



بررسی آزمایشگاهی تاثیر نانوسیال بر عملکرد حرارتی لوله های حرارتی نوسانی

محمد سیاحی¹، مجتبی ماموریان^{2*}، متین قدیری³

1- کارشناسی ارشد، تبدیل انرژی، دانشگاه فردوسی، مشهد

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد

3- کارشناسی ارشد، تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

* مشهد، صندوق پستی 9177948974، mamourian@um.ac.ir

چکیده

سیستم های خنک کننده با عملکرد بالا به یکی از چالش ها و مورد توجه مهندسان در صنعت تبدیل شده است. لوله های حرارتی نوسانی راه حل مناسبی برای رفع این نگرانی می باشد. نانوسیالات نیز به علت هدایت حرارتی بالاتر و خواص انتقال حرارتی بالا در سال های اخیر مورد توجه نیز قرار گرفته است. عملکرد لوله های حرارتی نوسانی براساس تغییر فاز سیال است. در این مقاله یک نمونه لوله حرارتی نوسانی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. مدل طراحی شده متشکل از 6 دور لوله مسی با قطر داخلی 2.2 میلی متر و قطر خارجی 4 میلی متر است. ارتفاع هر دور 280 میلی متر که طول قسمت اواپراتور و کندانسور 100 میلی متر و قسمت آدیاباتیک 80 میلی متر می باشد. از نانوسیال آهن Fe_3O_4 در چهار درصد جرمی (0.1، 0.3، 1 و 3) پس از ساخت نانوذره و نانوسیال از روش دوزمرحله ای با نسبت پرشدگی 60 درصد برای آزمایشات استفاده شده است. مقاومت حرارتی سیال رسم شد و نشان داد که مقاومت حرارتی با افزایش توان ورودی کاهش می یابد، نتایج نشان داد که عملکرد حرارتی نانوسیال نسبت به آب بهتر و بهترین عملکرد نانو سیال در غلظت 1% جرمی می باشد.

کلید واژگان: لوله حرارتی نوسانی، نانو سیال، فروفلوئید، سیال عامل

Experimental Investigation of the influence of nanofluid on the heat performance of pulsating heat pipe

Mohammad Sayyahi¹, Mojtaba Mamourian^{1*}, Matin Ghadiri²

1- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, University of Shahrood, Shahrood, Iran

* P.O.B. 9177948974, Mashhad, Iran. mamourian@um.ac.ir

ABSTRACT

One of the challenges facing engineers in the industry is high performance cooling systems. Pulsating heat pipe is suitable method for eliminating this concern. Besides, Nanofluid has attracted attention due to higher thermal conductivity and high thermal transfer properties in recent years. The performance of Pulsating heat pipes is based on the fluid phase change. In this paper, we analyze a prototype of pulsating heat pipe. The designed model is consist of 6 loops copper pipes with 2.2 mm inner diameter and 4 mm external diameter. Each loop is 280 mm that lengths of the evaporator and condenser are both 100 mm and height of adiabatic section is 80 mm. A two-step method of making nanoparticles and nano fluids with fill ratio of 60% is used and Ferro fluids Fe_3O_4 mass concentration was varied at four levels (0.1, 0.3, 1, and 3). It was shown that the thermal resistance decreases with increasing input power, The results showed that thermal performance of nano fluid is better than pure water and the best performance is noticed in case of 1% mass concentration of nanofluid.

Keywords: Pulsating heat pipe, nano fluid, ferro-fluid, working fluid

1- مقدمه

کوره ها و خشک کن برای ذخیره انرژی استفاده می شود. آزمایشات انجام شده نشان داده اند که لوله های حرارتی نوسانی توانایی انتقال بارهای حرارتی بیشتری نسبت به لوله های حرارتی معمول دارند و همچنین این وسایل می توانند حرارت را به مسافت های طولانی تری منتقل کنند. تمامی لوله های حرارتی که از نظر شکل ظاهری و عملکرد ترمودینامیکی و دینامیک سیالاتی مشابه ساختار نشان داده شده در "شکل 1" اند به عنوان لوله های حرارتی نوسانی خوانده می شوند. ساختمان آن ها متشکل از تعدادی لوله باریک با تعدادی پیچ و خم است که به طور نسبی از سیال عامل پر شده است. این لوله ها می توانند اتصالی به دو صورت سیکل باز یا سیکل بسته داشته باشد و برخلاف لوله های حرارتی متعارف، در ساختمان آن ها از هیچ فیتله ای استفاده نشده است. حداقل یک

