

Analisa Kinerja Pipa Kalor Berdenyut

I Wayan Sugita^{1*}, Bobbi Anggara Putra Sanjaya², Iman Nurdin Azhari¹

¹Program studi Teknik Mesin, Universitas Negeri Jakarta

²Program studi Pendidikan Teknik Mesin, Universitas Negeri Jakarta

¹wayan-sugita@unj.ac.id, ²bobbysanjaya222.bs@gmail.com

*Corresponding author – Email :wayan-sugita@unj.ac.id

ABSTRAK

Dibuat pipa kalor berdenyut tertutup untuk mengetahui kinerjanya. Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan fluida kerja air destilasi. Pipa kalor berdenyut tertutup dibuat dari pipa kapiler tembaga dengan diameter dalam 2 mm dan diameter luar 3.9 mm. Pipa kalor dibentuk menjadi 3 tekukan U dan dibagi menjadi tiga zone daerah perpindahan panas yaitu evarator, adiabatik dan kondensor. Pengaruh dari sudut kemiringan (0° , 30° , 45° , 60° dan 90° terhadap horizontal) dan variasi daya (5 W – 30W) diinvestigasi. Hasil penelitian menunjukkan kenaikan sudut kemiringan menyebabkan kinerja pipa kalor menurun, ditunjukkan oleh meningkatnya tahanan termal. Kinerja terbaik terjadi pada sudut kemiringan 0° . Peningkatan input panas meningkatkan kinerja pipa kalor.

Kata kunci: Pipa kalor berdenyut, sudut kemiringan, kapiler

ABSTRACT

A closed pulsed heat pipe was made to determine its performance. The research was conducted experimentally using distilled water as a working fluid. The closed pulsed heat pipe is made of a copper capillary tube with an inner diameter of 2 mm and an outer diameter of 3.9 mm. The heat pipe is formed into 3 U bends and is divided into three heat transfer zones, namely the evaporator, adiabatic, and condenser. The effect of the inclination angle (0° , 30° , 45° , 60° , and 90° to the horizontal) and the power variation (5 W – 30W) were investigated. The results showed that the increase in the angle of inclination caused the performance of the heat pipe to decrease, indicated by the increase in thermal resistance. The best performance occurs at an inclination angle of 0° . Increased heat input improves heat pipe performance.

Keywords: Pulse heat pipe, inclination angle, capillary

1. PENDAHULUAN

Energi yang digunakan di seluruh dunia hampir 70% dalam bentuk panas (Chan et al. 2015), sebagian besar berasal dari bahan bakar fosil. Permintaan energi dunia meningkat berdasarkan data dari *BP Statistics Review of World Energy* (Anon 2019). Konsumsi energi primer meningkat pada tahun 2018 pada tingkat 2,9%, hampir dua kali lipat dari rata-rata 10 tahun

sebesar 1,5% per tahun, dan emisi karbon juga meningkat sebesar 2%, pertumbuhan tercepat selama tujuh tahun. Dua sumber energi tertinggi adalah minyak bumi dan batu bara, dan kedua sumber tersebut akan menghasilkan emisi gas karbon jika dimanfaatkan untuk menyediakan energi bagi kebutuhan manusia. Selain tidak dapat diperbarui, bahan bakar fosil ketika dimanfaatkan untuk menghasilkan energi juga akan menghasilkan panas, dan

sebagian akan dilepaskan ke lingkungan sebagai limbah panas. Ini menjadi masalah yang menyebabkan pemanasan global menjadi semakin tidak terkendali. Panas yang tidak terpakai ini perlu dimanfaatkan untuk menjadi energi yang dapat digunakan melalui perangkat perpindahan panas.

