

Ulasan Perkembangan *Pulsating Heat Pipe* dengan bentuk penampang *circular*

Evi Sofia*, Nandy Putra, Adi Winarta

Applied Heat Transfer Research Group, Departemen Teknik Mesin,
Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Kampus UI Depok, 16424

*Correspondingauthor:e.sofia@ymail.com

Abstract.

Various developments to get good heat pipes are still being carried out. Pulsating Heat Pipe as one type of heat pipe that has many applications still growing, the advantages are without wick and very small diameter. The resulting process and lower costs than some studies indicate that Pulsating Heat Pipe has very good ability. There are several parameters that affect the performance of the Heat Pipe Pulsation, one of which is a geometry parameter such as the size of the inner diameter and cross section shape. This paper aims to summarize several experiments carried out on Pulsating Heat Pipe with a circular section with several diameter sizes.

Abstrak.

Berbagai pengembangan untuk mendapatkan kinerja *heat pipe* yang baik masih terus dilakukan. *Pulsating Heat Pipe* sebagai salah satu jenis dari *heat pipe* yang sudah banyak pengaplikasiannya masih terus mengalami pengembangan. Kelebihannya yang tanpa *wick* dan diameternya yang kecil mempermudah proses manufaktur dan menghemat biaya. Selain itu dari hasil beberapa eksperimen menyatakan bahwa *Pulsating Heat Pipe* mempunyai kemampuan memindahkan panas yang sangat baik. Ada beberapa parameter yang mempengaruhi kinerja dari *Pulsating Heat Pipe* salah satunya adalah parameter geometri seperti ukuran diameter dalam dan bentuk penampangnya. Tulisan ini bertujuan untuk merangkum beberapa eksperimen yang dilakukan terhadap *Pulsating Heat Pipe* dengan bentuk penampang *circular* dengan beberapa ukuran diameter.

Kata kunci: *heat pipe, pulsating heat pipe, wick, circular*

© 2018. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Heat pipe merupakan teknologi pemindah kalor pasif yang terus menerus mengalami pengembangan. Berbagai pengembangan untuk mendapatkan kinerja *heat pipe* yang lebih baik masih terus dilakukan oleh banyak peneliti. *Pulsating Heat Pipe* sebagai salah satu jenis dari *heat pipe* yang sudah banyak pengaplikasiannya masih terus mengalami pengembangan. Kelebihan dari pulsating heat pipe yakni tanpa *wick* dan diameternya yang kecil mempermudah proses manufaktur dan menghemat biaya. Selain itu dari hasil eksperimen Fumin Shang et al [1] menyatakan bahwa *Pulsating Heat Pipe* mempunyai kemampuan memindahkan kalor yang sangat baik. Ada beberapa parameter yang mempengaruhi kinerja dari *Pulsating Heat Pipe* salah satunya adalah parameter geometri seperti ukuran diameter dalam dan bentuk penampangnya. Tulisan ini bertujuan untuk merangkum beberapa eksperimen yang dilakukan terhadap *Pulsating Heat Pipe* dengan bentuk

penampang *circular* dengan beberapa ukuran diameter.

Menurut hasil investigasi dari Xiaohong Han et al dan Durga Bastakoti et al [2, 3] dapat diperoleh informasi bahwa ada beberapa parameter yang berpengaruh pada unjuk kerja dari *Pulsating Heat Pipe*, yaitu:

1. Pengaruh parameter geometrik.
 - a. Diameter dalam
 - b. Bentuk penampang dan konfigurasi saluran
 - c. Jumlah lekukan
2. Pengaruh sifat fisik termodinamik fluida kerja
3. Pengaruh parameter operasi
 - a. Rasio pengisian
 - b. Sudut Inklinasi dan gravitasi
 - c. Fluks panas dan gerakan osilasi dari fluida kerja.

