2
Second International Conference on air conditioning and heating / cooling installations
September 27 and 28 , 2016 ,University of Birjand

دومین کنفرانس بین المللی تهویه مطبوع و تاسیسات حرارتی و برودتی
۶ و ۷ مهر ۱۳۹۵- دانشگاه بیرجند

برگزار کنندگان

«به نام یگانه پروردگار عقل، عدل و عشق»

بدینوسیله گواهی می شود که مقاله با عنوان

**بررسی آزمایشگاهی تأثیر نانوسیال بر عملکرد حرارتی لوله‌های حرارتی نوسانی**

توسط نویسندگان محترم

**محمد سیاحی، مجتبی ماموریان، متین قدیری**

در دومین کنفرانس بین المللی تهویه مطبوع و تأسیسات حرارتی و برودتی در تاریخ ۶ و ۷ مهرماه ۱۳۹۵ در دانشگاه بیرجند

پذیرفته و ارائه گردیده است.

دبیر کنفرانس

دکتر سید علیرضا ذوالفقاری

دومین کنفرانس تهویه مطبوع و تأسیسات حرارتی و برودتی
دانشگاه بیرجند، ۷ و ۸ مهر ۱۳۹۵

HVAC2016-85078

# بررسی آزمایشگاهی تاثیر نانوسیال بر عملکرد حرارتی لوله های حرارتی نوسانی

محمد سیاحی[۱]، مجتبی ماموریان[۲*]، متین قدیری[۳]

۱- کارشناسی ارشد، تبدیل انرژی، دانشگاه فردوسی، مشهد
۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد
۳- کارشناسی ارشد، تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی شاهرود،شاهرود
* مشهد، صندوق پستی ۹۱۷۷۹۴۸۹۷۴، mamourian@um.ac.ir

**چکیده**

سیستم‌های خنک‌کننده با عملکرد بالا به یکی از چالش‌ها و مورد توجه مهندسان در صنعت تبدیل شده است. لوله‌های حرارتی نوسانی راه‌حل مناسبی برای رفع این نگرانی می-باشد. نانو سیالات نیز به علت هدایت حرارتی بالاتر و خواص انتقال حرارتی بالا در سال‌های اخیر مورد توجه نیز قرار گرفته است. عملکرد لوله‌های 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 میلی‌متر و قطر خارجی 4 میلی‌متر است. ارتفاع هر دور 280 میلی‌متر که طول قسمت اواپراتور و کندانسور 100 میلی‌متر وقسمت آدیاباتیک 80 میلی‌متر می باشد. از نانوسیال آهن $Fe_3O_4$ در چهاردرصد جرمی (0.1، 0.3 ، 1 و 3) پس از ساخت نانوذره و نانوسیال از روش دومرحله‌ای با نسبت پر شدگی 60 درصد برای آزمایشات استفاده شده است. مقاومت حرارتی سیال رسم شد و نشان داد که مقاومت حرارتی با افزایش توان ورودی کاهش می‌یابد، نتایج نشان داد که عملکرد حرارتی نانوسیال نسبت به آب بهتر و بهترین عملکرد نانو سیال در غلظت 1% جرمی می‌باشد.

**کلیدواژگان**

لوله حرارتی نوسانی، نانو سیال، فروفلویئد، سیال عامل

# Exprimental Investigation of the influence of nanofluid on the heat performance of pulsating heat pipe

**Mohammad Sayyahi[1], Mojtaba Mamourian[2*], Matin Ghadiri**

1- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
3- Department of Mechanical Engineering, University of Shahrood, Shahrood, Iran.
* P.O.B. 9177948974 Mashhad, Iran. mamourian@um.ac.ir

**Abstract**

One of the challenges of engineers in the industry is High performance cooling systems. Pulsating heat pipe is suitable solution for eliminating this concern. also Nanofluid has attract attention due to higher thermal conductivity and high thermal transfer properties in recent years. The performance of Pulsating heat pipes is according to 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 length of the evaporator and condenser is 100 mm and height of adiabatic section is 80 mm. Fero fluids Fe3O4 four percentage by mass (0.1, 0.3, 1, and 3) After a two-step method of making nanoparticles and nano fluids fill ratio of 60% is used for experiments. Thermal resistance of the fluid were drawn and it was shown that the thermal resistance decreases with increasing input power, The results showed that thermal performance of nano fluid better than water and 1% mass concentration is of best performance.

