



Experimental Investigation of the Effect of Different Parameters on the Thermal Performance of the Vapor Chamber for Cooling the Electronic Board

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Nikmehr M.¹ MSc,

Kalantar V.*¹ PhD

How to cite this article

Nikmehr M, Kalantar V. Experimental Investigation of the Effect of Different Parameters on the Thermal Performance of the Vapor Chamber for Cooling the Electronic Board. Modares Mechanical Engineering. 2019; 19(10): 2387-2395.

ABSTRACT

Nowadays with the increase of the power of electronic components, their heat generation rates have also increased therefore, therefore it is necessary to use new methods to cooling different parts. One of the solutions to cool the high-power components is the use of vapor chambers. The vapor chamber consists of three sections, the evaporation, the middle and the condensation section, which are flattened and can transfer a significant amount of heat without the need for external power and only by using a fluid phase change. In this study, two vapor chambers with a length and width of 120 mm and a height of 15 mm were made to cool the high-power printed circuit board, where the evaporation section of one of them was roughened and the condensation section is cooled down by the fin and through the air. In this research, the effect of roughening the evaporation section, the angle of the vapor chamber relative to the horizon, different heat input and the geometric deformation of the heat source in the fixed area, as well as changing the location of the heat source in the evaporation section, on the thermal performance of the vapor chamber; is experimentally reviewed and compared. The results of the experiments show that increasing the heat input and roughing the evaporation section improves the performance of the vapor chamber and the thermal resistance of the vapor chamber is also the function of changing its angle relative to the horizon, deformation, and location of the thermal source.

Keywords Vapor Chamber; Biphasic; Thermal Resistance; Printed Circuit Board

CITATION LINKS

[1] Temperature uniformity analysis of a multi-well vapor chamber heat spreader [2] Effects of evaporator's length on pulsating heat pipes' thermal performance [3] Multi objective optimization of heat pipe thermal performance while using aluminium oxide nanofluid [4] Experimental investigation of the influence of nanofluid on the heat performance of pulsating heat pipe [5] Experimental and theoretical study of a vapour chamber based heat spreader for avionics applications [6] Two-phase closed thermosyphon vapor-chamber system for electronic cooling [7] Application of two-phase vapor chamber technique for hard disk drive cooling of PCs [8] Experimental investigation on thermal performance of aluminum vapor chamber using micro-grooved wick with reentrant cavity array [9] The experimental investigation of a vapor chamber with compound columns under the influence of gravity [10] A vapor chamber using extended condenser concept for ultra-high heat flux and large heater area [11] Experimental investigation of vapor chambers with different wick structures at various parameters [12] Effect of heat source area on the thermal resistance of the wick columns vapor chambers [13] A correlation to predict the heat flux on the air side of a vapor chamber with overturn U flattened tube [14] A novel vapor chamber and its performance. International Journal of Heat and Mass Transfer [15] Performance tests on a novel vapor chamber using water, methanol or acetone as the working fluid [16] Combined effects of the filling ratio and the vapour space thickness on the performance of a flat plate heat pipe [17] Experimental investigation on flow and heat transfer performance of a novel heat fin-plate radiator for electronic cooling [18] Feasibility study of an aluminum vapor chamber with radial grooved and sintered powders wick structures [19] Wickless network heat pipes for high heat flux spreading applications [20] Calculation of uncertainties

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

Phone: +98 (35) 31232492

Fax: +98 (35) 38210699

vkalantar@yazd.ac.ir

Article History

Received: January 2, 2019

Accepted: February 13, 2019

ePublished: October 22, 2019

بررسی تجربی تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد حرارتی محفظه بخار برای خنک‌سازی برد الکترونیکی

مسعود نیک‌مهر MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

ولی کلانتر PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده

امروزه با افزایش توان تجهیزات الکترونیکی، نرخ تولید حرارت آنها نیز افزایش یافته است لذا برای خنک‌سازی قطعات مختلف نیاز به استفاده از روش‌های جدید است. یکی از راه‌حل‌های مناسب برای خنک‌سازی قطعات توان بالا، استفاده از محفظه‌های بخار است. محفظه بخار از سه بخش تشکیل می‌شود، بخش تبخیر، میانی و چگالش که به صورت مسطح ساخته می‌شوند و می‌توانند مقدار قابل توجهی از حرارت را بدون نیاز به توان خارجی و فقط با استفاده از تغییر فاز سیال، منتقل نمایند. در این تحقیق دو محفظه بخار با طول و عرض ۱۲۰ و ارتفاع ۱۵ میلی‌متر برای خنک‌سازی برد مدار چاپی حرارت بالا ساخته شده است که بخش تبخیر یکی از آنها زیر شده و بخش چگالش آنها به وسیله پره و از طریق هوا خنک می‌شود. در این پژوهش تأثیر زیرنمودن بخش تبخیر، زاویه قرارگیری محفظه بخار با افق، حرارت‌های ورودی مختلف و تغییر شکل هندسی منبع حرارتی در مساحت ثابت و همچنین تغییر محل نصب منبع حرارتی در بخش تبخیر بر عملکرد حرارتی محفظه بخار به صورت تجربی بررسی و مقایسه شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد افزایش میزان حرارت و زیرنمودن بخش تبخیر باعث بهبود عملکرد محفظه بخار شده است همچنین مقاومت حرارتی محفظه بخار تابع تغییر زاویه آن با افق، تغییر شکل و محل نصب منبع حرارتی است.

کلیدواژه‌ها: محفظه بخار، دوفازی، مقاومت حرارتی، برد مدار چاپی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۴

*نویسنده مسئول: vkalantar@yazd.ac.ir

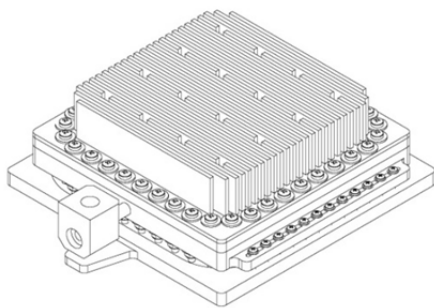
۱- مقدمه

بخش‌کننده‌های گرمایی برای خارج‌نمودن گرما از منبع‌های حرارتی کاربرد دارند. به بخش‌کننده‌های گرمایی دوفازی، محفظه بخار گفته می‌شود و معمولاً از مس برای ساختن آنها استفاده می‌گردد. محفظه بخار یک محفظه خالی است که ابتدا به وسیله پمپ خلأ، از هوا تخلیه می‌گردد و سپس سیال کاری در آن قرار می‌گیرد. وجود خلأ نسبی باعث پایین‌آمدن نقطه جوش سیال کاری شده و با ایجاد عملیات جوشش، انتقال حرارت را افزایش خواهد داد^[1] لذا اصول عملکرد محفظه بخار مانند لوله‌های حرارتی و لوله‌های حرارتی نوسانی است. حقایق و همکاران^[2] بررسی تجربی لوله‌های حرارتی نوسانی و تأثیر تغییر طول ناحیه تبخیرکننده را بر عملکرد آن مورد بررسی قرار دادند که نتایج آزمایش‌ها نشان داد عملکرد لوله حرارتی با افزایش طول ناحیه تبخیرکننده بهبود می‌یابد. شجاعی‌فرد و همکاران^[3] نیز بهینه‌سازی چند هدفی عملکرد گرمایی لوله حرارتی هنگام استفاده از نانو سیال اکسید آلومینیوم را بررسی و نقاط طراحی پیشنهادی را ارائه نمودند. سیاحی و همکاران^[4] بررسی آزمایشگاهی تأثیر نانوسیال بر عملکرد حرارتی لوله‌های حرارتی نوسانی را بررسی نمودند و نشان دادند که مقاومت حرارتی لوله حرارتی با افزایش توان منبع حرارتی کاهش می‌یابد. اما با فشرده‌تر شدن نیم‌رساناهای توان بالا، نیاز به سیستم‌های جدید برای خنک‌سازی آنها بیشتر احساس می‌شود. برای کاهش مقاومت گسترشی می‌توان ضخامت پایه پره‌ها را افزایش داد یا از مواد

