طراحی، ساخت و بررسی تجربی عملکرد گرمایی لوله حرارتی

محمد حسن شجاعی‌فرد [۱]، مجتبی طحانی [۲*]، علی مهتاب روش [۳]، جواد زارع [۳]

۱- استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
۲- استادیار دانشکده علوم و فنون، دانشگاه تهران
۳- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
*پست الکترونیک نویسنده مسئول: tahani@iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۱۰ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۵/۱۸

چکیده

در تحقیق حاضر به‌صورت تجربی به بررسی عملکرد لوله حرارتی پرداخته شده است. در ابتدا لوله حرارتی موردنظر با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر عملکرد لوله حرارتی طراحی و ساخته شده است. سپس با محاسبه‌ی مقدار سیال عامل موردنیاز و انجام عملیات شارژ لوله و همچنین نصب سنسورها و سایر تجهیزات جانبی مورد استفاده دستگاه آزمایش موردنظر آماده گردیده است. لوله حرارتی مورد آزمایش از جنس مس می‌باشد که از آب به‌عنوان سیال عامل استفاده می‌کند. پس از طراحی و ساخت مجموعه آزمایش با تغییر ولتاژ توان‌های مختلفی به گرمکن وارد شده و برای توان‌های ورودی مختلف توزیع دمای سطح لوله گرمایی در طول لوله به دست آمده است. در ادامه با استفاده از توزیع دمای به دست آمده، تغییرات مقاومت حرارتی و همچنین تغییرات ضریب هدایت معادل لوله گرمایی محاسبه شده است.

کلید واژگان: لوله حرارتی، مقاومت حرارتی، هدایت گرمایی معادل

Design, Construction and Empirical Investigation of Thermal Performance of A Heat Pipe

Mohammad Hassan Shojaei Fard [1], Mojtaba Tahani [2*], Ali Mahtab [3], Javad Zare [3]

1-Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
2- Assistant Professor of Faculty of Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran
3- Ph.D. Student, Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
*Corresponding author, E-mail address: tahani@iust.ac.ir

Received: 28.02.2017 Accepted: 09.08.2017

Abstract

In this work thermal performance of a cylindrical heat pipe at steady state has been investigated empirically. The used heat pipe, made of copper, has been designed and manufactured by considering effective parameters on heat pipe thermal performance. Then heat pipe has been charged by water as the working fluid. By installing sensors and the other equipment, the test set up has been prepared. After preparing the test set up by changing voltage, various input powers have been inserted into evaporator and the heat pipe surface temperature distribution has been obtained for each case. Then by using the obtained temperature distributions, thermal resistance variations and equivalent thermal conductivity coefficient have been computed. and variation of them versus input power have been plotted. The results show that the thermal resistance has its minimum value at maximum operating limit (maximum passing power) and equivalent thermal conductivity has its maximum value at this point.

Keywords: Heat pipe, Thermal Resistance, Equivalent thermal conductivity

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

۱- مقدمه

لوله‌های حرارتی به‌طور گسترده‌ای در کاربردهای مرتبط با انتقال حرارت مانند سیستم‌های تبدیل انرژی، خنک‌سازی راکتورها، خنک‌سازی تجهیزات الکترونیکی و کاربردهای فضایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱ و ۲]. در مقایسه با وسایل انتقال حرارت مرسوم، لوله‌های حرارتی وسایل مؤثری برای انتقال حرارت در نرخ‌های بالا می‌باشند. این سیستم، مقدار زیادی حرارت را در سطح مقطع کوچک و در فواصل نسبتاً طولانی با گرادیان دمای کم و بدون احتیاج به توان خارجی منتقل می‌نماید. هدایت گرمایی معادل لوله حرارتی می‌تواند تا چند صد برابر بهترین رساناها مانند مس برسد [۳].

لوله حرارتی دارای سه قسمت اواپراتور، آدیاباتیک و کندانسور می‌باشد. گرمای وارده در اواپراتور باعث تبخیر سیال عامل می‌شود و سپس گرادیان فشار ایجاد شده باعث رانده شدن سیال عامل به سمت کندانسور می‌شود که در این قسمت سیال چگالیده شده و گرمای نهان تبخیر آن آزاد می‌شود. سیال عامل سپس توسط فشار موئینگی ایجاد شده توسط ساختار ویک به سمت اواپراتور پمپ می‌شود. بنابراین این وسیله می‌تواند به‌صورت پیوسته گرما را از قسمت اواپراتور به کندانسور منتقل کند [۴]. به‌عنوان نمونه یکی از کاربردهای لوله‌های حرارتی استفاده از آن‌ها در خنک کردن پردازنده‌های پنتیوم در کامپیوترهای نوت بوک می‌باشد. به دلیل فضای محدود و توان موجود تولید شده در نوت بوک، لوله گرمایی وسیله‌ای ایده آل برای خنک کردن چیپ‌های آن می‌باشد. علاوه بر این در تجهیزات الکترونیکی با توان بالا همانند ترانزیستورها و یکسو کننده‌ها معمولاً از چاه‌های لوله حرارتی استفاده می‌نمایند [۵-۷].