**Keywords**

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

## ۱- مقدمه

لوله‌های حرارتی در بسیاری از موارد یکی از بهترین گزینه‌ها برای انتقال گرما و وسایل موثر برای بازیافت حرارت اتلافی محسوب می‌شوند. 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 مزیت‌های آن به شمار می‌رود. از جمله کارایی‌های لوله-های حرارتی نوسانی می‌توان به خنک‌کردن وسایل الکتریکی و تراشه‌های کوچک بدون نیاز به فن اشاره کرد. این وسایل توانایی بکارگیری در بازیاب-های حرارتی نیروگاه و دستگاه‌های تهویه مطبوع را نیز دارا می باشند. یکی از کاربردهای مهم لوله حرارتی استفاده به عنوان مبدل جهت بازیافت حرارت اتلافی دودکش‌ها می‌باشد. مبدل لوله حرارتی در بسیاری از موارد نظیر: دیگ بخار، کوره‌ها و خشک‌کن برای ذخیره انرژی استفاده می‌شود. آزمایشات انجام شده نشان داده‌اند که لوله‌های حرارتی نوسانی توانایی انتقال بارهای حرارتی بیشتری نسبت به لوله‌های حرارتی معمول دارند و همچنین این وسایل می-توانند حرارت را به مسافت‌های طولانی‌تری منتقل کنند.

تمامی لوله‌های حرارتی که از نظر شکل ظاهری و عملکرد ترمودینامیکی و دینامیک سیالاتی مشابه ساختار نشان داده شده درشکل1 اند به عنوان لوله‌های حرارتی نوسانی خوانده می‌شوند.

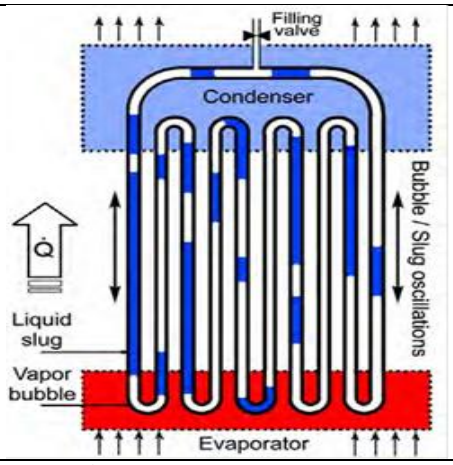


**Fig. 1** Schematic of pulsating heat pipe

**شکل ۱** شماتیک لوله حرارتی نوسانی

ساختمان آنها متشکل از تعدادی لوله باریک با تعدادی پیچ و خم است که به طور نسبی از سیال عامل پر شده است. این لوله‌ها می‌توانند اتصالی به دو صورت سیکل باز یا سیکل بسته داشته باشد و برخلاف لوله‌های حرارتی متعارف، در ساختمان آنها از هیچ فتیله‌ای استفاده نشده است. حداقل یک منبع حرارتی با سیستم در ارتباط است که به آن اواپراتور[1] یا هیتر و حداقل یک منبع دریافت‌کننده حرارت با سیستم در ارتباط است که به آن کندانسور[2] 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 لوله‌حرارتی قسمت متحرک مکانیکی ندارند، لذا تعمیر و نگهداری آنها به حداقل می‌رسد. تماس بین جریان‌های اتلافی وگرم 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 نظرگرفته 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 بطور جزیی 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 بطور نامتقارن و کاملا تصادفی در لوله‌ها پخش می‌شود. هیچ کنترل خارجی روی نحوه‌ی 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 توامان صورت می‌گیرد که این به نوبه خود مزیت دیگری است که در لوله حرارتی نوسانی نسبت به لوله‌های حرارتی متعارف که فقط انتقال حرارت نهان دارند، وجود دارد. قطرات مایع و حباب[3]های بخار بدلیل نوسانات و ارتعاشات فشار که در درون سیستم بوجود می‌آید، منتقل می‌شوند و حرارت را نیز به همراه خود منتقل می‌کنند. لوله حرارتی نوسانی الزاما یک وسیله مبدل حرارتی غیر تعادلی است که بوسیله 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 بهره برداری و استفاده از نقطه نظر مهندسی از سیستم لوله‌های حرارتی نوسانی توسط هیساترو آکاچی در سال 1990 انجام گرفت. او اولین نمونه‌ها از خانواده لوله‌های حرارتی نوین را در 24 شکل مختلف ساخت.[1] این مجموعه لوله‌های حرارتی چرخه ای 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. آکاچی 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، ازجمله: 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 وکندانسور 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 نانو سیال 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 اکسیدآلومینیوم $Al_2O_3$–water با قطر 56 نانومتر را بر روی لوله‌های حرارتی نوسانی پرداختند. آنها اثر نسبت پرشدگی، کسرجرمی 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 کسرجرمی 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 نانو ذرات اکسید آلومینیوم را با سیال پایه آب بر روی لوله های 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