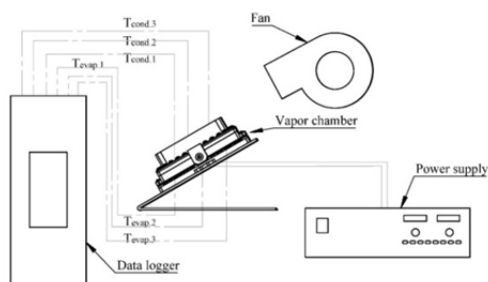
خاص مانند مس و طلا که هدایت حرارتی بالایی دارند استفاده نمود که وزن و هزینه را افزایش می‌دهد. اما می‌توان از ترکیب یک محفظه بخار با یک صفحه پره‌دار به عنوان راه‌حل مناسب‌تر استفاده نمود. لذا ریز و همکاران^[5] محفظه بخاری را برای کاربرد در هوانوردی با پخش‌کننده گرمایی متفاوت در دو حالت جابجایی اجباری و طبیعی بررسی نمودند. در پژوهش تسای و همکاران^[6] محفظه بخار دو فاز ترموسیفون بسته برای خنک‌سازی قطعات الکترونیکی مورد بررسی قرار گرفته است. در محفظه بخارهای ترموسیفون بجای اثر موینگی، نیروهایی مانند جاذبه یا نیروهای گریز از مرکز برای برگرداندن فاز مایع از بخش چگالش به بخش تبخیر مورد استفاده قرار می‌گیرند و بنا بر نظر نویسندگان مقاله، این موضوع باعث بهتر شدن مشخصات حرارتی سیستم خواهد شد. نافون و همکاران^[7] خنک‌سازی هارد رایانه‌های شخصی را با به‌کار بردن محفظه بخار مورد بررسی قرار داده‌اند. ایشان به این نتیجه رسیدند که استفاده از محفظه بخار تأثیر قابل ملاحظه‌ای در خنک‌سازی ذخیره‌ساز دارد.

زنگ و همکاران^[8] یک محفظه بخار آلومینیومی نازک با شیارهای میکرو به عنوان فیتیله را بررسی نمودند. در محفظه بخار آنها میکروشیارها برای افزایش میزان اثر موینگی می‌باشد و در مجموع باعث مناسب‌شدن محفظه بخار برای مدیریت گرمایی قطعات الکترونیکی توان بالا شده است. در پژوهش وانگیو و همکاران^[9] محفظه بخاری را که دارای ستون‌های مرکب است مورد بررسی قرار دادند در محفظه بخار ایشان ستون‌ها از جنس مس بوده و سطوح ستون‌ها با لایه متخلخل سینتر شده است. بررسی عملکرد حرارتی محفظه بخار ایشان نشان داده است که استفاده از ستون‌های مرکب موجب کاهش محدودیت اثر موینگی و بهبود سیکل سیال کاری در حالات زاویه‌دار شده است. جی و همکاران^[10] یک محفظه بخار را با استفاده از مفهوم گسترش قسمت چگالش برای دفع شار حرارتی بالا و سطح گرم‌کننده بزرگ بررسی کرده‌اند. در محفظه بخار ایشان یک لایه فشرده از فوم مسی به صورت متخلخل بر قسمت تبخیر قرار داده شده است و قسمت چگالش شامل شبکه‌ای از شیارهای مستقیم به شکل پره می‌باشد. با توجه به هندسه گفته‌شده در پژوهش ایشان، نه تنها دما یکنواخت شده است بلکه توزیع دما نیز نسبت به حالتی که از پره‌های عادی در بخش چگالش استفاده شده باشد، بهتر شده است^[10]. در پژوهش لی و همکاران^[11] یک محفظه بخار مسی با دو نوع ساختار فیتیله‌ای (فوم مسی و پودر مسی) ساخته شده است. بر اساس نتایج ایشان، ساختار فیتیله‌ای فومی، یکنواختی دمایی بیشتری را نشان می‌دهد و ساختار فیتیله‌ای پودری مقدار مقاومت حرارتی کمتری دارد. ویریاسارت و نافون^[12] تأثیر مساحت منبع تولیدکننده حرارت بر مقاومت حرارتی محفظه بخار دارای ستون‌های فیتیله‌ای و همچنین تأثیر توان حرارتی و مقدار دبی خنک‌کننده بخش چگالش بر مقاومت حرارتی را بررسی نمودند. آنها به این نتیجه رسیدند که مقدار و مساحت منبع حرارتی تأثیر قابل توجهی بر مقاومت بخش تبخیر و بخش چگالش محفظه بخار دارد. تفاوت کار ویریاسارت و نافون با سایر کارهای پیشین، تنها این است که ایشان تأثیر اندازه منبع حرارتی را در محفظه بخاری دارای ستون‌های فیتیله‌ای بررسی کرده‌اند در حالی که در کارهای گذشته تأثیر اندازه منبع حرارتی در محفظه بخار بدون فیتیله بررسی شده است. در پژوهش/سریموانگ و لیمکاپسانگ^[13] مشخصات حرارتی در یک محفظه بخار عادی که بخش چگالش آن به روش جابجایی خنک می‌شود با یک محفظه بخار که در بخش چگالش آن ساختاری حلقه‌ای وجود دارد مقایسه

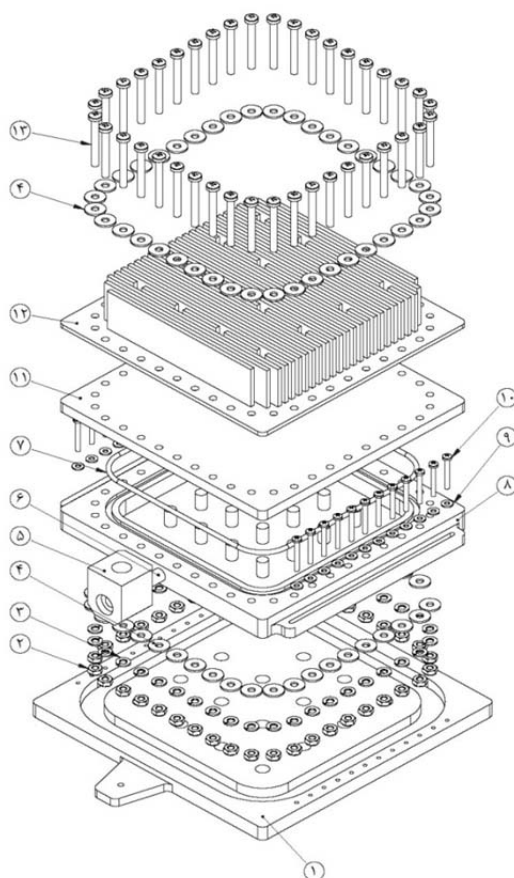
محفظه بخار نسبت به افق، استفاده شده است. جنس فیتیل‌ها از استیل زنگ‌زن است و دارای ۱۰۰ پنجره در هر اینچ می‌باشد.



شکل (۱) محفظه بخار



شکل (۲) شماتیک سامانه آزمایش



شکل (۳) اجزاء تشکیل‌دهنده محفظه بخار؛ ۱- نگهدارنده منبع حرارتی، ۲- مهره ام ۳، ۳- واشر فنری قفل‌شونده ام ۳، ۴- واشر تخت ام ۳، ۵- سهراهی، ۶- لوله مسی، ۷- اورینگ، ۸- تبخیرکننده، ۹- واشر تخت ام ۲، ۱۰- پیچ ام ۲، ۱۱- چگالنده، ۱۲- پر، ۱۳- پیچ ام ۳

شده است. نتایج حاکی از آن است که شار حرارتی و ضریب هدایت حرارتی در محفظه بخار دارای بخش چگالش حلقه‌ای بالاتر می‌باشد. وانگ و همکاران [14, 15] با بهبود بخشیدن به سطح بخش چگالش محفظه بخار، عملکرد حرارتی را بر اساس سیال‌های کاری آب، متانول و استون بررسی نمودند. همچنین لیپس و همکاران [16] سطح اواپراتور را به صورت شیارهای مستطیلی بهبود بخشیده و تأثیر نسبت پرشدگی و ضخامت فضای بخار در محفظه بخار را بررسی نموده‌اند. پنگ و لینگ [17] تأثیر نسبت پرشدگی و درجه خلأسازی و همچنین سرعت جریان هوا را بر عملکرد حرارتی محفظه بخار بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که نسبت پرشدگی و درجه خلأکردن تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد حرارتی سیستم دارد. محفظه‌های بخار معمولاً از مس ساخته می‌شوند اما چن و همکاران [18] در سال ۲۰۱۳ امکان‌سنجی یک محفظه بخار آلومینیومی با شیارهای شعاعی را با محفظه بخاری با ساختار فیتیل‌ای پودری متخلخل مقایسه نمودند. محفظه بخار آلومینیومی نسبت به مس مزایایی چون قیمت پایین‌تر، سبک‌تر بودن و شکل‌پذیرتر بودن را دارد. نتایج حاکی از آن است که مقاومت حرارتی در حالت استفاده از ساختار فیتیل‌ای پودری پاسخ بهتری داشته است. همچنین کائو و همکاران [19] از آلومینیوم به علت خاصیت ماشین‌کاری خوب برای ساخت محفظه بخار استفاده نموده‌اند ایشان از آب و متانول به عنوان سیال کاری استفاده نموده‌اند.

