس
درجه سلسیوس	۰.۱	ترمومتر دیجیتال
ثانیه	۱	زمان سنج
میلی متر	۱	متر
میلی متر	۰.۱	کولیس
آمپر	۰.۱	مولتی متر

۴- بحث و بررسی نتایج آزمایشات

ابتدا آزمایشات با آب مقطر در حالت عمودی و سپس در حالت شیب‌دار تحت زوایای مختلف انجام گرفت. پس از آن نانوسیال به دستگاه تزریق گردید و در زوایای مختلف بدون تاثیر میدان مغناطیسی آزمایشات تکرار شدند. نهایتاً آزمایشات به همان نحو و در همان زوایا با اعمال همزمان میدان مغناطیسی تکرار گردیدند. جدول ۴ لیست آزمایشات را نشان می‌دهد، نتایج آزمایشات نیز در ادامه آورده شده و مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.



شکل ۵- طرحواره استقرار آهنربا در مجاورت لوله



شکل ۶- دستگاه آزمایش و وسایل اندازه‌گیری

ابتدا توسط پمپ خلا طی ۲۵ دقیقه هوای داخل دستگاه تخلیه شد. پس از جدا کردن پمپ خلا، به مدت ۱۵ دقیقه فشار دستگاه کنترل می‌شود. در این مدت فشارسنج دیجیتال بر روی فشار 0.085 اتمسفر ثابت می‌ماند. سپس سیال عامل با استفاده از یک سرنگ مدرج به داخل دستگاه تزریق می‌گردد. با باز کردن شیر ورودی، به علت خلا بودن داخل دستگاه، سیال عامل به راحتی به داخل دستگاه مکش می‌گردد. اکنون دستگاه جهت انجام آزمایشات آماده می‌باشد. آزمایشات ابتدا با آب مقطر و سپس با نانوسیال در نسبت‌های پرشدگی 50% و 60% انجام شد. نسبت پرشدگی عبارت است از:

$$FR = \frac{V_f}{V_t} \times 100 \quad (3)$$

که در این رابطه V_f حجم سیال عامل و V_t حجم کل داخل لوله‌ها می‌باشد. گرمای ورودی به دستگاه از 30 تا 300 وات و با افزایش 30 وات در هر گام و در فواصل زمانی 15 دقیقه انجام می‌گردد. میانگین دمای تبخیرکن و چگالنده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$T_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad ; \quad N = 4 \quad (4)$$

مقاومت گرمایی پارامتر مناسبی جهت تعیین و تبیین عملکرد گرمایی مبادله‌کن‌های گرمایی می‌باشد:

$$R = \frac{T_e - T_c}{Q_{in}} \quad (5)$$

برای نشان دادن ظرفیت و محدوده عملکرد لوله گرمایی نوسانی می‌توان مقدار رسانایی گرمایی موثر را به روش زیر محاسبه نمود [۳۹]:

$$k_{eff} = \frac{Q \times L_{eff}}{A_c (T_e - T_c)} \quad (6)$$

که در آن طول موثر بین تبخیرکن و چگالنده است:

$$L_{eff} = 0.5(L_e + L_c) + L_a \quad (7)$$

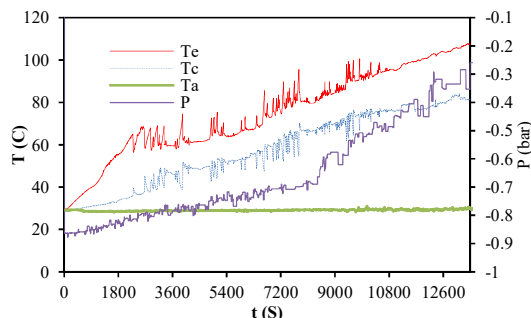
پس از آن برای بررسی تاثیر زاویه استقرار (شیب)، دستگاه در زوایای مختلف از صفر تا 90 درجه قرار داده شد و آزمایشات انجام گرفت.

جدول ۴- لیست آزمایشات

سیال عامل	نسبت پرشدگی (%)	زاویه قرارگیری (درجه)	میدان مغناطیسی	محدوده توان ورودی (وات)
آب	۵۰	۰-۳۰-۶۰-۹۰	-	۳۰۰-۰
نانوسیال	۵۰	۰-۳۰-۶۰-۹۰	-	۳۰۰-۰
نانوسیال	۵۰	۰-۳۰-۶۰-۹۰	✓	۳۰۰-۰
نانوسیال	۶۰	عمودی	-	۳۰۰-۰
آب	۶۰-۵۰	عمودی	-	۱۰۰ (ثابت)
نانوسیال	۶۰-۵۰	عمودی	-	۱۰۰ (ثابت)
نانوسیال	۶۰-۵۰	عمودی	✓	۱۰۰ (ثابت)

