

بهبود عملکرد لوله‌ی گرمایی نوسانی تک‌لُوپ بسته با تزریق میکروذرات مس

آزاده میهن‌دوست
مسعود زارع*
محمد بهشاد شفیعی
مرتضی خیاط

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران،
 استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران،
 m.zareh@srbiau.ac.ir
 استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران،
 استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران،
 mbshafi@sharif.edu،
 mkhayat@srbiau.ac.ir

چکیده

در این پژوهش آزمایشگاهی، عملکرد یک لوله‌ی گرمایی نوسانی تک‌لُوپ با ساختاری بسته در حضور سیال پایه (آب مقطر) و سیال حاوی میکروذرات مس مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور ارزیابی تاثیر پارامترهای مختلف بر کارایی لوله، مشخصه‌هایی نظیر توان گرمایی اعمالی بر تبخیرکن، نسبت پُرشدگی و غلظت میکروذرات مس مطالعه شدند. یافته‌ها نشان می‌دهند که رژیم جریان درون لوله برای توان‌های گرمایی پایین به صورت اسلاگ پلاگ بوده و در توان‌های گرمایی بالا به سمت جریان حلقوی پیش رفته است. لازم به ذکر است که مقاومت گرمایی لوله با افزایش توان گرمایی و غلظت میکروذرات مس کاهش یافته و حداقل مقدار آن در توان گرمایی ۶۰ وات و نسبت پُرشدگی ۶۰٪ برابر با $0/61^{\circ}\text{C}/\text{W}$ شده است. در نهایت با توجه به میزان خطاهای موجود برای هر پارامتر و به کمک رابطه‌ی هلمن، حداکثر مقدار عدم قطعیت برای آزمایش‌ها حدود ۸٪ محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی: لوله‌ی گرمایی نوسانی بسته، نسبت پُرشدگی، توان گرمایی، میکروذرات مس، آنالیز عدم قطعیت.

Improving the performance of a closed single turn pulsating heat pipe by injecting micro-coppers

A. Mihandoust

M. Zareh

M. Behshad Shafii

M. Khayat

Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
 Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
 Department of Mechanical Engineering, Sharif University of technology, Tehran, Iran
 Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract

In this experimental research, the performance of a close single turn pulsating heat pipe (CPHP) with distilled water as base fluid and distilled water including microparticles (micro-coppers) have been investigated. To evaluate the effect of different parameters on PHP performance, several characters like input powers, filling ratio and concentrations of micro-coppers were studied. Findings from experiments indicated that the multiphase flow regime inside the pipe was slug-plug in low powers but it approached to an annular flow in high value of heat inputs. Furthermore, it is needed to mention that the thermal resistance of the device with micro-coppers has decreased with enhancing in the concentration of micro-coppers and input powers and it has the minimum value ($0.61\text{degC}/\text{W}$) at filling ratio of 60%, at input power of 60W. Finally, according to any errors of each parameters and by using Holman methods, the maximum uncertainty of experiments was calculated about 8%.

Keywords: Close Pulsating Heat Pipe, Filling Ratio, Heat Input, Micro-Coppers, Uncertainty analysis.

۱- مقدمه

[2,3]. آب شیرین‌کن‌ها، آب‌گرمکن‌های خورشیدی، ترانزیستورها، مبادله‌کن‌های گرمایی تنها بخش کوچکی از کاربردهای لوله‌های گرمایی بوده که در مدل‌های گوناگون، دارای پتانسیل مناسبی جهت استفاده در بخش‌های مختلف صنعتی هستند [4-6]. لوله‌های گرمایی نوسانی، ابزارهایی با راندمان بالای گرمایی هستند که عملکرد آن‌ها ناشی از تغییر فاز دوره‌ای سیال درون لوله می‌باشد. از جمله مزیت‌های لوله‌های گرمایی نوسانی نسبت به مدل‌های رایج می‌توان به نبود فتهیل در ساختار آن‌ها، توانایی انتقال حرارت بالا در فواصل زیاد، استقلال گرانشی و ساختمان ساده‌ی آن‌ها اشاره کرد [7]. در لوله‌های نوسانی، تغییر فاز مهم‌ترین عامل در افزایش بازدهی

لوله‌های گرمایی، ابزارهای تبادل گرمایی هستند که حرارت را به سرعت از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر منتقل کرده و از آن‌ها با نام ابررسانای گرمایی یاد می‌شود. تجهیزات مذکور دارای آهنگ انتقال حرارت بالا و اتلاف گرمایی ناچیزی بوده که به دلیل مشخصات عملکردی مطلوب، همواره توجه ویژه‌ای را در بسیاری از زمینه‌ها همانند مدیریت و نگهداری قطعات الکترونیکی به خود جلب کرده‌اند [1]. لوله‌های گرمایی از سه بخش اصلی تبخیرکن (تبخیر کننده)، ناحیه‌ی آدیاباتیک و چگالنده (چگالنده) تشکیل شده‌اند

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.zareh@srbiau.ac.ir

سیستم بوده و بررسی حرکت حباب‌های بخار و قطرات مایع در بیان چگونگی جریان تاثیرگذار است [8,9].