لوله های حرارتی در بسیاری از موارد یکی از بهترین گزینه ها برای انتقال گرما و وسایل موثر برای بازیافت حرارت اتلافی محسوب می شوند. ساخت و طراحی آسان، افت دمای کم در طول لوله حرارتی، کاربرد در بازه وسیعی از دما (4 تا 2000 کلوین) و توانایی کنترل و انتقال نرخ های بالای حرارت در دماهای مختلف از مزیت های آن به شمار می رود. از جمله کارایی های لوله های حرارتی نوسانی می توان به خنک کردن وسایل الکتریکی و تراشه های کوچک بدون نیاز به فن اشاره کرد. این وسایل توانایی بکارگیری در بازیاب های حرارتی نیروگاه و دستگاه های تهویه مطبوع را نیز دارا می باشند. یکی از کاربردهای مهم لوله حرارتی استفاده به عنوان مبدل جهت بازیافت حرارت اتلافی دودکش ها می باشد. مبدل لوله حرارتی در بسیاری از موارد نظیر: دیگ بخار،

Please cite this article using:

M.Sayyahi, M.Mamourian, M.Ghadiri, Experimental Investigation of the influence of nanofluid on the heat performance of pulsating heat pipe, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Second International Conference on Air-Conditioning, Heating and Cooling Installations*, Vol. 16, No. 13, pp. 162-165, 2016 (In Persian) (فارسی)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

دیگری است که در لوله حرارتی نوسانی نسبت به لوله‌های حرارتی متعارف که فقط انتقال حرارت نهان دارند، وجود دارد. قطرات مایع و حباب³های بخار بدلیل نوسانات و ارتعاشات فشار که در درون سیستم به وجود می‌آید، منتقل می‌شوند و حرارت را نیز به همراه خود منتقل می‌کنند. لوله حرارتی نوسانی الزاماً یک وسیله مبدل حرارتی غیرتبادل‌ی است که به وسیله ترکیب پیچیده‌ای از انواع گوناگون پدیده‌های ناپایدار دوفازی کار می‌کند. موفقیت عملکرد آن‌ها وابسته به نوسانات مداوم و پیوسته حباب‌ها است که به نوبه خود متاثر از حالات و شرایط ناپایداری درون سیستم است.