در این پژوهش دو محفظه بخار ساخته‌شده، که بخش تبخیر یکی از آنها با فرایند پاشش ذرات مس (به عنوان روشی عملی و ساده، با هزینه کم) زیر شده است و تأثیر زیرنمودن بخش تبخیر محفظه بخار، تأثیر تغییر شکل هندسی منبع حرارتی در مساحت ثابت و تأثیر تغییر محل نصب منبع حرارتی در بخش تبخیر محفظه بخار، به عنوان پارامترهایی جدید و مؤثر و نیز تأثیر تغییرات زاویه قرارگیری محفظه بخار با افق و حرارت‌های ورودی مختلف، بر عملکرد حرارتی هر دو محفظه بخار به صورت تجربی، بررسی و مقایسه شده است. با توجه به مطالب فوق کاربردهای عملی این تحقیق عبارتند از خنک‌کاری و کنترل دما در سی‌پی‌یو، جی‌پی‌یو و ذخیره‌ساز رایانه‌ها، ترانزیستورهای حرارت بالا، بردهای مدار چاپی و سایر قطعات الکترونیکی که حرارت قابل توجهی در مساحت‌های چندسانتی‌متر مربعی تولید می‌نمایند که البته در این تحقیق برای ایجاد حرارت، از برد مدار چاپی استفاده شده است. لذا کاربرد محفظه بخار در این پژوهش خنک‌کاری و کنترل دمای برد مدار چاپی است.

۲- سامانه آزمایش

محفظه بخار (شکل ۱) مورد استفاده در سامانه آزمایش این پژوهش (شکل ۲) از مس ساخته شده است و همان طور که در شکل ۳ نمایش داده شده است به ترتیب از بالا به پایین، شامل بخش‌های پر، چگالنده، تبخیرکننده، منبع تولید حرارت (برد مدار چاپی) و بخش نگهدارنده منبع تولید حرارت می‌باشد که به وسیله پیچ و مهره و اورینگ به یکدیگر متصل شده‌اند. ابعاد بیرونی بخش چگالنده و تبخیرکننده دارای طول و عرض ۱۲۰ و ارتفاع ۱۵ میلی‌متر می‌باشد. در سطوح داخلی بخش چگالنده و تبخیرکننده ستون‌هایی تعبیه شده است تا از تغییر فرم محفظه بخار در هنگام خلأ جلوگیری به عمل آید. درون بخش تبخیرکننده از سه لایه توری به عنوان فیتیل برای برگرداندن سیال کاری در هنگام زاویه‌دار بودن

۴- آنالیز خطا

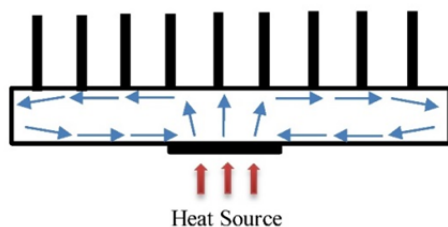
به منظور ایجاد توان‌های حرارتی مختلف در منابع حرارتی، از منبع تغذیه TDK-LAMBDA با جریان مستقیم استفاده شده است که با توجه به مشخصات دستگاه، دارای خطای حداکثر ۱٪ بازه ولتاژ و ۱٪ بازه جریان است. اندازه‌گیری دماها با استفاده از سنسور دما از برند تستو انجام شده است که دارای خطای ۰/۱ درجه سانتیگراد است. با توجه به موارد ذکر شده و رابطه (۱) از کتاب کرکاپ و فرنکل، میزان حداکثر خطا کمتر از ۲٪ محاسبه شده است [20].

$$u^2(y) = \left(\frac{\partial y}{\partial x^1}\right)^2 u^2(x^1) + \left(\frac{\partial y}{\partial x^2}\right)^2 u^2(x^2) + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_0}\right)^2 u^2(x_0) \quad (1)$$

که در رابطه (۱)، u^2 مجذور خطای پارامتر $y(X_1, X_2, \dots, X_n)$ می‌باشد.

۵- بحث و تحلیل نتایج

در این بخش ابتدا جهت تقویت نتایج تجربی پیش رو در این تحقیق، اصول تئوری عملکرد محفظه بخار ارائه و بیان شده است. با توجه به اینکه محفظه بخار ابتدا به وسیله پمپ خلأ، از هوا تخلیه می‌گردد و سپس سیال کاری در آن قرار می‌گیرد، لذا وجود خلأ نسبی باعث پایین آمدن نقطه جوش سیال کاری می‌گردد. با توجه به شکل ۵ سیال کاری در بخش تبخیر با جذب حرارت از منبع حرارتی تبخیر شده و به بخش بالایی محفظه بخار (بخش چگالش) وارد می‌گردد، سپس با ازدست دادن حرارت در بخش چگالش، مجدداً به مایع تبدیل شده و به بخش تبخیر باز می‌گردد و این چرخه ادامه می‌یابد. در صورت کمبود مایع در بخش تبخیر که در اثر عدم عملکرد مناسب بخش چگالش، حرارت زیاد در بخش تبخیر، عدم عملکرد مناسب فیتیله برای بازگرداندن مایع به بخش تبخیر در حالات زاویه دار و غیره رخ می‌دهد خشک‌شدگی در محفظه بخار اتفاق خواهد افتاد. در صورتی که تمام بخش تبخیر بدون مایع کاری بماند خشک‌شدگی کلی و در صورتی که فقط بخش‌هایی از بخش تبخیر از جمله نواحی بالای منبع حرارتی دچار خشک‌شدگی گردد، خشک‌شدگی، موضعی است که هر دو حالت موجب کاهش انتقال حرارت خواهد بود. از طرف دیگر افزایش بیش از حد مایع در بخش تبخیر نیز مانند مقاومتی حرارتی مانع عملکرد کامل محفظه بخار می‌گردد. لذا برای عملکرد بهینه محفظه بخار مقدار مناسب سیال کاری در بخش تبخیر مورد نیاز است.



شکل ۵) اصول عملکرد محفظه بخار

برای بررسی و مقایسه عملکرد حرارتی محفظه بخار در حالات مختلف آزمایش، از مفهوم مقاومت حرارتی به صورت رابطه (۱) استفاده شده است.