کیم و همکاران [۸] به بررسی تکنولوژی خنک کردن پردازنده‌های کامپیوترهای شخصی به کمک لوله گرمایی پرداخته‌اند. همچنین عنوان شده است که به کمک لوله گرمایی با استفاده از فن‌های کوچک‌تر و با سرعت کمتر می‌توان پردازنده پنتیوم IV را خنک نمود؛ که این امر موجب کاهش قیمت ساخت و همچنین کاهش صدای سیستم می‌گردد. جریان در ناحیه بخار لوله حرارتی و محیط متخلخل توسط محققان گوناگونی مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است. آل گنک و هوانگ [۹] به‌صورت تجربی پاسخ گذرای یک لوله حرارتی مسی با آب به‌عنوان سیال عامل را مورد بررسی قرار داده‌اند؛ که از نتایج آن می‌توان امکان بیان پاسخ گذرای لوله حرارتی هنگام گرم شدن و سرد شدن توسط یک تابع نمایی و همچنین افزایش مقدار پایای دمای بخار با افزایش توان ورودی یا کاهش نرخ جریان آب خنک‌ساز اشاره کرد. آل گنک و همکاران [۱۰]. به‌صورت تجربی به بررسی عملکرد یک لوله حرارتی مایل که از آب استفاده می‌کند پرداخته‌اند. سعید و اکاش [۱۱] به‌صورت تجربی عملکرد دو نوع لوله حرارتی با و بدون ویک را با سیال عامل آب مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دهنده‌ی کارکرد بهتر لوله حرارتی با ویک در قالب ضریب انتقال حرارت کلی نسبت به لوله بدون ویک در رنج دمایی مورد مطالعه بود. فقری و توماس [۱۲] به‌صورت تجربی و تئوری محدوده موئینگی را برای یک لوله حرارتی هم‌محور بررسی کردند. در این نوع لوله گرمایی دولایه فتیله وجود دارد. یک‌لایه فتیله در سطح خارجی لوله میانی و یک‌لایه فتیله در سطح داخلی لوله بیرونی قرار گرفته است و بخار در بین دو لوله درونی و بیرونی در جریان است. فقری و توماس توزیع دما بر روی لوله حرارتی را به دست آورده‌اند و با توزیع دما بر روی لوله حرارتی استوانه‌ای معمولی مورد مقایسه قرار دادند. آزاد [۱۳] به‌صورت تئوری و تجربی به بررسی عملکرد لوله‌های حرارتی در جمع کننده‌های خورشیدی پرداخته است که نتایج به دست آمده از مدل تئوری یک نسبت بهینه‌ی طول حرارت دیده به طول خنک شده برای جذب بیشتر گرما و افزایش مقدار کلی حرارت مفید را پیشنهاد می‌کند و همچنین مدل قادر به پیش‌بینی تعدادی از خصوصیات سیستم خورشیدی مثل دمای لوله حرارتی، دمای آب خروجی، بازده و گرمای جذب مفید می‌باشد. فقری و باچکو [۱۴] لوله گرمایی با چندین منبع گرمایی را به‌صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. در این کار تأثیر توزیع بار گرمایی در قسمت اواپراتور بر عملکرد و توزیع دمای اواپراتور بررسی شده است که در نهایت حالت بهینه‌ای برای نحوه‌ی توزیع بار گرمایی در قسمت اواپراتور لوله گرمایی به دست آمده است. کیم و همکاران [۱۵] با استفاده از روش تجربی و تحلیلی به بررسی رفتاری و بهینه‌سازی عملکرد یک لوله گرمایی کوچک (مورد استفاده برای خنک کردن تجهیزات الکترونیکی) با فتیله شیاری پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش تحلیلی و استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی، حالت بهینه‌ای برای تعداد و ابعاد شیارهای به کار رفته در لوله گرمایی به دست آوردند.