Dalam perancangan sebuah PHP ukuran atau dimensi tergantung dari sistem atau piranti yang akan didinginkan. Hal ini dimaksud untuk merancang *heat pipe* berdasarkan tempat yang tersedia dan luasan dari sumber kalor yang akan diserap. Dimensi ini biasanya juga akan sangat menentukan tipe dari *heat pipe* yang akan dirancang apakah tipe lurus, melingkar atau tipe pelat [4].

Pengoperasian normal PHP didasarkan pada gerakan osilasi dari *vapour slugs* dan *liquid plugs* dan apakah *vapour slugs* dan *liquid plugs* dapat dibentuk di PHP tergantung pada kekuatan relatif gravitasi dan tegangan permukaan, seperti ditunjukkan oleh *Bond number*.

$$Bo = \sqrt{Eo} = \sqrt{\frac{g(\rho_l - \rho_g)}{\sigma}} D^2 \dots \dots \dots (1)$$

Hasil penelitian dari beberapa peneliti [5-7] menyatakan bahwa *Bond number* untuk PHP ditunjukkan dalam Persamaan (2).

$$Bo \leq 2 \dots \dots \dots (2)$$

Pengaruh tegangan permukaan dari fluida kerja lebih kuat dari gravitasi. Nilai *Bond number* 2 bukan satu-satunya nilai kritis. Shafii et al [8] dan Hosoda et al [9] menyarankan *Bond number* 1,84. Kombinasi dari Persamaan (1) dan (2) diperoleh Persamaan (3) untuk diameter maksimum.

$$D_{max} = 2 \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_l - \rho_g)g}} \dots \dots \dots (3)$$

Seperti diketahui bahwa densitas dan tegangan permukaan fluida kerja dipengaruhi oleh temperatur. Dapat dilihat bahwa diameter maksimum dari PHP tergantung kepada sifat fisik fluida kerja dan temperatur operasinya.

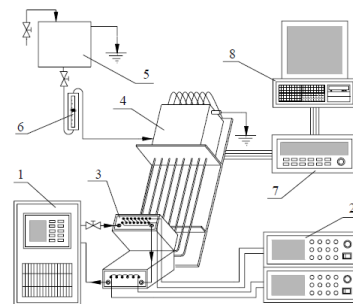
Meskipun setiap parameter saling mempengaruhi namun parameter geometrik merupakan parameter yang berhubungan erat dengan definisi *Pulsating Heat Pipe* dan memiliki dampak besar pada kinerja transfer panas dari *Pulsating Heat Pipe*.

Berikut adalah ulasan mengenai beberapa eksperimen tentang *Pulsating Heat Pipe* dengan bentuk penampang *circular* dengan diameter dalam antara 1 – 5 mm.

Investigasi eksperimental

Pulsating Heat Pipe pertama kali dikembangkan oleh Akachi pada tahun 1990 [10], walaupun aspek mendasar dari *Pulsating Heat Pipe* sebenarnya sudah diperkenalkan dan dipatenkan oleh Smyrnov

dan Savchenkov pada tahun 1975 di Rusia [11]. Tahun 2006 Fumin Shang et al [1] melakukan eksperimen untuk merinci karakteristik perpindahan panas dan kekuatan transportasi dari *Self Exciting Mode Oscillating Flow (SEMOS) Heat Pipe* dibawah pemanasan laser, dengan profil seragam berdiameter 3 mm, sedangkan *heat pipe* lainnya berbentuk elips dengan profil tidak seragam. Material pipa terbuat dari kuningan dengan fluida kerja air suling dengan kemurnian tinggi, tingkat pengisian 42 %, kemiringan/sudut inklinasi 55°, dan tekanan pada pipa panas $1,8 \times 10^{-3}$ Pa. Gambar 1 memperlihatkan sistem eksperimental dari pengujiannya.



1—Unit of refrigeration cycle, 2—Power supply, 3—Laser supply, 4—Experimental table of SEMOS heat pipe, 5—Water tank, 6—Flow meter, 7—Data acquisition system, 8—Personal computer.