۴-۱- بررسی نمودارهای نوسانات دما و فشار

نمودارهای نوسانات دمای تبخیرکن و چگالنده و فشار در حالتی که دستگاه به صورت عمودی قرار گرفته در شکل ۷ آورده شده است. دمای هوای ورودی به چگالنده (Ta) تقریباً در تمام مدت انجام آزمایش ثابت است. در شروع آزمایش و در شار گرمایی پایین، حرکت نوسانی در لوله رخ نمی‌دهد، زیرا هنوز حباب‌های بخار و نیروی کافی برای بالا بردن لخته‌های مایع و ایجاد جریان نوسانی و چرخشی ندارند. نمودار نوسانات دما برای آب مقطر در شکل ۷ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود پس از گذشت حدود ۲۲۵۰ ثانیه در حالیکه دمای تبخیرکن به ۶۴ درجه سلسیوس رسیده، نوسانات آغاز می‌شوند. در این موقعیت، توان ورودی به دستگاه ۹۰ وات می‌باشد. نوسانات فشار نیز در همین محدوده شروع شده‌اند. پس از گذشت زمان حدود ۱۰۶۰۰ ثانیه وقتی که دمای تبخیرکن به حدود ۹۴ درجه سلسیوس رسیده است، دیگر نوسانات زیادی در دما دیده نمی‌شود اگر چه دما همچنان در حال افزایش است. از این نقطه به بعد، نوسانات دما در چگالنده نیز کمتر شده‌اند به عبارتی نشان دهنده این است که رژیم جریان از حالت قطره - حباب به جریان حلقوی^۱ و نهایتاً حالت مه^۲ تبدیل شده [۴۱] و چگالنده هوایی دیگر قابلیت چگالش بخار را ندارد. استفاده از فن با دبی بیشتر و یا چگالنده آبی می‌تواند منجر به ادامه عملیات انتقال گرما گردد.

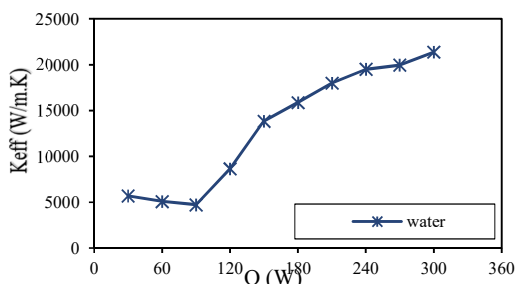


شکل ۷- تغییرات دمای تبخیرکن و چگالنده و فشار دستگاه برای سیال عامل آب مقطر در حالت عمودی

یکی از شاخصه‌های مهم برای بیان و مقایسه محدوده عملکرد

^۱annular
^۲mist flow

مبادله‌کن‌های حرارتی، نمایش نمودار رسانایی گرمایی موثر می‌باشد. شکل ۸ میزان رسانایی گرمایی دستگاه را در حالت‌های مختلف در موقعیت عمودی نشان می‌دهد. در حالت پایه با سیال عامل آب مقطر و در نسبت پرشدگی ۵۰٪، رسانایی گرمایی موثر دستگاه حدود 21000 W/m.K است که بیش از ۵۰ برابر رسانایی گرمایی لوله مسی (393 W/m.K) می‌باشد. علت این افزایش را می‌توان اینگونه بیان کرد که در لوله گرمایی نوسانی، انتقال گرما به علت جوشش و تقطیر بوده و انتقال گرمای محسوس و نهان به صورت همزمان انجام می‌شود (که انتقال گرمای نهان بسیار بیشتر از گرمای محسوس است) اما لوله مسی فقط قابلیت انتقال گرمای محسوس را دارد.



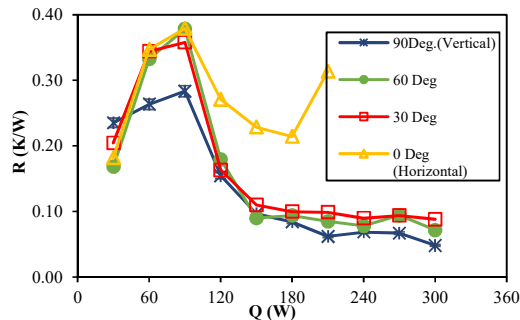
شکل ۸- رسانایی گرمایی موثر دستگاه در حالت عمودی

۴-۲- تأثیر نسبت پرشدگی بر مقاومت گرمایی

نسبت پرشدگی از عوامل بسیار مهم بر عملکرد حرارتی لوله گرمایی نوسانی است. آزمایشات متعددی در این خصوص انجام شده و نتایج نشان داده که اغلب بهترین نسبت پرشدگی بین حدود ۳۵ تا ۶۵٪ می‌باشد [۴۲]. در این خصوص آزمایش‌هایی با نانوسیال به ازای نسبت‌های پرشدگی ۵۰ و ۶۰٪ در حالت عمودی انجام شد تا نسبت پرشدگی بهینه مشخص شود. پس از آن آزمایشات در زوایای مختلف نسبت به افق بر اساس نسبت پرشدگی بهینه انجام شد و نتایج محاسبات بر اساس میانگین دما در بازه اعمال گرمای ورودی در ادامه آورده شده است.