[1] evaporator
[2] condenser
[3] Bubble/ Slug

این آزمایش 50% و هنگامی‌که 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 تاثیر $SiO_2$ با درصد جرمی و توان‌های متفاوت و مقایسه عملکرد حرارتی با آب را بررسی کردند. آنها نشان دادند که درکسر 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 نانو سیال 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 بدلیل پیچیدگی و گستردگی پدیده‌های انتقال حرارت و جرم، جریان سیال دوفازی با الگوهای مختلف، آشفتگی و ناپایداری فشار و دما، جوشش، تقطیر و غیره بطور کامل شناخته نشده‌اند. داده‌های بدست آمده تاکنون از نظر کمی و کیفی محدود و غیرقابل اعتماد بوده، لذا نیاز به آزمایشات گسترده‌تر کاملا ضروری است. به طور کلی پارامترهای زیادی بر عملکرد لوله-های حرارتی نوسانی تاثیر گذارند که می‌توان به نسبت پرشدگی، شار حرارتی، نوع سیال عامل، قطر داخلی، طول اوپراتور، 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 می-کنیم.

## ۲-سیستم آزمایشگاهی

سیستم طراحی وساخته شده برای انجام آزمایش‌ها در شکل3 نشان داده شده است. این سیستم یک لوله حرارتی نوسانی سیکل بسته می‌باشد.

**Fig. 3** system setup

**شکل۳** سیستم آزمایش

لوله حرارتی ساخته شده از جنس مس شامل 6 دور لوله با قطر داخلی 2.2 میلی‌متر و قطر خارجی4 میلی‌متر است. ارتفاع هر دور لوله 280 میلی-متر می‌باشد که متشکل از اواپراتور وکندانسور به طول 100 میلی‌متر و ناحیه آدیاباتیک به طول 80 میلی‌متر است. توان حرارتی مورد نیاز قسمت اواپراتور توسط سیم حرارتی از جنس کروم نیکل با مقاومت الکتریکی 28.8 اهم استفاده شده است. چهار توان ورودی (25 ،50 ، 75، 100) وات به سیستم داده شده که توسط دیمر این توان‌ها کنترل می‌شود. ناحیه اواپراتور و آدیاباتیک با عایقی از جنس پتوی سرامیکی که تحمل دمایی بالایی دارد عایق شده تا اتلاف حرارتی تقریبا 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 می-شود. از یک پمپ خلا دارای توانایی 0.005 تور برای خلا کردن سیستم قبل از هر بار آزمایش استفاده شده است. برای آماده سازی نانوذرات روش دومرحله‌ای انتخاب شده است. ابتدا نانو ذرات سنتز شده و سپس به کمک روش‌هایی، آنها را درون سیال پایه مورد نظر پراکنده کرد. پس از آماده سازی نانوذرات $Fe_3O_4$ نوبت به آماده سازی نانوسیال می‌رسد. در این مرحله با توجه به درصد جرمی مطلوب، مقدار مورد نظر نانوذره در سیال پایه که در اینجا آب است پراکنده می‌شوند.[10] در این پژوهش چهاردرصد جرمی 0.1 و 0.3 و 1 و 3 درصد مورد مطالعه قرار گرفته است.

