



بررسی تجربی لوله‌های حرارتی نوسانی و تأثیر تغییر طول ناحیه تبخیر کننده بر عملکرد آن

شهاب حقایق^۱، محمد حسن سعیدی^{۲*}، حسین افشین^۳، محمد بهشاد شفیعی^۴، علی ادیب‌نیا^۵

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۳- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۴- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۵- دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

* تهران، صندوق پستی ۹۵۶۷-۱۱۱۵۵، saman@sharif.edu

چکیده- توسعه تجهیزات الکترونیکی با عملکرد بالا، به وسایل انتقال حرارت با ظرفیت بالا نیاز دارد. لوله‌های حرارتی نوسانی نسبت به لوله‌های حرارتی معمولی عملکرد بهتری دارند و می‌توانند برای بهبود خنک کردن وسایل الکترونیکی در آینده مورد استفاده قرار گیرند. همچنین لوله‌های حرارتی به عنوان مبدل‌های انتقال حرارت در بسیاری از کاربردهای صنعتی قابلیت استفاده دارند. در این تحقیق یک لوله حرارتی نوسانی با پنج دور ساخته شده و در آن از نانوسیال فروفلوئید استفاده شده است و تأثیر طول ناحیه تبخیر کننده بر عملکرد حرارتی آن به صورت تجربی بررسی شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که عملکرد لوله حرارتی با افزایش طول ناحیه تبخیر کننده بهبود می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: لوله حرارتی نوسانی، مقاومت حرارتی، نانوسیال، طول اواپراتور.

Effects of evaporator's length on pulsating heat pipes' thermal performance

Sh. Haghayegh¹, M.H. Saidi^{2*}, H. Afshin³, M.B. Shafii⁴, A. Adibnia⁵

1- MSc Student, Mech. Eng., Sharif Univ., Tehran, Iran

2- Prof., Mech. Eng., Sharif Univ., Tehran, Iran

3- Assist. Prof., Mech. Eng., Sharif Univ., Tehran, Iran

4- Assoc. Prof., Mech. Eng., Sharif Univ., Tehran, Iran

5- BSc Student, Mech. Eng., Sharif Univ., Tehran, Iran

* P.O.B. 11155-9567 Tehran, Iran. saman@sharif.edu

Abstract- Developing the high performance electrical devices requires high capacity heat transfer manners, which could be the pulsating heat pipes (PHPs). PHPs have a better performance in compare with conventional heat pipes (HPs), besides, they can be used to improve cooling systems for electrical devices, in future. There are some other applications for PHPs in other industries as heat transfer converters, either.

The effect of the evaporator's length on the PHPs' performance is investigated experimentally by hiring a five turns PHPs and ferrofluid as set-up and working nanofluid, respectively. The results show that PHPs' performance is enhanced by increasing the evaporator's length.

Keywords: Pulsating Heat Pipes (PHPs), Thermal Resistance, Nanofluid, Evaporator's Length.

۱- مقدمه

لوله‌های حرارتی نوسانی برای اولین بار توسط آکاچی در سال ۱۹۹۰ معرفی شدند [۱]. اولین نمونه‌ها از خانواده لوله‌های حرارتی نوسانی در این سال توسط آکاچی در ۲۴ شکل مختلف ساخته شدند که لوله‌های حرارتی چرخه‌ای^۱ نام گرفتند. سیالات عاملی که برای استفاده در لوله‌های حرارتی معمولی مناسب نبودند، در این لوله‌ها می‌توانستند به کار گرفته شوند و دارای کارایی بالاتر یا لااقل مشابه بودند [۱].