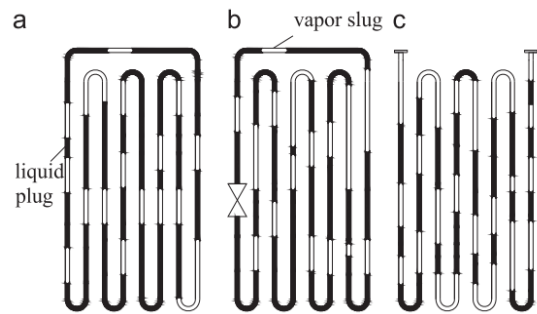
Kebutuhan alat perpindahan panas yang efisien juga terjadi pada komponen elektronik. Perkembangan dari komponen elektronik dari waktu ke waktu sangat cepat dan ukurannya semakin kecil. Semakin kecil dan meningkatnya kinerja komponen elektronik menyebabkan panas yang dihasilkan juga meningkat. Ini menciptakan kebutuhan akan perangkat yang secara cepat dan efektif dapat membuang fluks panas yang sangat tinggi dan mempertahankan suhu operasinya (Sohel Murshed and Nieto de Castro 2017). Jika suhu operasional terlampaui, kinerja dan umur pakai mikroprosesor akan berkurang.

Berdasarkan kondisi yang telah disampaikan tersebut, maka diperlukan perangkat perpindahan panas yang efektif dan efisien. Salah satu perangkat perpindahan panas dengan potensi untuk memenuhi kebutuhan tersebut adalah pipa kalor berdenyut tertutup. Oleh karena itu dilakukan penelitian terhadap pipa kalor berdenyut.

2. KAJIAN LITERATUR

2.1 Pipa Kalor Berdenyut

Pipa kalor berdenyut, juga dikenal sebagai pipa kalor berosilasi merupakan jenis pipa kalor generasi baru yang menarik perhatian luas sejak diusulkan oleh Akachi pada 1990-an karena prinsip kerjanya yang unik dan kinerja termal yang sangat baik (Xu et al. 2021). Pipa kalor berdenyut terdiri dari pipa kapiler, yang dapat ditekuk menjadi berbagai bentuk sesuai dengan kebutuhan lingkungan kerja. Menurut susunan pipanya, pipa kalor berdenyut dapat dikategorikan menjadi pipa kalor tertutup dengan dan tanpa katup dan pipa terbuka, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1 (Bastakoti et al. 2018).



Gambar 2.1 Jenis pipa kalor berdenyut: a. Pipa kalor tertutup, b. Pipa kalor tertutup dengan katup, c. Pipa kalor terbuka

2.2 Kinerja Pipa Kalor Berdenyut

Kinerja pipa kalor berdenyut dapat diukur dengan perbandingan perbedaan temperatur antara evaporator dan kondensor dan total masukan panas, sebagai berikut (Gamit et al. 2015):

$$R_e = \frac{(T_e - T_c)}{Q}$$

.....(1)

Dimana T_e adalah suhu rata-rata evaporator (K), T_c adalah suhu rata-rata kondensor (K), Q adalah masukan panas (W), R tahanan panas (K / W). Rasio ini banyak digunakan untuk mengukur kinerja pipa kalor berdenyut. Semakin kecil nilai R menunjukkan semakin tinggi kinerja pipa kalor berdenyut.

2.3 Parameter Yang Mempengaruhi Kinerja Pipa Kalor Berdenyut

Berbagai parameter yang mempengaruhi kinerja pipa kalor berdenyut dapat dikategorikan menjadi tiga kelompok utama; (1) geometri pipa kalor berdenyut, (2) sifat fisik fluida kerja, dan (3) parameter operasional.

Geometri: Diameter, penampang, konfigurasi saluran, panjang bagian evaporator, adiabatik dan kondensor, jumlah lekukan merupakan parameter geometri yang dapat mempengaruhi kinerja pipa kalor berdenyut. Diameter dalam pipa kalor berdenyut mempengaruhi kinerja termalnya. Hal ini berhubungan langsung antara tegangan permukaan fluida dengan material pipa kalor dan gaya gravitasi. Yang dkk. (Yang, Khandekar, and Groll