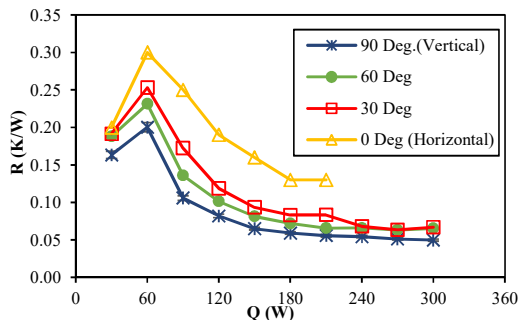
با تغییر توان ورودی، مقدار متوسط مقاومت گرمایی در نسبت‌های پرشدگی ۵۰٪ و ۶۰٪ در شکل ۹ ترسیم شده است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که در شار گرمایی بسیار کم (در شروع کار)، حرکت نوسانی در داخل لوله انجام نمی‌شود که علت آن عدم تشکیل حباب‌های بخار به اندازه کافی جهت جابجا کردن مایع داخل لوله می‌باشد [۴۳]. لذا تا زمانی که شار گرمایی به مقدار لازم جهت شروع نوسانات افزایش نیافته، مقاومت گرمایی افزایش می‌یابد. در این حالت هنوز عملکرد حرارتی دستگاه مناسب نیست. با شروع نوسانات و انتقال لخته‌های مایع توسط حباب‌های بخار در داخل لوله، مقدار مقاومت گرمایی شروع به کاهش می‌کند. مقاومت گرمایی دستگاه در نسبت پرشدگی ۵۰٪ کمتر از مقاومت آن در نسبت پرشدگی ۶۰٪ می‌باشد و دستگاه در این حالت عملکرد حرارتی بهتری دارد. علت آن را می‌توان به حجم سیال داخل لوله نسبت داد. در نسبت پرشدگی ۶۰٪ ارتفاع سیال داخل لوله نسبت به ۵۰٪ بیشتر است، لذا نیروی بیشتری برای شروع نوسانات و در نتیجه فرایند انتقال گرما لازم است. به عبارتی نیاز به توان ورودی بیشتری می‌باشد. در توان‌های پایین اختلاف مقاومت

در این مدت، گرما فقط به شیوه رسانش از طریق لوله مسی منتقل می‌شود. در همه زوایا نیاز به یک حداقل توان ورودی (۹۰ وات) جهت شروع به کار دستگاه می‌باشد. در حالت افقی هنگامی که توان ورودی به حدود ۱۸۰ وات می‌رسد، در بخش‌هایی از تبخیرکن خشک شدگی رخ می‌دهد و مقاومت گرمایی ناگهان افزایش می‌یابد [۳۱، ۴۴]. در حقیقت به علت عدم تاثیر نیروی جاذبه در حالت افقی برگشت سیال از چگالنده به تبخیرکن انجام نمی‌شود و این موجب افزایش شدید دمای تبخیرکن و مختل شدن عملکرد دستگاه می‌گردد. در سایر حالت‌ها با افزایش توان ورودی، مقاومت گرمایی کاهش می‌یابد اما همواره کمترین مقاومت گرمایی مربوط به زاویه ۹۰ درجه (حالت عمودی) است.



شکل ۱۱- تغییرات مقاومت گرمایی بر حسب توان ورودی برای سیال عامل آب مقطر در زوایای مختلف

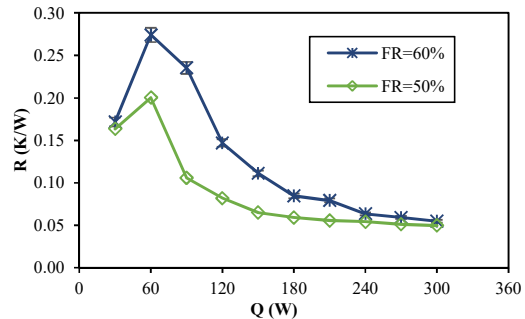
شکل ۱۲ نشان می‌دهد که در صورت استفاده از نانوسیال باز هم کمترین مقاومت گرمایی مربوط به حالت عمودی خواهد بود. دلیل اصلی آن وجود نیروی جاذبه است. در این حالت البته توان مورد نیاز برای شروع به کار دستگاه کاهش می‌یابد (۶۰ وات) که نسبت به حالت قبل ۳۰٪ کمتر است و نشان می‌دهد استفاده از نانوسیال موجب بهبود عملکرد دستگاه شده است. در حالت افقی و در توان ورودی ۲۱۰ وات، دما در برخی از لوله‌های تبخیرکن به بیش از ۱۰۰ درجه سلسیوس رسید و به منظور رعایت اصول ایمنی از افزایش بیشتر توان صرفنظر گردید.



