

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemanasan global dan isu keberlanjutan energi mendorong untuk menciptakan inovasi teknologi yang efisien termasuk sistem perpindahan panas. Selain itu, kemajuan teknologi di bidang elektronik mendorong pengembangan perangkat yang berukuran lebih kecil, bekerja lebih cepat, dan memiliki kepadatan komponen yang lebih tinggi dibandingkan sebelumnya. Miniaturisasi tersebut menyebabkan peningkatan densitas daya yang berdampak pada naiknya fluks panas pada perangkat elektronik, sehingga temperatur operasi perangkat cenderung meningkat [1]. Jika panas tersebut tidak dikelola dengan baik, maka akan berdampak negatif terhadap performa dan umur pakai perangkat. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem manajemen termal yang andal untuk mengembangkan metode dan teknologi pendinginan baru pada perangkat elektronik.

Untuk mengatasi tantangan tersebut, sistem manajemen termal menjadi sangat penting. Salah satu solusi yang menjanjikan adalah penggunaan *Pulsating Heat Pipe* (PHP). *Pulsating Heat Pipe* (PHP) adalah perangkat perpindahan kalor pasif yang memanfaatkan sirkulasi alami dari fluida kerja dalam tabung kapiler berkelok serta dapat dibentuk sesuai dengan kebutuhan lingkungan kerja [2]. Konsep awal *Pulsating Heat Pipe* pertama kali diperkenalkan oleh Smyrnov dan Savchenkov pada tahun 1971 untuk mempelajari mekanisme perpindahan panas. Kemudian, pada tahun 1990 Hisateru Akachi pertama kali mengusulkan teknologi *Pulsating Heat Pipe* (PHP) dari perspektif teknik [3]. Strukturnya yang sederhana, proses fabrikasi yang mudah, biaya rendah, dan kemampuan perpindahan panas yang tinggi menjadi keunggulan dari PHP [4]. Selain itu, karena PHP tidak menggunakan struktur sumbu (*wickless*), PHP tidak mengalami batas kapiler, meskipun batas pendidihan masih mungkin terjadi. Hal ini menjadi salah satu keunggulan *Pulsating Heat Pipe* (PHP) [5]. Oleh karena itu, PHP dapat dianggap efektif dalam pendinginan elektronik untuk menghilangkan fluks panas yang besar.

Terdapat tiga jenis *Pulsating Heat Pipe* (PHP), yaitu: (a) *Closed Loop Pulsating Heat Pipe*, (b) *Closed Loop Pulsating Heat Pipe with valve*, dan (c) *Open*

Loop Pulsating Heat Pipe. Dari ketiga jenis PHP, diketahui bahwa pipa kalor berdenyut tertutup atau *Closed Loop Pulsating Heat Pipe* (CLPHP) yang lebih efisien, karena kinerja termalnya yang tinggi [6], serta memiliki kemampuan menjaga sirkulasi fluida secara berkelanjutan dan efektif dalam skala kecil. Struktur CLPHP terdiri dari tiga bagian utama, bagian evaporator sisi yang menerima panas, bagian adiabatik sisi transisi, dan bagian kondensor, sisi untuk melepaskan panas [7]. Untuk menghasilkan kinerja yang baik, desain geometri pipa, sifat fisik fluida kerja yang digunakan, penggunaan jumlah lekukan, input daya yang diberikan, serta rasio pengisian fluida kerja pada pipa harus diperhatikan [8]. Di antaranya, penggunaan jumlah lekukan pada pipa dan jenis fluida kerja yang digunakan menjadi aspek penting yang berdampak langsung terhadap performa termal. Semakin banyak lekukan yang digunakan dapat meningkatkan ketidakteraturan aliran fluida yang memicu osilasi lebih stabil, di sisi lain berpotensi menambah kehilangan tekanan. Sementara itu, fluida kerja yang digunakan juga memiliki perbedaan dalam sifat termofisikanya, seperti tegangan permukaan, viskositas, dan panas laten.

Berbagai studi telah dilakukan untuk mengetahui kinerja termal CLPHP dan meningkatkan performa kinerjanya. Dalam penelitian Sugita et al. [2], menggunakan fluida kerja air destilasi dengan rasio pengisian 50%, menggunakan diameter dalam dan luar masing-masing 2 mm dan 3.9 mm, menggunakan 3 lekukan (*U-turn*), variasi daya 5W–30W, serta menggunakan sudut kemiringan sebagai pengaruh kinerja CLPHP. Hasilnya kinerja terbaik CLPHP terjadi pada sudut kemiringan 0°, dan tahanan termal berkurang dengan meningkatnya input panas yang diberikan. Penelitian lain oleh Rahman et al. [9], mengamati karakteristik performa dari fluida kerja etanol dan metanol, menggunakan diameter dalam dan luar masing-masing 2.5 mm dan 3 mm, dengan rasio pengisian 50% dalam CLPHP yang dilekuk menjadi 8 lekukan (*U-turn*), menggunakan sudut kemiringan sebagai pengaruh kinerja CLPHP serta menggunakan sirip (fin) pada bagian kondensor. Hasilnya untuk kemiringan 45° metanol lebih baik dibandingkan etanol, penggunaan sirip dapat meningkatkan karakteristik performa dan perpindahan panas pada sistem CLPHP. Selanjutnya penelitian Bastakoti dan Zhang et al. [10], menggunakan fluida kerja metanol, etanol, larutan surfaktan