مازاوا و همکاران [۲] در سال ۱۹۹۵، برای اولین بار یک نمونه از لوله‌های حرارتی نوسانی مدار باز را آزمایش کردند. سامانه آزمایشگاهی آن‌ها از ۲۰ دور لوله مسی با قطر داخلی ۱/۰ mm به طول مجموع ۲۴ متر تشکیل شده بود. آن‌ها از سیال عامل R-142b استفاده کردند و توسط گرمکن‌های برقی که در قسمت تبخیرکننده قرار داده شده بود، حرارت به سیستم داده می‌شد و قسمت چگالنده نیز به وسیله جریان آب خنک می‌شد. آن‌ها تأثیر نسبت پرشدگی و زاویه شیب سیستم نسبت به افق را به طور آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها انتقال حرارت بهتر لوله حرارتی نوسانی را در حالت عمودی نسبت به حالت افقی نشان داد. آن‌ها همچنین نشان دادند که بهترین نسبت پرشدگی سیال عامل ۵۰٪ است.

کاوارا و همکاران [۳] در سال ۱۹۹۶، با استفاده از رادیوگرافی پروتونی از درون لوله‌های حرارتی نوسانی عکس-برداری کرده و حرکت‌های ناگهانی و نوسانی سیال را ثبت کرده‌اند. لوله حرارتی نوسانی آزمایش شده با ایجاد شیارهای مستطیلی شکل به ابعاد $0.7 \times 0.6 \text{ mm}^2$ بر روی یک صفحه به ابعاد $190 \times 50 \times 1.3 \text{ mm}^3$ ساخته شده بود. آن‌ها بیان داشتند که جریان غالب دوفازی در لوله حرارتی نوسانی به صورت الگوی قطره - حباب^۲ می‌باشد.

تونگ و ونگ [۴] در سال ۲۰۰۱، از رفتار لوله حرارتی نوسانی تصویر برداری کردند. آن‌ها از یک لوله حرارتی شیشه‌ای با ۱۰ دور و قطر داخلی ۱/۸ mm استفاده کردند و نشان دادند که توزیع نامتقارن حباب‌ها و قطرات و همچنین جوشش غیر همزمان، عوامل اصلی رانش سیال و نوسان آن هستند. در این تحقیق نشان داده شد که حداقل شار حرارتی، برای ایجاد و

شروع یک جریان نوسانی پایدار مورد نیاز است.

چارونسساوان و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۳، نتایجی را برای لوله حرارتی نوسانی حلقه بسته مسی با ۳ سیال عامل (آب، اتانول و R-123) و دو قطر داخلی ۱ mm و ۲ mm منتشر کردند. در تمام آزمایش‌ها نسبت پرشدگی ثابت و برابر ۵۰٪ در نظر گرفته شده بود. آن‌ها به جای کنترل حرارت اعمالی به تبخیرکننده، دمای تبخیرکننده و چگالنده را تنظیم کردند. اثر قطر داخلی، زاویه شیب، تعداد دور و سیال عامل مورد بررسی قرار گرفت. در بررسی تعداد دور بر عملکرد لوله حرارتی مشخص شد که اگر تعداد دور از مقدار بحرانی (N_{crit}) بیشتر باشد، آنگاه لوله حرارتی نوسانی به طور مناسبی در حالت افقی نیز می‌تواند کار کند [۵].

تسای و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۴، از نانوذر طلا برای انجام آزمایش در لوله‌های حرارتی استفاده کردند. نتایج آن‌ها کاهش شدید مقاومت حرارتی نانوسیال در مقایسه با آب خالص را برای یک نسبت پرشدگی یکسان نشان داد. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که مقاومت حرارتی لوله حرارتی با تغییر اندازه نانو ذرات طلا تغییر می‌کند. ما و همکاران [۸،۷] در سال ۲۰۰۶، تأثیر استفاده از نانو سیال الماس^۳ را در عملکرد لوله حرارتی نوسانی مورد بررسی قرار دادند و کاهش چشمگیری را در مقاومت حرارتی در مقایسه با آب خالص مشاهده نمودند. کج به عنوان مثال در توان ورودی ۸۰ W، نانو سیال الماس اختلاف دمای بین تبخیرکننده و چگالنده را از $40/9^\circ\text{C}$ به $24/3^\circ\text{C}$ کاهش داد. همچنین آن‌ها به مقاومت حرارتی 0.03 K/W در توان ورودی ۳۳۶ W رسیدند.