شکل ۱۲- تغییرات مقاومت گرمایی بر حسب توان ورودی برای نانوسیال در زوایای مختلف

با اعمال میدان مغناطیسی می‌توان شاهد تغییراتی نسبت به حالت‌های قبل بود (شکل ۱۳). اولین و مهمترین تغییر، امکان کارکرد دستگاه در حالت افقی به ازای تمام توان‌های ورودی می‌باشد. همچنین عملکرد دستگاه در زاویه ۶۰ درجه و ۹۰ درجه (و در توان بیشتر از

گرمایی نیز بیشتر است. با افزایش گرمای ورودی، دامنه نوسانات نیز بیشتر شده و در نتیجه سیال داخل لوله جریان می‌یابد. لذا در توان‌های گرمایی بالاتر، مقاومت گرمایی در هر دو نسبت پرشدگی بیشتر به هم نزدیک می‌شود.

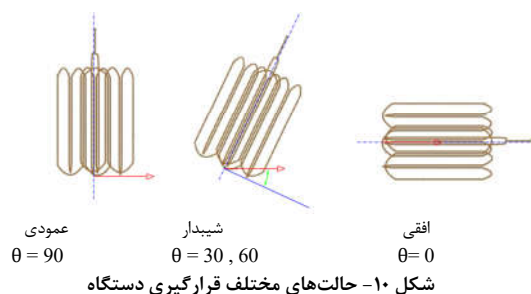


شکل ۹- تغییرات مقاومت گرمایی بر حسب توان ورودی برای نانوسیال در نسبت‌های پرشدگی مختلف

با توجه به اینکه دستگاه در نسبت پرشدگی ۵۰٪ عملکرد حرارتی بهتری دارد لذا ادامه آزمایشات با این نسبت پرشدگی انجام شده‌اند.

۴-۳- تأثیر زاویه استقرار بر مقاومت گرمایی

از آنجایی که ممکن است همیشه لوله گرمایی نوسانی در تجهیزات گوناگون الزاماً به صورت عمودی قرار نگیرد لذا کارکرد دستگاه تحت زوایای مختلف اهمیت فراوانی دارد. در حالت عمودی، نیروی جاذبه در برگرداندن سیال از چگالنده به تبخیرکن نقش اساسی را ایفا می‌کند، اما در حالت افقی نیروی جاذبه تاثیر بر عملکرد دستگاه ندارد. چنانچه دستگاه بتواند در حالت افقی به طور کامل و صحیح به کار خود ادامه دهد به آن ضد جاذبه^۱ گفته می‌شود. در این تحقیق عملکرد دستگاه در زوایای صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به افق مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱۰).

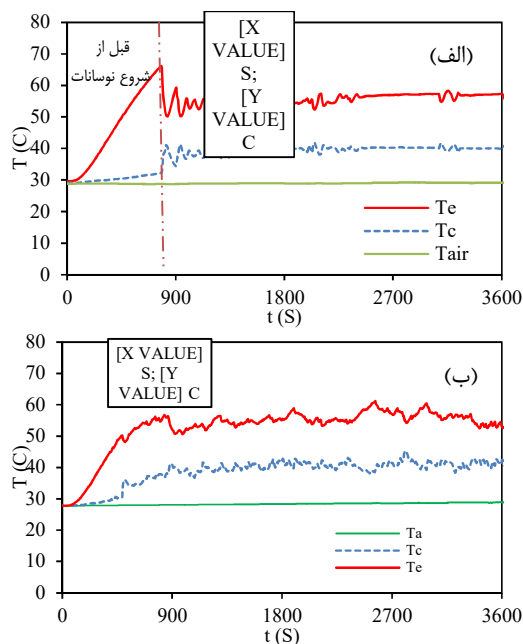


آزمایشات ابتدا با سیال عامل آب مقطر انجام شد. شکل ۱۱ مقاومت گرمایی دستگاه را در زوایای مختلف استقرار و از توان‌های ورودی ۳۰ وات تا ۳۰۰ وات نشان می‌دهد. با افزایش گرمای ورودی، ابتدا مقاومت گرمایی دستگاه افزایش می‌یابد پس از آن با شروع نوسانات و ایجاد جریان ضربانی، ناگهان مقاومت گرمایی کاهش می‌یابد. علت افزایش مقاومت تا قبل از تشکیل حباب و نوسانات این است که