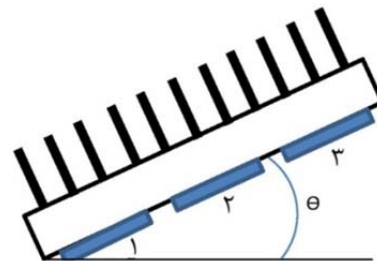
$$R = \frac{T_e - T_c}{q} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، R مقاومت حرارتی میانگین بر حسب درجه سانتیگراد بر وات، T_e دمای میانگین تبخیرکننده بر حسب درجه سانتیگراد، T_c

به منظور جلوگیری از اتلاف حرارتی، بین منبع حرارتی و بخش نگهدارنده آن به طور کامل عایق شده است. پره به کاررفته در بالای بخش چگالش، به وسیله فن و با دبی نامی ماکزیمم ۱۰۰۰ متر مکعب بر ساعت در افت فشار صفر، خنک می‌گردد. در سطح جانبی محفظه بخار از طریق یک لوله مسی، یک سهراهی قرار داده شده است تا امکان اتصال فشارسنج و شیر به مجموعه محفظه بخار فراهم گردد. اتصال فشارسنج به منظور تشخیص میزان خلأ و همچنین اطمینان خاطر از عدم نشتی محفظه بخار است و نصب شیر به منظور ایجاد امکان جداسازی محفظه بخار از پمپ خلأ پس از عملیات خلأ نمودن محفظه بخار می‌باشد. اندازه‌گیری دماها در هر یک از بخش‌های تبخیر و چگالش با استفاده از سنسور دما از برند تستو و اتصال آنها به داده‌پرداز انجام شده است. به منظور ایجاد توان‌های حرارتی مختلف در منابع حرارتی نیز از منبع تغذیه TDK-LAMBDA با جریان مستقیم استفاده شده است.

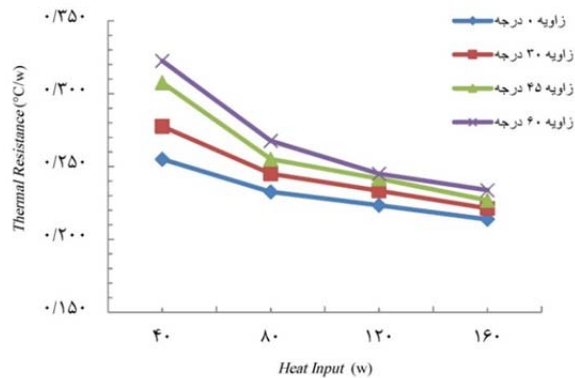
۳- شرح مساله و طراحی آزمایش

ابتدا برای خلأ نمودن محفظه بخار، مجموعه از طریق سهراهی و شیر تعبیه شده در سطح جانبی آن، به پمپ خلأ متصل می‌گردد. پمپ خلأ، محفظه بخار را تا فشار ۰/۰۰۱ میلی‌بار تخلیه می‌نماید. آنگاه با بستن شیر می‌توان محفظه بخار را از پمپ خلأ جدا نمود. سپس شیلنگ تراز می‌درج شده، به شیر متصل شده و سیال عامل آب از طریق آن با نسبت پر شدگی ۳۰٪ حجم محفظه بخار، مجموعه محفظه بخار را شارژ می‌نماید. ابعاد منبع حرارتی که از برد مدار چاپی ساخته شده است دارای طول و عرض ۳×۳ سانتی‌متر و ۸×۱۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است تا بتوان تأثیر تغییر شکل منبع حرارتی در مساحت و نیز حرارت یکسان را بر عملکرد حرارتی محفظه بخار بررسی نمود.

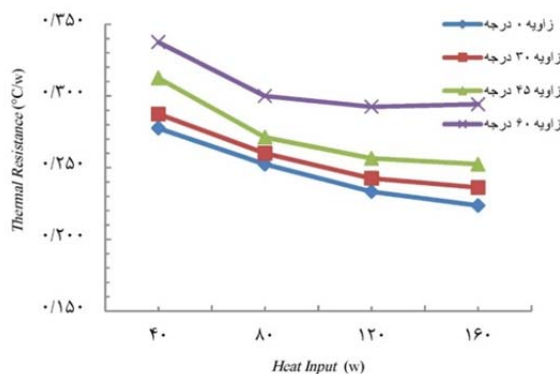


شکل ۴) محل قرارگیری منابع حرارتی در حالات مختلف؛ ۱- در سمت چپ (پایین) ۲- وسط ۳- در سمت راست (بالا)

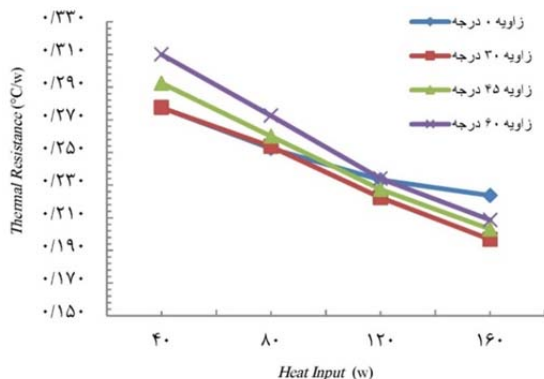
آزمایش‌ها در زوایای صفر، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به افق و در حرارت‌های ۴۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ وات انجام شده است. همچنین همان طور که در شکل ۴ نمایش داده شده است تأثیر محل قرارگیری منبع حرارتی در وسط و دو سمت بخش تبخیرکننده محفظه حرارتی، در حرارت‌ها و زوایای فوق بررسی شده است. همچنین برای انجام آزمایش دو محفظه بخار ساخته شده است و بخش تبخیرکننده یکی از آنها با استفاده از روش پاشش مسبارهایی با ابعاد ۵/۰ تا ۲ میلی‌متر، زیر شده و زبری حدود ۱۰۰ میکرون در سطح آن ایجاد شده است. حالات فوق در دو حالت محفظه بخار ساده و محفظه بخار دارای بخش تبخیرکننده زیر (محفظه بخار زیر) آزمایش شده است تا رفتار محفظه بخار زیر شده نسبت به حالت ساده نیز مشخص گردد. به منظور اطمینان از تکرارپذیری نتایج، اندازه‌گیری‌ها و تست‌ها در هر مورد ۳ مرتبه تکرار شده است.



نمودار ۴) تغییرات مقاومت حرارتی با حرارت ورودی و زاویه‌های مختلف در محفظه بخار ساده با منبع حرارتی ۸×۱/۱۲۵ سانتی‌متر در وسط بخش تبخیرکننده



نمودار ۵) تأثیر تغییرات حرارت ورودی و زاویه‌های مختلف بر مقاومت حرارتی محفظه بخار ساده با منبع حرارتی ۸×۱/۱۲۵ سانتی‌متر در سمت راست (بالا) بخش تبخیرکننده



نمودار ۶) تأثیر تغییرات حرارت ورودی و زاویه‌های مختلف بر مقاومت حرارتی محفظه بخار ساده با منبع حرارتی ۸×۱/۱۲۵ سانتی‌متر در سمت چپ (پایین) بخش تبخیرکننده

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش میزان حرارت، مقاومت حرارتی کاهش یافته است. این امر به این دلیل است که حرارت در ابتدا از طریق هدایت و از لایه مایع موجود در قسمت تبخیرکننده وارد محفظه بخار می‌گردد. لذا در صورتی که این لایه مایع ضخامت زیادی داشته باشد مانند یک مقاومت حرارتی عمل کرده و باعث افزایش مقاومت حرارتی محفظه بخار می‌گردد. از طرف دیگر کاهش بیش از حد مایع در بخش تبخیر نیز باعث خشک‌شدگی موضعی در محفظه بخار خواهد شد و باعث افزایش مقاومت حرارتی محفظه بخار می‌گردد. در نمودار ۱ با افزایش میزان حرارت ضخامت لایه مایع موجود در تبخیرکننده کاهش یافته و لذا موجب کاهش مقاومت حرارتی شده است [11]. همچنین مقاومت حرارتی محفظه

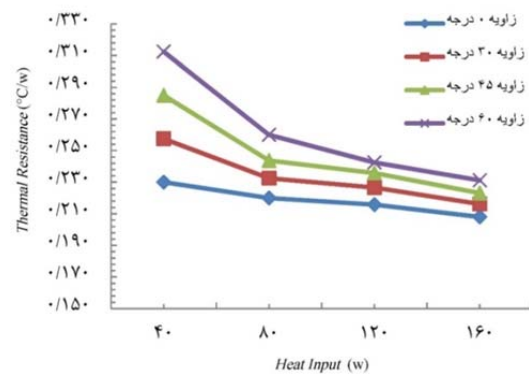
دمای میانگین بخش چگالش بر حسب درجه سانتیگراد و q توان ورودی به مجموعه محفظه بخار بر حسب وات است.