2009) menyimpulkan bahwa pipa kalor berdenyut dengan diameter dalam yang lebih besar menunjukkan kinerja termal yang jauh lebih baik daripada yang lebih kecil, hal ini berkaitan dengan kerugian disipatif yang lebih rendah ketika diameter dalam lebih besar. Dari penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa ukuran diameter dalam pipa kalor berada dalam rentang diantara 1 mm (Mehta and Patel 2016) hingga 7.2 mm (Kim et al. 2017). Bentuk penampang saluran pipa kalor berdenyut secara signifikan mempengaruhi transisi pola aliran dan distribusi fluida kerja dalam pipa, terutama bila penampang tidak dalam bentuk bulat (Han et al. 2016). Panjang setiap bagian pipa kalor, yaitu evaporator, adiabatik, dan kondensor, berpengaruh signifikan terhadap performa pipa kalor berdenyut. Dapat dipastikan kinerja pipa kalor akan lebih baik jika panas dari evaporator sepenuhnya dibuang di kondensor. Mengurangi panjang evaporator dan kondensor akan mengurangi panjang perpindahan panas efektif yang menyebabkan hanya sedikit panas yang ditransfer oleh perangkat. Charoensawan dan Terdtoon (Charoensawan and Terdtoon 2007) melakukan percobaan dua pipa kalor berdenyut dengan panjang yang berbeda namun masing-masing bagian dari pipa kalor berdenyut dibuat dalam ukuran yang sama (kondensor dan evaporator). Panjang masing-masing bagian adalah 50 mm dan 150 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tahanan termal bergantung pada panjang evaporator. Semakin pendek evaporator meningkatkan kinerja termal untuk semua ukuran diameter, fluida kerja, dan rasio pengisian.

Panjang bagian adiabatik merupakan faktor lain yang berpotensi mempengaruhi kinerja pipa kalor berdenyut. Liu dkk. (Liu et al. 2015) mempelajari faktor ini secara bersamaan dengan faktor-faktor lain seperti rasio pengisian, masukan panas, orientasi sudut dan jumlah lekukan. Meskipun studi ini tidak menyebutkan efek gradasi perubahan panjang penampang, namun penyesuaian yang dibuat untuk mengatur

panjang adiabatik dengan mengubah panjang pipa sangat berguna untuk menentukan pengaruh parameter lainnya. Pipa kalor berdenyut memiliki bentuk unik dengan banyak lekukan kapiler berbentuk "U". Jumlah lekukan akan mempengaruhi kinerjanya. Karena bentuk "U", fluida kerja kehilangan tekanannya lebih banyak daripada pipa lurus. Meskipun jumlah lekukan mempengaruhi kinerja pipa kalor berdenyut, jumlah lekukan optimal belum dapat ditentukan. Quan dkk. (Li and Jia 2010) menyarankan bahwa meningkatkan jumlah lekukan pipa kalor dapat memberikan kinerja perpindahan panas yang lebih baik.

Fluida kerja: Sifat fisik fluida kerja, seperti panas laten, tegangan permukaan, panas spesifik, viskositas, dll., memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kinerja pipa kalor (Han et al. 2016). Fluida kerja dengan panas laten yang rendah akan menghasilkan gelembung dan segera pecah yang menguntungkan pada saat awal pengoperasian (*startup*) pipa kalor. Ketika panas laten fluida kerja rendah, pipa kalor segera dengan cepat dapat beroperasi pada sumber panas kecil (Zhang and Faghri 2008). Fluida kerja dengan panas laten rendah diperlukan untuk fluks panas yang rendah. Namun untuk fluks panas tinggi, dibutuhkan fluida kerja dengan panas laten yang lebih tinggi untuk memastikan pipa kalor dapat bekerja dengan baik. Untuk fluida kerja dengan nilai panas spesifik yang tinggi akan meningkatkan perpindahan panas sensibel di dalam pipa kalor. Ketika sumber panas di evaporator rendah maka perpindahan panas utama dilakukan oleh panas sensibel. Sehingga, fluida kerja dengan panas spesifik yang lebih tinggi diperlukan. Panas spesifik berkaitan erat dengan kapasitas kalor fluida kerja (Xiao and Cao 2012). Fluida kerja dengan viskositas rendah dapat digunakan sebagai fluida kerja pipa kalor. Viskositas dinamis yang rendah akan menurunkan tegangan geser dalam pipa dan mengurangi penurunan tekanan. Ini akan mengurangi kebutuhan panas untuk mempertahankan

gerakan osilasi pada pipa kalor (Groll and Khandekar 2016).

