

# Sistem Pendingin Central Processing Unit (CPU) Berbasis Cascade Straight Heat Pipe

Wayan Nata Septiadi<sup>1\*</sup>, I Nyoman Budiarsa<sup>1</sup>, Imanuel Adam Tnunay<sup>2</sup>, IGAA Desy Wulandari<sup>3</sup> dan Wayan Ainun Wildan Ula<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin, Universitas Udayana

<sup>2</sup>Prodi Magister Teknik Mesin, Departemen Teknik Mesin, Universitas Udayana

<sup>3</sup>Prodi Teknik Mesin, Departemen Teknik Mesin, Universitas Udayana

\*Corresponding author: wayan.nata@gmail.com

**Abstract** Advanced technological development has entered into various fields, Central Processing Unit (CPU) is a part of computer's hardware that carry out instructions of computer's program. CPU technology development leads into Smart Technology with the impression of small dimensions yet increase the system's performance. This results the increasing of heat flux which should be removed from the CPU system to maintain the performance and life of the CPU, the computer's heat could potentially damage and slow down the computer performance. Therefore, heat pipes has been developed as the cooling systems, where heat pipes have capability to transfer heat but contributes to the high exhausting temperature in the condenser. So that we made the design of Cascade Heat Pipe by combining two heat pipes into one. The design is expected to be able to degrade heat on the processor and also on the condenser. The results showed that the CPU Cooling System Cascade Heat Pipe with single condenser is able to reduce the processor temperature at idle conditions 2.74°C, and 1.48°C, at maximum idle conditions and 14.94°C of condenser part at idle conditions, and 21.12°C at maximum conditions, Cascade Heat Pipe with Double condenser can reduce processor temperature 3.89°C at idle conditions, and 4.24°C at maximum conditions and condenser part 17.12°C at idle conditions, and 24.16°C at maximum conditions lower than Non Cascade Heat Pipe.

**Abstrak** Perkembangan teknologi telah masuk ke dalam berbagai bidang, *Central Processing Unit* (CPU) merupakan bagian dari *hardware* pada sebuah komputer yang melaksanakan instruksi dari program komputer. Saat ini perkembangan CPU mengarah ke *Smart Technology*, dimana dimensi semakin kecil namun kinerja meningkat. Hal ini mengakibatkan meningkatnya fluks kalor yang harus dibuang untuk menjaga kinerja serta umur pemakaian CPU, panas pada komputer tersebut berpotensi merusak dan memperlambat kerja komputer. Oleh karena itu, *heat pipe* dikembangkan sebagai salah satu sistem pendingin, dimana *heat pipe* mampu memindahkan kalor, namun berdampak pada tingginya temperatur keluaran pada bagian kondensor. Sehingga dilakukan perancangan *Cascade Heat Pipe* dengan menggabungkan dua heat pipe menjadi satu. Harapannya, dapat menurunkan panas pada *processor* dan juga pada kondensor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Sistem Pendingin CPU *Cascade Heat Pipe* kondensor tunggal mampu menurunkan temperatur *processor* 2,74 °C dan 1,48 °C pada kondisi idle dan maksimum dan bagian kondensor 14,94 °C dan 21,12 °C pada kondisi idle dan maksimum, *Cascade Double* kondensor mampu menurunkan temperatur *processor* 3,89 °C dan 4,24 °C pada kondisi idle dan maksimum dan bagian kondensor 17,12 °C dan 24,16 °C pada kondisi idle dan maksimum lebih rendah dari Sistem Pendingin *Non Cascade*.

**Keywords:** *Heat Pipe, Cascade Straight Heat Pipe, screen mesh, CPU, Fluks Kalor.*

© 2018. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

## Pendahuluan

Kehidupan manusia sekarang berada pada zaman perkembangan teknologi yang sudah maju dari beberapa tahun terakhir, hal ini merupakan bukti nyata pertumbuhan eksponensial berbagai

bidang seperti elektronik, pembangkit listrik dan lain-lain [1]. *Smart Technologies* merupakan aplikasi pengetahuan ilmiah untuk tujuan praktis dengan proses evolusi terutama pada teknologi komputer baik dalam bentuk perangkat lunak, perangkat keras, dan layanan yang dirancang

sebagai solusi dan pengembangan aplikasi terkemuka yang membantu memudahkan dan meningkatkan kinerja kerja di seluruh dunia. Smart Technologies tetap menjadi display interaktif teknologi yang tepat digunakan dengan cara yang benar [2]. Central processing unit (CPU) merupakan bagian dari hardware pada sebuah komputer yang melaksanakan instruksi dari program komputer. seperti aritmatika, logis, dan operasi input / output dasar dari sebuah sistem komputer. Perkembangan teknologi CPU juga termasuk dalam salah satu bidang di dunia teknologi elektronika sangat cepat dengan memberikan kesan dimensi yang kecil dengan peralatan yang lebih ringan namun tetap menjaga kinerja agar semakin tinggi dan lebih efisien [3].