در تحقیق حاضر در مرحله اول لوله حرارتی با دیواره مسی و ساختار ویک موردنظر طراحی و ساخته شده است. پس از انجام عملیات شارژ لوله با سیال عامل موردنظر و نصب تجهیزات جانبی، مجموعه آزمایش آماده و آزمایش‌های موردنظر بر روی لوله حرارتی انجام گردیده است. در انتها

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

توزیع دما بر روی دیواره لوله حرارتی در فواصل گوناگون و به ازای بارهای حرارتی متفاوت به دست آمده است. سپس مقاومت حرارتی و ضریب هدایت معادل لوله گرمایی محاسبه و نمودارهای مربوطه ترسیم گردیده است.

۲- تشریح دستگاه آزمایش

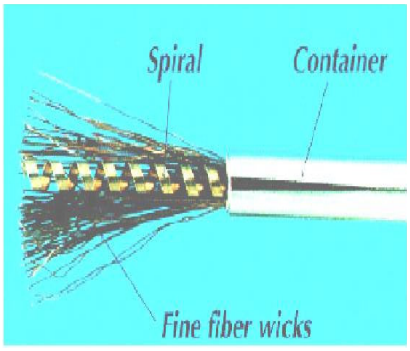
لوله حرارتی ساخته شده در کوچک‌ترین اندازه ممکن برای کاربرد در مصارف خنک کردن تجهیزات الکترونیکی می‌باشد. می‌توان گفت که مهم‌ترین عامل محدودکننده‌ی عملکرد این نوع لوله‌های گرمایی که دمای کارکرد پایینی دارند، محدودیت مویینگی است؛ بنابراین شکل ساختار متخلخل و نوع آن نقش بسیار مهمی در عملکرد سیستم خواهد داشت. در تحقیق حاضر از رشته سیم‌های نازک که در راستای طول لوله گرمایی کشیده شده، به‌عنوان ساختار متخلخل استفاده شده است. در ادامه به توضیح مراحل ساخت و آزمایش نمونه پرداخته می‌شود.

دیواره لوله حرارتی از جنس مس می‌باشد و مشخصات لوله مسی به کار برده شده در جدول ۱ آمده است.

همان گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، از رشته سیم‌های نازک که در راستای طول لوله گرمایی کشیده شده، به‌عنوان ساختار متخلخل استفاده می‌شود.

جدول ۱- مشخصات لوله مسی به کار رفته برای ساخت لوله گرمایی

قطر خارجی (mm)	۸
قطر داخلی (mm)	۷
ضخامت دیواره (mm)	۰/۵
طول (mm)	۲۵۰



شکل ۱- ساختار متخلخل به کار گرفته شده در ساخت لوله حرارتی

این ساختار متخلخل دارای تخلخل مناسب و ضریب نفوذپذیری بالا می‌باشد. همچنین به دلیل وجود ساختار فنری میانی از پدیده‌ی تداخل جلوگیری می‌کند و باعث کاهش افت فشار بخار می‌شود. در کار حاضر از رشته‌های نازک سیم مسی به‌عنوان محیط متخلخل استفاده شده که مشخصات آن در جدول ۲ آورده شده است. همچنین ساختار فنری مسی با مشخصات ذکر شده در جدول ۳ به‌عنوان ساختار فنری میانی در لوله به کار گرفته شده است.

همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، ضخامت لایه متخلخل که از جنس رشته‌های نازک مس می‌باشد مقدار ۰/۷۵ میلی‌متر است.

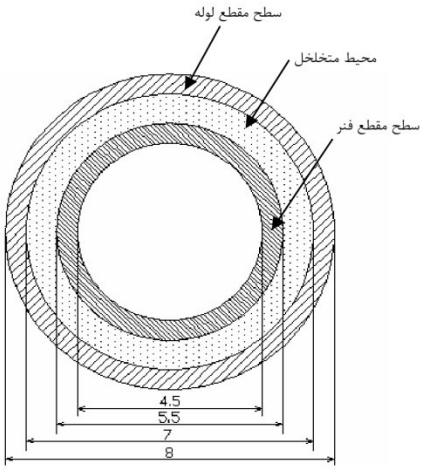
جدول ۲- مشخصات رشته‌های نازک مسی به کار رفته به‌عنوان فتیله لوله گرمایی

قطر (mm)	۰/۲
طول (mm)	۲۵۰
تعداد	۱۵۰ عدد

جدول ۳- مشخصات هندسی ساختار فنری به کار گرفته شده در لوله گرمایی

قطر سیم فنر (mm)	۰/۵
قطر داخلی فنر (mm)	۴/۵
قطر خارجی فنر (mm)	۵/۵
طول فنر (mm)	۲۵۰
تعداد گام‌های فنر	۶۰