اغلب مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی لوله‌های گرمایی نوسانی مربوط به سال‌های اخیر بوده و تاثیر پارامترهایی نظیر هندسه لوله، تعداد دور، زاویه‌ی قرارگیری لوله، نوع سیال عامل (نانوسیالات رایج و نانوسیالات هیبریدی)، نسبت پُرشدگی سیال^۱، شار گرمایی اعمالی و آرایش ساختاری لوله‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند [10-12]. تاثیر انواع سیال‌های عامل، نسبت‌های پُرشدگی و توان‌های گرمایی بر عملکرد لوله‌های نوسانی توسط باساکوتی و همکارانش برای سیال-های متانول، اتانول و کلراید آمونیوم انجام شده و در نهایت نتایج با داده‌های موجود برای آب‌دیونیزه مقایسه شده است [13]. از آنجا که عمده‌ی تحقیقات صورت گرفته در سال‌های اخیر بر چگونگی عملکرد لوله‌ها در حضور نانوسیالات معطوف بوده، ما و لین با انجام یکسری آزمایشات بر بهبود عملکرد لوله‌های نوسانی حاوی نانوسیالات نسبت به سیال پایه (فاقد نانوذره) تاکید داشته‌اند [14,15]. محمدی و همکارانش به بررسی اثر نانوسیال (Fe₂O₃) در لوله‌ی گرمایی نوسانی چهار حلقه‌ای، تحت میدان مغناطیسی و بدون حضور آن پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از فرولیدها باعث افزایش بازدهی سیستم گرمایی بخصوص در حضور میدان مغناطیسی می‌شود [16]. در ادامه ژو و همکارانش عملکرد لوله‌ی گرمایی نوسانی حاوی نانوسیال گرافن را مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند که بکارگیری نانوسیال گرافن سبب کاهش مقاومت گرمایی لوله شده و بهترین غلظت حجمی نانوسیال در محدوده ۲-۱۳/۸ درصد بوده است [17]. در مطالعه‌ی دیگر، نظری و همکارانش به بررسی تاثیر نانوسیال گرافن اکسید بر عملکرد لوله‌های گرمایی نوسانی پرداخته‌اند. با توجه به نتایج بدست آمده، بکارگیری نانوسیال مذکور سبب کاهش ۴۲ درصدی مقاومت گرمایی لوله نسبت به سیال خالص شده است [18]. به منظور بررسی عملکرد لوله‌های گرمایی نوسانی در حضور نانوسیالات هیبریدی، زوفار و همکارانش به مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی این مدل لوله پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که لوله گرمایی نوسانی در حضور نانوسیالات هیبریدی سریعتر به لحظه‌ی شروع نوسانات نسبت به سیال خالص رسیده است [19]. اخیرا سرافراز و همکارانش تاثیر نانوسیال آلومینا گلیکول را بر عملکرد گرمایی لوله‌ی نوسانی مسی بررسی نموده‌اند. طبق نتایج حاصل از این مطالعه، افزودن نانوسیال فوق سبب بهبود چشمگیر عملکرد گرمایی لوله گرمایی شده است [20].

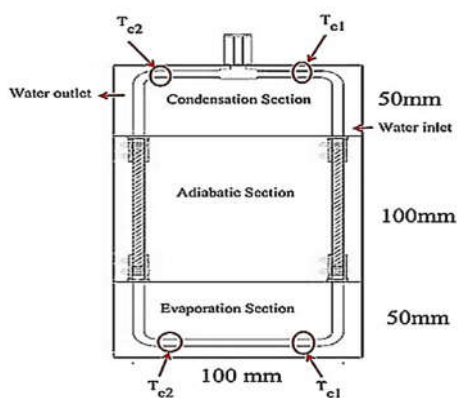
مطابق با مطالعات صورت گرفته توسط گروه نویسندگان مقاله، اثری مبنی بر بررسی عملکرد لوله‌های گرمایی نوسانی در حضور میکروذرات که دارای صرفه‌ی اقتصادی بسیار بالایی نسبت به نانوذرات همجنس هستند، یافت نشده است. مقاله‌ی فوق، به بررسی عملکرد لوله‌ی گرمایی نوسانی تک‌لویپ با ساختار بسته در حضور میکروذرات مس پرداخته است. علاوه بر مورد مذکور، تاثیر نسبت‌های پُرشدگی (۴۰ و ۶۰ درصد)، شارهای گرمایی مختلف (۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰

وات) و غلظت میکروذرات (۰/۰۶۲۵ و ۰/۱۲۵ گرم بر میلی‌لیتر) نیز بر روی عملکرد گرمایی لوله بررسی شده است.

۲- آزمایش

۲-۱- مجموعه دستگاه آزمایشگاهی و روش کار

لوله‌ی گرمایی نوسانی مورد استفاده در این آزمایش شامل سه ناحیه‌ی تبخیرکن، چگالنده و قسمت آدیاباتیک همانند شکل (۱) می‌باشد. طول تبخیرکن، چگالنده و ناحیه‌ی آدیاباتیک به ترتیب ۵۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر است. چگالنده مسی درون یک محفظه‌ی شیشه‌ای با ابعاد ۶×۱۲×۲۵ میلی‌متر مکعب قرار دارد.



شکل ۱- لوله‌ی گرمایی نوسانی

دو مدخل ورودی و خروجی در محفظه تعبیه شده که آب با دمای ۲۰ درجه‌ی سلسیوس را به طور مداوم به آن وارد و از آن خارج می‌کند. مدخل ورودی دارای فاصله ۲ سانتی‌متری از کف محفظه و مدخل خروجی در فاصله‌ی ۸ سانتی‌متری کف قرار دارد. تبخیرکن مسی در قسمت تحتانی لوله قرار گرفته و به دستگاه واریاک (جریان برق مستقیم) متصل است. توان‌های گرمایی اعمالی توسط تبخیرکن دارای مقادیر ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ وات می‌باشد. ناحیه‌ی آدیاباتیک در قسمت میانی لوله و از جنس پیرکس می‌باشد. قطر داخلی و خارجی لوله در تمامی قسمت‌های تبخیرکن، چگالنده و ناحیه‌ی آدیاباتیک به ترتیب ۴ و ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به نوع سیال عامل، محدوده‌ی مجاز برای قطر لوله‌ی گرمایی نوسانی از معادله‌ی (۱) تبعیت می‌کند [21]:

$$0/7 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \leq D \leq 1/8 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \quad (1)$$

ρ چگالی بخار و ρ_v چگالی مایع، L کشش سطحی، σ در رابطه‌ی (۱)، گرانش زمین است. به منظور انجام آزمایش ابتدا لوله‌ی گرمایی g نوسانی توسط پمپ خلا هواگیری شد. در ادامه آب مقطر به عنوان سیال عامل با ویژگی‌های موجود در جدول ۱ و با نسبت‌های پُرشدگی مختلف (۴۰ و ۶۰ درصد) از طریق یک سرنگ به درون لوله تزریق شد. ستاپ آزمایشگاهی و شماتیک آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

¹ Filling ratio

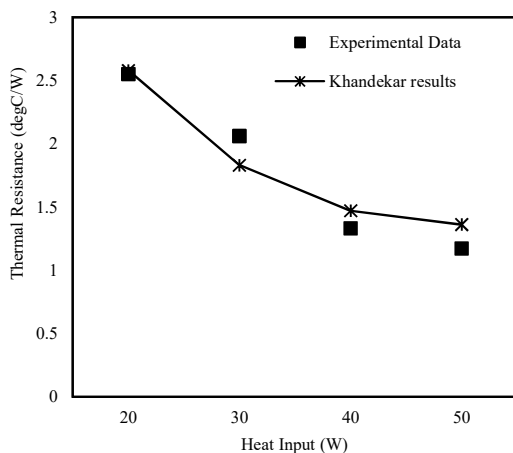
² Ferrofluid

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اعتبارسنجی داده‌ها

نتایج آزمایشگاهی لوله‌ی گرمایی نوسانی حاوی آب مقطر در نسبت پُرشدگی ۶۰ درصد برای توان‌های گرمایی مختلف، با داده‌های خروجی از مطالعه‌ی خندکار^۱ بر اساس مدل شبکه عصبی مقایسه گردید [23]. نمودار شکل (۳) نتایج قابل قبولی را با خطای متوسط ۷/۳۷ درصد برای سه مرتبه تکرار آزمایش نشان می‌دهد.