CTAC (50–2000 ppm), dan air deionisasi (DI), dengan rasio pengisian 35%, 50%, dan 65%, beban panas dari 15W–80W, serta 7 lekukan (U-turn). Hasilnya resistansi termal terendah diperoleh saat menggunakan air DI dengan rasio pengisian 50% sebesar 0,34 K/W, metanol dan etanol menunjukkan fluktuasi aliran yang lebih besar, namun tidak meningkatkan kinerja termal secara signifikan pada beban tinggi. Penggunaan larutan CTAC 2000 ppm pada rasio pengisian 35–50% menghasilkan resistansi termal terendah sebesar 0,30 K/W, dan menunjukkan performa perpindahan panas terbaik di antara semua fluida.

Berdasarkan uraian tersebut, kinerja *Closed Loop Pulsating Heat Pipe* (CLPHP) dipengaruhi oleh berbagai parameter, di antaranya fluida kerja dan sudut kemiringan, yang berperan penting dalam menentukan karakteristik aliran serta mekanisme perpindahan panas di dalam sistem. Selain fluida kerja dan sudut kemiringan, besarnya input daya yang diberikan pada sisi evaporator juga memengaruhi karakteristik start-up dan kestabilan osilasi aliran di dalam CLPHP, sehingga berdampak langsung pada nilai tahanan termal, laju perpindahan panas. Meskipun berbagai penelitian telah dilakukan, hasil yang diperoleh masih menunjukkan kecenderungan yang beragam, khususnya terkait respon kinerja CLPHP terhadap perubahan kondisi operasi. Oleh karena itu, diperlukan kajian eksperimental dengan konfigurasi dan kondisi operasi yang terkontrol untuk memperoleh pemahaman yang lebih konsisten mengenai karakteristik kinerja CLPHP.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang sudah diuraikan, maka dapat diidentifikasi beberapa masalah, diantaranya yaitu:

1. Peningkatan densitas daya akibat miniaturisasi perangkat elektronik menimbulkan fluks panas yang tinggi, sehingga diperlukan sistem manajemen panas yang mampu bekerja secara efisien.
2. *Closed Loop Pulsating Heat Pipe* (CLPHP) merupakan perangkat perpindahan panas pasif yang memiliki potensi tinggi untuk pendinginan elektronik, namun kinerja termalnya sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi dan karakteristik fluida kerja dan kondisi operasi.

3. Pengaruh variasi fluida kerja terhadap kinerja termal CLPHP pada berbagai sudut kemiringan dan tingkat input daya masih memerlukan kajian eksperimental yang sistematis.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini yaitu:

1. Penelitian ini dilakukan pada sistem *Closed Loop Pulsating Heat Pipe* (CLPHP) dengan konfigurasi geometri yang ditetapkan.
2. Fluida kerja yang digunakan dibatasi pada air destilasi dan etanol.
3. Variasi sudut kemiringan yang ditinjau meliputi 0° , 30° , 45° , 60° , dan 90° .
4. Variasi input daya yang diberikan berada pada rentang 10 W hingga 50 W, dengan kenaikan 10 W.
5. Jenis pipa, diameter pipa, jumlah lekukan, dan rasio pengisian fluida kerja ditetapkan dan tidak divariasikan selama pengujian.
6. Parameter kinerja yang dianalisis dibatasi pada tahanan termal dan laju perpindahan panas.

1.4 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini yaitu:

Bagaimana pengaruh fluida kerja, sudut kemiringan dan input daya terhadap kinerja *Closed Loop Pulsating Heat Pipe*?

1.5 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini yaitu:

1. Menganalisis pengaruh penggunaan fluida kerja air destilasi dan etanol terhadap kinerja termal sistem *Closed Loop Pulsating Heat Pipe* (CLPHP) berdasarkan parameter tahanan termal dan laju perpindahan panas.
2. Menganalisis pengaruh variasi input daya terhadap kinerja termal CLPHP pada sudut kemiringan.
3. Menganalisis pengaruh sudut kemiringan terhadap kinerja termal CLPHP pada fluida kerja air destilasi dan etanol berdasarkan respon sistem terhadap peningkatan input daya.

4. Membandingkan kinerja termal CLPHP menggunakan fluida kerja air destilasi dan etanol berdasarkan parameter tahanan termal dan laju perpindahan panas pada berbagai variasi sudut kemiringan dan input daya.

1.6 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menambah wawasan dan referensi ilmiah di bidang perpindahan panas, khususnya terkait kinerja *Closed Loop Pulsating Heat Pipe (CLPHP)* dengan jenis fluida kerja dan sudut kemiringan. Hasil penelitian ini dapat menjadi bahan pembanding dan rujukan bagi penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan sistem manajemen termal dan pendinginan perangkat elektronik.

Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran terkait kinerja sistem CLPHP pada berbagai kondisi operasi, serta dapat berkontribusi dalam pengembangan teknologi sistem manajemen panas yang lebih efisien.