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]



شکل ۲- نمایی از سطح مقطع لوله گرمایی

برای قرار دادن رشته‌های مس و فنر موردنظر در قسمت درونی لوله گرمایی از یک میله نگه‌دارنده به قطر ۴/۵ میلی‌متر استفاده شده است. پس از قرار دادن رشته‌های مسی و فنر مربوطه در قسمت درونی لوله گرمایی، یکی از دو سر آن توسط لحیم‌کاری سرد کاملاً مسدود و سر دیگر به یک لوله‌ی نازک به قطر خارجی ۳ میلی‌متر، قطر داخلی ۲/۲ میلی‌متر و طول ۱۰ سانتیمتر متصل گردید. این لوله مسیری برای تزریق مقدار سیال عامل موردنیاز به درون لوله حرارتی می‌باشد. در انتهای دیگر این لوله با استفاده از اتصالات مربوطه یک شیر توپی ۱/۴ اینچ متصل گردید که هنگام تزریق سیال عامل مورد استفاده می‌باشد.

پس از ساخت لوله گرمایی به روشی که شرح داده شد، نوبت به مرحله‌ی تزریق سیال عامل که مهم‌ترین مرحله در تهیه لوله گرمایی است، می‌رسد. جهت اطمینان از عدم نشتی در بدنه‌ی لوله گرمایی سیستم توسط کمپرسور تحت فشار قرار می‌گیرد. سپس محل‌های لحیم‌کاری شده و اتصالات مورد بازدید قرار می‌گیرند. با وجود عدم مشاهده نشتی و همچنین عدم وجود آثاری از حباب با قرار دادن مجموعه درون آب؛ برای اطمینان بیشتر کلیه اتصالات و محل‌های لحیم‌کاری شده با خمیر سیلیکون کاملاً پوشیده شد. پس از این مرحله از یک دستگاه پمپ تخلیه با قدرت بالا برای تخلیه هوای درون لوله گرمایی استفاده شد. بدین ترتیب که با اتصال پمپ تخلیه به شیر توپی، هوای درون لوله گرمایی خالی گردید. برای سیال عامل از آب مقطر استفاده شده است. با توجه به نتایج تجربی به دست آمده مقدار سیال عامل موردنیاز باید تا حدی باشد که فضای خالی محیط متخلخل را کاملاً اشباع کند. البته اگر مقدار سیال به کار رفته از این حد کمی بیشتر باشد، با توجه به تأثیرات خشک‌شدگی در اواپراتور عملکرد مطلوب‌تری به دست خواهد آمد. با توجه به اینکه دمای طراحی لوله گرمایی موردنظر ۵۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است و همچنین با در نظر گرفتن ابعاد المان‌های داخلی به کار رفته در ساخت لوله گرمایی مقدار تخلخل و حجم فضای خالی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_t} = 1 - \frac{V_s}{V_t} = 1 - \frac{150 \times \pi/4 \times (.2)^2}{\pi/4 \times (7^2 - 5.5^2)} = 0.68 \qquad (۱)$$

$$V_p = V_t - V_s = \left[\pi/4 \times (0.7^2 - 0.55^2) - 150 \times \pi/4 \times 0.02^2\right] \times 25 = 2.5034 (cm)^3 \qquad (۲)$$

$$V_f = \frac{V_{channel}}{V_{g50^\circ}} \times V_{f50^\circ} = \frac{0.55^2 \times \pi/4 \times 25}{12.0318} \times 0.001012 = 0.0005 (cm)^3 \qquad (۳)$$

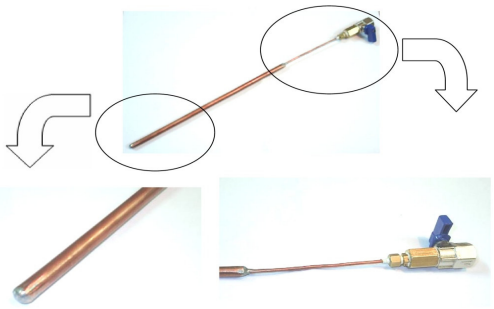
مقدار حجم مایعی که بخار درون کانال بخار را تأمین می‌کند به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار فوق بسیار اندک است. بنابراین حدود ۲/۶ سانتیمتر مکعب سیال برای تزریق درون لوله گرمایی موردنیاز است. پس از تخلیه لوله گرمایی از هوا، شیر توپی بسته شده و با استفاده از اتصالات شیلنگی و یک بورت عمل شارژ صورت گرفت. بدین ترتیب که پس از باز کردن جزئی شیر، حجم موردنظر سیال به درون لوله تزریق گردید. در طی عمل تزریق سیال عامل لوله نازک قرار داده شده در حین ساخت وظیفه‌ی ایجاد افت فشار لازم را به عهده داشت. پس از تزریق مقدار موردنیاز سیال عامل به درون لوله حرارتی، شیر بسته شده و انتهای لوله گرمایی در ناحیه نازک پرس شده و پس از جدا شدن، لحیم‌کاری گردید.