Parameter operasional: Rasio pengisian fluida kerja, fluks panas, sudut kemiringan merupakan parameter operasional juga mempengaruhi kinerja pipa kalor berdenyut. Yang dkk. (Yang, Khandekar, and Groll 2008) menemukan bahwa rasio pengisian optimal adalah 50% untuk mendapatkan kinerja terbaik. Secara umum, fluks panas mempengaruhi hambatan termal dari pipa kalor. Hambatan thermal dari pipa kalor menurun dengan meningkatnya fluks panas (Lin, Kang, and Chen 2008). Sedangkan pengaruh sudut kemiringan bervariasi tergantung pada kondisi fluida kerja dan suplai panas. Xue dkk. (Xue and Qu 2014) melakukan studi eksperimental pipa kalor berdenyut dan menemukan bahwa hambatan termal menurun dengan meningkatnya sudut kemiringan. Selanjutnya Paudel dan Michna melalui penelitiannya menemukan bahwa tahanan thermal terendah terjadi pada posisi horizontal (Paudel and Michna 2014).

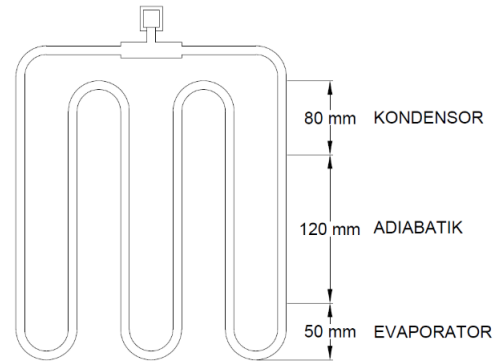
3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Instrumen Penelitian

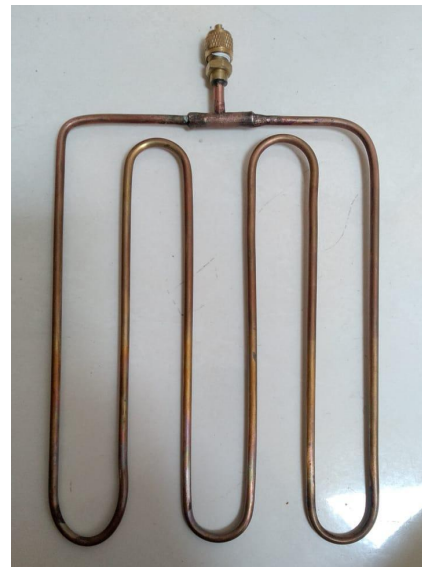
Untuk melaksanakan penelitian ini diperlukan instrument penelitian:

- Pipa kalor berdenyut tertutup dari tembaga.
- Pompa vakum untuk memvakum pipa kalor.
- Slide regulator, untuk mengatur tegangan listrik yang keluar dari PLN (220 Volt) sehingga dapat diatur menurut kebutuhan. Arus listrik digunakan untuk memanaskan *heater*.
- *Heater*, sebagai sumber panas untuk pipa kalor (pengganti energi panas yang terbuang).
- Data logger untuk merekam temperature.
- Satu unit komputer sebagai pencatat dan pengolah data.

- Voltmeter, digunakan untuk mengukur tegangan yang mengalir pada pemanas listrik.
- Thermokople sebanyak 4 buah (2 buah dikeondesor dan 2 buah di evaporator).