۱-۵- محفظه بخار با بخش تبخیر زبرنده (ساده)

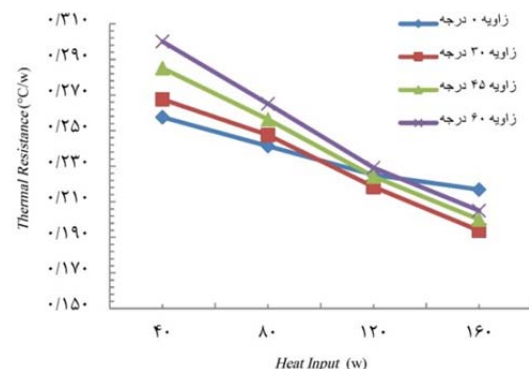
نمودارهای ۱ تا ۶ پارامترهای عملکردی محفظه بخار با تبخیرکننده ساده را نمایش می‌دهد. در این حالت هیچ عملیاتی جهت زبرنمودن بخشی از محفظه بخار صورت نگرفته است و تأثیر پارامترهای مختلف بر مقاومت حرارتی بررسی شده است.

۱-۱-۵- محفظه بخار ساده با منبع حرارتی ۳×۳ سانتی‌متر

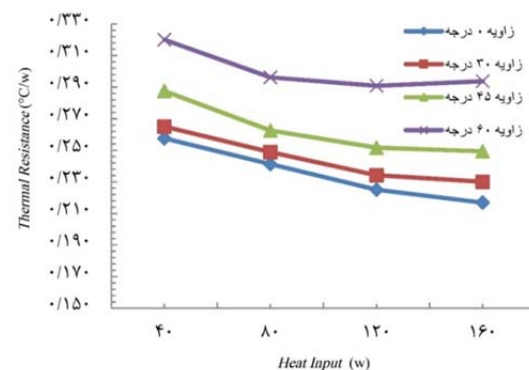
نمودار ۱ مقاومت حرارتی محفظه بخار را بر حسب حرارت ورودی در زاویه‌های مختلف در حالتی که منبع حرارتی ۳×۳ سانتی‌متر در وسط بخش تبخیرکننده قرار داشته و بخش تبخیرکننده آن زبر نشده باشد، نمایش می‌دهد.



نمودار ۱) تغییرات مقاومت حرارتی با حرارت ورودی و زاویه‌های مختلف در محفظه بخار ساده با منبع حرارتی ۳×۳ سانتی‌متر در وسط بخش تبخیرکننده



نمودار ۲) تأثیر تغییرات حرارت ورودی و زاویه‌های مختلف بر مقاومت حرارتی محفظه بخار ساده با منبع حرارتی ۳×۳ سانتی‌متر در سمت چپ (پایین) بخش تبخیرکننده



نمودار ۳) تأثیر تغییرات حرارت ورودی و زاویه‌های مختلف بر مقاومت حرارتی محفظه بخار ساده با منبع حرارتی ۳×۳ سانتی‌متر در سمت راست (بالا) بخش تبخیرکننده

جریان بخار به سمت بخش چگالش در داخل محفظه بخار به صورت روان و ابتدا به سمت بالا و سپس در چهار جهت انجام می‌پذیرد. اما در حالت استفاده از منبع حرارتی $8 \times 1/125$ سانتی‌متر، ضلع 8 سانتی‌متری منبع حرارتی از طرفین به لبه‌های (دیواره) بخش تبخیرکننده نزدیک شده که این امر سبب می‌گردد جریان بخار ایجاد شده در داخل محفظه بخار، پس از حرکت به سمت بالا، از دو سمت به وسیله دیواره محفظه بخار محدود گردد و فقط بتواند به دو سوی دیگر حرکت نماید. از طرف دیگر شکل هندسی و عریض بودن منبع حرارتی $8 \times 1/125$ سانتی‌متر موجب می‌شود که مایع‌رسانی فیتیله در حالت زاویه‌دار به بالای منبع حرارتی یکنواخت‌تر صورت پذیرد که تأثیر مثبت بر کاهش مقاومت حرارتی محفظه بخار در حالات زاویه‌دار دارد. لذا در حالات توان 160 وات در زاویه 45° درجه و 120° و 160° وات زاویه 60° درجه، مقاومت حرارتی در نمودار ۴ نزدیک به نمودار ۱ به دست آمده است.

در نمودار ۵ مقاومت حرارتی محفظه بخار بر حسب حرارت ورودی در زاویه‌های مختلف در حالتی که منبع حرارتی $8 \times 1/125$ سانتی‌متر در سمت راست (بالا) بخش تبخیرکننده قرار داشته و بخش تبخیرکننده آن زیر نشده باشد، نمایش داده شده است. از مقایسه نمودار ۵ و حالت مشابه آن با منبع 3×3 سانتی‌متر (نمودار ۳) مشخص می‌گردد همان طور که قبلاً بیان شد مقاومت حرارتی در این حالت افزایش یافته است. همچنین در زاویه 60° درجه با افزایش حرارت از 120° به 160° وات بر خلاف روند معمول آن مقاومت حرارتی افزایش یافته است که این امر به دلیل وجود منبع حرارتی در سمت راست (بالا) تبخیرکننده و کمبود مایع در بالای منبع حرارتی به علت وجود زاویه زیاد نسبت به افق و عدم بازگردانی کامل مایع تجمع‌یافته در سمت چپ (پایین) ناحیه تبخیرکننده، توسط فیتیله است [11].

نمودار ۶ مقاومت حرارتی محفظه بخار را بر حسب حرارت ورودی در زاویه‌های مختلف در حالتی که منبع حرارتی $8 \times 1/125$ سانتی‌متر در سمت چپ (پایین) بخش تبخیرکننده قرار داشته و بخش تبخیرکننده آن زیر نشده باشد، نمایش می‌دهد. با توجه به نمودار ۶ در تمامی حالات، مقاومت نشان داده شده، بالاتر از مقاومت به دست آمده در حالت مشابه قبلی (نمودار ۲) با منبع 3×3 سانتی‌متر است زیرا با قرارگیری منبع حرارتی در سمت چپ (پایین) تبخیرکننده، کمبود مایع وجود نخواهد داشت و فقط افزایش مقاومت حرارتی در اثر شکل هندسی منبع و عدم وجود جریان بخار چهار جهته در این حالت تأثیر گذار خواهد بود.

۵-۲- محفظه بخار با بخش تبخیر زبرشده

نمودارهای ۷ تا ۹ پارامترهای عملکردی محفظه بخار با تبخیرکننده زبرشده را نمایش می‌دهد. در این حالت با عملیات پاشش پرفشار ذرات مس از طریق هوا، به عنوان روشی عملی و با هزینه کم، بخش تبخیرکننده زبرشده و تأثیر پارامترهای مختلف بر محفظه حرارتی بررسی شده است. در این بخش، هدف تعیین روند رفتار کلی محفظه بخار زبرشده نسبت به حالت ساده است.

۵-۲-۱- محفظه بخار زیر با منبع حرارتی 3×3 سانتی‌متر

نمودارهای ۷ تا ۹ مقاومت حرارتی محفظه بخار را بر حسب حرارت ورودی در زاویه‌های مختلف در حالتی که منبع حرارتی 3×3 سانتی‌متر در وسط، سمت چپ (پایین) و سمت راست (بالا) بخش تبخیرکننده قرار داشته و بخش تبخیرکننده آن زبرشده باشد، نمایش می‌دهد. با توجه به نمودار ۷ مقدار مقاومت حرارتی نسبت به حالت مشابه در نمودار ۱، در محفظه بخار ساده (منبع 3×3 سانتی‌متر وسط)، کاهش یافته است. این امر به دلیل وجود