## ۳- 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 ازمایشات استفاده می‌کنیم. برای مقایسه عملکرد حرارتی آب و فروفلویئد از مقاومت حرارتی که برای لوله‌های حرارتی نوسانی به صورت زیر است، استفاده می‌شود :

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

در شکل 4 تغییرات مقاومت حرارتی بر حسب توان ورودی برای آب و چهار درصد جرمی فروفلوییید (0.1، 0.3، 1 و 3) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش توان ورودی مقاومت حرارتی کاهش می-یابد. 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 0.1تا 1 درصد ضریب هدایت حرارتی نانو سیال 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.

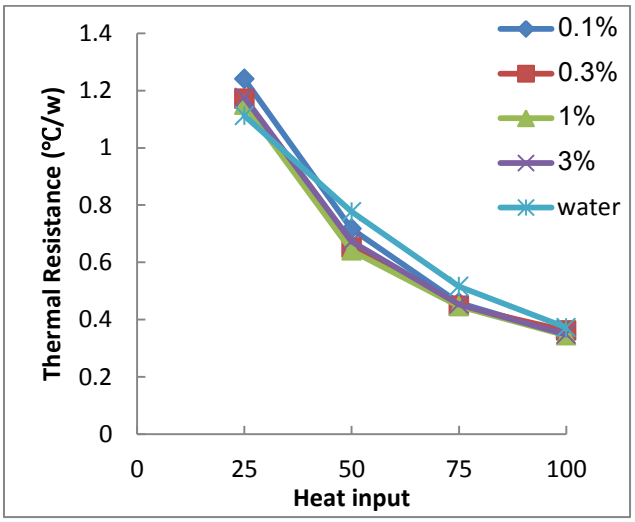


**Fig. 4** Variation of thermal resistance with heat power

**شکل ۴** تاثیر توان حرارتی ورودی بر مقاومت حرارتی

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 نانو سیال دارد که نشان‌دهنده آن است که استفاده از نانوسیال زمان 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. به عنوان مثال در 75 وات نسبت مقاومت حرارتی1% نسبت به آب مقطر 14 درصد کاهش پیدا کرده که می-توان گفت عملکرد حرارتی نسبت به آب 14 درصد بهبود یافته است.

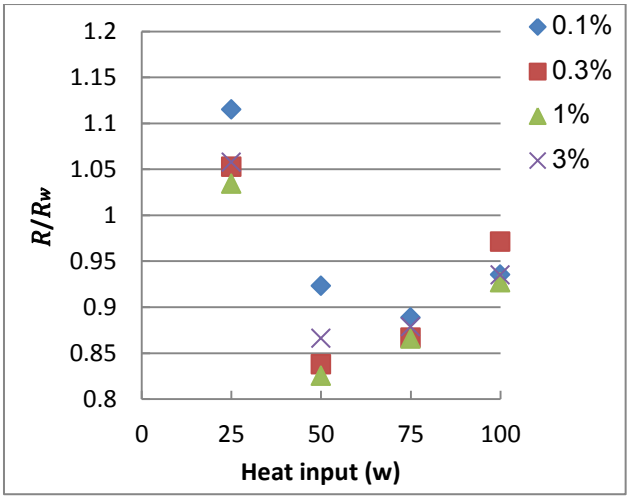


**Fig. 5** Variation of nanofluids Thermal resistance to water thermal resistance by input power ( different concentrations and filling ratio 60%)

**شکل۵** تغییرات نسبت مقاومت حرارتی نانوسیال به مقاومت حرارتی آب برحسب توان های ورودی (غلظت‌های متفاوت و نسبت پرشدگی 60%)

## ۴-نتیجه گیری 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.

## ۵- فهرست علایم

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

## ۶- مراجع


[۱] H. Akachi, *Structure of a heat pipe: US, 4921041* .

[۲] H. Akachi, F. Polasek, *Thermal control of IGBT modules in traction drives by pulsating heat pipes, in Proceeding of*, 8-12 .

[۳] 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 .

[٤] 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 .

[٥] J. Qu, H.-y. Wu, P. Cheng, *Thermal performance of an oscillating heat pipe with Al 2 O 3–water nanofluids*, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 2, pp .111-115 , 2010 .

[٦] 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 .

[٧] 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 .

[٨] 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 .

[٩] 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 .

[۱۰] 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.