Gambar 1. Sistem eksperimental peningkatan perpindahan panas Heat Pipe *SEMOS Heat Pipe* t [12]

Fumin Shang et al [12] pada tahun 2011 kembali melakukan eksperimen mengenai *Pulsating Heat Pipe* dengan judul *Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Coupled Pulsating Heat Pipes*. Ekperimennya dilakukan pada perangkat *PHP* dengan diameter pipa 2 mm yang digabungkan antara *PHP* utama dan *synergistic oscillating PHP*. Dua setup yang berbeda dibangun untuk percobaan. Setup satu (*etanol coupled PHP*) yang terbuat dari *PHP* utama diisi dengan air suling 62,254% dan *synergistic oscillating PHP* yang diisi dengan 59.823% ethanol. Setup dua (*air coupled PHP*) terbuat dari *PHP* utama diisi dengan 62.254% air suling dan *synergistic oscillating PHP* diisi dengan 100% udara.

Karakteristik tekanan di dalam *heat pipe* berosilasi loop tunggal (OHP) yang memiliki tabung tembaga berdiameter 4,5 mm dengan tinggi loop 440 mm diselidiki oleh Park Yong Ho et al [13] pada tahun 2012. Air suling digunakan sebagai fluida kerja di dalam OHP dengan rasio pengisian yang berbeda 40%, 60% dan 80%. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa karakteristik termal secara signifikan terkait dengan fluktuasi tekanan serta frekuensi tekanan, dan frekuensi tekanan juga

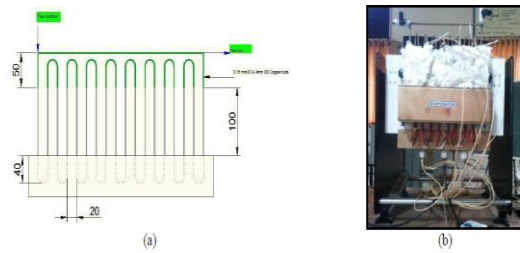
tergantung pada suhu evaporator yang dipertahankan dalam kisaran 60–96°C.

Tahun 2013 M. Aboutalebi et al [14] melakukan eksperimen tentang *Rotating closed loop PHP (RCLPHP)* yang merupakan jenis baru dari *PHP*, dimana prinsip-prinsip termodinamika *PHP* dikombinasikan dengan rotasi. Dalam tulisan ini, efek kecepatan rotasi pada kinerja termal *RCLPHP* diselidiki secara eksperimental. Penelitian dilakukan dengan mengubah daya input (dari 25 W menjadi 100 W) dan rasio pengisian (25%, 50%, dan 75%) untuk kecepatan rotasi yang berbeda (dari 50 rpm hingga 800 rpm dengan penambahan dari 125 rpm). Diameter pipa berbentuk *circular* dengan diameter 2 mm dan fluida kerja air.

Wang Jianshen et al [15] di tahun 2013 juga melakukan eksperimen tentang kinerja start-up dan transfer panas dari *PHP* yang dioperasikan dengan berbagai pola pemanasan secara numerik dipelajari pada 30%, 50%, 70% rasio pengisian. Hasilnya mengungkapkan bahwa *PHP* pada rasio pengisian yang lebih rendah dapat mulai dengan mudah di rentang yang dipertimbangkan. Selanjutnya, pola pemanasan memiliki efek yang signifikan pada proses start-up dan ketahanan termal dari *PHP*. Dibandingkan dengan pola pemanasan seragam, pola pemanasan tidak seragam dapat mengurangi periode start-up dan meningkatkan ketahanan termal dari *PHP*.