اولین بهره‌برداری و استفاده از نقطه نظر مهندسی از سیستم لوله‌های حرارتی نوسانی توسط هیساترو آکچی در سال 1990 انجام گرفت. او اولین نمونه‌ها از خانواده لوله‌های حرارتی نوین را در 24 شکل مختلف ساخت [1]. این مجموعه لوله‌های حرارتی چرخه‌ای نامیده شدند. همه این ساختارهای پیشنهادی دارای یک مشخصه مشترک بودند و آن وجود یک شیر یک طرفه در مسیر لوله برای تحمیل یک جهت قراردادی بود. حداقل قطر داخلی لوله-های به کار رفته در این مجموعه دو میلی‌متر بود. آکچی و پلاسک [2] در تحقیقی دیگر از این نوع لوله حرارتی برای خنک‌سازی قطعات الکترونیکی استفاده کردند و ترکیبات مختلفی را در ساخت لوله حرارتی مورد استفاده قرار دادند، از جمله: لوله‌های استیل با سیال عامل نیتروژن مایع، لوله‌های مسی با سیال‌های عامل آب، R-144، R-133 و آلومینیوم و متانول. آن‌ها در تحقیقات خود مقاومت حرارتی سیستم‌های مختلف را مورد مقایسه قرار دادند. ما و همکاران [3] در سال 2006 نانو سیال الماس را به سیال پایه در نسبت پرشدگی 50 درصد بر طبق مطالعات گذشته تزریق کردند که اختلاف دمای اواپراتور و کندانسور از 40.9 به 24.3 رسید. با توجه به این مقاومت حرارتی دستگاه کاهش و عملکرد حرارتی افزایش می‌یابد. لین و همکاران [4] در سال 2008 اثر نانوسیال نقره در دو درصد (100-450 ppm) در درصد پرشدگی و توان‌های ورودی متفاوت آزمایش کردند. آن‌ها دریافتند که در حالت کلی سیال با غلظت 100 ppm عملکرد حرارتی بهتری دارد. سیال با غلظت بیشتر دارای ضریب انتقال حرارت بالاتر بوده اما ویسکوزیته آن بیشتر و نیروی اصطکاک ایجاد شده با لوله بیشتر می‌باشد، بنابراین غلظت بیشتر موجب عملکرد حرارتی بهتر نمی‌باشد. جیان و همکارانش [5] در سال 2010 به بررسی اثر استفاده از ذرات اکسید آلومینیوم Al_2O_3 -water با قطر 56 نانومتر را بر روی لوله‌های حرارتی نوسانی پرداختند. آن‌ها اثر نسبت پرشدگی، کسر جرمی ذرات آلومینیوم و توان ورودی را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند بهترین نسبت پرشدگی در 50 درصد بوده و استفاده از نانوسیالات آلومینیوم باعث افزایش قابل توجه عملکرد سیستم شده به طوری که در کسر جرمی 0.9% مقدار 32.5% افزایش میزان انتقال حرارت و در نتیجه کاهش مقاومت گرمایی در مقایسه با آب در سیستم شده است. یولانگ و همکاران [6] در سال 2011 تأثیر اندازه نانوذرات اکسید آلومینیوم را با سیال پایه آب بر روی لوله‌های حرارتی نوسانی بررسی و مقایسه کردند. چهار ذره به ترتیب با قطرهای متوسط 50 نانومتر، 80 نانومتر، 2.2 میکرومتر و 20 میکرومتر را مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که بهترین نسبت پرشدن برای این آزمایش 50% و هنگامی که اندازه ذرات اکسید آلومینیوم از 20 میکرومتر به 80 نانومتر کاهش می‌یابد، قابلیت انتقال حرارت افزایش و مقاومت گرمایی کاهش می‌یابد. جیا و همکاران [7] در سال 2013 تأثیر SiO_2 با درصد جرمی و توان‌های متفاوت و مقایسه عملکرد حرارتی با آب را

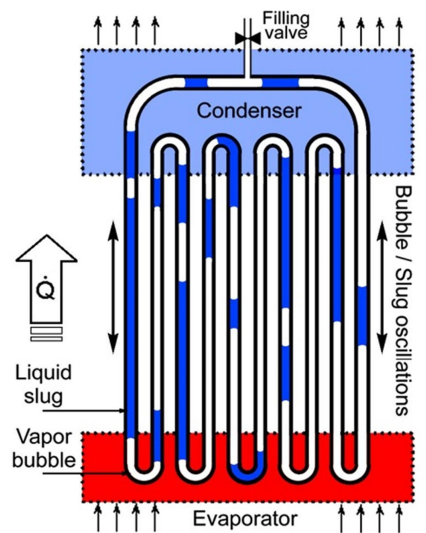


Fig. 1 Schematic of pulsating heat pipe

شکل 1 شماتیک لوله حرارتی نوسانی

منبع حرارتی با سیستم در ارتباط است که به آن اواپراتور¹ یا هیتر و حداقل یک منبع دریافت‌کننده حرارت با سیستم در ارتباط است که به آن کندانسور² گفته می‌شود. یک بخش آدیاباتیک می‌تواند به صورت اختیاری بین اواپراتور و کندانسور در صورت زیاد بودن فاصله بین آن‌ها قرار گیرد.