لین و همکاران در سال ۲۰۰۸ تحقیقاتی بر روی لوله حرارتی با مسیر بسته که با نانوسیال نقره شارژ شده بود انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که نانوسیال با غلظت ۴۵۰ ppm عملکرد ضعیف‌تری نسبت به نانوسیال با غلظت ۱۰۰ ppm دارد [۹]. جمشیدی و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۹، از نانوسیال نقره و تیتانیوم اکسید به عنوان سیال عامل در لوله حرارتی نوسانی استفاده کردند. آن‌ها تأثیر تغییر نسبت پرشدگی، زاویه شیب و غلظت نانو سیال را مورد بررسی قرار دادند.

کو و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۰، تأثیر استفاده از نانوسیال آلومینیوم را بر عملکرد لوله حرارتی نوسانی به طور

1. Loop Type Heat Pipe

2. Slug-Plug

3. Diamond Nano-Fluid

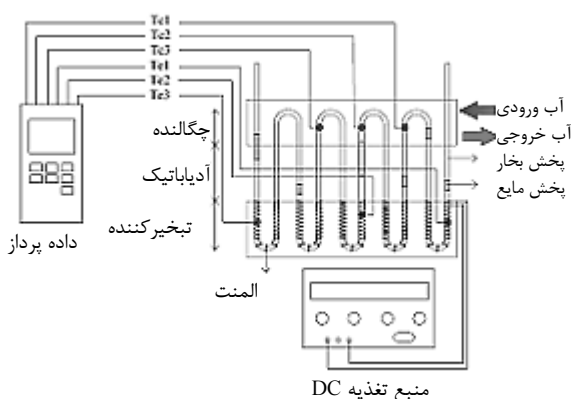
مستقیم، استفاده شده است. این منبع تغذیه با عبور دادن جریان در المنت‌ها باعث اعمال شار حرارتی به سیستم می‌شود. شکل ۱ شماتیکی از دستگاه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

۳- ساخت سیال عامل

برای ساخت نانوسیال مورد نظر (فروفلوید) $0/3426$ گرم $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ و $0/6756$ گرم $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ و $0/6$ گرم $(NH_2)_2CO$ در 10 میلی‌لیتر آب حل شده است و محلول مدت 10 دقیقه زیر فشار اتمسفری گاز N_2 هم زده می‌شود و بعد از آن محلول برای مدتی طولانی در دمای 90 تا 95 درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شود. در این محلول از $(NH_2)_2CO$ به عنوان سرفکتانت استفاده شده است [۱۴].

۴- طراحی آزمایش

به منظور شارژ کردن سیستم، به وسیله یک پمپ خلأ هوای درون لوله تا فشار 16 پاسکال تخلیه شده و سیال عامل به درون آن تزریق می‌شود. در این پژوهش 60 درصد حجم لوله حرارتی توسط سیال عامل پر شده است. آزمایش‌ها برای دو حالت راه‌اندازی و پایا انجام شد. در حالت راه‌اندازی، توسط منبع تغذیه به دستگاه به مدت 60 دقیقه توان مشخصی اعمال شد و داده‌برداری صورت گرفت. در تست‌های حالت پایا، توان به دستگاه اعمال شد و پس از رسیدن دستگاه از نظر دمایی به حالت پایدار، داده‌برداری صورت می‌گرفت. آزمایش‌ها برای دو طول مختلف ناحیه تبخیرکننده (قسمتی از لوله که با المنت پوشیده شده) انجام شد.