شکل ۳- نمایی از لوله گرمایی ساخته شده

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]



شکل ۴- نمایی از قسمت کندانسور

در قسمت اواپراتور لوله گرمایی، جهت ایجاد گرمای موردنظر از یک گرمکن الکتریکی استفاده شده است. این گرمکن به‌صورت یک سیم با مقاومت بر واحد طول معین می‌باشد. به‌منظور اجتناب از تماس سیم با دیواره لوله از یک استوانه توخالی سرامیکی که در ساخت المان‌ها کاربرد دارد، استفاده شده است. بدین‌صورت که استوانه مذکور بر روی لوله گرمایی قرار گرفته و سیم گرمکن بر روی آن پیچیده شده است. سپس برای جلوگیری از تماس گرمکن با عایقی که روی آن قرار می‌گیرد، روی سیم گرمکن با چندلایه پارچه نسوز پوشیده می‌شود. در قسمت کندانسور به‌منظور خارج کردن گرمای سیستم از یک مجموعه پره و فن مطابق شکل ۴ استفاده شده است. همان‌طور که از شکل دیده می‌شود کل مجموعه در یک جعبه قرار گرفته است و می‌توان با تغییر توان ورودی به فن توان خنک کاری را تغییر داد. جهت قرار دادن لوله در پره موردنظر سوراخی به قطر خارجی لوله ایجاد شده و لوله در آن قرار می‌گیرد. در جدول ۴ طول قسمت‌های مختلف لوله گرمایی نشان داده شده است.

جدول ۴- مشخصات هندسی قسمت‌های مختلف لوله گرمایی

طول اواپراتور (mm)	۳۰
طول آدیاباتیک (mm)	۱۰
طول کندانسور (mm)	۶۰

جدول ۵- محل‌های نصب سنسورهای دما از ابتدای اواپراتور

شماره سنسور	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
فاصله از ابتدای اواپراتور (mm)	۲۰	۴۵	۱۰۰	۱۳۵	۱۸۵	۲۲۰



شکل ۵- نمایی از وسیله‌ی اندازه‌گیری دما

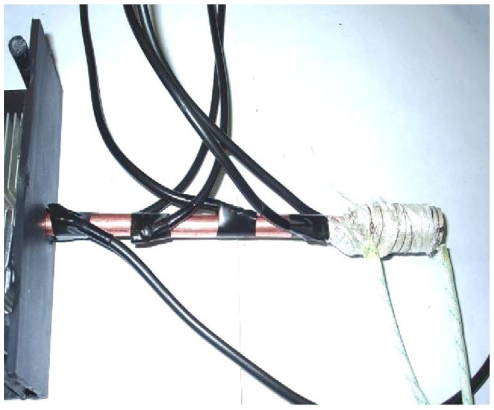
برای تعیین دمای سطح لوله گرمایی از ۶ سنسور دما که توسط یک میکروکنترلر هدایت می‌شود، استفاده شده است. این مدار الکترونیکی دما را تا یک رقم اعشار نشان می‌دهد. جهت کالیبراسیون سنسورها از دماسنج‌های جیوه‌ای استفاده شده است. بدین ترتیب که توسط پتانسیومتر مدار مقدار دمایی را که دماسنج‌ها نشان می‌دهند بر روی صفحه دیجیتالی تنظیم شد. شکل ۵ نمایی از وسیله تعیین دمای به کار رفته را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، ۶ عدد سنسور موجود بر روی دیواره لوله حرارتی نصب شده است. بدین ترتیب که یک سنسور در قسمت اواپراتور و زیر گرمکن الکتریکی، یک سنسور در قسمت کندانسور و ۴ سنسور در قسمت ادیاباتیک میانی بر روی دیواره لوله گرمایی متصل شده‌اند. محل‌های نصب سنسورها از ابتدای اواپراتور و فواصل بین آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.