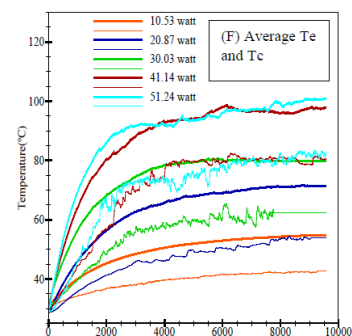
Eksperimen terhadap *CLHP* dengan fluida kerja air, ethanol, methanol dan aseton dan campuran biner (1:1 volume) dilakukan oleh Pramod R. Pachghare pada tahun 2014 [16]. Tabung kapiler yang digunakan terbuat dari tembaga dengan diameter 2 mm. Untuk semua eksperimen, rasio pengisiannya adalah 50%. Hasilnya menunjukkan bahwa resistan termal menurun dengan cepat hingga masukan panas 40W, setelah itu cukup stabil. Dibandingkan dengan semua cairan yang bekerja, cairan kerja biner aseton-air telah menunjukkan kinerja termal terbaik atas cairan kerja lain yang digunakan dalam *CLPHPs*.

Harshal Garmit et al [17] pada tahun 2015 melakukan eksperimen yang berkaitan dengan investigasi eksperimental pada *Closed Loop Pulsating Heat Pipe*. Air digunakan sebagai fluida kerja. Diameter dalam tabung tembaga adalah 2,15 mm. Mekanisme perpindahan panas adalah konveksi alami di bagian kondensor. Percobaan dilakukan dengan rasio pengisian sebesar 40%, 50% dan 60%. Masukan panas bervariasi seperti 10W, 20W, 30W, 40W dan 50W. Hasilnya menunjukkan kinerja sistem yang lebih baik dengan tingkat rasio pengisian yang lebih rendah dan pada input panas yang lebih tinggi. Skematik dan setup eksperimen dari pengujian terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. (a) skematik (b) setup eksperimen [17]

Mekanisme Start Up *Pulsating Heat Pipe* diteliti oleh Vipul M. Patel et al [18] pada tahun 2016. Investigasi eksperimental dilakukan pada 9 lekukan copper *CLPHP* untuk mekanisme start up. Rasio pengisian dipertahankan 50%. Pengujian dilakukan pada tabung tembaga berdiameter 2 mm. Panjang bagian evaporator, adiabatik dan kondensor masing-masing adalah 40 mm, 100 mm dan 50 mm. Hasil pengujiannya diperlihatkan pada Gambar 3.



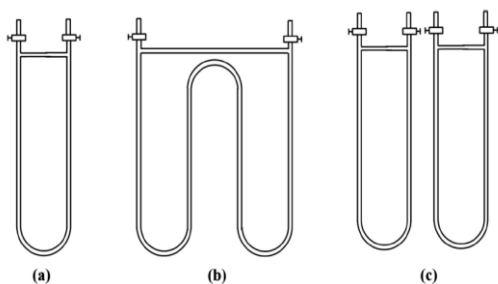
Gambar 3. Temperatur evaporator dan kondensor terhadap waktu pada input panas yang berbeda [18]

Pengaruh Suhu Kondensor terhadap Perilaku Transien dari *Pulsating Heat Pipe* diselidiki oleh L.A. Betancur et al [19] pada tahun 2016. Diameter dalam pipa 3,18 mm dengan fluida kerja air dan rasio pengisian 50%. Di tahun yang sama Nandy Putra dan Adi Winarta [20] melakukan penelitian sebuah desain *OHP* untuk aplikasi *ducting* sistem tata udara berdimensi 300 x 470 mm untuk diuji karakteristik kinerjanya. *OHP* dibuat dengan menggunakan pipa kapiler tembaga dengan diameter dalam 1,7 mm dan tebal pipa 0,65 mm. Panjang bagian evaporator, adiabatik dan kondenser berturut-turut, 260 mm, 240 mm, dan 260 mm. Ethanol dipergunakan sebagai fluida kerja dengan filling ratio sebesar 60%. Hasil penelitian didapatkan bahwa nilai hambatan thermal (*thermal resistance*) terendah adalah 0,36 °C/W pada input kalor 76,1 Watt. Hambatan thermal pada *OHP* yang diuji cenderung stabil saat sudut inklinasi dari *OHP* divariasikan. Hasil pengujian kinerja menunjukkan bahwa *OHP* memiliki potensi yang

besar untuk dapat dimanfaatkan sebagai *heat recovery* dengan temperatur operasional 50°C-70°C.