شکل ۱ شماتیک دستگاه آزمایش

تجربی مورد بررسی قرار دادند. نانوسیال آلومینیم عملکرد لوله حرارتی را در بهترین حالت $32/5\%$ نسبت به آب خالص بهبود بخشید. آن‌ها بیان داشتند که تجمع نانو ذرات در تبخیرکننده که شرایط سطح را تحت تأثیر قرار می‌دهد، مهمترین دلیل برای افزایش انتقال حرارت لوله حرارتی نوسانی با نانو سیال آلومینیوم است.

تسلیمی‌فر و همکاران در سال 2013 نشان دادند که لوله حرارتی در حالتی که از فروفلوید به عنوان سیال عامل استفاده شود نسبت به سیال عامل آب عملکرد بهتری دارد [۱۲]. محمدی و همکاران در سال 2013 نشان دادند که استفاده از فعال کننده سطحی در ساخت فروفلوید مانع از چسبیدن نانوذرات به یکدیگر شده و در نتیجه انتقال حرارت افزایش می‌یابد [۱۳].

در این پژوهش از نانوسیال فروفلوید به عنوان سیال عامل در یک لوله حرارتی نوسانی استفاده شده و تأثیر تغییر طول ناحیه تبخیرکننده در حالت راه‌اندازی و حالت پایا بررسی شده است.

۲- سامانه آزمایشگاهی

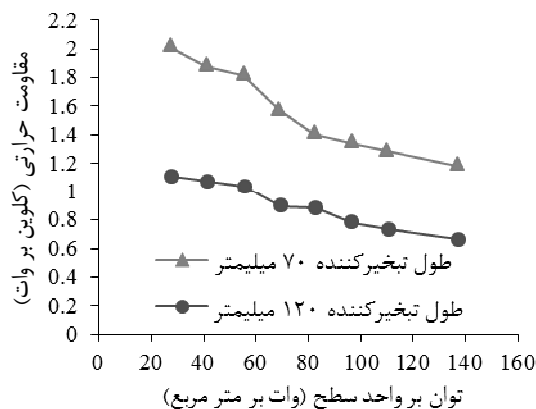
برای ساخت لوله حرارتی مورد نیاز در این آزمایش، از لوله مسی به قطر خارجی 3 میلی‌متر و قطر داخلی $1/75$ میلی‌متر با 5 دور استفاده شده است. این سیستم از سه قسمت تبخیر کننده، آدیاباتیک و چگالنده تشکیل شده، که طول هر یک از این قسمت‌ها به ترتیب 70 میلی‌متر، 50 میلی‌متر و 80 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. قسمت تبخیر کننده تماماً به وسیله المنت به منظور اعمال توان پوشیده شده و قسمت چگالنده نیز تماماً درون محفظه‌ای که آب با دبی بالا در آن جریان دارد شناور است. در حالتی که طول تبخیرکننده افزایش می‌یابد، ناحیه آدیاباتیک حذف شده و طول تبخیر کننده 120 میلی‌متر می‌شود.

به منظور جلوگیری از خروج گرما از سیستم و انتقال کامل آن به سیال درون لوله حرارتی، قسمت آدیاباتیک و تبخیر کننده سیستم به طور کامل عایق شده است.

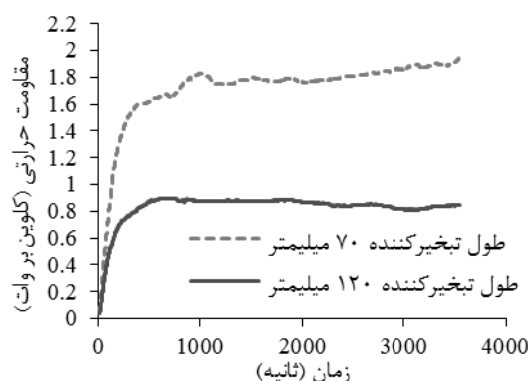
اندازه‌گیری دماها با استفاده از سه ترموکوپل نوع K در تبخیرکننده و سه ترموکوپل در چگالنده انجام گرفته است.

