



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH PENGGUNAAN SUMBU KAPILER  
BIOMATERIAL DAN FLUIDA KERJA  $Al_2O_3$ -AIR  
TERHADAP KINERJA PIPA KALOR MELINGKAR**

**SKRIPSI**

**ASHAR OKTA DWIPUTRA**

**0806454645**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM SARJANA**

**DEPOK**

**JUNI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH PENGGUNAAN SUMBU KAPILER  
BIOMATERIAL DAN FLUIDA KERJA  $Al_2O_3$ -AIR  
TERHADAP KINERJA PIPA KALOR MELINGKAR**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik**

**ASHAR OKTA DWIPUTRA**

**0806454645**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM SARJANA**

**DEPOK**

**JUNI 2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber yang saya kutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Ashar Okta Dwiputra

NPM : 0806454645

Tanda Tangan :



Tanggal : 18 Juni 2012



## HALAMAN PENGESAHAN

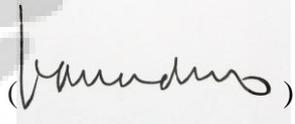
Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Ashar Okta Dwiputra  
NPM : 0806454645  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : Pengaruh Penggunaan Sumbu Kapiler Biomaterial  
dan Fluida Kerja Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-air Terhadap Kinerja Pipa  
Kalor Melingkar

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian dari persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr.-Ing. Ir. Nandy Setiadi Djaya Putra (  )

Penguji : Prof. Dr. Ir. Raldi Artono Koestoer, D.E.A (  )

Penguji : Dr. Ir. R. Danardono A.S., D.E.A (  )

Penguji : Dr. Agus Pamitran, S.T., M.Eng. (  )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 18 Juni 2012

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah puji syukur kepada kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat, nikmat, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Dalam skripsi ini, penulis juga banyak menerima masukan, saran, bimbingan, dan bantuan dari berbagai pihak sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan lancar. Maka dari itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Prof. Dr.-Ing. Nandy Putra, selaku dosen pembimbing skripsi yang telah membantu dan memberi masukan, bimbingan, dan saran dengan meluangkan waktu dan tenaganya.
2. Orang tua dan kakak penulis, Papa, Mama, dan Mas Yoga, yang telah memberikan dukungan penuh berupa perhatian, doa, dan semangat sehingga skripsi ini dapat diselesaikan.
3. Si Pacar, Wuri Prastiti Rahajeng, wanita yang selama ini telah memberikan dukungan, semangat waktu *down*, dan doa secara penuh siang dan malam. Kita wisuda bareng-bareng yaa nanti.
4. Zein, *partner* terbaik yang pernah didapatkan, walaupun sering terjadi cekcok, tapi kita tetap sehati bahu-membahu untuk menyelesaikan skripsi ini.
5. Mas Wayan Nata, yang setiap hari direcokin dengan pertanyaan-pertanyaan dan keteledoran penulis, tapi masih tetap sabar membantu dengan ikhlas.
6. Teman-teman seperjuangan di *Applied Heat Transfer 2008* Lab Universitas Indonesia, Rio Wirawan, Gerry Julian, Ary Maulana, Annisa Nurulianthy, Bimo Sakti W., Retsa Anugrah M. yang senang dan susah bersama untuk menjadi ST.
7. Tiga wanita hebat dan gila, Lilia Zuhara, Catherine Dhammamitta Viriya, dan Karina Ginka, kalianlah sahabat-sahabat wanita terbaik yang pernah ada, yang telah memberikan dukungan sepenuhnya untuk mengerjakan skripsi ini.

8. Rekan-Rekan di *Applied Heat Transfer* Lab Universitas Indonesia, Pak Mulya, Pak Hadi, Bu Yuyu, Bu Dini, Bu Ayi, Mas Agus, Mas Agung, Pak Ridho yang telah memberikan ilmu serta canda dan tawa di lab.
9. Para “*labils Mesin 2008*” Rachmi Satarsyah, Christoforus Deberland, ST, Randy Wicaksono, ST, M. Hudi Wibowo, Edwin Dwi Novianto, ST, Alfi Indra Azhary, Muhammad Yudha, Muhammad Husin sebagai penyemangat dan membuat hidup di mesin selama 4 tahun menjadi begitu berwarna.
10. Teman-teman kosan Pondok Ijo, Mario Reinzini, Aditya Primaperkasa, dan Rangga Aryawardhana, yang telah penulis anggap sebagai keluarga sendiri karena 4 tahun bersama, canda tawa, dan pertengkaran. Namun kalian selalu tetap ada dihati.
11. Bapak Zainal di Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Bapak Djajat di Departemen Teknik Kimia dan Bioproses, yang telah banyak membantu dalam persiapan pembuatan alat dan melakukan *sintering*.

Akhir kata, penulis berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Penulis berharap skripsi ini dapat berguna dan membawa manfaat bagi semua orang.