Sistem pendingin CPU merupakan rangkaian perangkat yang digunakan untuk mengurangi atau menghilangkan panas pada komponen komputer atau CPU, terutama pada bagian processor, dimana panas pada komputer tersebut berpotensi merusak atau memperlambat kerja sebuah komputer. Dampak dari perkembangan Smart Teknologi ini mengakibatkan sebagian komponen CPU menghasilkan fluks kalor atau overheating yang harus dikurangi bahkan dibuang dari sistem CPU untuk menjaga kinerja serta umur pemakaian CPU lebih lama [4]. Media perpindahan panas tradisional seperti udara, air, etilenaglikol belum maksimal sehingga sistem CPU membutuhkan media perpindahan panas dengan konduktivitas termal yang tinggi [3]. Sebagian besar perangkat elektronik menghasilkan lebih dari 100 W/cm<sup>2</sup> fluks kalor yang harus dimanajemen dengan menggunakan sistem pendingin yang handal [5]. Berkembangnya teknologi pada sistem pendingin CPU dengan dimensi yang kecil, kinerja tinggi dan serta tidak membutuhkan tambahan konsumsi daya listrik menjadikan suatu tantangan tersendiri bagi industri elektronik komputer, peneliti hingga bahkan sampai kalangan masyarakat [6].

Dari berbagai permasalahan manajemen fluks kalor pada sistem CPU maka untuk mengatasi hal tersebut ada beberapa upaya yang telah dilakukan oleh beberapa pengembang seperti penggunaan heat pipe sebagai sistem pendingin dengan wick biomaterial [7]. Pengembangan selanjutnya pada penggunaan sistem pendingin dengan pengintegrasian wick sintered powder dan screen mesh [8] serta penelitian potensi nanofluida baik nanofluida tunggal maupun hybrid nanofluids sebagai fluida kerja heat pipe seperti penggunaan fluida kerja Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-air, TiO<sub>2</sub>-air, ZnO-air, CuO-air dan karakterisasi termal hybrid nanofluid Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CuO-air juga telah dilakukan guna meningkatkan

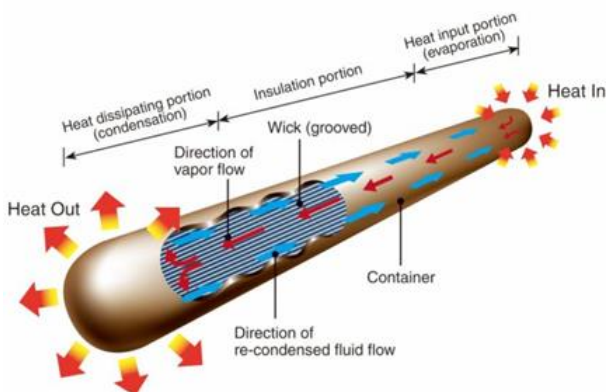
kinerja heat pipe untuk manajemen sistem termal CPU [9]. Dalam hal penyerapan panas, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids dan 5% SnO<sub>2</sub> nanofluids panas yang diserap 9% dan 12%, masing-masing lebih baik dari pada air, dan keseluruhan transfer koefisien MCHE bila menggunakan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -water 5% dan SnO<sub>2</sub> -water 5% dapat ditingkatkan hingga 13% dan 14%, hasil ini menunjukkan bahwa nanofluids adalah fluida kerja potensial untuk microchannel di masa depan [9]. Eksperimen dan pendekatan pemodelan nanofluida dalam thermosyphons dan pipa panas juga dikembangkan mendapatkan hasil optimal kinerja termal thermosyphons dan heat pipe dalam ketergantungan pada konsentrasi yang ditemukan untuk Ag, TiO<sub>2</sub> dan CuO nanopartikel tersebar di berbagai fluida dasar [10].