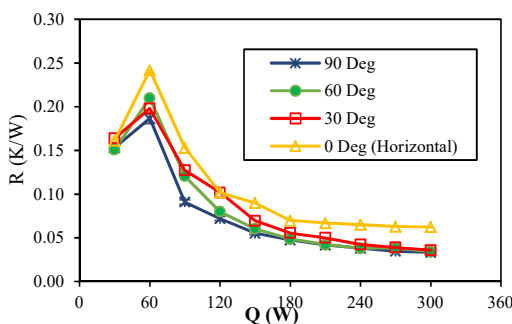
^۱ anti gravity

۴-۵- تأثیر شار گرمای ثابت بر عملکرد حرارتی دستگاه

در برخی از تجهیزات صنعتی، میزان گرمای تولید شده مقدار ثابتی است. لذا به منظور بررسی تأثیر توان ورودی ثابت بر عملکرد حرارتی دستگاه در حالت عمودی و نسبت پرشدگی ۵۰ درصد، توان ثابت ۱۰۰ وات به مدت ۳۶۰۰ ثانیه به دستگاه اعمال شد. شکل ۱۵ تغییرات دمای تبخیرکن و چگالنده را در حالی که از آب مقطر به عنوان سیال عامل استفاده شده نشان می‌دهد. زمان شروع نوسانات^۱ دستگاه ۷۷۵ ثانیه پس از اعمال گرما و در دمای ۶۶/۱ درجه سلسیوس خواهد بود. میانگین دمای تبخیرکن پس از شروع نوسانات ۵۵/۸ درجه سلسیوس است. در صورت استفاده از نانوسیال فرایند انتقال گرما در دمای پایین‌تر (۵۰/۲ درجه سلسیوس) و زمان کمتری (۴۸۵ ثانیه) آغاز می‌شود. در این حالت دمای میانگین تبخیرکن در حالت پایدار ۵۵/۳ درجه سلسیوس خواهد بود. اعمال میدان مغناطیسی موجب می‌شود تا نوسانات با رسیدن به دمای ۴۴/۷ درجه سلسیوس شروع شوند. در تجهیزات الکترونیکی، پایین بودن دمای کاری بسیار مهم است. زمان شروع نوسانات دمای تبخیرکن و چگالنده حدود ۵۳۵ ثانیه پس از اعمال حرارت خواهد بود. ضمناً میانگین دمای تبخیرکن در حالت پایدار ۵۰/۶ درجه سلسیوس می‌باشد. همچنین هنگام استفاده از آب مقطر، نوسانات دمایی دستگاه پس از حدود ۲۵۰۰ ثانیه تقریباً متوقف می‌شود ولی در حالت‌های نانوسیال همچنان نوسانات به صورت پایدار ادامه دارند که حاکی از تداوم عملکرد دستگاه می‌باشد.



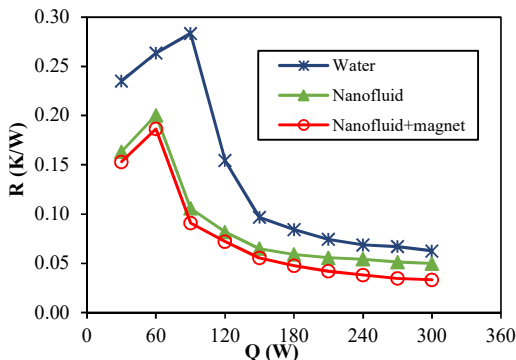
۱۵۰ وات حتی در زاویه ۳۰ درجه) بسیار به هم نزدیک می‌شود. در حقیقت با شیب‌دار کردن دستگاه و نزدیک شدن به حالت افقی، تأثیر نیروی گرانش کمتر می‌شود. اما با اعمال میدان مغناطیسی، می‌توان عدم وجود جاذبه (نیروی گرانش) را جبران نمود. زیرا در حضور میدان مغناطیسی، ممان مغناطیسی نانوذرات Fe_3O_4 با مکانیزم‌های چرخش براونی و نیل با میدان مغناطیسی همراستا می‌شوند. در حالت شیب‌دار با کم شدن و نهایتاً حذف تأثیر نیروی گرانش، نیروی مغناطیسی نانوسیال را از چگالنده به داخل تبخیرکن می‌کشد و با به جریان انداختن سیال عامل، خشک شدگی تبخیرکن را به تاخیر می‌اندازد. این موضوع مهم‌ترین دلیل بر ادامه کار دستگاه در زوایای نزدیک به افق و حتی در حالت افقی می‌باشد.



شکل ۱۳- تغییرات مقاومت گرمایی بر حسب توان ورودی برای نانوسیال در حضور میدان مغناطیسی در زوایای مختلف

۴-۴- تأثیر نانوسیال بر عملکرد حرارتی دستگاه

همانگونه که پیش‌تر نیز گفته شد، نوع سیال عامل بر عملکرد حرارتی دستگاه تأثیر دارد. استفاده از نانوسیال به علت داشتن رسانایی گرمایی بالاتر نسبت به آب مقطر، موجب کاهش ضریب مقاومت گرمایی و در نتیجه بهبود عملکرد دستگاه می‌گردد. این موضوع در شکل ۱۴ که به منظور امکان مقایسه بهتر و دقیق‌تر تأثیر سیال عامل بر عملکرد دستگاه و برای حالت عمودی ارائه شده است، کاملاً مشهود است. اعمال میدان مغناطیسی موجب شده تا مقاومت گرمایی دستگاه، کاهش بیشتری داشته باشد. میزان تأثیر میدان مغناطیسی به عوامل دیگری مانند کسر جرمی نانوذره، قطر لوله و شدت میدان مغناطیسی نیز بستگی دارد.