بخار با ایجاد زاویه نسبت به افق و افزایش یافتن زاویه، بالا رفته است. علت این امر آن است که حتی با وجود لایه‌های فیتیله‌ای مش‌دار موجود در محفظه بخار، بخشی از مایع به دلیل وجود زاویه در سمتی از محفظه بخار که پایین‌تر است، تجمع پیدا کرده و با کاهش مقدار مایع در تبخیرکننده، مقاومت حرارتی محفظه بخار افزایش یافته است. نمودار ۲ نشان دهنده مقاومت حرارتی محفظه بخار بر حسب حرارت ورودی و زوایای مختلف در حالتی است که با توجه به توضیحات بخش طراحی آزمایش، منبع حرارتی 3×3 سانتی‌متر در سمت چپ (پایین) بخش تبخیرکننده قرار داشته و بخش تبخیرکننده آن زیر نشده باشد. همان طور که مشاهده می‌گردد در این حالت نیز با افزایش میزان حرارت، مقاومت حرارتی محفظه بخار کاهش یافته است. با ایجاد زاویه نسبت به افق و افزایش مقدار زاویه، در حرارت‌های پایین مقدار مقاومت حرارتی افزایش یافته است اما با افزایش میزان حرارت تأثیر افزایش زاویه بر افزایش مقاومت حرارتی کاهش یافته است و حتی مشاهده می‌شود که مقاومت حرارتی در حرارت 160° وات در زاویه صفر درجه، بر خلاف حالتی که منبع حرارتی در وسط قرار داشت، بیشتر از زوایای دیگر می‌باشد. علت این امر آن است که با توجه به اینکه محل منبع حرارتی در سمت چپ (پایین) قرار دارد با ایجاد زاویه نسبت به افق، میزان مایع بیشتری در بخش تبخیرکننده در بالای منبع حرارتی قرار می‌گیرد وجود این مایع در حرارت‌های بالا از خشک‌شدگی موضعی محفظه بخار جلوگیری به عمل آورده و لذا مقاومت حرارتی در حالات زاویه‌دار در حرارت 160° وات کمتر از حالت بدون زاویه به دست آمده است [2].

با توجه به نمودار ۳ که مقاومت حرارتی محفظه بخار را در حالتی که منبع حرارتی در سمت راست (بالا) بخش تبخیرکننده قرار داشته باشد و سایر پارامترها مشابه حالات نمودارهای ۱ و ۲ باشد، نمایش می‌دهد مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه نسبت به افق، میزان افزایش مقاومت حرارتی، افزایش یافته است. علت این امر آن است که با توجه به موقعیت منبع حرارتی که در سمت راست (بالا) تبخیرکننده قرار دارد با افزایش میزان زاویه مقدار قابل توجهی از مایع موجود در تبخیرکننده در سمت پایین آن تجمع پیدا کرده و فیتیله موجود در بخش تبخیرکننده نیز نتوانسته تمام مایع مورد نیاز را به محل منبع تولید حرارت (بالای بخش تبخیرکننده) برگرداند بنابراین کاهش مقدار مایع، موجب افزایش مقاومت حرارتی شده و با افزایش زاویه، میزان افزایش مقاومت حرارتی نیز بیشتر شده است.

۵-۲-۲- محفظه بخار ساده با منبع حرارتی $8 \times 1/125$ سانتی‌متر

نمودار ۴ مقاومت حرارتی محفظه بخار را بر حسب حرارت ورودی در زاویه‌های مختلف در حالتی که منبع حرارتی $8 \times 1/125$ سانتی‌متر در وسط بخش تبخیرکننده قرار داشته و بخش تبخیرکننده آن زیر نشده باشد، نمایش می‌دهد. سایر پارامترها و مساحت منبع حرارتی در این حالت و حالت قبل (استفاده از منبع حرارتی 3×3 سانتی‌متر) یکسان است لذا تأثیر تغییر شکل هندسی منبع حرارتی قابل بررسی می‌باشد. با توجه به حالات قبل همان طور که پیش‌بینی می‌شود با افزایش مقدار حرارت و زاویه میزان مقاومت به ترتیب کاهش و افزایش یافته است اما با مقایسه نمودار ۴ و نمودار ۱ مشخص می‌گردد که تغییر شکل هندسی منبع حرارتی (برد مدار چاپی) از 3×3 به $8 \times 1/125$ سانتی‌متر موجب افزایش مقاومت حرارتی محفظه بخار شده است. علت این امر آن است که در حالت استفاده از منبع حرارتی 3×3 سانتی‌متر، با توجه به اینکه منبع حرارتی از چهار سو در مرکز تبخیرکننده قرار می‌گیرد، شکل‌گیری

با توجه به نمودار ۹ که مقاومت حرارتی را در حالتی که منبع حرارتی در سمت راست (بالا) بخش تبخیر قرار دارد نمایش می‌دهد، مشاهده می‌گردد که در حالات زاویه‌دار بودن محفظه بخار، به علت کمبود مایع در بخش تبخیر، زبر نمودن تأثیر مثبت کمتری در کاهش مقاومت حرارتی داشته است و حتی در زاویه ۶۰ درجه و حرارت‌های ۱۲۰ و ۱۶۰ وات، مقدار مقاومت حرارتی در حالت محفظه بخار زبر شده، افزایش نیز یافته است که نشان‌دهنده خشک‌شدگی موضعی در زاویه ۶۰ و حرارت بیشتر از ۱۲۰ وات است.

۵-۲-۲- محفظه بخار زیر با منبع حرارتی ۸×۱/۱۲۵ سانتی‌متر

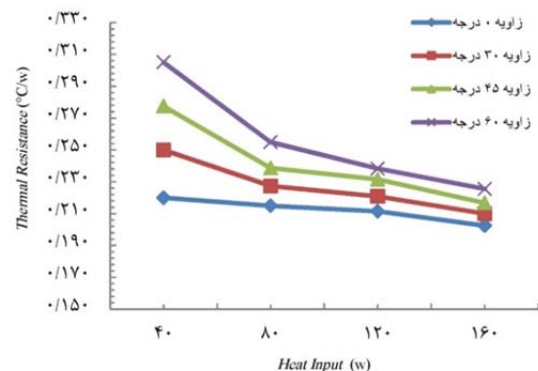
نمودارهای ۱۰ تا ۱۲ مقاومت حرارتی محفظه بخار را بر حسب حرارت ورودی در زاویه‌های مختلف در حالتی که منبع حرارتی ۸×۱/۱۲۵ سانتی‌متر در وسط، سمت راست (بالا) و سمت چپ (پایین) بخش تبخیرکننده قرار داشته و بخش تبخیرکننده آن زبر شده باشد، نمایش می‌دهد. با توجه به نمودار ۱۰، که مقاومت حرارتی را در حالتی که منبع حرارتی ۸×۱/۱۲۵ سانتی‌متر در وسط بخش تبخیرکننده زبر شده نشان می‌دهد، مشاهده می‌گردد که مقاومت حرارتی در این حالت به علت وجود زبری از مقاومت به دست آمده در حالت مشابه با بخش تبخیر زبر نشده (نمودار ۴) کمتر می‌باشد. در حالتی که منبع حرارتی ۸×۱/۱۲۵ سانتی‌متر در سمت راست (بالا) بخش تبخیرکننده قرار دارد (نمودار ۱۱)، مشاهده می‌گردد که زبری تأثیر کمی بر کاهش مقاومت حرارتی نسبت به حالت مشابه زبر نشده، مخصوصاً در حالات زاویه‌دار که کمبود مایع در بخش تبخیرکننده وجود دارد، گذاشته است. با توجه به نمودار ۱۲ که مقاومت حرارتی محفظه بخار زبر شده با منبع حرارتی ۸×۱/۱۲۵ سانتی‌متر در سمت چپ (پایین) بخش تبخیرکننده را نمایش می‌دهد، مشاهده می‌گردد که با توجه به عدم کمبود مایع در بخش تبخیر به علت سمت چپ (پایین) بودن منبع حرارتی، زبر نمودن باعث کاهش مقاومت حرارتی نسبت به حالت مشابه زبر نشده، شده است.

با توجه به حالات بررسی شده، بالاترین مقاومت حرارتی مربوط به محفظه بخار ساده با منبع حرارتی ۸×۱/۱۲۵ سانتی‌متر در سمت راست (بالا) بخش تبخیرکننده در زاویه ۶۰ درجه مشاهده می‌گردد. نمودار ۱۳ دمای میانگین بخش تبخیرکننده را در این حالت در حرارت‌های مختلف نمایش می‌دهد.