پس از نصب سنسورها در مکان‌های تعیین شده، قسمت آدیاباتیک و قسمت گرمکن با استفاده از عایق‌های استوانه‌ای توخالی کاملاً پوشیده می‌شود.

همان‌طور که در قسمت‌های قبل گفته شد برای گرم کردن قسمت اواپراتور از یک گرمکن الکتریکی با مقاومت مشخص استفاده شده است. مقاومت این گرمکن توسط یک اهم متر دیجیتالی اندازه‌گیری شد که مقدار ۱۸ اهم می‌باشد. برای تنظیم مقدار توان ورودی به گرمکن از یک ترانسفورماتور AC با ولتاژ خروجی قابل تنظیم استفاده شده است. بنابراین با تغییر ولتاژ می‌توان توان‌های مختلفی به دست آورد.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]



شکل ۶- نمایی از محل‌های نصب سنسورهای دما بر روی دیواره لوله گرمایی

۳- نتایج و بحث

پس از آماده شدن لوله حرارتی جهت به دست آوردن توزیع دمای سطحی و بیشینه توان انتقالی آن آزمایش‌های لازم صورت گرفت. بدین منظور سیم‌های دو سر گرمکن الکتریکی به خروجی‌های ترانسفورماتور متصل شده و با روشن کردن سیستم و تغییر ولتاژ، توان‌های مختلفی به گرمکن وارد گردید. این توان ورودی از مقادیر کم (۵ وات) شروع شده و به‌تدریج افزایش می‌یابد؛ بنابراین سنسورهای دما تغییرات دمای سطح را حس می‌کنند. جهت رسیدن به حالت دائمی حدود ۳۰ دقیقه زمان لازم است تا مقادیری که سنسورها نشان می‌دهند، ثابت گردد و تغییر نکند. نتایج به دست آمده در جدول ۶ برای توان‌های حرارتی متفاوت آورده شده است.

شکل ۷ نمودار توزیع دما برای توان‌های ورودی مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش نرخ انتقال حرارت، دمای میانگین افزایش می‌یابد. توزیع دما تا توان ۲۵ وات به یکدیگر نزدیک و دمای میانگین آن حدود ۷۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، اما همان‌طور که از نمودار دیده می‌شود با افزایش توان به ۳۰ وات اختلاف دمای زیادی به دست می‌آید. بنابراین می‌توان عنوان کرد که این حالت توان بیشینه عبوری است و پس از آن پدیده‌ی خشک‌شدگی در اواپراتور ایجاد شده است که این امر باعث افزایش دمای زیاد این قسمت شده است. همچنین دیده می‌شود که دمای کارکرد لوله حدود ۷۰ درجه و حتی کمی بیشتر از آن است؛ بنابراین فشار داخل آن باید از فشار اشباع آب در ۵۰ درجه که محاسبات بر اساس آن صورت گرفته بیشتر باشد. این امر ممکن است به دلایل

جدول ۶- توزیع دما روی دیواره لوله برای توان‌های ورودی مختلف

شماره سنسور	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
توان ورودی (W)	دما (^0C)					
۵	۷۶/۳	۶۷/۸	۶۶/۷	۶۵/۱	۶۴/۶	۵۷/۲
۱۰	۷۸/۱	۶۹/۸	۶۸/۳	۶۶/۴	۶۵/۱	۵۹/۶
۱۵	۸۱/۵	۷۰/۶	۶۹/۳	۶۷/۶	۶۷/۲	۶۰/۳
۲۰	۸۳/۲	۷۶/۳	۷۳/۲	۷۱/۵	۷۰/۹	۶۱/۱
۲۵	۸۵/۴	۷۶/۱	۷۴/۲	۷۲/۹	۷۱/۲	۶۳/۴
۳۰	۱۱۴/۳	۹۳/۷	۸۶/۶	۸۴/۷	۷۹/۱	۶۴/۲

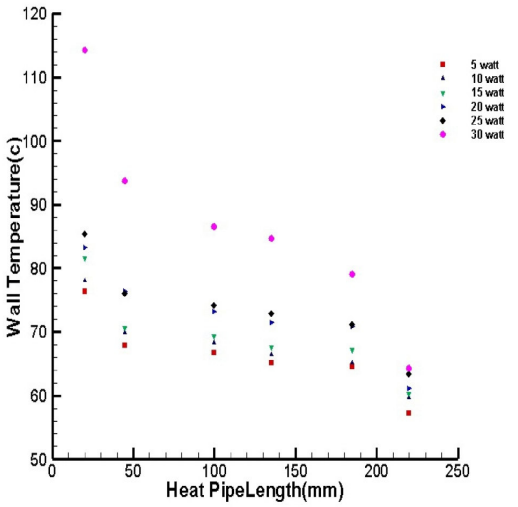
ورود سیال بیش از حد یا عدم تخلیه کامل هوای داخل لوله قبل از شارژ ایجاد گردد.