شکل ۱۴- تغییرات مقاومت گرمایی بر حسب توان ورودی در حالت عمودی در حالت‌های مختلف

^۱ start up

نسبت به آب مقطر به ترتیب ۳۷٪ و ۳۰٪ کمتر شود. دمای شروع نوسانات نیز به ترتیب ۲۴٪ و ۳۲٪ کاهش می‌یابد.

۶- نمادها

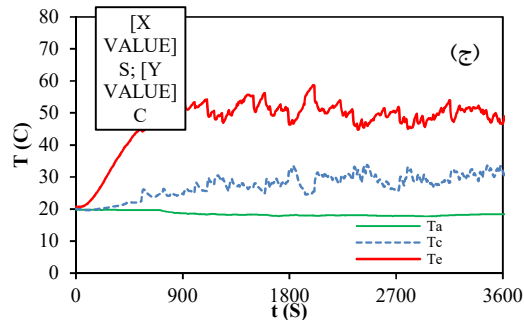
D	قطر (mm)
I	شدت جریان (A)
L	طول (m)
m	جرم (kg)
Q	آهنگ انتقال گرمای ورودی (W)
R	مقاومت گرمایی (°C/W)
T	دما (°C)
V	ولتاژ (v)
v	حجم

زیرنویس‌ها

ave	میانگین
bf	سیال پایه
c	چگالنده
e	تبخیرکن
f	سیال
in	ورودی
np	نانو ذره

۷- مراجع

- [1] Akachi H., Structure of a heat pipe, ed: Google Patents, 1990.
- [2] Mameli M., Besagni G., Bansal P. K., and Markides C. N., Innovations in pulsating heat pipes: From origins to future perspectives, Applied Thermal Engineering, Vol. 203, p. 117921, 2022/02/25/ 2022.
- [3] Qu J., Wang Q., and Sun Q., Lower limit of internal diameter for oscillating heat pipes: a theoretical model, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 110, pp. 174-185, 2016.
- [4] Yang H., Khandekar S., and Groll M., Operational limit of closed loop pulsating heat pipes, Applied Thermal Engineering, Vol. 28, No. 1, pp. 49-59, 2008.
- [5] Khandekar S., Dollinger N., and Groll M., Understanding operational regimes of closed loop pulsating heat pipes: an experimental study, Applied Thermal Engineering, Vol. 23, No. 6, pp. 707-719, 2003.
- [6] Lee J., Joo Y., and Kim S. J., Effects of the number of turns and the inclination angle on the operating limit of micro pulsating heat pipes, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 124, pp. 1172-1180, 2018.
- [7] Li M., Li L., and Xu D., Effect of number of turns and configurations on the heat transfer performance of helium cryogenic pulsating heat pipe, Cryogenics, Vol. 96, pp. 159-165, 2018.
- [8] Sedighi E., Amarloo A., and Shafii B., Numerical and experimental investigation of flat-plate pulsating heat pipes with extra branches in the evaporator section, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 126, pp. 431-441, 2018.
- [9] حقایق ش. سعیدی م. ح. شفییعی م. ب. بررسی تجربی لوله‌های حرارتی نوسانی و تأثیر تغییر طول ناحیه تبخیرکننده بر عملکرد آن. مجله مهندسی مکانیک مدرس، د. ۱۳، ش. ۱۵، ص ۱۱۰-۱۱۵، ۱۳۹۲.
- [10] Zufar M., Gunnasegaran P., Kumar H., and Ng K., Numerical and experimental investigations of hybrid nanofluids on pulsating heat pipe performance, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 146, p. 118887, 2020.
- [11] Nazari M. A., Ahmadi M. H., Ghasempour R., and Shafii M. B., How to improve the thermal performance of pulsating



شکل ۱۵- تغییرات دمای تبخیرکن و چگالنده برای (الف) آب خالص، (ب) نانوسیال (ج) نانوسیال همراه با اعمال میدان مغناطیسی؛ در شار ورودی ثابت در حالت عمودی