Tahun 2017 Chien Hung Sun et al [21] melakukan eksperimen tentang pengaruh tekanan vakum pada start up dan kinerja keseluruhan PHP. Diameter luar tabung tembaga adalah 3 mm dan 2 mm (desain tabung ganda) memiliki ketebalan dinding 0,3 mm dan 0,2 mm. Fluida kerja yang digunakan adalah air dan HFE-7000 dengan rasio pengisian sekitar 50%, dan tekanan evakuasi mulai dari 0,01 Torr. Untuk tekanan evakuasi 0,01 Torr pada daya yang disediakan 80 W, hambatan termal dengan fluida kerja air adalah 0,928 K/W dan 1,161 K/W untuk fluida kerja HFE-7000. Namun, tren ini terbalik ketahanan termal untuk HFE-7000 lebih rendah dari air ketika tekanan evakuasi meningkat lebih dari 100 Torr. Konduktivitas termal efektif yang sesuai pada fluida kerja mencapai 51,448 W/mK dibandingkan dengan HFE-7000 sebesar 12,692 W/mK. Namun, konduktivitas termal yang efektif untuk fluida kerja air menurun cukup besar dengan meningkatnya tekanan evakuasi, dan PHP tidak berfungsi pada tekanan atmosfer. Sebaliknya, meskipun konduktivitas termal yang efektif untuk PHP HFE-7000 turun dengan munculnya tekanan evakuasi, PHP HFE-7000 masih beroperasi bahkan tanpa evakuasi.

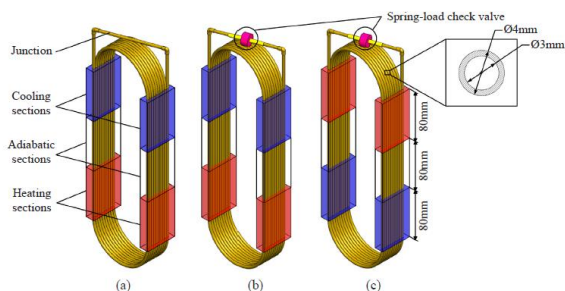
Serangkaian percobaan dilakukan oleh Byeongchan Kim et al [22] pada tahun 2017, untuk menyelidiki kinerja termal dari PHP dengan sambungan tunggal, paralel dan dua lekukan menggunakan fluida kerja yang berbeda. Tabung kapiler tembaga yang digunakan memiliki diameter internal dan eksternal 2,2 mm dan 3,2 mm masing-masing PHP diisi dengan etanol dan air deionisasi sebagai fluida kerja dengan rasio pengisian 50%. Hasil eksperimennya menyatakan bahwa ketahanan termal dari PHP yang diisi dengan etanol lebih rendah dari air deionisasi, yang berarti etanol lebih disukai sebagai fluida kerja. PHP yang terhubung paralel menunjukkan kinerja termal yang lebih baik daripada dua lekukan. Skematik pengujiannya diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Skematik dari (a) PHP satu lekukan (b) PHP dua lekukan (c) PHP sambungan paralel [22]