داده‌های آزمایشگاهی فوق برای لوله‌ی گرمایی تک‌لپ مسی با ناحیه‌ی آدیباتیک پیرکسی^۲ که دارای سیستم مشابه خنک‌کاری آبی با دمای ۲۰ درجه سلسیوس، در توان‌های اعمالی مشابه و نسبت پُرشدگی ۶۰ درصد، برای نسبت مشابه قطر خارجی به داخلی $(D_o/D_i=3/2)$ ، با نتایج خروجی از مطالعه خندکار مقایسه گردید.



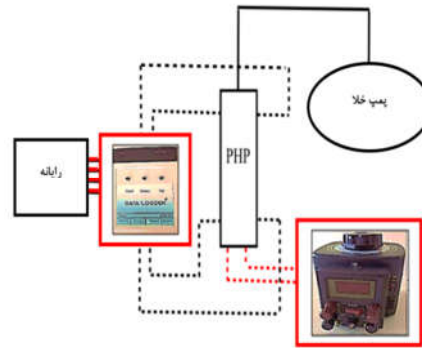
شکل ۳- اعتبارسنجی مدل آزمایشگاهی لوله‌ی گرمایی نوسانی برای $(D_o/D_i=3/2)$

۳-۲- تاثیر نسبت پُرشدگی بر عملکرد لوله

در برخی منابع بهترین محدوده‌ی انتخابی برای نسبت پُرشدگی بین ۲۰ تا ۸۰ و در برخی بین ۲۰ تا ۶۰ درصد ذکر شده است. مقادیر پایین نسبت پُرشدگی خطر خشک شدگی^۳ تبخیرکن و مقادیر بالای نسبت پُرشدگی احتمال عدم ایجاد شرایط ضربانی در لوله را باعث می‌شود. به همین دلیل در این پژوهش از نسبت‌های پُرشدگی ۴۰ و ۶۰ درصد استفاده شد. تغییرات مقاومت گرمایی لوله‌ی نوسانی حاوی آب مقطر نسبت به توان‌های گرمایی مختلف در نسبت‌های پُرشدگی ۴۰ و ۶۰ درصد، در شکل ۴ نمایش داده شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی آب مقطر در فشار اتمسفر [21]

سیال عامل	آب مقطر
دمای نقطه جوش °C	۱۰۰
چگالی Kg/m ³	۹۹۸
گرمای ویژه KJ/Kg.C	4/18
رسانایی گرمایی W/m.C	0/559
تنش سطحی N/m ²	72/8×10 ³



شکل ۲- مجموعه دستگاه آزمایشگاهی و طرحواره آن

با اعمال توان‌های گرمایی مختلف (۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ وات) توسط دستگاه واریاک مدل (DELTA MST)، تمامی اطلاعات دمایی ناحیه چگالنده و تبخیرکن به کمک ترموکوپل‌های مدل k به دستگاه دیتالاگر مدل (DATA LOGGER®) ارسال گردید.

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی میکروذرات مس [22]

میکروذره	مس
دمای نقطه جوش K	۲۸۳۵
دمای نقطه ذوب K	۱۳۵۷
رسانایی گرمایی W.K ⁻¹ .m ⁻¹	۴۰۱
چگالی Kg.m ⁻³	۸۹۶۰
اندازه μm	۴۵

۲-۲- روند آنالیز داده‌ها

با قرار دادن چهار ترموکوپل (دو عدد در قسمت تبخیرکن T_{e1} و T_{e2}) و دو عدد در قسمت چگالنده (T_{c1} و T_{c2}) و محاسبه‌ی دمای متوسط هر قسمت از رابطه‌ی (۲)، مقاومت گرمایی لوله همانند رابطه‌ی (۳) استخراج خواهد شد [21].

$$T_{avg} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 T_i \quad (2)$$

$$R_{PHP} = \frac{T_{avg,e} - T_{avg,c}}{Q = v \times I} \quad (3)$$

در روابط (۲) و (۳)، T_{ave} دمای متوسط برای هر کدام از قسمت‌های تبخیرکن و چگالنده، Q توان گرمایی و R_{PHP} مقاومت گرمایی سیستم است. برای یک توان گرمایی مشخص، اختلاف دمایی اندک میان قسمت‌های تبخیرکن و چگالنده نشانگر انتقال حرارت مناسب در سیستم است. نتایج نشان می‌دهند که لوله‌ی گرمایی نوسانی در توان‌های گرمایی پایین حداقل و حداکثر مقادیر دمایی ۲۰ و ۹۰ درجه را در طول آزمایش تجربه خواهد کرد.