دلایل برتری این مبدل‌ها نسبت به تجهیزات دیگر را می‌توان عوامل زیر معرفی کرد. مبدل‌های لوله‌های حرارتی قسمت متحرک مکانیکی ندارند، لذا تعمیر و نگهداری آن‌ها به حداقل می‌رسد. تماس بین جریان‌های اتلافی و گرم شونده وجود ندارد. به لحاظ عملکرد مستقل لوله‌های حرارتی، امکان نصب لوله‌ها در فضاهای محدود و به شکل‌های مختلف وجود دارد. ضریب بالای تبادل گرما و سطح زیاد انتقال گرما، بازده عملکرد مبدل را بسیار زیاد می‌کند. ابعاد مبدل نسبت به گرمایی که منتقل می‌کند خیلی کوچک است. برتری مهم و اصلی این مبدل‌ها نسبت به مبدل‌های دیگر، نزدیکی عملکرد به حالت دما ثابت، افت فشار کم و درصد خطای در نظر گرفته شده در هنگام طراحی و هزینه نصب و راه اندازی کم می‌باشد.

مکانیزم طرز کار لوله‌های حرارتی نوسانی بدین صورت است که ابتدا هوای درون لوله حرارتی توسط سیستم خلا خالی می‌شود و سپس به طور جزئی با سیال عامل پر می‌شود (به نسبت بین حجم سیال درون لوله‌ها به حجم کل لوله‌ها نسبت پرشدگی گفته می‌شود). به دلیل قطر کم لوله‌ها و در نتیجه نیروی کشش سطحی و هم‌چنین فشار اولیه پایین سیال درون لوله‌ها سیال عامل بصورت مخلوطی از قطرات مایع و حباب‌های بخار به طور نامتقارن و کاملاً تصادفی در لوله‌ها پخش می‌شود. هیچ کنترل خارجی روی نحوه توزیع اولیه حباب‌ها در لوله‌ها وجود ندارد. سپس شار حرارتی از طریق یک منبع حرارتی به اواپراتور اعمال می‌شود و در نتیجه فشار بخار در قسمت اواپراتور افزایش می‌یابد. در کندانسور نیز به دلیل سرد شدن بخش بخار، فشار کاهش می‌یابد. این اختلاف فشار، نیروی رانشی ایجاد می‌کند که موجب ایجاد حرکات نوسانی بخش سیال و به دنبال آن بخش بخار می‌گردد. در نتیجه، لوله حرارتی نوسانی، حرارت را بوسیله حرکت نوسانی و مداوم مخلوط دوفازی بین تبخیرکننده و چگالنده منتقل می‌کند. در این وسایل انتقال حرارت محسوس و نهان توأمان صورت می‌گیرد که این به نوبه خود مزیت

¹ evaporator

² condenser

³ Bubble/ Slug

شده است. چهار توان ورودی (100, 75, 50, 25) وات به سیستم داده شده که توسط دیمر این توان‌ها کنترل می‌شود. ناحیه اواپراتور و آدیاباتیک با عایقی از جنس پتوی سرمایی که تحمل دمایی بالایی دارد عایق شده تا اتلاف حرارتی تقریباً صفر و تمام حرارت به لوله حرارتی منتقل شود. قسمت کندانسور شامل یک آکواریوم با ورودی آب سرد در سمت چپ و یک خروجی آب در سمت راست می‌باشد که در ابتدا و انتهای آن از دو دماسنج مقاومتی (PT100) برای مشاهده دمای آب استفاده شده است. برای کنترل مقدار دبی آب از یک روتامتر در ورودی آب که در تمام آزمایشات مقدار 100 لیتر بر ساعت تنظیم شده است، استفاده می‌شود. دما به وسیله 8 ترموکوپل تیپ K که در قسمت کندانسور و اواپراتور هر کدام 4 ترموکوپل استفاده شده به صورت گذرا توسط دیتالاگر لیتون مدل BTM خوانده می‌شود. از یک پمپ خلا دارای توانایی 0.005 تور برای خلا کردن سیستم قبل از هر بار آزمایش استفاده شده است. برای آماده‌سازی نانوذرات روش دومرحله‌ای انتخاب شده است. ابتدا نانوذرات سنتز شده و سپس به کمک روش‌هایی، آن‌ها را درون سیال پایه موردنظر پراکنده کرد. پس از آماده‌سازی نانوذرات Fe_3O_4 نوبت به آماده‌سازی نانوسیال می‌رسد. در این مرحله با توجه به درصد جرمی مطلوب، مقدار مورد نظر نانوذره در سیال پایه که در این جا آب است پراکنده می‌شوند [10]. در این پژوهش چهار درصد جرمی 0.1 و 0.3 و 1 و 3 درصد مورد مطالعه قرار گرفته است.