Heat Pipe (Pipa Kalor) adalah teknologi alat yang digunakan untuk mentransfer panas menggunakan pipa berukuran tertentu dari satu tempat lain, pipa berongga, tertutup, mengandung cairan atau fluida kerja ini dibagi menjadi tiga bagian yaitu evaporator, adiabatik, dan bagian kondensor. Cara kerja pendinginan *heat pipe* adalah dengan mengalirkan panas dari satu titik ke titik yang lain [11]. Heat Pipe biasanya terbuat dari bahan aluminium, tembaga atau tembaga berlapis nikel, jumlah kalor yang jauh lebih besar dari kenaikan suhunya yang kecil antara cuaca panas dan dingin. *Heat Pipe* dapat digunakan pada keadaan dimana sumber dan pelepas panas diharuskan terpisah, untuk membantu konduksi atau pembagian panas pada bidang permukaan sumber panas [12]. Pada dinding bagian dalam pipa kalor biasanya diisi sumbu pipa kapiler (*wick*) yang berfungsi sebagai lintasan dan pompa kapiler dari cairan kondensat untuk kembali dari kondensor ke bagian evaporator, cairan kondensat bergerak atas prinsip kerja kapiler. Setelah fluida menguap di bagian evaporator, lalu uap tersebut mengalir menuju bagian kondensor dan setelah mengalami kondensasi di bagian kondensor maka uap akan mencair, cairan atau kondensat tersebut akan mengalir kembali ke sisi panas (*evaporator*) dari *heat pipe* dan begitu seterusnya [12].

Teknologi *heat pipe* memiliki keunggulan yang sangat baik sebagai alat penukar kalor dari pada jenis alat penukar kalor yang lainnya, karena *heat pipe* memiliki kemampuan menyimpan kalor yang cukup besar dengan beda temperatur yang kecil serta investasi dan perawatan pipa kalor membutuhkan biaya yang murah. Kemampuan yang dimiliki *heat pipe* yang sangat baik dalam memindahkan kalor juga berdampak pada tingginya temperatur buangan pada bagian kondensor [13].

Pada tahun 2016 juga telah dilakukan pengkajian terhadap permasalahan ini juga oleh W. Nata Septiadi dengan melakukan karakterisasi kinerja termal pada sistem pendingin berupa heat pipe bertingkat, dimana nilai hambatan termal yang didapatkan pada masing-masing fluida kerja memiliki nilai yang berbeda-beda, hambatan termal tertinggi dimiliki oleh fluida kerja alkohol 70% pada saat pembebanan 46,22 watt yaitu sebesar  $0,495\text{ }^{\circ}\text{C/W}$  sedangkan nilai hambatan termal terendah dimiliki oleh aquades dengan pembebanan 46,22 watt yaitu sebesar  $0,451\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ .

Prinsip kerja heat pipe adalah memindahkan kalor dari bagian evaporator menuju bagian kondensor dengan siklus penguapan dan pengembunan fluida kerja [12]. Prinsip kerja heat pipe bergantung pada selisih temperatur antara kedua ujung pipa, jika temperatur pada salah satu pipa mencapai temperatur penguapan maka fluida kerja yang berada pada bagian evaporator akan menguap, dan terjadi tekanan didalam rongga sehingga uap akan mengalir dari ujung satu ke ujung yang lainnya, peristiwa ini akan dibawa oleh fluida kerja kemudian dilepaskan sampai mencapai temperatur pengembunan sehingga mengakibatkan fluida kerja berubah dari fase uap menjadi fase cair akibat proses kondensasi [12].



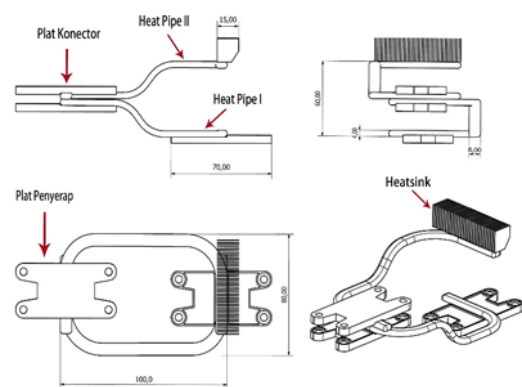
**Gambar 1. Prinsip Kerja Heat Pipe**

Setelah peristiwa kondensasi terjadi maka fluida kerja akan berubah fase menjadi cair yang mengalir ke sumber panas pada evaporator untuk mendinginkan kembali, selama pipa kalor bekerja, proses ini akan mengalami proses terus menerus, sebagai konsep bahwa seperti inilah cara kerja pipa kalor dalam menyerap dan mendinginkan pada sumber kalor tersebut. Disini perlu diperhatikan mengenai temperatur yang mampu diserap oleh heat pipe agar fluida kerja tetap terjaga dan menghindari heat pipe dari kekeringan.