به منظور اعمال توان به سیستم از یک منبع تغذیه

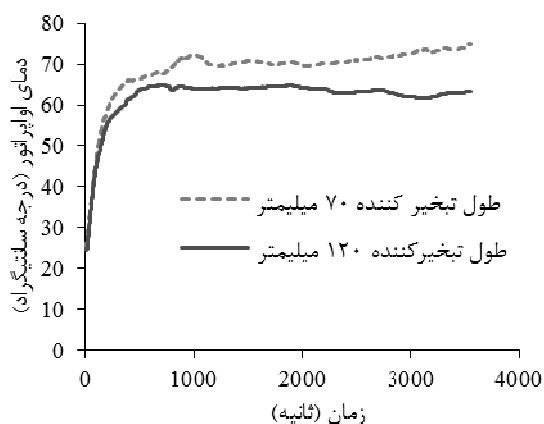
حالت سطح انتقال حرارت سیال عامل با ناحیه تبخیرکننده افزایش می‌یابد و سیال عامل فرصت کافی برای جذب حرارت از تبخیرکننده را دارد.



شکل ۲ بررسی تأثیر طول ناحیه تبخیرکننده بر عملکرد لوله حرارتی نوسانی



شکل ۳ تأثیر طول تبخیر کننده بر مقاومت حرارتی در حالت راه‌اندازی با توان ۳۰ وات



شکل ۴ تأثیر طول تبخیرکننده بر دمای ناحیه تبخیرکننده در حالت راه‌اندازی با توان ۳۰ وات

در حالت کوتاه طول ناحیه تبخیرکننده ۷۰ میلی‌متر و در حالت بلند ۱۲۰ میلی‌متر می‌باشد. همچنین اثر زاویه قرار گرفتن لوله حرارتی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به خاصیت مغناطیسی فروفلوید، تأثیر قرار دادن مگنت در ناحیه تبخیر کننده نیز مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور مگنتی در زیر ناحیه تبخیر کننده به طور مماس با المنت‌ها قرار داده شد. این مگنت ۵۰ میلی‌متر از طول ناحیه تبخیرکننده را پوشش می‌داد.

۵- تحلیل خطا

با توجه به اطلاعات دستگاه‌ها حدود ۰/۵ ولت خطا در ولتاژ و حدود ۰/۱ آمپر خطا در شدت جریان وجود دارد. همچنین ترموکوپل نوع K نیز ۱ درجه سانتی‌گراد خطا دارد. بنابراین با استفاده از روش استفاده شده توسط هلمن، مقدار کل خطا کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد [۱۵].

۶- بحث و تحلیل نتایج

برای مقایسه عملکرد لوله حرارتی در حالات مختلف از مفهوم مقاومت حرارتی استفاده می‌شود. مقاومت حرارتی به شکل معادله ۱ تعریف می‌شود.

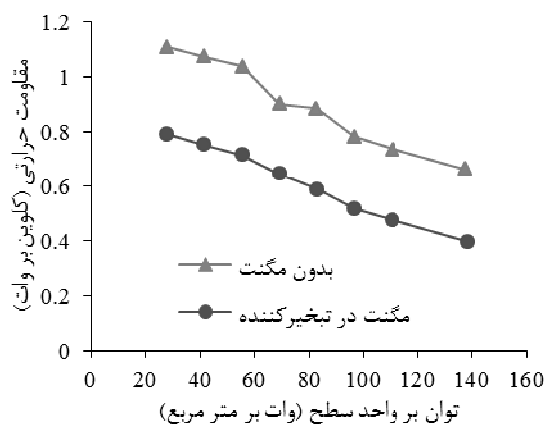
$$R = \frac{T_e - T_c}{q_h} \quad (1)$$

که R مقاومت حرارتی متوسط، q_h توان ورودی به تبخیرکننده و T_e (میانگین T_{e1}, T_{e2}, T_{e3}) و T_c (میانگین T_{c1}, T_{c2}, T_{c3}) به ترتیب دمای متوسط در قسمت تبخیرکننده و چگالنده هستند.