3- نتایج

برای انجام آزمایشات ابتدا سیستم را خلا سپس سیال عامل را تزریق و توان ورودی دستگاه را تنظیم می‌کنیم. از درصد پرشدگی 60% برای تمام آزمایشات استفاده می‌کنیم. برای مقایسه عملکرد حرارتی آب و فروفلوئید از مقاومت حرارتی که برای لوله‌های حرارتی نوسانی به صورت رابطه (1) است، استفاده می‌شود:

$$R = \frac{T_e - T_c}{Q} \quad (1)$$

در "شکل 4" تغییرات مقاومت حرارتی برحسب توان ورودی برای آب و چهار درصد جرمی فروفلوئید (0.1, 0.3, 1 و 3) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش توان ورودی مقاومت حرارتی کاهش می‌یابد. مقاومت حرارتی نانوسیال با غلظت 1% جرمی پایین‌ترین مقاومت حرارتی و بهترین عملکرد حرارتی را در بین غلظت‌های جرمی آزمایش شده دارا می‌باشد. با افزایش غلظت جرمی از 0.1 تا 1 درصد ضریب هدایت حرارتی نانوسیال افزایش یافته بنابراین عملکرد حرارتی لوله حرارتی نوسانی افزایش می‌یابد. اما با افزایش غلظت به 3 درصد جرمی مقاومت حرارتی افزایش و عملکرد سیستم کاهش می‌یابد. اگر چه ضریب هدایت حرارتی نانوسیال با غلظت 3% بیشتر می‌باشد اما با افزایش غلظت، ویسکوزیته سیال نیز افزایش می‌یابد. ویسکوزیته بیشتر تولید حباب در لوله‌ها را مشکل‌تر و باعث افزایش نیروی اصطکاک درون لوله می‌گردد که موجب انسداد جریان مایع درون لوله و تاثیر در حرکت حباب‌ها که باعث کاهش عملکرد حرارتی لوله حرارتی نوسانی می‌گردد.

"شکل 5" تغییرات نسبت مقاومت حرارتی نانوسیال به مقاومت حرارتی آب در نسبت پرشدگی 60% برحسب توان های ورودی و غلظت‌های متفاوت را نشان می‌دهد. نسبت مقاومتی نانوسیال با غلظت 1% درصد جرمی پایین‌تر از غلظت‌های دیگر می‌باشد. در توان ورودی 25 وات آب مقطر عملکرد بهتری نسبت به نانوسیال دارد که نشان‌دهنده آن است که استفاده از نانوسیال زمان

بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که در کسر جرمی بالا عملکرد نانوسیال نسبت به آب بدتر می‌شود یعنی مقاومت حرارتی و دمای اواپراتور افزایش می‌یابد. کارتیکیان و همکارانش [8] در سال 2014 از نانو سیال مس و نقره که هر کدام از دو روش متفاوت به دست آمده بودند، استفاده کردند. استفاده از نانوسیال باعث کاهش دمای اواپراتور نسبت به آب که سبب کاهش مقاومت حرارتی و افزایش عملکرد حرارتی سیستم شد. تسلیمی فر و همکاران [9] در سال 2013 نشان دادند که لوله حرارتی در حالتی که از فروفلوئید به عنوان سیال عامل استفاده شود نسبت به سیال عامل آب عملکرد بهتری دارد. آن‌ها همچنین نشان دادند که نانوسیال در حضور میدان مغناطیسی عملکرد بهتری دارد. هنوز ماهیت دقیق پدیده‌هایی که در لوله‌های حرارتی نوسانی اتفاق می‌افتد به دلیل پیچیدگی و گستردگی پدیده‌های انتقال حرارت و جرم، جریان سیال دوفازی با الگوهای مختلف، آشفستگی و ناپایداری فشار و دما، جوشش، تقطیر و غیره به طور کامل شناخته نشده‌اند. داده‌های به دست آمده تاکنون از نظر کمی و کیفی محدود و غیرقابل اعتماد بوده، لذا نیاز به آزمایشات گسترده‌تر کاملاً ضروری است. به طور کلی پارامترهای زیادی بر عملکرد لوله‌های حرارتی نوسانی تاثیر گذارند که می‌توان به نسبت پرشدگی، شار حرارتی، نوع سیال عامل، قطر داخلی، طول اواپراتور، اختلاف دمای اواپراتور و کندانسور و تعداد دور اشاره کرد.