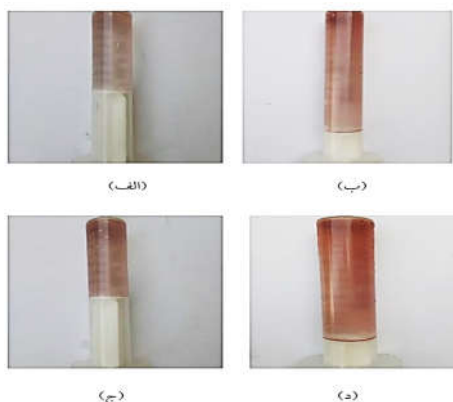
¹ Khandekar

² Pyrex

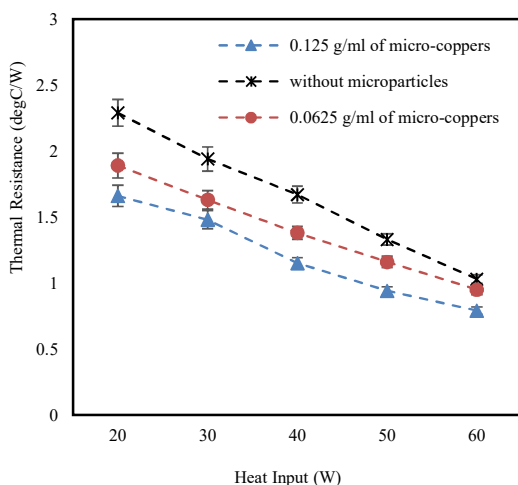
³ Dry out

۳-۳- تاثیر حضور میکروذرات مس بر عملکرد لوله

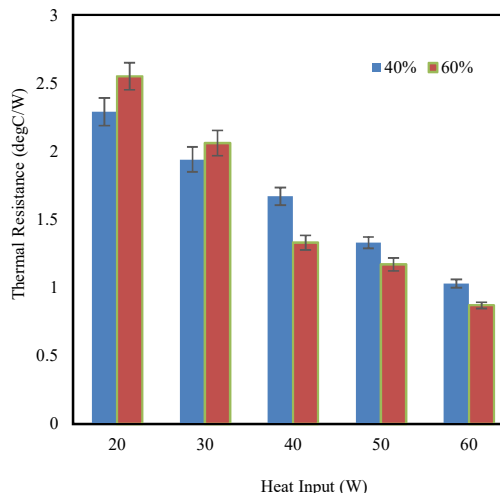
در شکل ۵ آب مقطر حاوی میکروذرات مس در دو غلظت ۰/۰۶۲۵ و ۰/۱۲۵ گرم بر میلی‌لیتر، در دو نسبت پُرشدگی ۴۰ و ۶۰ درصد به ترتیب در ردیف (الف و ب) و (ج و د) نمایش داده شده است. شکل‌های ۶ و ۷ تغییرات مقاومت گرمایی سیستم در مقابل توان‌های گرمایی مختلف و دو غلظت ۰/۰۶۲۵ و ۰/۱۲۵ گرم بر میلی‌لیتر برای نسبت‌های پُرشدگی ۴۰ و ۶۰ درصد را نشان می‌دهند. به نظر می‌رسد که افزودن میکروذرات به سیال عامل سبب افزایش اغتشاش درون لوله بویژه در قسمت تبخیرکن و جلو انداختن لحظه‌ی شروع نوسانات در لوله‌ی گرمایی می‌شود. از طرفی حضور میکروذرات مس به دلیل داشتن رسانایی گرمایی بالا، سبب افزایش انتقال حرارت درون لوله نسبت به حالت سیال پایه بوده است. در ادامه قابل ذکر است که حضور میکروذرات مس در ناحیه‌ی تبخیرکن سبب تشکیل جوشی مستعد جوشش هسته‌ای بوده که همین امر انتقال حرارت جوشی را افزایش می‌دهد.