در حالت استفاده از نانوسیال به همراه اعمال میدان مغناطیسی، نوسانات در دمای کمتری آغاز می‌شود که نشان دهنده این است که در این حالت فرایند انتقال گرما در پایین‌ترین دما انجام می‌گردد. در حقیقت در لوله گرمایی نوسانی با افزایش دما، حباب‌های بخار تشکیل می‌شوند که موجب حرکت لخته‌های مایع در داخل لوله می‌شوند. اعمال میدان مغناطیسی کمک می‌کند تا این حرکت در دمای پایین‌تری انجام گردد. استفاده از سیال مغناطیسی در مقایسه با آب خالص موجب می‌شود نوسانات در دستگاه حداقل حدود ۳۰ درصد زودتر آغاز شوند، این امر به علت رسانایی گرمایی بالاتر سیال مغناطیسی نسبت به آب خالص می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک لوله گرمایی نوسانی سه بعدی با تعداد ۱۱ دور در قسمت تبخیرکن ساخته شد و عملکرد حرارتی آن به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. عملکرد دستگاه با دو نوع سیال عامل متفاوت شامل آب مقطر و نانوسیال Fe_3O_4 با کسر جرمی ۰/۱٪ تحت زوایای مختلف از حالت عمودی تا افقی در گام‌های ۳۰ درجه با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. اثر میدان مغناطیسی نیز بر عملکرد دستگاه بررسی شد. میدان مغناطیسی منجر به گردش جریان سیال شده و انتقال گرما را بهبود می‌بخشد. با افزایش توان ورودی از ۳۰ تا ۳۰۰ وات نتایج اصلی این پژوهش به شرح زیر بیان می‌گردد:

- ۱- استفاده از نانوسیال موجب کاهش مقاومت گرمایی و بهبود عملکرد حرارتی دستگاه می‌شود.
- ۲- مقاومت گرمایی در نسبت پرشدگی ۵۰ درصد، کمتر از نسبت پرشدگی ۶۰ درصد در حالت قائم می‌باشد.
- ۳- مقاومت گرمایی با افزایش شار گرمای ورودی کاهش می‌یابد.
- ۴- در حالت افقی، فقط در هنگام اعمال میدان مغناطیسی، دستگاه می‌تواند به کار خود ادامه دهد.
- ۵- بهترین عملکرد دستگاه برای آب مقطر و همچنین نانوسیال، در حالت عمودی خواهد بود و با شیب‌دار کردن دستگاه عملکرد آن کاهش می‌یابد.
- ۶- در صورت اعمال میدان مغناطیسی، تاثیر زاویه شیب بر عملکرد دستگاه کاهش می‌یابد.
- ۷- در شار گرمایی ثابت، استفاده از نانوسیال و همچنین اعمال میدان مغناطیسی موجب می‌شود زمان شروع به کار دستگاه