Gambar 3.1 Rancangan Pipa Kalor Berdenyut Tertutup



Gambar 3.2 Aktual Pipa Kalor Berdenyut



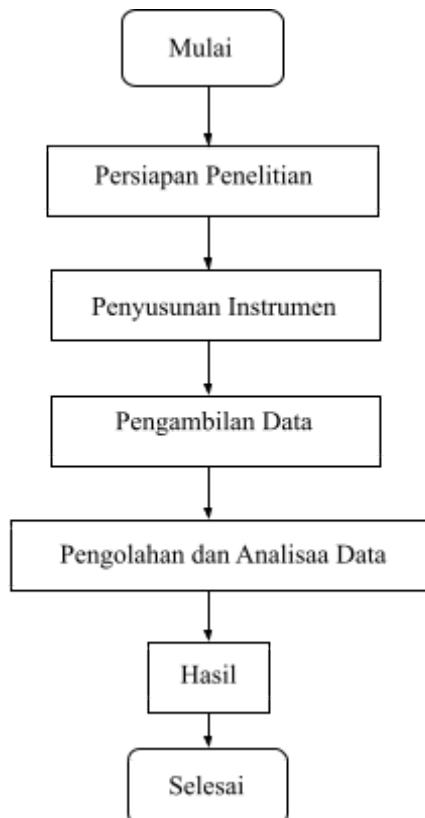
Gambar 3.3 Pompa Vakum



Gambar 3.4 Slide Regulator



Gambar 3.5 Data Logger



Gambar 3.6 Bagan Alur Penelitian

3.2 Pembuatan Pipa Kalor Berdenyut

Pipa kalor berdenyut yang digunakan pada penelitian ini terbuat dari pipa tembaga dengan diameter dalam 2 mm dan diameter luar 3.9 mm. Pipa kalor berdenyut dibuat dalam 3 lekukan. Pipa kalor dibagi ke dalam tiga bagian yaitu evaporator, adiabatik dan kondenser. Panjang bagian evaporator 50 mm, adiabatik 180 mm dan kondenser 80 mm. Fluida kerja yang digunakan adalah air destilasi dengan rasio pengisian 50%.

Pada bagian evaporator input panas diberikan melalui heater dan diisolasi untuk mengurangi kehilangan panas. Bagian kondenser didinginkan menggunakan udara. Empat termokopel dipasang masing-masing dua di bagian kondensor dan evaporator. Untuk merekam pengukuran temperature digunakan 4ch Data Logger Thermometer TM-947SD J datalogger.

Tabel 3.1 Spesifikasi Pipa Kalor Berdenyut

Spesifikasi Pipa Kalor Berdenyut	
Bahan	Pipa tembaga
Diameter dalam pipa	2 mm
Diameter luar pipa	3.9 mm
Panjang kondensor	80 mm
Panjang adiabatic	120 mm
Panjang evaporator	50 mm
Jumlah lekukan	3
Fluida kerja	Air destilasi
Rasio pengisian	50% (volume)

3.3 Prosedur Penelitian

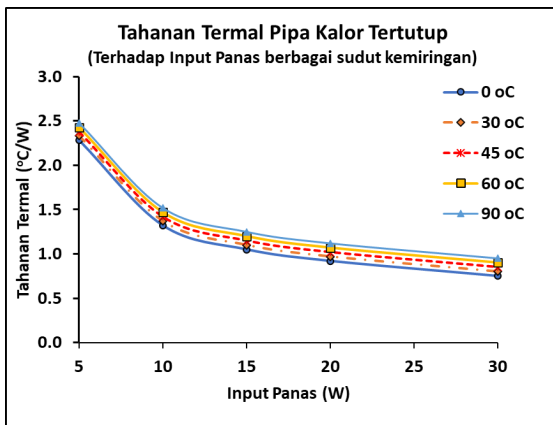
Prosedur berikut dilaksanakan selama penelitian:

- Sebelum diisi dengan fluida kerja, pipa kalor divakum terlebih dahulu.
- Pipa kalor diisi dengan fluida kerja dengan rasio pengisian 50%.
- Daya (input panas) diatur sedemikian rupa menggunakan regulator listrik dengan variasi 5W sampai 30 W dengan kenaikan setiap 5 W.

- Data temperature direkam setelah kondisi steady.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

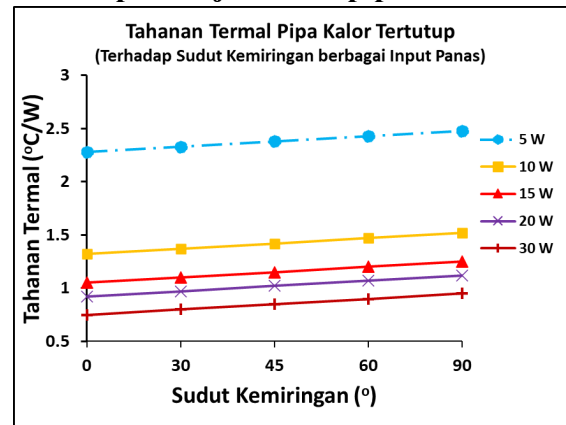
4.1 Pengaruh Sudut Kemiringan terhadap kinerja termal pipa kalor