Dalam pengembangan di masa smart technology ini, maka melihat potensi dan perkembangan teknologi heat pipe yang cukup baik dan sangat menjanjikan untuk digunakan sebagai alternatif pada teknologi sistem pendingin CPU.

## Metode Penelitian

**Rancangan Penelitian,** Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode eksperimental yang dilakukan dalam beberapa tahapan penelitian. Tahapan pertama merupakan tahap perencanaan desain model *cascade straight heat pipe* dengan kondensor tunggal dan double kondensor dan selanjutnya pada tahap ketiga dilakukan pengujian, pengujian ini untuk mengetahui temperatur pada prosessor dan kondensor.

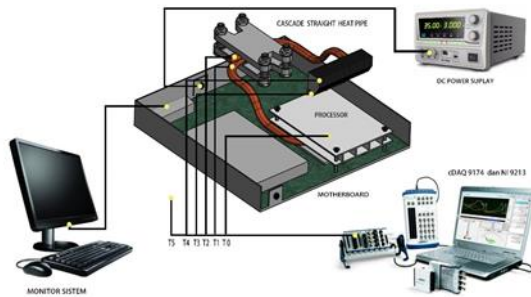


**Gambar 2. Desain Cascade Heat Pip**

**Tahap Perancangan Alat,** Pada tahap rancangan ini akan dilakukan desain *cascade straight heat pipe* dengan kondensor tunggal yang terbuat dari pipa tembaga pipih dengan lebar 8 mm, tebal 4 mm dan panjang 100 mm, pada tingkat pertama dan desain heat pipe pada tingkat kedua menggunakan pipa tembaga dengan lebar yang sama dengan heat pipe tingkat pertama. Ukuran desain dibuat dengan mempertimbangkan batas kerja *heat pipe* serta luas area sekitar perangkat CPU dan processor. *Heat Pipe* tingkat pertama difungsikan sebagai evaporator yang berfungsi sebagai bagian yang menyerap kalor dari procesor CPU. Pada bagian ujung dari salah satu sisi *heat pipe* bagian pertama dilengkapi dengan plat kontak termal yang terbuat dari tembaga dengan dimensi 40 mm x 40 mm dan *Heat Pipe* tingkat Kedua dilengkapi dengan sirip-sirip.

**Skematik Pengujian,** Pada Tahapan pengujian kinerja sistem pendingin CPU berbasis *cascade straight heat pipe* dan *hybrid nanofluid* dilakukan pada *Central Processing Unit* (CPU) Core i5 2,90 GHz yang tergolong pabrikan terbaru dan sering

banyak digunakan, serta dengan memberikan pembebanan pada kondisi idle yang merupakan kondisi beban CPU tanpa pengoperasian atau beban awal, dan kondisi maksimum yaitu pada saat CPU dioperasikan. Kinerja sistem pendingin *cascade straight heat pipe* diamati dengan meletakkan 5 *thermocouple* tipe-K pada desain berbentuk *cascade* kondensor tunggal dan 8 *thermocouple* pada *Double* Kondensor, *thermocouple* diletakan pada permukaan processor, bagian evaporator *heat pipe* tingkat pertama dan tingkat kedua, dan pada bagian kondensor *heat pipe* tingkat pertama dan tingkat kedua.