شکل ۸ مقدار مقاومت حرارتی لوله گرمایی را بر حسب مقادیر شار ورودی متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود برای حد بیشینه کارکرد (ماکزیمم توان عبوری) مقدار مقاومت حرارتی کمترین مقدار است و پس از آن افزایش می‌یابد و در توان‌های میانی کارکرد، تغییرات مقادیر مقاومت حرارتی زیاد نیست؛ که علت این امر را می‌توان چنین بیان کرد که تا رسیدن به حد بیشینه‌ی کارکرد با افزایش Q تغییرات ΔT بسیار کم می‌باشد و به همین خاطر شاهد کاهش R می‌باشیم، اما با گذر از حد بیشینه‌ی کارکرد و به علت وقوع پدیده‌ی خشک‌شدگی با افزایش Q افزایش بسیار زیاد ΔTو متعاقب آن افزایش مقاومت حرارتی را خواهیم داشت. شکل ۹ نمودار تغییرات ضریب هدایت معادل لوله گرمایی بر حسب تغییرات شار عبوری را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود بیشترین مقدار ضریب هدایت معادل مربوط به حد بیشینه کارکرد لوله گرمایی می‌باشد و پس از آن به‌شدت افت می‌کند؛ یعنی همان‌گونه که بیان شد با افزایش Q تا رسیدن به حد بیشینه‌ی کارکرد تغییرات کم ΔTو افزایش ضریب هدایت معادل را خواهیم داشت، اما با گذر از حد بیشینه‌ی کارکرد تغییرات شدید ΔT باعث افزایش ضریب هدایت معادل خواهد شد.

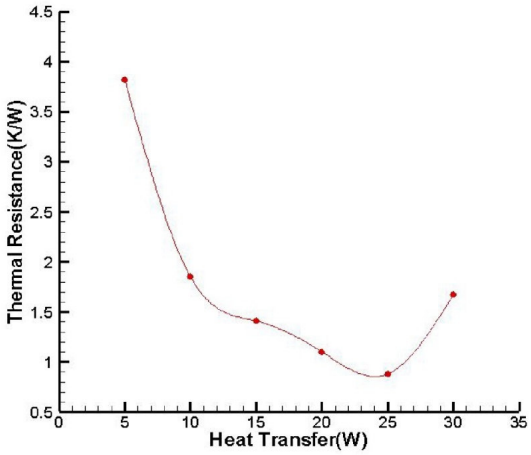
[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

۶- نتیجه‌گیری

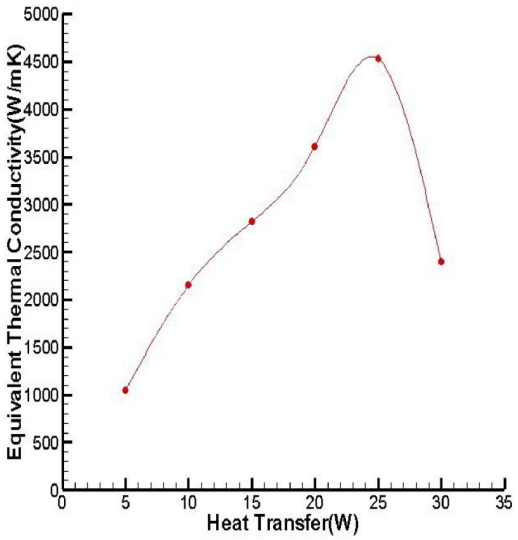
در این مقاله ابتدا مراحل طراحی، ساخت لوله گرمایی و تزریق سیال عامل، همچنین نحوه‌ی آماده‌سازی دستگاه آزمایش تشریح شد. پس از آماده‌سازی دستگاه آزمایش، با تغییر ولتاژ، توان‌های مختلفی به گرمکن وارد شد و سپس برای توان‌های ورودی مختلف توزیع دمای سطح لوله گرمایی در حالت پایا اندازه‌گیری شده و بر مبنای طول لوله ترسیم گردید. همان‌طور که مشاهده شد، دمای سطح لوله حرارتی با حرکت از اواپراتور به سمت کندانسور مقداری افت پیدا می‌کند که در واقع افت اندک دما از مزایای استفاده از لوله‌های حرارتی می‌باشد و در حالت ایده آل می‌توان لوله حرارتی را به‌صورت هم‌دما در نظر گرفت. همچنین با افزایش نرخ انتقال حرارت، دمای میانگین افزایش می‌یابد و با افزایش توان از ۲۵ وات به ۳۰ وات اختلاف دمای زیادی به دست آمد که نشانگر ماکزیمم بودن توان عبوری در این حالت می‌باشد و پس از آن پدیده‌ی خشک‌شدگی در اواپراتور ایجاد شده است که این امر باعث افزایش دمای زیاد این قسمت شده است. دمای نقاط قسمت آدیاباتیک نیز کاملاً یکسان نیستند و مقداری افت دما در این محدوده دیده می‌شود که می‌توان این افت را ناشی از تلفات عایق‌کاری و همچنین رسانایی طولی دیواره مسی دانست. همچنین نتایج نشانگر وجود کمترین مقدار مقاومت حرارتی و بیشترین مقدار ضریب هدایت معادل در حد بیشینه‌ی کارکرد (ماکزیمم توان عبوری) می‌باشد.