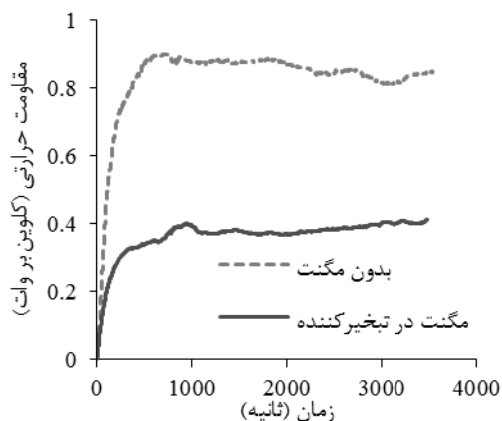
شکل ۲ نشان‌دهنده مقاومت حرارتی برای دو طول مختلف ناحیه تبخیر کننده می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود، افزایش شار حرارتی در هر دو حالت باعث بهبود عملکرد لوله حرارتی می‌شود. علت این امر تغییر شکل جریان از آرایش قطره- حباب به جریان حلقوی می‌باشد [۱۶، ۱۷].

شکل ۳ مقاومت حرارتی را در راه‌اندازی برای طول تبخیر کننده کوتاه و بلند مقایسه می‌کند و شکل ۴ دمای ناحیه تبخیر کننده را برای این دو حالت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود دستگاه پس از صرف زمان اندکی به حالت پایدار می‌رسد و همچنین عملکرد دستگاه با طول ناحیه تبخیرکننده بلند در راه‌اندازی نیز، بهتر است. چون در این

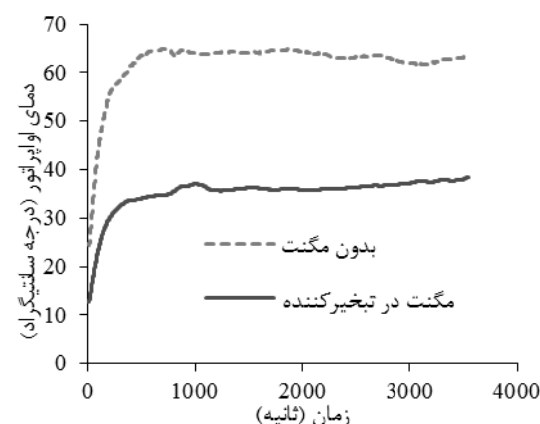
می‌باشد؛



شکل ۷ تأثیر حضور مگنت در لوله حرارتی نوسانی با طول ناحیه تبخیرکننده بلند در حالت عمودی



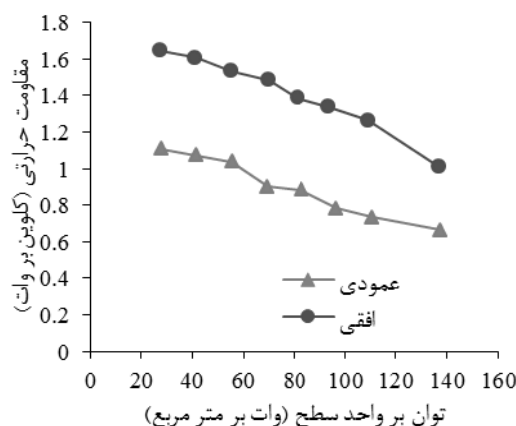
شکل ۸ تأثیر حضور مگنت در تبخیرکننده بر مقاومت حرارتی لوله حرارتی نوسانی با طول تبخیرکننده بلند در حالت راه اندازی با توان ۳۰ وات