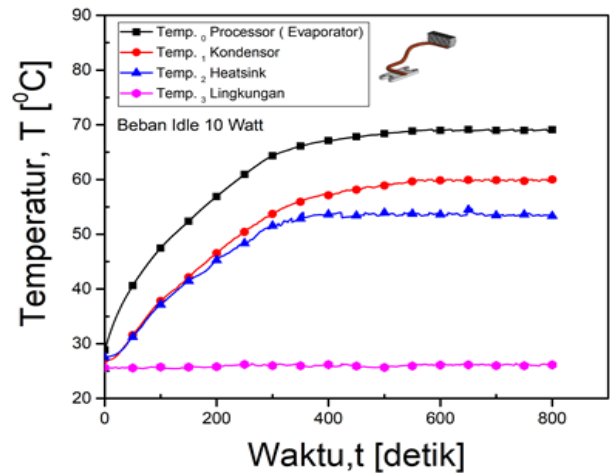
Gambar 3. Skematik Pengujian

## Hasil dan Pembahasan

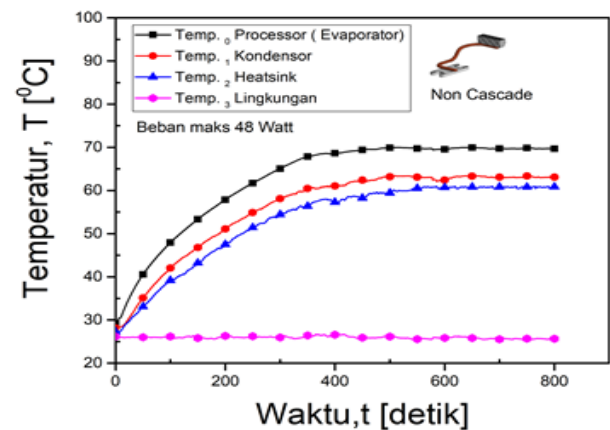
### Distribusi Temperatur Sistem Pendingin CPU Non Cascade

Pada Gambar 4. ini memperlihatkan distribusi perbandingan temperatur *Non Cascade* pada Kondisi Idle 10 Watt, dari gambar yang ditunjukkan tersebut dapat dilihat kenaikan temperatur secara drastis mulai dari 0 detik sampai 800 detik, setelah itu temperatur dalam keadaan *steady*. Pada keadaan *steady*, temperatur processor (Evaporator) mencapai 69,10 °C dan temperatur keluaran pada kondensor mencapai 59,99 °C, serta temperatur pada heatsink mencapai mencapai 53,32 °C.

Distribusi temperatur *Non Cascade* dengan pembebanan processor Maksimum 48 Watt atau pada kondisi maksimum dapat dilihat pada gambar 4, dari gambar tersebut ditunjukkan bahwa kenaikan temperatur secara drastis mulai dari 0 detik hingga 800 detik, setelah itu temperatur dalam keadaan *steady*. Pada keadaan *steady*, temperatur processor (Evaporator) mencapai 69,68 °C dan temperatur keluaran pada kondensor mencapai 63,06 °C, serta temperatur pada heatsink mencapai mencapai 60,85 °C.

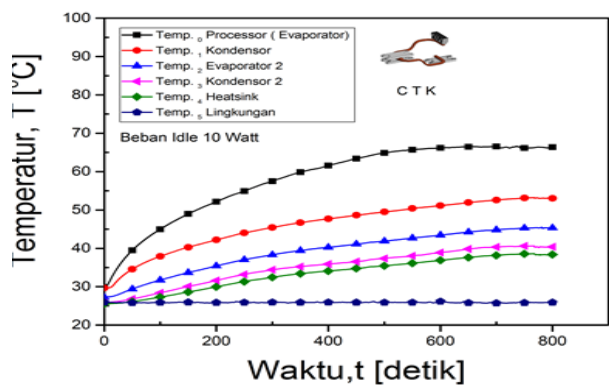


Gambar 4. Grafik distribusi temperatur pada *Non Cascade* pada Kondisi Idle 10 Watt.

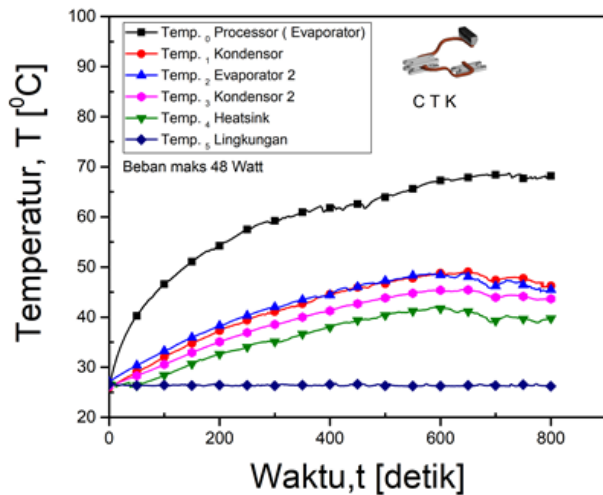


Gambar 5. Grafik distribusi temperatur pada *Non Cascade* pada Kondisi Maksimum 48 Watt.

### Distribusi Temperatur Cascade Tunggal Kondensor



Gambar 6. Grafik distribusi temperatur pada *Cascade Tunggal Kondensor* pada Kondisi Idle 10 Watt.