در این مقاله به طراحی و ساخت لوله حرارتی نوسانی پرداخته می‌شود. سپس عملکرد حرارتی سیستم را بعد از ساخت نانوذره، نانوسیال با درصد‌های جرمی متفاوت در درصد پرشدگی 60% و در توان‌های مختلف بررسی می‌کنیم.

2- سیستم آزمایشگاهی

سیستم طراحی و ساخته شده برای انجام آزمایش‌ها در "شکل 3" نشان داده شده است. این سیستم یک لوله حرارتی نوسانی سیکل بسته می‌باشد. لوله حرارتی ساخته شده از جنس مس شامل 6 دور لوله با قطر داخلی 2.2 میلی‌متر و قطر خارجی 4 میلی‌متر است. ارتفاع هر دور لوله 280 میلی‌متر می‌باشد که متشکل از اواپراتور و کندانسور به طول 100 میلی‌متر و ناحیه آدیاباتیک به طول 80 میلی‌متر است. توان حرارتی موردنیاز قسمت اواپراتور توسط سیم حرارتی از جنس کروم نیکل با مقاومت الکتریکی 28.8 اهم استفاده



Fig. 3 system setup

شکل 3 سیستم آزمایش

4- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این آزمایش نانوسیال آهن از روش دومرحله‌ای ساخته و از نسبت پرشدگی 60% برای تمام آزمایشات استفاده شد. نتایج نشان داد که مقاومت حرارتی با افزایش توان ورودی کاهش یافته و بهترین عملکرد لوله‌های حرارتی نوسانی در غلظت 1% جرمی نانوسیال اتفاق می‌افتد. افزایش غلظت نانوسیال تا 1% جرمی باعث بهبود عملکرد حرارتی لوله‌های حرارتی نوسانی شده ولیکن با افزایش غلظت از 1% به 3%، ویسکوزیته سیال بیشتر شده و نیروی اصطکاک درون لوله بیشتر می‌شود که این موضوع باعث کاهش عملکرد حرارتی لوله حرارتی نوسانی می‌گردد.

5- فهرست علائم

R	مقاومت حرارتی ($^{\circ}\text{C}/\text{w}$)
T_e	دمای اواپراتور ($^{\circ}\text{C}$)
T_c	دمای کندانسور ($^{\circ}\text{C}$)
Q	توان (w)