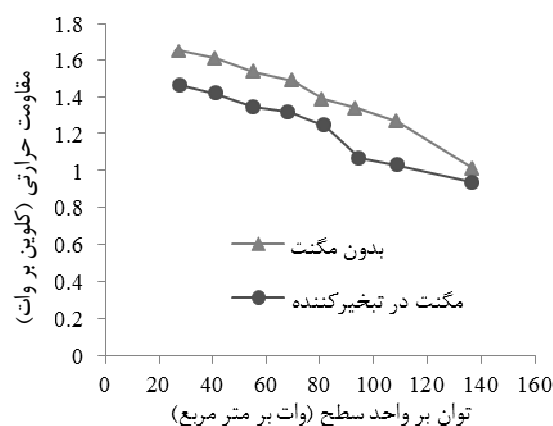
شکل ۹ تأثیر حضور مگنت در تبخیرکننده بر دمای ناحیه تبخیرکننده لوله حرارتی نوسانی با طول تبخیرکننده بلند در حالت راه‌اندازی با توان ۳۰ وات

شکل ۵ نشان دهنده عملکرد بهتر دستگاه (با طول تبخیر کننده بلند) در حالت عمودی نسبت به حالت افقی است. در حالت افقی بازگشت سیال عامل به تبخیرکننده با مشکل مواجه است در حالی که در حالت عمودی نیروی گرانش به بازگشت نانوسیال به تبخیرکننده کمک می‌کند و این امر باعث عملکرد بهتر دستگاه می‌شود [۱۷، ۱۸].

همان‌طور که از شکل‌های ۶ و ۷ مشخص است، قرار دادن مگنت در تبخیر کننده با توجه به خاصیت مغناطیسی نانوسیال استفاده شده در این لوله حرارتی، به بازگشت سیال عامل به تبخیرکننده کمک می‌کند و عملکرد دستگاه را بهبود می‌بخشد [۱۹].



شکل ۵ مقایسه حالت عمودی و افقی لوله حرارتی نوسانی با طول تبخیرکننده بلند



شکل ۶ تأثیر حضور مگنت در لوله حرارتی نوسانی با طول ناحیه تبخیرکننده بلند در حالت افقی

همچنین شکل‌های ۸ و ۹ نشان دهنده بهبود عملکرد دستگاه در حالت راه اندازی با قرار دادن مگنت در قسمت تبخیرکننده

- heat pipe", *Journal of Heat Transfer*, 2006, pp. 1213-1216.
- [8] Ma H. B., Wilson C., Borgmeyer B., Park K., Yu Q., Choi S. U. S. and Tirumala M., "Effect of nanofluid on the heat transport capability in an oscillating heat pipe", *Applied Physics Letters*, 2006, pp.
- [9] Lin Y. H., Kang S. W. and Chen H. L., "Effect of silver nano-fluid on pulsating heat pipe thermal performance", *Journal of Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, 2008, pp. 1312-1317.
- [10] Jamshidi H., Arabnejad S., Shafii M. B., Saboohi Y. and Rasoulia R., "Experimental investigation of closed loop pulsating heat pipe with nanofluids", *ASME 2009 Heat Transfer Summer Conference (HT2009)*, San Francisco, California, USA, 2009.
- [11] Qu J., Wu H. Y. and Cheng P., "Thermal performance of an oscillating heat pipe with Al₂O₃-water nanofluids", *International Communication in Heat and Mass Transfer*, 2010, pp. 111-115.
- [12] Taslimifar M., Mohammadi M., Afshin H., Saidi M. H. and Shafii M. B., "Overall thermal performance of ferrofluidic open loop pulsating heat pipes: An experimental approach", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 65, 2013, pp. 234-241.
- [13] Mohammadi M., Taslimifar M., Haghayegh S., Hannani S. K., Shafii M. B., Saidi M. H. and Afshin H., "Open Loop Pulsating Heat Pipes Charged with Magnetic Nano-fluids- Powerful Candidates for Future Electronic Coolers", *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, 2013.
- [14] Fu X., Wang J., Li N., Wang L. and Pu L., "Label-free electrochemical immunoassay of carcinoembryonic antigen in human serum using magnetic nanorods as sensing probes", *Microchimica Acta*, Vol. 165, 2009, pp. 437-442.
- [15] Holman J., *Experimental Methods for Engineering*, 2001.
- [16] Khandekar S., *Thermo-hydrodynamics of closed loop pulsating heat pipes*, PhD Thesis, university of Stuttgart, 2004.
- [17] Jamshidi H., Arabnejad S., Shafii M. B. and Saboohi Y., "Thermal characteristics of closed loop pulsating heat pipe with nanofluids", *Journal of Enhanced Heat Transfer*, Vol. 18, 2011, pp. 221-237.
- [18] Liu Z., Li Y. and Bao R., "Thermal performance of inclined grooved heat pipes using nanofluids", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, 2010, pp. 1680-1687.
- [19] Mohammadi M., Mohammadi M. and Shafii M. B., "Experimental Investigation of a Pulsating Heat Pipe Using Ferrofluid (Magnetic Nanofluid)", *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 134, 2012.
- [20] Lotfi H. and Shafii M. B., "Boiling Heat Transfer on a High Temperature Silver Sphere in Nanofluid", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, 2009, pp. 215-220.