Gambar 4.1 Pengaruh sudut kemiringan terhadap kinerja pipa kalor tertutup

Sudut kemiringan mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kinerja pipa kalor berdenyut. Pengaruh dari sudut kemiringan bisa dianalisa dari gambar 4.1. Hasil penelitian mengungkapkan kenaikan sudut kemiringan menyebabkan kenaikan tahanan termal. Nilai tahanan thermal tertinggi terjadi pada input panas terendah untuk semua sudut kemiringan. Dengan meningkatnya sudut kemiringan, fluida kerja mengalami sudut pembasahan yang lebih tinggi. Ini mempengaruhi fluida dalam hal perbedaan tekanan kapiler menjadi lebih rendah dan gaya gravitasi mendominasi gaya tegangan permukaan. Berkurangnya perbedaan tekanan kapiler ini tidak mampu mendorong cairan dari bagian evaporator ke bagian kondensor. Akibatnya perbedaan suhu yang tinggi antara bagian evaporator dan kondensor menyebabkan tahanan termal yang lebih tinggi. Untuk rasio pengisian 50%, kinerja terbaik terjadi pada sudut kemiringan 0°.

4.2 Pengaruh Kenaikan Input Panas terhadap kinerja termal pipa kalor



Gambar 4.2 Pengaruh input panas terhadap kinerja pipa kalor

Kenaikan input panas mempengaruhi kinerja pipa kalor berdenyut. Semakin tinggi panas yang diberikan kepada pipa kalor maka tahanan termalnya semakin kecil yang berarti semakin baik kemampuan pipa kalor dalam memindahkan panas. Ketika panas diberikan ke evaporator, tekanan dan suhu uap di evaporator akan meningkat yang memberikan daya dorong untuk aliran fluida. Pada penelitian ini input panas sebesar 5 W memiliki tahanan termal yang paling tinggi untuk setiap perbedaan sudut kemiringan. Semakin tinggi input panas (30 W) memiliki tahanan termal yang paling kecil. Hal ini disebabkan oleh pengaruh dari kecenderungan fluida kerja didalam pipa yang mudah untuk menguap dan tahanan geser yang semakin kecil. Pengaruh dari kenaikan input panas dapat dilihat dari gambar 4.2 Hasil penelitian mengungkapkan kenaikan input panas menyebabkan turunnya tahanan termal. Kenaikan input panas menyebabkan fluida kerja bekerja lebih efektif.

5. KESIMPULAN

Kinerja terbaik pipa kalor berdenyut terjadi pada sudut kemiringan 0° (horizontal) untuk berbagai input panas.

Tahanan thermal pipa kalor berdenyut berkurang dengan meningkatnya input panas menyebabkan kinerja pipa kalor meningkat.

6. UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Negeri Jakarta yang telah membiayai penelitian ini dengan nomor kontrak: 062.a/5.FT/PP/IV/2021

7. DAFTAR PUSTAKA

Anon. 2019. "BP Statistical Review of World Energy Statistical Review of World."

Bastakoti, Durga, Hongna Zhang, Da Li, Weihua Cai, and Fengchen Li. 2018. "An Overview on the Developing Trend of Pulsating Heat Pipe and Its Performance." *Applied Thermal Engineering* 141(April):305–32. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.05.121.

Cai, Qingjun, Chung Lung Chen, and Julie F. Asfia. 2006. "Operating Characteristic Investigations in Pulsating Heat Pipe." *Journal of Heat Transfer* 128(12):1329–34. doi: 10.1115/1.2349509.

Chan, C. W., E. Siqueiros, J. Ling-Chin, M. Royapoor, and A. P. Roskilly. 2015. "Heat Utilisation Technologies: A Critical Review of Heat Pipes." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50:615–27. doi: 10.1016/j.rser.2015.05.028.