6- مراجع

- [1] H. Akachi, *Structure of a heat pipe: US*, 4921041.
- [2] H. Akachi, F. Polasek, *Thermal control of IGBT modules in traction drives by pulsating heat pipes*, in *Proceeding of*, 8-12.
- [3] H. Ma, C. Wilson, B. Borgmeyer, K. Park, Q. Yu, S. Choi, M. Tirumala, *Effect of nanofluid on the heat transport capability in an oscillating heat pipe*, *Applied Physics Letters*, Vol. 88, No. 14, pp. 143116, 2006.
- [4] Y.-H. Lin, S.-W. Kang, H.-L. Chen, *Effect of silver nano-fluid on pulsating heat pipe thermal performance*, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, No. 11, pp. 1312-1317, 2008.
- [5] J. Qu, H.-y. Wu, P. Cheng, *Thermal performance of an oscillating heat pipe with Al₂O₃-water nanofluids*, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 2, pp. 111-115, 2010.
- [6] Y. Ji, H. Ma, F. Su, G. Wang, *Particle size effect on heat transfer performance in an oscillating heat pipe*, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 35, No. 4, pp. 724-727, 2011.
- [7] H. Jia, L. Jia, Z. Tan, *An experimental investigation on heat transfer performance of nanofluid pulsating heat pipe*, *Journal of Thermal Science*, Vol. 22, No. 5, pp. 484-490, 2013.
- [8] V. Karthikeyan, K. Ramachandran, B. Pillai, A. B. Solomon, *Effect of nanofluids on thermal performance of closed loop pulsating heat pipe*, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 54, pp. 171-178, 2014.
- [9] M. Taslimifar, M. Mohammadi, H. Afshin, M. H. Saidi, M. B. Shafii, *Overall thermal performance of ferrofluidic open loop pulsating heat pipes: an experimental approach*, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 65, pp. 234-241, 2013.
- [10] M. Ghadiri, M. Sardarabadi, M. Pasandideh-fard, A. J. Moghadam, *Experimental investigation of a PVT system performance using nano ferrofluids*, *Energy Conversion and Management*, Vol. 103, pp. 468-476, 2015.

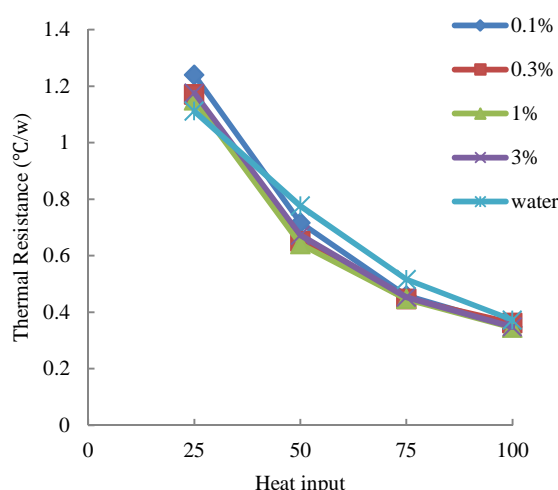


Fig. 4 Variation of thermal resistance with heat power

شکل 4 تاثیر توان حرارتی ورودی بر مقاومت حرارتی

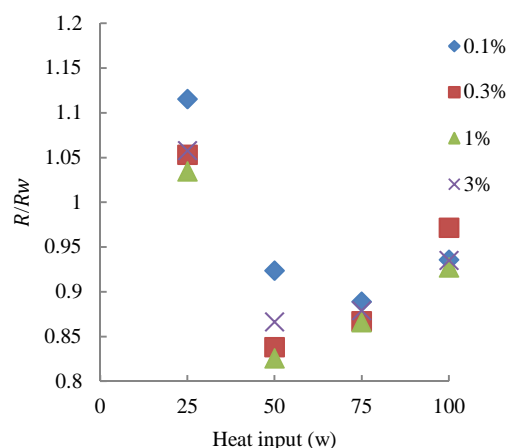


Fig. 5 Variation of nanofluids Thermal resistance to water thermal resistance by input power (different concentrations and filling ratio 60%)

شکل 5 تغییرات نسبت مقاومت حرارتی نانوسیال به مقاومت حرارتی آب برحسب توان های ورودی (غلظت‌های متفاوت و نسبت پرشدگی 60%)

راه‌اندازی سیستم را افزایش داده و نوسان‌های لوله حرارتی نوسانی با نانوسیال هنوز شروع نشده است. با افزایش توان نیروی محرک افزایش یافته و در نتیجه نوسانات حباب‌ها و انتقال به فاز مایع بیشتر شده است و عملکرد نانوسیال نسبت به آب بهبود می‌یابد. به‌عنوان مثال در 75 وات نسبت مقاومت حرارتی 1% نسبت به آب مقطر 14 درصد کاهش پیدا کرده که می‌توان گفت عملکرد حرارتی نسبت به آب 14 درصد بهبود یافته است.