Tahun 2018, Xi Chen et al [23] membangun sebuah sistem eksperimental untuk menyelidiki karakteristik perpindahan panas dari *Ethane Pulsating Heat Pipe* (EPHP) berdasarkan *Stirling cooler*. EPHP terbuat dari pipa tembaga dengan diameter dalam dua mm, yang terdiri dari 20 tabung. Efek dari rasio pengisian, masukan panas dan sudut kemiringan pada kinerja EPHP dipelajari pada temperatur yang berbeda. Selama proses pendinginan, EPHP menunjukkan efisiensi perpindahan panas yang tinggi. Rasio pengisian optimal yang sesuai dengan resistansi termal terendah adalah sekitar 30%. Untuk rasio pengisian yang sama, kinerja perpindahan panas terbaik dari EPHP tidak diperoleh pada sudut inklinasi 90°, tetapi dari sudut inklinasi spesifik antara orientasi vertikal dan horizontal. Hambatan panas meningkat perlahan ketika sudut inklinasi meningkat di bawah kondisi anti gravitasi, tetapi ketika sudut inklinasi mendekati 90°, hambatan termal meningkat dengan cepat.

Chen Feng et al [23] (2018) melakukan eksperimen terhadap *check valve* yang mengontrol aliran sirkulasi satu arah dari fluida kerja diintegrasikan ke dalam *Closed Loop Pulsating Heat Pipe* (CLPHP) awal untuk meningkatkan kinerja termal. Kinerja termal dari CLPHP dengan *check valve* (CLPHP/CV) secara eksperimen diselidiki dan dibandingkan dengan CLPHP awal. CLPHP awal terbuat dari tabung kapiler tembaga dengan diameter dalam 3mm dan sepuluh putaran spiral. Katup pegas dimuat diintegrasikan ke dalam dua lokasi di CLPHP awal antara bagian dua pemanasan (CLPHP/CVh) dan bagian dua pendinginan (CLPHP/CVc). Pengujian dilakukan di dengan tiga orientasi mode pemanasan bawah, horisontal, dan atas. CLPHP diisi dengan air deionisasi sebagai fluida kerja dengan rasio pengisian 60%. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa *check valve* menciptakan aliran sirkulasi satu arah dari fluida kerja dan memfasilitasi start-up CLPHP. Penurunan 25% dalam ketahanan termal dari CLPHP/CV dicapai dibandingkan dengan CLPHP awal dengan mode pemanasan atas pada beban pemanasan yang rendah. Selain itu, *check valve* mengurangi kepekaan CLPHP ke orientasinya, terutama ketika katup diintegrasikan antara dua bagian pemanasan. Skematik dari CLPHP dan CLPHP/CV diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 5. Skematik CLPHP dan CLPHP/CV: (a) CLPHP; (b) CLPHP/CVc; (c) CLPHP/CVh [23]

Hasil rangkuman dari eksperimen PHP berbentuk penampang sirkuler ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ekeperimen Pulsating Heat Pipe