شکل ۵- سیال عامل پایه (آب مقطر) حاوی میکروذرات مس در دو غلظت ۰/۰۶۲۵ و ۰/۱۲۵ گرم بر میلی‌لیتر و برای دو نسبت پُرشدگی ۴۰ و ۶۰ درصد به ترتیب در ردیف (الف و ب) و (ج و د)



شکل ۶- تغییرات مقاومت گرمایی سیستم در غلظت‌های مختلف میکروذرات مس و نسبت پُرشدگی ۴۰٪



شکل ۷- تغییرات مقاومت گرمایی لوله حاوی آب مقطر نسبت به توان گرمایی

نتایج نشان می‌دهند که برای لوله‌ی گرمایی نوسانی فاقد میکروذرات مس و در توان‌های گرمایی پایین (کمتر از ۴۰ وات) عملکرد لوله در نسبت پُرشدگی ۴۰ درصد، مناسب‌تر خواهد بود. لازم به ذکر است که در نسبت‌های پایین پُرشدگی و به ازای توان‌های گرمایی بالا، رژیم جریان به سمت جریان حلقوی پیش رفته که مناسب نیست. بنا به شکل ۴، در توان‌های گرمایی بالا لوله‌ی گرمایی نوسانی دارای بهترین عملکرد خود در نسبت پُرشدگی ۶۰ درصد می‌باشد. از جمله بزرگترین چالش‌های موجود در لوله‌های گرمایی نوسانی با نسبت پُرشدگی بالا، احتمال عدم تشکیل حباب و عدم ایجاد شرایط مناسب جهت ایجاد شرایط نوسانی در توان‌های گرمایی پایین است. در نهایت برای لوله‌ی فوق در شرایط فاقد میکروذره، حداقل مقاومت گرمایی ۰/۸۷ degC/W بوده که در توان گرمایی ۶۰ وات و نسبت پُرشدگی ۶۰ درصد حاصل شده است.

در نهایت کمترین مقدار مقاومت گرمایی (0/61 degC/W) برای لوله‌ی نوسانی دارای غلظت ۰/۱۲۵ گرم بر میلی‌لیتر از میکروذره مس در نسبت پُرشدگی ۶۰ درصد و توان گرمایی ۶۰ وات رخ داده است. حداکثر افزایش عملکرد گرمایی لوله‌ی نوسانی حاوی میکروذرات مس، حدود ۳۷/۶۱ درصد محاسبه شده است.

۴-۳- آنالیز عدم قطعیت

از آنجا که هر مطالعه‌ی آزمایشگاهی بدون خطا نبوده، در نتیجه ارزیابی عدم قطعیت داده‌ها در این آزمایش ضروری می‌باشد. به منظور بررسی این خطا از روش هلمن^۱ جهت محاسبه‌ی عدم قطعیت داده‌ها استفاده شد [24]. برای ترموکوپل‌ها عدم قطعیتی معادل با ۰/۱ کلوین و برای توان‌های ورودی به شکل مشخص شدت جریان الکتریکی و ولتاژ الکتریکی، دقت‌های ۰/۰۳ آمپر و ۰/۳ وارد شد. طبق روابط (۴) و (۵) حداکثر مقدار عدم قطعیت حدوداً ۰/۸ بوده که رقم قابل قبولی است.

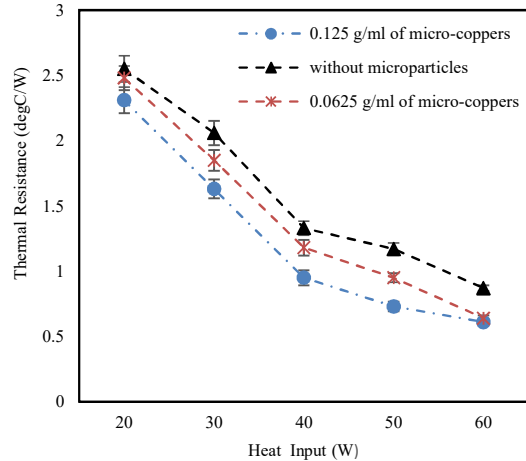
$$\frac{\delta Q}{Q} = \sqrt{\left(\frac{\delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\delta I}{I}\right)^2} \quad (4)$$

$$\frac{\delta R_{PHF}}{R} = \sqrt{\left(\frac{\delta T_e}{T_e - T_c}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_c}{T_e - T_c}\right)^2 + \left(\frac{\delta Q}{Q}\right)^2} \quad (5)$$