- closed loop pulsating heat pipe, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 57, No. 5, pp. 751-763, 2021.
- [30] Qu J., Zuo A., Liu H., Zhao J., and Rao Z., Three-Dimensional oscillating heat pipes with novel structure for latent heat thermal energy storage application, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 187, p. 116574, 2021.
- [31] Kangarlui R. A., Ranjbari M. A., and Ramezanzpour 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, p. 105306, 2021.
- [32] Lei J., Luo Z., Qing S., Huang X., and Li F., Effect of surfactants on the stability, rheological properties, and thermal conductivity of Fe₃O₄ nanofluids, *Powder Technology*, Vol. 399, p. 117197, 2022.
- [33] Wang J., Li G., Li T., Zeng M., and Sundén B., Effect of various surfactants on stability and thermophysical properties of nanofluids, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 143, No. 6, pp. 4057-4070, 2021.
- [۳۴] اصلاحچی ع.، نوبختی م. ح.، شفیع م.، دینایی بناب م. ح.، بررسی تجربی انتقال گرمایی جابجایی اجباری فرو سیال Fe₃O₄ در لوله ی-U شکل تحت میدان مغناطیسی نوسانی، *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۵۱، ش. ۴، ص ۴۰۵-۴۱۲، ۱۴۰۰.
- [35] Kang S.-W., Wang Y.-C., Liu Y.-C., and Lo H.-M., Visualization and thermal resistance measurements for a magnetic nanofluid pulsating heat pipe, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 126, pp. 1044-1050, 2017/11/05/ 2017.
- [36] Zhao N., Zhao D., and Ma H., Experimental investigation of magnetic field effect on the magnetic nanofluid oscillating heat pipe, *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, Vol. 5, No. 1, p. 011005, 2013.
- [37] Taslimifar M., Mohammadi M., Afshin H., Saidi M. H., and Shafii M. B., Overall thermal performance of ferrofluidic open loop pulsating heat pipes: an experimental approach, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 65, pp. 234-241, 2013.
- [38] Berger P., Adelman N. B., Beckman K. J., Campbell D. J., Ellis A. B., and Lisensky G. C., Preparation and properties of an aqueous ferrofluid, *Journal of chemical education*, Vol. 76, No. 7, p. 943, 1999.
- [39] Smoot C. and Ma H., Experimental investigation of a three-layer oscillating heat pipe, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 136, No. 5, p. 051501, 2014.
- [40] Heris S. Z., Edalati Z., Noie S. H., and Mahian O., Experimental investigation of Al₂O₃/water nanofluid through equilateral triangular duct with constant wall heat flux in laminar flow, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 35, No. 13, pp. 1173-1182, 2014.
- [41] Sedighi E., Amarloo A., and Shafii M., Experimental investigation of the thermal characteristics of single-turn pulsating heat pipes with an extra branch, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 134, pp. 258-268, 2018.
- [42] Han X., Wang X., Zheng H., Xu X., and Chen G., Review of the development of pulsating heat pipe for heat dissipation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 59, pp. 692-709, 2016.
- [43] Xu R., Li X., Lei T., Wu Q., and Wang R., Operation characteristics of a gravity pulsating heat pipe under different heat inputs, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 189, p. 122731, 2022.
- [44] Winarta A., Putra N., Koestoe R. A., Pamitran A. S., and Hakim I. I., Experimental Investigation of a Large Scale-oscillating Heat Pipe at Different Inclinations, *Mechanical Engineering*, Vol. 10, No. 2, 2019.
- heat pipes: A review on working fluid, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 91, pp. 630-638, 2018.
- [۱۲] عباسعلیزاده م. و اکبری کنگرلوئی ر.، بررسی تجربی عملکرد گرمایی لوله گرمایی نوسانی داخل شیاردار با نانوسیال آب، MWCNT- *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۵۲، ش. ۱، ص ۲۱۷-۲۲۵، ۱۴۰۱.
- [13] Goshayeshi H. R. and Chaer I., Comparison of copper and glass oscillating heat pipes with Fe₂O₃ under magnetic field, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Vol. 11, No. 4, pp. 455-459, 2016.
- [14] Mameli M., Marengo M., and Zinna S., Numerical model of a multi-turn closed loop pulsating heat pipe: effects of the local pressure losses due to meanderings, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, No. 4, pp. 1036-1047, 2012.
- [15] Ma H., *Oscillating heat pipes*. Springer, 2015.
- [16] Charoensawan P., Khandekar S., Groll M., and Terdtoon P., Closed loop pulsating heat pipes: Part A: parametric experimental investigations, *Applied thermal engineering*, Vol. 23, No. 16, pp. 2009-2020, 2003.
- [17] Yongxi M. and Zhang H., Analysis of heat transfer performance of oscillating heat pipes based on a central composite design, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 223-228, 2006.
- [18] Lin Z., Wang S., Huo J., Hu Y., Chen J., Zhang W. et al., Heat transfer characteristics and LED heat sink application of aluminum plate oscillating heat pipes, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 14-15, pp. 2221-2229, 2011.
- [19] Alqahtani A. A., Edwardson S., Marengo M., and Bertola V., Performance of flat-plate, flexible polymeric pulsating heat pipes at different bending angles, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 216, p. 118948, 2022/11/05/ 2022.
- [20] Mohammadi M., Mohammadi M., Ghahremani A. R., Shafii M. B., and Mohammadi N., Experimental investigation of thermal resistance of a ferrofluidic closed-loop pulsating heat pipe, *Heat transfer engineering*, Vol. 35, No. 1, pp. 25-33, 2014.
- [21] Heris S. Z., Salehi H., and Noie S., The effect of magnetic field and nanofluid on thermal performance of two-phase closed thermosyphon (TPCT), *International Journal of Physical Sciences*, Vol. 7, No. 4, pp. 534-543, 2012.
- [22] Farrokh M., Goodarz T., Samad J., Javid N., and Amin H., Analysis of Entropy Generation of a Magneto-Hydrodynamic Flow Through the Operation of an Unlooped Pulsating Heat Pipe, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 140, No. 8, 2018.
- [23] Mameli M., Manno V., Filippeschi S., and Marengo M., Thermal instability of a closed loop pulsating heat pipe: combined effect of orientation and filling ratio, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 59, pp. 222-229, 2014.
- [24] Davari H., Goshayeshi H. R., Öztöp H. F., and Chaer I., Experimental investigation of oscillating heat pipe efficiency for a novel condenser by using Fe₃O₄ nanofluid, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 140, No. 6, pp. 2605-2614, 2020.
- [25] Mohammadfam Y., Heris S. Z., and Khazini L., Experimental Investigation of Fe₃O₄/hydraulic oil magnetic nanofluids rheological properties and performance in the presence of magnetic field, *Tribology International*, Vol. 142, p. 105995, 2020.
- [26] Zahmatkesh I., Effect of magnetic field orientation on nanofluid free convection in a porous cavity: a heat visualization study, *Journal of Thermal Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 170-186, 2020.
- [27] Gandomkar A., Saidi M., Shafii M., Vandadi M., and Kalan K., Visualization and comparative investigations of pulsating ferro-fluid heat pipe, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 116, pp. 56-65, 2017.
- [28] Goshayeshi H. R., Goodarzi M., Safaei M. R., and 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.
- [29] Markal B. and Aksoy K., The combined effects of filling ratio and inclination angle on thermal performance of a