Judul	Pengarang	Tahun	Bentuk Penampang	Diameter Dalam (mm)	Fluida kerja	Rasio Pengisian
Experimental investigation of enhanced heat transfer of self-exciting mode oscillating-flow heat pipe with non-uniform profile under laser heating	F. Shang, H. Xian, D. Liu, X. Du & Y. Yang	2006	Circular	3	distilled high-purity water	42%
Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Coupled Pulsating Heat Pipes	Fumin Shang, Jianhong Liu and Dengying Liu	2011	Circular	2	air	
Characterizing pressure fluctuation into single-loop oscillating heat pipe.	PARK Yong-ho, Md. Riyad Tanshen, Md. J. Nine, CHUNG Han-shik, JEONG Hyo-min	2012	Circular	4,5	air	40%,60%, 80%
Experimental investigation on performance of a rotating closed loop pulsating heat pipe	M. Aboutalebi, A.M. Nikravan Moghaddam, N. Mohammadi, M.B. Shafii	2013	Circular	2	air	25%, 50%,75%
Thermal performance of pulsating heat pipes with different heating patterns	Wang Jiansheng , Wang Zhenchuan , Li Meijun	2013	Circular		air	30%,50%, 70%
Thermo-hydrodynamics of closed loop pulsating heat pipe:	Pramod R. Pachghare, and Ashish M. Mahalle	2014	Circular	2	air, ethanol, methanol, acetone (gabungan air dan masing-masing)	50%
Experimental investigations on pulsating heat pipe	Harshal Gamit, Vinayak More, Bade Mukund, H. B. Mehta	2015	Circular	2,15	air	40%,50%, 60%
Start Up Mechanism Of Pulsating Heat Pipe	Vipul M. Patel dan Hemantkumar B. Mehta	2016	Circular	2	air	50%
Condenser Temperature Effect on the Transient Behavior of a Pulsating Heat Pipe.	L.A. Betancur, et al	2016	Circular	3,18	air	50%
Kinerja Termal dan Pola Aliran Oscillating Heat Pipe dengan Fluida Kerja Ethanol	Nandy Putra dan Adi Winarta	2016	Circular	1,7	ethanol	60%
Investigation of the evacuation pressure on the performance of pulsating heat pipe	Chien-Hung Sun, Chih-Yung Tseng, Kai-Shing Yang, Shi-Kuo Wu, Chi-Chuan Wang	2017	Circular	2,7 dan 1,8	air	50%
A study on thermal performance of parallel connected pulsating heat pipe	Byeongchan Kim, Longnan Li, Jihson Kim, Daeseong Kim	2017	Circular	2,2	ethanol and deionized	50%
Experimental study on thermal performance of an anti-gravity pulsating heat pipe and its application on heat recovery utilization	Zilong Deng, Yi Zheng, Xiangdong Liu, Bingpeng Zhu, Yongping Chen	2017	Circular	3	air	50%,70%
Experimental investigation on ethane pulsating heat pipe based on strling cooler	Xi Chen , Shuai Shao , Jijia Xiang , Wentong Ma , Hui Zhang	2018	Circular	2	ethanol	22%, 30%,40%, 50%,60%
Heat transfer characteristics of a novel closed-loop pulsating heat pipe with a check valve	Chen Feng, Zhenping Wan, Haijun Mo, Heng Tang, Longsheng Lu, Yong Tang	2018	Circular	3	air deionisasi (deionized water)	60%

Aplikasi Pulsating Heat Pipe

Sebagai jenis Heat Pipe terbaru eksperimen tentang pengaplikasian PHP dengan bentuk penampang circular sudah banyak dilakukan. Misalnya; sebagai pendingin elektronik [24, 25], pada solar water heater [26, 27], sebagai sistem

manajemen termal motor listrik [28] dan banyak lagi aplikasi lainnya.

Kesimpulan

Meskipun setiap parameter saling mempengaruhi namun parameter geometrik merupakan parameter yang berhubungan erat dengan definisi Pulsating Heat Pipe dan memiliki dampak besar pada kinerja transfer panas dari Pulsating Heat Pipe.

Bentuk penampang pipa circular banyak digunakan dalam beberapa eksperimen tentang Pulsating Heat Pipe, selain proses manufaktur yang lebih mudah pipa dengan bentuk circular mudah didapat di pasaran.

Sebagai jenis Heat pipe terbaru Pulsating Heat Pipe sudah cukup menjanjikan untuk diaplikasikan.