۴- نتیجه‌گیری

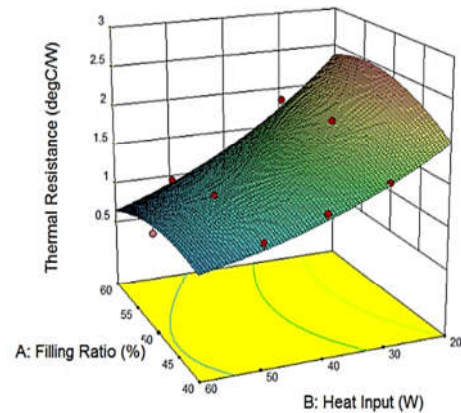
مهم‌ترین هدف مدنظر در این مطالعه بهبود عملکرد گرمایی لوله‌ی گرمایی نوسانی تک‌لوپ با ساختار بسته ضمن تزریق میکروذرات مسی در مقادیر مختلف بوده است. علاوه بر مورد مذکور، تاثیر توان‌های گرمایی اعمالی (بین ۲۰ تا ۶۰ وات)، نسبت‌های پُرشدگی (۴۰ و ۶۰ درصد) نیز بر روی عملکرد گرمایی لوله بررسی شد. در نهایت مهم‌ترین یافته‌های حاصل از پژوهش عبارتند از:

- ۱- نتایج کلی نشان می‌دهند که مقاومت گرمایی لوله در حضور آب مقطر و همچنین سیال حاوی میکروذرات مس با افزایش توان گرمایی، کاهش می‌یابد.
- ۲- نتایج نشان می‌دهند که مقاومت گرمایی لوله با افزایش غلظت میکروذرات، کاهش می‌یابد.
- ۳- حداقل مقدار مقاومت گرمایی 0/61°C/W بوده که در نسبت پُرشدگی ۶۰ درصد و توان گرمایی ۶۰ وات برای لوله‌ی حاوی 0/125g/ml از میکروذرات رخ داده است.
- ۴- حضور میکروذرات مس به دلیل رسانایی گرمایی بالا و ایجاد اغتشاش درون لوله سبب افزایش انتقال حرارت می‌شوند.
- ۵- حضور میکروذرات مس در تبخیرکن و تشکیل نواحی جوش هسته‌ای، به جلو انداختن تشکیل حباب و شروع نواسانات کمک می‌کند.

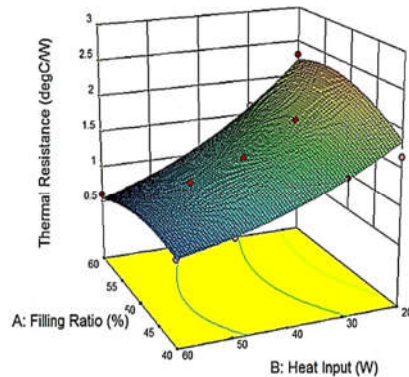


شکل ۷- تغییرات مقاومت گرمایی سیستم در غلظت‌های مختلف میکروذرات مس و نسبت پُرشدگی ۶۰٪

به منظور مشاهده‌ی همزمان تغییرات مقاومت گرمایی لوله‌ی حاوی میکروذرات مس با دو متغیر توان گرمایی و نسبت پُرشدگی، شکل‌های ۸ و ۹ نمودارهای سه بعدی مناسبی در غلظت‌های مختلف ارائه داده اند.



شکل ۸- نمودار سه‌بعدی تغییرات مقاومت گرمایی لوله نسبت به توان‌های ورودی و نسبت پُرشدگی برای غلظت 0/0625g/ml



شکل ۹- نمودار سه‌بعدی تغییرات مقاومت گرمایی لوله نسبت به توان‌های ورودی و نسبت پُرشدگی برای غلظت 0/125g/ml

¹ Holman

۵- نمادها

V	ولتاژ الکتریکی (V)
I	جریان الکتریکی (A)
R _{PHP}	مقاومت گرمایی لوله (°C/W)
T _c	دمای چگالنده (°C)
T _e	دمای تبخیرکن (°C)
Q	توان گرمایی ورودی (W)
PHP	لوله گرمایی نوسانی (-)
ρ _l	چگالی مایع (kg/m ³)
ρ _v	چگالی بخار (kg/m ³)
σ	کشش سطحی (N/m)