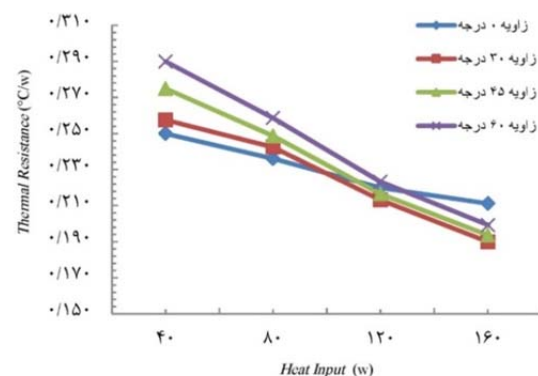
۵-۳- بررسی زمانمند حالت بهینه

با توجه به حالات آزمایش شده فوق حالت بهینه‌ای که کمترین مقدار مقاومت حرارتی را نشان می‌دهد حالتی است که منبع حرارتی ۳×۳ سانتی‌متر در سمت چپ (پایین) بخش تبخیرکننده در حالت زبر شده در زاویه ۳۰ درجه و حرارت ۱۶۰ وات، قرار دارد زیرا در این حالت کمبود یا مقدار بیش از حد مایع در بخش تبخیرکننده وجود نداشته است. برای بررسی اثر افزایش بیش از حد مایع در تبخیرکننده، حالت بهینه با حالت مشابهی که محفظه بخار زاویه ۶۰ درجه با افق دارد و مقدار مایع در بالای منبع حرارتی تجمع یافته است، در نمودار ۱۴ به صورت زمانمند مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد در حرارت ۱۶۰ وات کمترین اختلاف در مقاومت حرارتی بین دو حالت مقایسه شده وجود دارد و با کمتر شدن میزان حرارت، توانایی منبع حرارتی در تبخیر نمودن لایه مایع موجود در بخش تبخیرکننده کاهش یافته است و لذا وجود لایه مایع مانند عایقی باعث اختلاف بیشتر مقاومت حرارتی بین دو حالت ۳۰ و ۶۰ درجه، در حرارت‌های کمتر شده است.

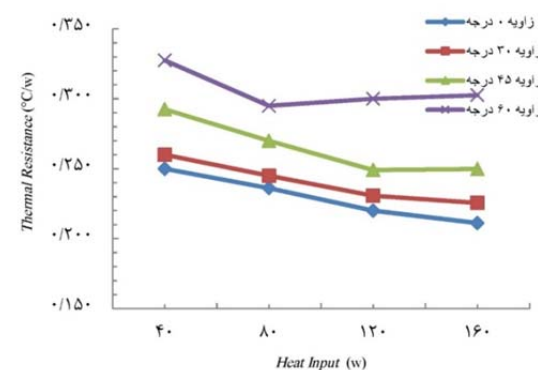
تبخیرکننده زبر شده و افزایش سطح تماس مایع و کف تبخیرکننده است که باعث افزایش تشکیل هسته‌های بخار می‌گردد [6]. نمودار ۸ که نشان‌دهنده مقاومت حرارتی در حالتی است که منبع حرارتی ۳×۳ سانتی‌متر در سمت چپ (پایین) قسمت تبخیرکننده قرار دارد نیز کاهش مقاومت حرارتی را در حالت محفظه بخار زیر نسبت به محفظه بخار ساده نشان می‌دهد. در این حالت با توجه به موقعیت منبع حرارتی (که در پایین بخش تبخیرکننده قرار دارد)، به علت وجود شیب در حالات زاویه‌دار، کمبود مایع در بخش تبخیرکننده وجود نداشته است لذا زبر کردن، با افزایش میزان تبخیر، باعث بهبود عملکرد محفظه بخار شده است.



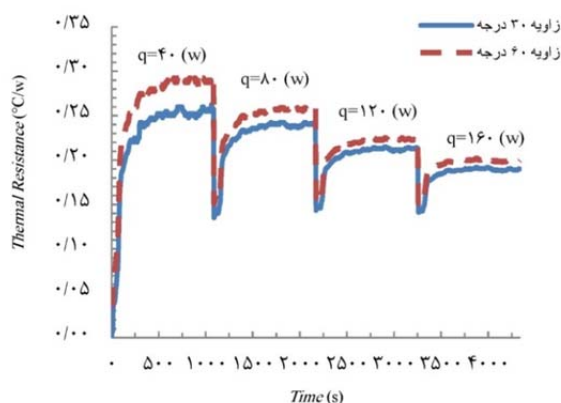
نمودار ۷) تأثیر تغییرات حرارت ورودی و زاویه‌های مختلف بر مقاومت حرارتی محفظه بخار زبر شده با منبع حرارتی ۳×۳ سانتی‌متر در وسط بخش تبخیرکننده



نمودار ۸) تأثیر تغییرات حرارت ورودی و زاویه‌های مختلف بر مقاومت حرارتی محفظه بخار زبر شده با منبع حرارتی ۳×۳ سانتی‌متر در سمت چپ (پایین) بخش تبخیرکننده



نمودار ۹) تأثیر تغییرات حرارت ورودی و زاویه‌های مختلف بر مقاومت حرارتی محفظه بخار زبر شده با منبع حرارتی ۳×۳ سانتی‌متر در سمت راست (بالا) بخش تبخیرکننده

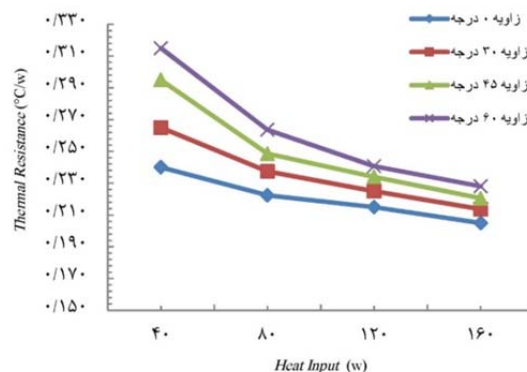


نمودار ۱۴) مقایسه زمانمند مقاومت حرارتی محفظه بخار در حالت پهنه با حالت مشابه در زاویه ۶۰ درجه

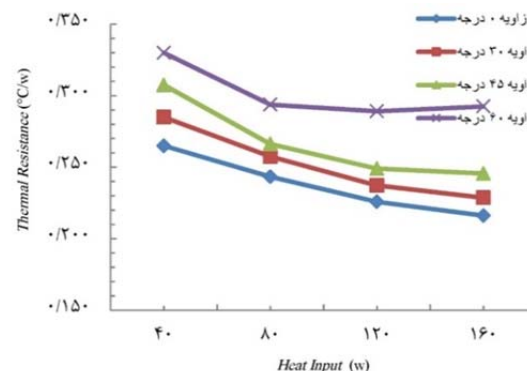
۶- نتیجه گیری

در این پژوهش تأثیر زیرنمودن بخش تبخیر، حرارت‌های ورودی مختلف، زاویه قرارگیری محفظه بخار با افق، تغییر محل نصب منبع حرارتی در بخش تبخیرکننده و تغییر شکل هندسی منبع حرارتی در مساحت ثابت بر عملکرد حرارتی محفظه بخار به صورت تجربی بررسی و مقایسه شده است. وجود بیش از حد یا کمبود مایع در بخش تبخیرکننده محفظه حرارتی باعث افزایش مقاومت حرارتی محفظه بخار می‌گردد. لذا افزایش میزان حرارت در حضور مایع کافی در تبخیرکننده باعث کاهش مقاومت حرارتی (مانند حالات زاویه‌داری که منبع حرارتی در پایین بخش تبخیرکننده قرار دارد) و در صورت عدم حضور مایع کافی باعث افزایش مقاومت حرارتی (مانند حالات زاویه‌داری که منبع حرارتی در بالای بخش تبخیرکننده قرار دارد) می‌گردد. همچنین افزایش زاویه محفظه حرارتی با افق در صورتی که باعث کمبود مایع در تبخیرکننده گردد، باعث افزایش مقاومت حرارتی محفظه بخار می‌گردد. با قراردادن منبع حرارتی در سمت چپ (پایین) بخش تبخیرکننده، با افزایش زاویه میزان مایع‌رسانی افزایش یافته است لذا مقاومت حرارتی مخصوصاً در حرارت‌های بالا، کاهش می‌یابد اما با قراردادن منبع حرارتی در سمت راست (بالا) محفظه حرارتی و افزایش زاویه، به علت عدم توانایی فیتیله در بازگردانی کامل مایع، مقاومت حرارتی افزایش یافته است. منبع حرارتی 3×3 سانتی‌متر به دلیل شکل مربعی در میانه بخش تبخیرکننده قرار می‌گیرد و باعث شکل‌گیری بهتر جریان بخار در محفظه بخار می‌گردد که این امر باعث کاهش مقاومت حرارتی شده است. از طرف دیگر منبع حرارتی $8 \times 1/125$ سانتی‌متر به دلیل عرض کمتر، دسترسی بهتری به مایع بازگردانده شده از طریق فیتیله دارد که سبب می‌گردد در حالاتی که کمبود مایع در تبخیرکننده وجود دارد عملکرد بهتری را نشان دهد. زیرنمودن بخش تبخیرکننده با ایجاد هسته‌های بخار و سطح تماس بیشتر، باعث انتقال حرارت بیشتر می‌گردد لذا در حالاتی که مایع کافی در بخش تبخیرکننده وجود داشته باشد باعث کاهش مقاومت حرارتی می‌گردد اما در حالاتی که کمبود مایع در تبخیرکننده وجود داشته باشد (مانند حالات زاویه‌داری که منبع حرارتی در سمت راست (بالا) بخش تبخیرکننده قرار دارد) تأثیر زیرنمودن تبخیرکننده بر کاهش مقاومت حرارتی، کاهش می‌یابد.