زیرا حضور مگنت باعث چسبیدن نانوذرات به دیواره لوله و در نتیجه افزایش زبری سطح آن و بهبود انتقال حرارت می‌شود [۲۰].

۷- نتیجه‌گیری

- عملکرد لوله حرارتی نوسانی با افزایش طول ناحیه تبخیرکننده بهبود می‌یابد. علت این امر سطح انتقال حرارت بیشتر و فرصت بیشتر سیال عامل برای تبادل حرارت با تبخیر کننده می‌باشد.

- عملکرد لوله حرارتی نوسانی در حالت عمودی به علت تأثیر مثبت نیروی گرانش در بازگشت سیال عامل به تبخیر کننده، بهتر از حالت افقی است.

- قرار دادن مگنت در تبخیر کننده به بازگشت نانوسیال مغناطیسی به تبخیرکننده کمک می‌کند و باعث بهبود عملکرد دستگاه می‌شود.

۸- تشکر و قدردانی

با سپاس فراوان از جناب آقای مازیار محمدی و هم‌چنین جناب آقای حق‌دوست و دکتر باقرزاده که در انجام این پروژه ما را یاری نمودند.

۹- مراجع

- [1] Akachi H., 1990, Structure of Heat Pipe, U. S. Patent, PN. 4921041.
- [2] Maezawa S., Minamisawa K. and Akachi H., "Thermal Performance of Capillary Tube Thermosyphon", *9th International Heat Pipe Conference, Albuquerque, New Mexico*, 1995.
- [3] Kawara Z., Takahashi O., Serizawa A. and Kohno M., "Visualization of Flow in Heat Pipe by Proton Radiography", *24th Visualization and Information Symposium, Osaka, Japan*, 1996.
- [4] Tong B. and Wong T., "Closed-Loop Pulsating Heat Pipe", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 21, 2001, pp. 1845-1862.
- [5] Charoensawan P., Khandekar S., Groll M. and Terdtoon P., "Closed loop pulsating heat pipes Part A: parametric experimental investigations", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, 2003, pp. 2009-2020.
- [6] Tsai C. Y., Chien H. T., Ding P. P., B.Chan, Luh T. Y. and Chen P. H., "Effect of structural character of gold nano-particles in nano-fluid on heat pipe thermal performance", *Materials Letters*, 2004, pp. 1461-1465.
- [7] Ma H. B., Wilson C., Yu Q., Park K., Choi U. S. and Tirumala M., "An experimental investigation of heat transport capability in a nanofluid oscillating