**Gambar 7. Grafik distribusi temperatur pada Cascade Tunggal Kondensor pada Kondisi Maksimal 48 Watt**

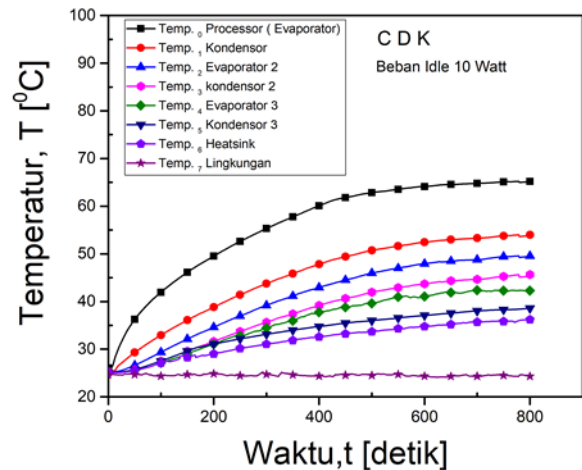
Pada Gambar 6. memperlihatkan distribusi temperatur *Cascade Tunggal Kondensor* pada kondisi Idle 10 Watt. dari gambar yang ditunjukkan tersebut dapat dilihat kenaikan temperatur secara drastis mulai dari 0 detik sampai 800 detik, setelah itu temperatur dalam keadaan *steady*, temperatur processor (Evaporator) mencapai 66,36 °C dan temperatur keluaran pada kondensor mencapai 53,03 °C, serta temperatur pada heatsink mencapai mencapai 38,38 °C.

Distribusi temperatur pada *Cascade Tunggal Kondensor* pada kondisi Maksimal 48 Watt dapat dilihat pada gambar 7 dari gambar tersebut ditunjukkan bahwa kenaikan temperatur secara drastis mulai dari 0 detik hingga 800 detik, setelah itu temperatur dalam keadaan *steady*. Pada keadaan *steady*, temperatur processor (Evaporator) mencapai 68,19 °C dan temperatur keluaran pada kondensor mencapai 43,66 °C, serta temperatur pada heatsink mencapai mencapai 39,73 °C.

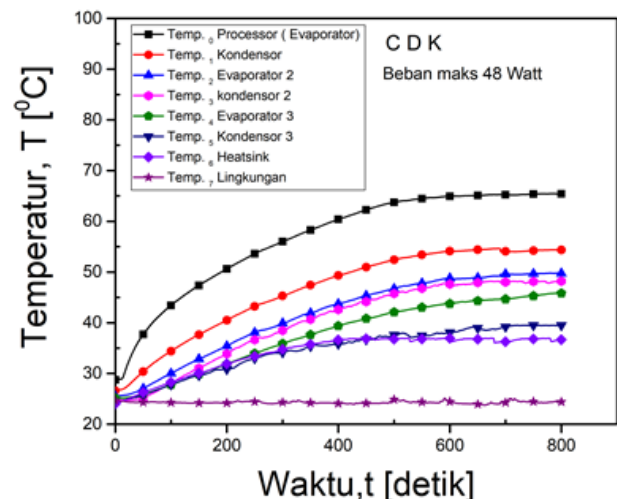
### Distribusi Temperatur Cascade Double Kondensor

Pada Gambar 8. memperlihatkan distribusi temperatur pada *Cascade Double Kondensor* pada Kondisi Idle 10 Watt dari gambar yang ditunjukkan tersebut dapat dilihat kenaikan temperatur secara drastis mulai dari 0 detik sampai 800 detik, setelah itu temperatur dalam keadaan *steady*, Pada keadaan *steady*, temperatur processor (Evaporator I) mencapai 65,21 °C dan temperatur keluaran pada kondensor 3 mencapai 38,57 °C, serta temperatur pada heatsink mencapai mencapai 36,20 °C.

Distribusi temperatur pada *Cascade Double Kondensor* pada kondisi idle 48 Watt. atau pada kondisi maksimum dapat dilihat pada gambar 8, dari gambar tersebut ditunjukkan bahwa kenaikan temperatur secara drastis mulai dari 0 detik hingga 800 detik, setelah itu temperatur dalam keadaan *steady*. Pada keadaan *steady*, temperatur processor (Evaporator I) mencapai 65,44 °C dan temperatur keluaran pada kondensor 3 mencapai 39,49 °C, serta temperatur pada heatsink mencapai mencapai 36,69 °C.