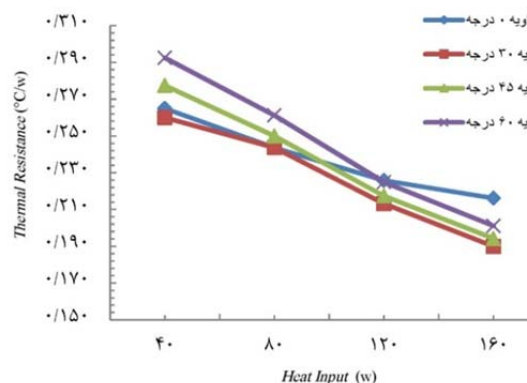
تشکر و قدردانی: با سپاس از آقایان دکتر محمد سفید و دکتر محمدرضا نظری که با نظرات ارزشمند خود ما را در انجام این پژوهش یاری نمودند.



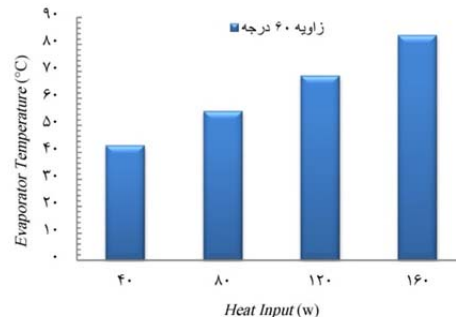
نمودار ۱۰) تغییرات مقاومت حرارتی با حرارت ورودی و زاویه‌های مختلف در محفظه بخار زیرشده با منبع حرارتی $8 \times 1/125$ سانتی‌متر در وسط بخش تبخیرکننده



نمودار ۱۱) تأثیر تغییرات حرارت ورودی و زاویه‌های مختلف بر مقاومت حرارتی محفظه بخار زیرشده با منبع حرارتی $8 \times 1/125$ سانتی‌متر در سمت راست (بالا) بخش تبخیرکننده



نمودار ۱۲) تأثیر تغییرات حرارت ورودی و زاویه‌های مختلف بر مقاومت حرارتی محفظه بخار زیرشده با منبع حرارتی $8 \times 1/125$ سانتی‌متر در سمت چپ (پایین) بخش تبخیرکننده



نمودار ۱۳) دمای میانگین بخش تبخیرکننده مربوط به بالاترین مقاومت حرارتی

investigation of a vapor chamber with compound columns under the influence of gravity. *Applied Thermal Engineering*. 2018;140:131-138.

10- Ji X, Xu J, Abanda AM, Xue Q. A vapor chamber using extended condenser concept for ultra-high heat flux and large heater area. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2012;55(17-18):4908-4913.

11- Li Y, Li Z, Zhou W, Zeng Z, Yan Y, Li B. Experimental investigation of vapor chambers with different wick structures at various parameters. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016;77:132-143.

12- Wiriyaart S, Naphon P. Effect of heat source area on the thermal resistance of the wick columns vapor chambers. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2016;30(2):933-942.

13- Srimuang W, Limkaisang V. A correlation to predict the heat flux on the air-side of a vapor chamber with overturn-U flattened tubes. *Heat Mass Transfer*. 2016;52(8):1683-1692.

14- Wong SC, Hsieh KC, Wu JD, Han WL. A novel vapor chamber and its performance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010;53(11-12):2377-2384.

15- Wong SC, Huang SF, Hsieh KC. Performance tests on a novel vapor chamber using water, methanol or acetone as the working fluid. 5th International Microsystems Packaging Assembly and Circuits Technology Conference, 20-22 Oct 2010, Taipei, Taiwan. Piscataway: IEEE; 2010.

16- Lips S, Lefèvre F, Bonjour J. Combined effects of the filling ratio and the vapour space thickness on the performance of a flat plate heat pipe. *International Journal of Heat Mass Transfer*. 2010;53(4):694-702.

17- Peng H, Ling X. Experimental investigation on flow and heat transfer performance of a novel heat fin-plate radiator for electronic cooling. *Heat and Mass Transfer*. 2009;45(12):1575-1581.

18- Chen YT, Kang SW, Hung YH, Huang CH, Chien KC. Feasibility study of an aluminum vapor chamber with radial grooved and sintered powders wick structures. *Applied Thermal Engineering*. 2013;51(1-2):864-870.

19- Cao Y, Cao M. Wickless network heat pipes for high heat flux spreading applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2002;45(12):2539-2547.

20- Kirkup L, Frenkel RB. Calculation of uncertainties. In: Kirkup L, Frenkel RB. An introduction to uncertainty in measurement. Cambridge UK: Cambridge University Press; 2006. pp. 97-125.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به طور کامل با بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. ضمناً محتویات علمی و ادبی مقاله منتج از فعالیت علمی خود نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج و متن مقاله بر عهده نویسندگان است.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

سهم نویسندگان: مسعود نیک‌مهر (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ ولی کلانتر (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۵۰٪)

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

- 1- Kang SW, Chen YT, Hsu CH, Lin JY. Temperature uniformity analysis of a multi-well vapor chamber heat spreader. *Frontiers in Heat Pipes*. 2012;3:013004.
- 2- Haghayegh Sh, Saidi MH, Afshin H, Shafii MB, Adibnia A. Effects of evaporator's length on pulsating heat pipes' thermal performance. *Modares Mechanical Engineering*. 2014;13(15):110-115. [Persian]
- 3- Shojaeefard MH, Khalkhali A, Zare J, Tahani M. Multi objective optimazation of heat pipe thermal performance while using aluminium oxide nanofluid. *Modares Mechanical Engineering*. 2014;14(1):158-167. [Persian]
- 4- Sayyahi M, Mamourian M, Ghadiri M. Experimental investigation of the influence of nanofluid on the heat performance of pulsating heat pipe. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;16(13):162-165. [Persian]
- 5- Reyes M, Alonso D, Arias JR, Velazquez A. Experimental and theoretical study of a vapour chamber based heat spreader for avionics applications. *Applied Thermal Engineering*. 2012;37:51-59.
- 6- Tsai TE, Wu HH, Chang CC, Chen SL. Two-phase closed thermosyphon vapor-chamber system for electronic cooling. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2010;37(5):484-489.
- 7- Naphon P, Wongwises S, Wiriyaart S. Application of two-phase vapor chamber technique for hard disk drive cooling of PCs. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2013;40:32-35.
- 8- Zeng J, Zhang Sh, Chen G, Lin L, Sun Y, Chuai L, et al. Experimental investigation on thermal performance of aluminum vapor chamber using micro-grooved wick with reentrant cavity array. *Applied Thermal Engineering*. 2018;130:185-194.
- 9- Liu W, Gou J, Luo Y, Zhang M. The experimental