۶- مراجع

- diameter channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 89, pp. 817-828, 2015.
- [13] Bastakoti D., Zhang H., Cai W., Li F., An experimental investigation of thermal performance of pulsating heat pipe with alcohols and surfactant solutions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 117, pp. 1032-1040, 2017.
- [14] Ma H. B., Wilson C., Yu Q., Park K., Choi U. S., Tirumala M., An Experimental Investigation of Heat Transport Capability in a Nanofluid Oscillating Heat Pipe. *Journal of Heat Transfer*. Vol.128, pp.1213–1216, 2006.
- [15] Lin Y. H., Kang S. W., Chen H. L., Effect of Silver Nanofluid on Pulsating Heat Pipe Thermal Performance. *Applied Thermal Engineering*, Vol.28, pp.1312–1317, 2008.
- [16] Mohammadi M., Mohammadi M., Shafii M. B., Experimental Investigation of a Pulsating Heat Pipe Using Ferrofluid (Magnetic Nanofluid). *Journal of Heat Transfer*, Vol. 134, 2012.
- [17] Zhou Y., Cui X., Weng J., Shi S., Han H., Chen C., Experimental investigation of the heat transfer performance of an oscillating heat pipe with graphene nanofluids. *Powder Technology*, Vol. 332, pp.371-380, 2018.
- [18] Nazari M. A., Ghasempour R., Ahmadi M. H., Heydarian G., Shafii M. B., Experimental investigation of graphene oxide Nanofluid on heat transfer enhancement of pulsating heat pipe. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 91, pp.90-94, 2018.
- [19] Zufar M., Gunnasegaran P., Kumar H. M., Ng K. C., Numerical and experimental investigations of hybrid nanofluids on pulsating heat pipe performance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 146, 2020.
- [20] Sarafraz M. M., Hormozi F., Experimental study on the thermal performance and efficiency of a copper based thermosyphon heat pipe charged with alumina-glycol based nanofluids. *Powder Technology*, Vol. 266, pp.378-387, 2014.
- [21] Kim B., Li L., Kim J., Kim D., A study on thermal performance of parallel connected pulsating heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, Vol.126, pp.1063-1068, 2017.
- [22] Meija J., Coplen T. B., Berglund M., Brand W. A., Bievre P. D., Groning M., Holden N. E., Irrgeher J., Loss R. D., Walczyk T., Prohaska T., Atomic weights of the elements 2013 (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, Vol. 88, pp.265-291, 2016.
- [23] Khandekar S., *Thermo-hydrodynamics of closed loop pulsating heat pipes*, Ph.D. Thesis, Institut für Kernenergetik und Energiesysteme der Universität Stuttgart, 2004.
- [24] Holman j. p., *experimental methods for engineers*, 7th ed., McGraw-Hill, New York, 2001.
- [1] Khandekar S., Groll M., an insight into thermo-hydrodynamic coupling in closed loop pulsating heat pipes. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 43, pp. 13-20, 2003.
- [2] Khandekar S., Groll M., Charoensawan P., Terdtoon P., Pulsating Heat Pipes: Thermo-fluidic Characteristics and Comparative Study with Single Phase Thermosyphon. *Proceedings of 12th International Heat Transfer Conference*, 2002.
- [3] Faghri A., *Heat pipe science and technology*. Washington, DC: Taylor and Francis, 1995.
- [4] Nekrashevych I., Nikolayev V. S., Reprint of: Effect of tube heat conduction on the pulsating heat pipe start-up. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 126, pp. 1077-1082, 2017.
- [۹] هوشمند پ. شفیی م ب. محسن زاده م. بررسی نظری و تجربی تولید آب شیرین کن‌های گرمایی در حالت فعال و غیر فعال، مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک تبریز، ش. 3، ص ۲۵۱-۲۵۵، ۱۴۰۰.
- [6] Shafii M. B., Faghri A., Zhang Y., Thermal modeling of unlooped and looped pulsating heat pipes. *ASME J. Heat Transf*, Vol. 123, pp. 1159-1171, 2001.
- [7] Funkano T., Characteristics of Gas-Liquid two phase flow in a capillary tube. *Journal of Engineering and Design*, pp. 59-68, 1993.
- [8] Glynne Jones P., Tudor M. J., Beeby S. P., White N. M., An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems. *Sensors and Actuators*, pp. 344-349, 2004.
- [9] Jiaqiang E., xiaohuan Z., Haili L., Jianmei C., Wei Z., Qingguo P., Field synergy analysis for enhancing heat transfer capability of a novel narrow-tube closed oscillating heat pipe. *Applied Energy*, Vol. 175, pp.218-228, 2016.
- [10] Hada S., Jain D., Effects of Filled Ratio, Heat Input and Orientation on Closed Loop Pulsating Heat Pipe. *International journal of scientific research in science engineering and technology*, Vol. 3, pp. 2394-4099, 2016.
- [11] Han H., Cui X., Zhu Y., Sun S., A comparative study of the behavior of working fluids and their properties on the performance of pulsating heat pipes (PHP). *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 82, pp.138-147, 2014.
- [12] Kwon H., Kim S., Experimental investigation on the thermal performance of a micro pulsating heat pipe with a dual-