**Gambar 8. Grafik distribusi temperatur pada Cascade Double Kondensor pada Kondisi Idle 10 Watt**



**Gambar 9. Grafik distribusi temperatur pada Cascade Double Kondensor pada Kondisi Maksimal 48 Watt**

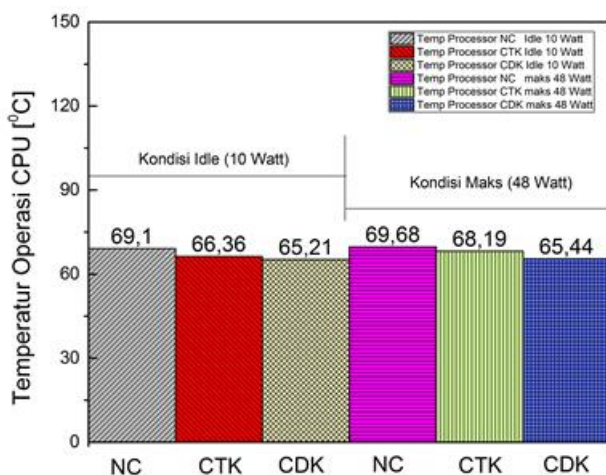
**Temperatur Operational Processor Sistem Pendingin CPU,** Dari analisa grafik yang telah dilakukan maka dilakukan perhitungan akan penggunaan desain sistem pendingin CPU berdasarkan temperatur operasi pada pembebanan



idle dan maksimal, temperatur operasi kondensor ditunjukkan dalam bentuk diagram.

Sistem Pendingin CPU Cascade Heat Pipe mampu menurunkan temperatur operational processor dibawah 80 °C yakni masing- masing adalah 66,36 0C untuk Cascade Tunggal Kondensor dan 65,21 °C untuk Cascade Double Kondensor. Sistem Pendingin CPU Cascade Heat Pipe tunggal kondensor mampu menurunkan temperatur processor 2,74 0C pada kondisi idle, dan 1,48 °C 0C pada kondisi maksimum lebih rendah dibandingkan dengan sistem pendingin Non Cascade . Sistem Pendingin CPU Cascade Heat Pipe Double kondensor mampu menurunkan temperatur processor 3,89 °C pada kondisi idle, dan 4,24 °C pada kondisi maksimum lebih rendah dibandingkan dengan sistem pendingin Non Cascade .

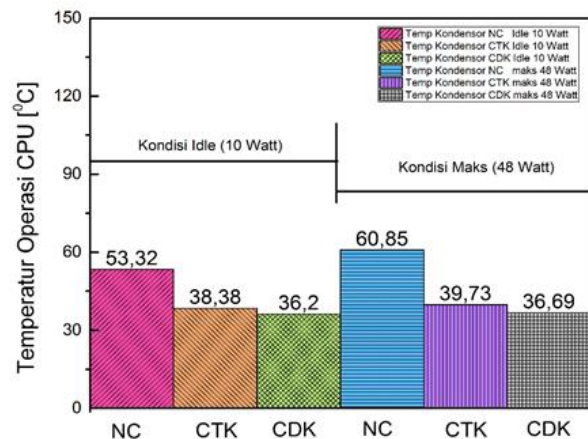
Persentasi penurunan temperatur processor pada pembebanan idle dengan menggunakan sistem pendingin CPU terhadap temperatur processor tanpa menggunakan sistem pendingin masing masing adalah dengan menggunakan Non Cascade adalah sebesar 40 %, menggunakan Cascade Heat Pipe tunggal kondensor sebesar 42 % dan menggunakan Cascade Heat Pipe Double sebesar 43 %. Dan pada pembebanan maksimal masing masing adalah dengan menggunakan Non Cascade adalah sebesar 39 %, menggunakan Cascade Heat Pipe tunggal kondensor sebesar 41 % dan menggunakan Cascade Heat Pipe Double sebesar 43 %.



**Gambar 10. Grafik distribusi temperatur pada Cascade Double Kondensor pada Kondisi Maksimal 48 Watt**

**Temperatur Operational Kondensor Sistem Pendingin CPU,** Dari analisa grafik yang telah

dilakukan maka dilakukan perhitungan akan efisiensi dari penggunaan desain sistem pendingin CPU berdasarkan temperatur operasi pada pembebanan idle dan maksimal, temperatur operasi kondensor ditunjukkan dalam bnetuk diagram dibawah ini.



**Gambar 11. Penurunan Temperatur Kondensor CPU**

Sistem Pendingin CPU *Cascade Heat Pipe* mampu menurunkan temperatur operational kondensor dibawah 40 °C yakni masing- masing adalah 38,38 °C untuk Cascade Tunggal Kondensor dan 36,20 °C untuk Cascade Double Kondensor. Sistem Pendingin CPU Cascade Heat Pipe tunggal kondensor mampu menurunkan temperatur keluaran pada bagian kondensor 14,94 °C pada kondisi idle, dan 21,12 °C pada kondisi maksimum lebih rendah dibandingkan dengan sistem pendingin Non Cascade . Sistem Pendingin CPU Cascade Heat Pipe Double kondensor mampu menurunkan temperatur keluaran pada bagian kondensor 17,12 °C pada kondisi idle, dan 24,16 °C pada kondisi maksimum lebih rendah dibandingkan dengan sistem pendingin Non Cascade .