Referensi

- Shang, F., et al., *Experimental investigation of enhanced heat transfer of self-exciting mode oscillating-flow heat pipe with non-uniform profile under laser heating*, 2006: Kung Cheng Je Wu Li Hsueh Pao.
- Bastakoti, D., et al., *An overview on the developing trend of pulsating heat pipe and its performance*. Applied Thermal Engineering, 2018. **141**.
- Han, X., et al., *Review of the development of pulsating heat pipe for heat dissipation*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. **59**.
- Nandy Putra, W.N.S., *Teknologi Pipa Kalor. Teori Desain dan Aplikasi*. 2014.
- Zhang, Y. and A. Faghri, *Advances and Unsolved Issues in Pulsating Heat Pipes*. Heat Transfer Engineering, 2008. **29**.
- Cai, Q., C.I. Chen, and J.F. Asfia, *Operating Characteristic Investigations in Pulsating Heat Pipe*. Journal Heat Transfer, 2006. **128**(12).
- Groll, M. and S. Khandekar, *State of the Art on Pulsating Heat Pipes*. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2012. **2**(10).
- Shafii, M.B., A. Faghri, and Y. Zhang, *Thermal Modeling of Unlooped and Looped Pulsating Heat Pipes*. Journal of Heat Transfer, 2001. **123**.
- HISODA, M., S. NISHIO, and R. SHIRAKASHI, *Study of Meandering Closed-Loop Heat-Transport Device : Vapor-Plug Propagation Phenomena*. JSME International Journal, 1998. **42**.
- Akachi, *Strukture of a Heat Pipe*, 1990.
- Smirnov.H and Savchenkov.G, *Pulsating Heat Pipe 1977*.
- Shang, F., J. Liu, and D. Liu. *Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Coupled Pulsating Heat Pipes*. in *International Heat Pipe Symposium*. 2011. Taipei.

13. Yong-ho, P., et al., *Characterizing pressure fluctuation into single-loop oscillating heat pipe*. National Research Foundation of Korea, 2012.
14. Aboutaleb, M., et al., *Experimental investigation on performance of a rotating closed loop pulsating heat pipe*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2013. **45**.
15. Jiansheng, W., W. Zhenchuan, and L. Meijun, *Thermal performance of pulsating heat pipes with different heating patterns*. Applied Thermal Engineering, 2014. **64**.
16. Pachghare, P.R. and A.M. Mahalle, *Thermo hydrodynamics of closed loop pulsating heat pipe*. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014.
17. Gamit, H., et al. *Experimental investigations on pulsating heat pipe*. in *International Conference on Applied Energy*. 2015.
18. Patel, V.M. and H.B. Mehta. *Start Up Mechanism Of Pulsating Heat Pipe*. in *National Conference on Thermal Fluid Science and Tribo Application*. 2016. Gujarat.
19. L.A. Betancur, e.a. *Condenser Temperature Effect on the Transient Behavior of a Pulsating Heat Pipe*. in *18th IHPC and 12th IHPS*. 2016. Jeju.
20. Putra, N. and A. Winarta, *Kinerja Termal dan Pola Aliran Oscillating Heat Pipe dengan Fluida Kerja Ethanol*, 2016.
21. Sun, C.H., et al., *Investigation of the evacuation pressure on the performance of pulsating heat pipe*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2017. **85**.
22. Kim, B., et al., *A study on thermal performance of parallel connected pulsating heat pipe*. Applied Thermal Engineering, 2017. **126**.
23. Chen, X., et al., *Experimental investigation on ethane pulsating heat pipe based on stirling cooler*. International Journal of Refrigeration, 2018. **88**.
24. Maydanik, Y.F., *Compact cooler for electronics on the basis of Pulsating Heat Pipe*. Applied Thermal Engineering, 2009. **29**.
25. Cay, B. *Appliance of self-excited flow heat pipe for heat recovery of wood drying*.
26. Rittidech, S. and S. Wannapakne, *Experimental study of the performance of a solar collector by closed-end oscillating heat pipe(CEOHP)*. Applied Thermal Engineering, 2007. **27**.
27. Nguyen, K., S. Yoon, and J. Choi, *Effect of working-fluid filling ratio and cooling- water flow rate on the performance of solar collector with closed-loop oscillating heat pipe*. Journal of Mechanical Science and Technology 2012. **26**.
28. Winarta, A., *Studi Eksperimen Pengembangan Oscillating Heat Pipe Sebagai Aplikasi Pendingin Fluks Kalor Tinggi*, in *Mechanical Engineering 2018*, Universitas Indonesia: Indonesia.