Charoensawan, Piyanun, and Pradit Terdtoon. 2007. "Thermal Performance Correlation of Horizontal Closed-Loop Oscillating Heat Pipes." *Proceedings of the*

Electronic Packaging Technology Conference, EPTC 906–9. doi: 10.1109/EPTC.2007.4469768.

Gamit, Harshal, Vinayak More, Bade Mukund, and H. B. Mehta. 2015. "Experimental Investigations on Pulsating Heat Pipe." *Energy Procedia* 75:3186–91. doi: 10.1016/J.EGYPRO.2015.07.665.

Groll, Manfred, and Sameer Khandekar. 2016. "ICMM2004-2318."

Han, Xiaohong, Xuehui Wang, Haoce Zheng, Xiangguo Xu, and Guangming Chen. 2016. "Review of the Development of Pulsating Heat Pipe for Heat Dissipation." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59:692–709. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.350.

Kim, Byeongchan, Longnan Li, Jihoon Kim, and Daejoong Kim. 2017. "A Study on Thermal Performance of Parallel Connected Pulsating Heat Pipe." *Applied Thermal Engineering* 126:1063–68. doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2017.05.191.

Li, Quan, and Li Jia. 2010. "Experimental Study on Heat Transfer Characteristic of Plate Pulsating Heat Pipe." *Proceedings of the ASME Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer International Conference 2009, MNHMT2009* 3(January 2009):361–66. doi: 10.1115/MNHMT2009-18080.

Lin, Yu Hsing, Shung Wen Kang, and Hui Lun Chen. 2008. "Effect of Silver Nano-Fluid on Pulsating Heat Pipe Thermal Performance." *Applied Thermal Engineering* 28(11–12):1312–17. doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2007.10.019.

- Liu, Yumeng, Haoren Deng, John Pfothenhauer, and Zhihua Gan. 2015. "Design of a Hydrogen Pulsating Heat Pipe." *Physics Procedia* 67:551–56. doi: 10.1016/j.phpro.2015.06.074.
- Mehta, V. M., and H. B. Patel. 2016. "Start up Mechanism of Pulsating Heat Pipe." *Proceedings of the National Conference on Thermal Fluid Science and Tribo Application* (May 2016).
- Paudel, Sagar Babu, and Gregory J. Michna. 2014. "Effect of Inclination Angle on Pulsating Heat Pipe Performance." *ASME 2014 12th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, ICNMM 2014, Collocated with the ASME 2014 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting* 1–6. doi: 10.1115/ICNMM2014-22016.
- Sohel Murshed, S. M., and C. A. Nieto de Castro. 2017. "A Critical Review of Traditional and Emerging Techniques and Fluids for Electronics Cooling." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 78(February):821–33. doi: 10.1016/j.rser.2017.04.112.
- Xiao, Lan, and Yiding Cao. 2012. "Recent Advances in Pulsating Heat Pipes and Its Derivatives." *Journal of Enhanced Heat Transfer* 19(3):213–31. doi: 10.1615/JEnhHeatTransf.2012001896
- Xu, Yanyan, Yanqin Xue, Hong Qi, and Weihua Cai. 2021. "An Updated Review on Working Fluids, Operation Mechanisms, and Applications of Pulsating Heat Pipes." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 144.
- Xue, Zhihu, and Wei Qu. 2014. "Experimental Study on Effect of Inclination Angles to Ammonia Pulsating Heat Pipe." *Chinese Journal of Aeronautics* 27(5):1122–27. doi: 10.1016/j.cja.2014.08.004.
- Yang, Honghai, S. Khandekar, and M. Groll. 2008. "Operational Limit of Closed Loop Pulsating Heat Pipes." *Applied Thermal Engineering* 28(1):49–59. doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2007.01.033.
- Yang, Honghai, Sameer Khandekar, and Manfred Groll. 2009. "Performance Characteristics of Pulsating Heat Pipes as Integral Thermal Spreaders." *International Journal of Thermal Sciences* 48(4):815–24. doi: 10.1016/J.IJTHEMALSCI.2008.05.017.
- Zhang, Yuwen, and Amir Faghri. 2008. "Advances and Unsolved Issues in Pulsating Heat Pipes." *Heat Transfer Engineering* 29(1):20–44. doi: 10.1080/01457630701677114.