Persentasi penurunan temperatur kondensor pada pembebanan idle dengan menggunakan sistem pendingin CPU menggunakan Cascade Heat Pipe terhadap temperatur kondensor Non Cascade masing masing adalah dengan menggunakan Cascade Heat Pipe tunggal kondensor sebesar 28 % dan menggunakan Cascade Heat Pipe Double sebesar 32 %. Dan pada pembebanan maksimal masing masing adalah dengan menggunakan Cascade Heat Pipe tunggal kondensor sebesar 35 % dan menggunakan Cascade Heat *Pipe Double* Kondensor sebesar 40 %.

## Kesimpulan

Dari penelitian yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa sistem pendingin CPU *Cascade Double* Kondensor mampu menurunkan temperatur processor pada kondisi Idle 10 Watt sebesar 3,89 °C dan pada kondisi pembebanan maksimal 48 Watt mampu menurunkan temperatur processor sebesar 4,24 °C, serta menurunkan temperatur kondensor pada kondisi Idle 10 Watt sebesar 17,12 °C dan pada kondisi pembebanan maksimal 48 Watt mampu menurunkan temperatur processor sebesar 24,16 °C dari temperatur desain sistem pendingin *Non Cascade*. Penggunaan *cascade heat pipe* lebih baik dari penggunaan *Non Cascade* dikarenakan mampu menurunkan luaran kondensor hingga dibawah 40°C.

## Penghargaan

Terima kasih diucapkan kepada Kementerian Riset Teknologi dan Pendidikan Tinggi dan Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat Udayana atas dukungan dana melalui skema Hibah Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi (PTUPT) dengan Kontrak Nomor 171.123/UN14.4.A/LT/2018, serta kepada Laboratorium AHTRG FT UI atas dukungan peralatan data akuisisi.

## Referensi

- [1] J. A. Ranga Babu, K. K. Kumar, and S. Srinivasa Rao, "State-of-art review on hybrid nanofluids," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, pp. 551–565, Sep. 2017.
- [2] S. Brenner, *Law in an era of smart technology*. Oxford University Press, 2007.
- [3] Q. Chen and Y. Huang, "Scale effects on evaporative heat transfer in carbon nanotube wick in heat pipes," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 111, pp. 852–859, 2017.
- [4] K. V Paiva and M. B. H. Mantelli, "Wire-plate and sintered hybrid heat pipes: Model and experiments," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 93, pp. 36–51, 2015.
- [5] A. B. Solomon, K. Ramachandran, and B. C. Pillai, "Thermal performance of a heat pipe with nanoparticles coated wick," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 36, pp. 106–112, Apr. 2012.
- [6] D. Liu, F.-Y. Zhao, H.-X. Yang, and G.-F. Tang, "Thermoelectric mini cooler coupled with micro thermosiphon for CPU cooling system," *Energy*, vol. 83, pp. 29–36, 2015.
- [7] N. Putra, R. Saleh, W. N. Septiadi, A. Okta, and Z. Hamid, "Thermal performance of biomaterial wick loop heat pipes with water-base Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 76, pp. 128–136, Feb. 2014.
- [8] N. Putra, W. N. Septiadi, H. Rahman, and R. Irwansyah, "Thermal performance of screen mesh wick heat pipes with nanofluids," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 40, pp. 10–17, Jul. 2012.
- [9] N. Putra, "An Experimental Study On Thermal Performance Of Nano Fluids," *Int. J. Technol.*, 2013.
- [10] M. H. Buschmann, "Nanofluids in thermosyphons and heat pipes: Overview of recent experiments and modelling approaches," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 72, pp. 1–17, 2013.
- [11] N. K. Gupta, A. K. Tiwari, and S. K. Ghosh, "Heat transfer mechanisms in heat pipes using nanofluids – A review," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 90, pp. 84–100, 2018.
- [12] N. Putra and W. N. Septiadi, *Teknologi Pipa Kalor Teori, Desain, dan Aplikasi*. Jakarta: Universitas Indonesia, 2014.
- [13] J. Xu, Y. Zou, M. Fan, and L. Cheng, "Effect of pore parameters on thermal conductivity of sintered LHP wicks," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 55, no. 9, pp. 2702–2706, 2012.