شکل ۷- نمودار توزیع دمای سطح لوله گرمایی برای توان‌های ورودی مختلف



شکل ۸- نمودار تغییرات مقاومت حرارتی برای توان‌های ورودی مختلف



شکل ۹- نمودار تغییرات ضریب هدایت معادل لوله گرمایی برای توان‌های ورودی مختلف

منابع

[1] R. R. Riehl, T. Dutra, Development of an experimental loop heat pipe for application in future space missions, *Applied Thermal Engineering*, 25, pp. 101-112, 2005.

[2] Z. J. Zuo, M. T. North, K. L. Wert, *High heat flux heat pipe mechanism for cooling of electronics. In Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2000. ITHERM 2000*. The Seventh Intersociety Conference on, Vol. 2, pp. 122-128, 2000.

[3] A. Faghri, *Heat Pipe Science and Technology*, Taylor & Francis Publishing, 1995.

[4] G. P. Peterson, *An introduction to heat pipes: modeling, testing, and applications*, John Wiley & Sons, Inc, 1994.

[5] T. Nguyen, M. Mochizuki, M. Mashiko, Y. Saito, K. Goto, *Cooling CPU using hinged heat*

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

pipe, 5th International heat pipe symposium, Melbourne, Australia, 17-20 November, 1996.

[6] T. Nguyen, M. Mochizuki, K. Mashiko, Y. Saito, I. Sauciuc, R. Boggs, Advanced cooling system using miniature heat pipes in mobile pc, IEEE Transactions on components and packaging technology, 23, 2000.

[7] S. H. Moon, G. Hwang, H. G. Yun, T. G. Choy, Y. I. Kang, Improving thermal performance of miniature heat pipe for notebook pc cooling, *Microelectronics Reliability*, Vol. 42, No. 1, 2002, pp. 135-140.

[8] K. Kim, M. Won, J. Kim, B. Back, Heat pipe cooling technology for desktop PC CPU, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, No. 9, pp. 1137-1144, 2003.

[9] M. S. El-Genk, L. Huang, An experimental investigation of the transient response of a water heat pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, No. 15, pp. 3823-3830, 1993.

[10] L. Huang, M. S. El-Genk, J. M. Tournier, *Transient performance of an inclined water heat pipe with a screen wick*, ASME National Heat Transfer Conference, Atlanta, GA, heat pipes and capillary pumped loops, HTD, Vol. 236, pp. 87-92, 1993.

[11] S. A. Said, B. A. Akash, Experimental performance of a heat pipe, *International Communications in Heat and Mass Transfer* Vol. 26, No. 5, pp. 679-684, 1999.

[12] A. Faghri, S. Thomas, Performance characteristics of a concentric annular heat pipe: part I-Experimental prediction and analysis of the capillary limit, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 111, No. 4, pp. 844-850,1989.

[13] E. Azad, Theoretical and experimental investigation of heat pipes solar collector, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, pp. 1666-1672, 2008.

[14] A. Faghri M. Buchko, Experimental and numerical analysis of low-temperature heat pipes with multiple heat sources*, Journal of Heat Transfer*, Vol. 113, No. 3, pp. 728-734, 1991.

[15] S. J. Kim, j. K. Seo K. H. do, Analytical and experimental investigation on the operational characteristics and thermal optimization of a miniature heat pipe with a grooved wick structure, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, No. 11, pp. 2051-2063, 2003.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]