Depok, 18 Juni 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS  
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Ashar Okta Dwiputra

NPM : 0806454645

Program Studi : Teknik Mesin

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**PENGARUH PENGGUNAAN SUMBU KAPILER BIOMATERIAL DAN  
FLUIDA KERJA  $AL_2O_3$ -AIR TERHADAP KINERJA PIPA KALOR  
MELINGKAR**

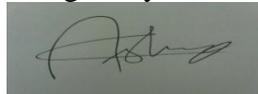
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia /formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 18 Juni 2012

Yang menyatakan,



(Ashar Okta Dwiputra)

## ABSTRAK

Nama : Ashar Okta Dwiputra

Program Studi : Teknik Mesin

Judul : Pengaruh Penggunaan Sumbu Kapiler Biomaterial dan Fluida Kerja  $Al_2O_3$ -air Terhadap Kinerja Pipa Kalor Melingkar

Penggunaan pipa kalor pada pendinginan elektronik telah mengalami peningkatan secara pesat karena menjadi salah satu solusi alternatif guna menyerap kalor yang dihasilkan karena naiknya fluks panas. Pipa kalor melingkar merupakan tanggapan terhadap tantangan yang berkaitan dengan makin majunya teknologi di dunia. Perangkat yang menghasilkan panas berlebih dikarenakan spesifikasi yang sangat canggih namun dengan kemampuan pemindahan panas yang efisien. Sementara itu penelitian tentang pipa kalor melingkar masih jarang dijumpai. Penelitian yang dilakukan ini adalah dengan sumbu kapiler biomaterial dan *sintered Cu* pada salah satu sisinya. Variasi penggunaan fluida kerja juga dilakukan dengan penambahan nanopartikel  $Al_2O_3$  sehingga menghasilkan campuran yang bersuspensi dengan fluida dasar air dengan konsentrasi 1%, 3%, dan 5%. Hasil menunjukkan bahwa sumbu kapiler biomaterial mampu mereduksi panas pada sisi evaporator lebih baik dibandingkan *sintered Cu* karena memiliki porositas yang baik sehingga menghasilkan permeabilitas yang lebih tinggi. Pengaruh fluida kerja nanofluida juga mempengaruhi kinerja dari pipa kalor melingkar, semakin tinggi konsentrasinya, maka kinerja dari pipa kalor melingkar juga semakin baik dikarenakan konduktivitas termal yang semakin besar. Kondisi vakum juga merupakan kondisi dimana hambatan termal menurun sehingga menghasilkan perpindahan panas yang lebih efisien dari evaporator menuju kondensor.

Kata Kunci : *pipa kalor melingkar, biomaterial, sintered Cu, sumbu kapiler, nanofluida*

## ABSTRACT

Name : Ashar Okta Dwiputra  
Study Program : Mechanical Engineering  
Judul : Investigation on Biomaterial Wick Loop Heat Pipes using Nanofluids Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Water as Working Fluid

Utilization of heat pipe in electronic cooling equipment has been increasing rapidly due to its function as an alternate solution to absorb the heat that has been produced. The heat that is produced from a PC will increase in accordance with the ascension of heat flux from the CPU and VGA. Loop heat pipe is a response to the challenges of the rising in technology on the world which generate more heat due high specification. Thus, they need more efficient heat transfer capabilities to reduce the excessive heat. In contrary to the high demand, the research in this particular field is still rare. This research use the biomaterial wick and sintered Cu wick on each side. There is also a variation in working fluid, with the addition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano particles, creating a suspended mixture that consists of water-based fluid with the volume fraction of 1%, 3%, and 5%. The result indicates that biomaterial wick could reduced the heat on the evaporator side better than sintered Cu wick because it has a good porosity, so it generates a higher permeability. The effect of nano fluids also gives an impact to the performance of loop heat pipe in accordance to the increase of volume fraction. Such condition occurred due to the increasing thermal conductivity. In a vacuum condition, thermal resistance decreased in order to generate more efficient heat transfer from evaporator to condensor.

Key Words : *loop heat pipe, biomaterial, sintered Cu, wick, nanofluids*

## DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS .....	vii
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	5
1.3 Tujuan Penelitian .....	5
1.4 Batasan Penelitian .....	6
1.5 Metodologi Penelitian .....	6
1.6 Sistematika Penulisan .....	7
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....	8
2.1 <i>Heat Pipe</i> (Pipa Kalor).....	8
2.2 <i>Loop Heat Pipe</i> (Pipa Kalor Melingkar).....	11
2.2.1 Proses Vakum .....	15
2.3 Struktur <i>Wick</i> (Sumbu Kapiler).....	15
2.3.1 Konduktivitas Termal Sumbu Kapiler pada Pipa Kalor .....	17
2.3.2 Struktur Sumbu Kapiler Homogen.....	17
2.3.3 Hambatan Termal Sumbu Kapiler pada Pipa Kalor.....	18
2.3.4 Pengaruh Kapilaritas .....	18
2.3.5 Porositas dan Permeabilitas.....	19
2.3.6 Jenis Struktur Sumbu Kapiler .....	21
2.4 Nanofluida.....	22
2.4.1 Konduktivitas Termal Nanofluida.....	23

2.4.2	Pembuatan Nanofluida .....	24
BAB 3	METODOLOGI PENELITIAN .....	26
3.1	Preparasi Nanofluida .....	26
3.2	Pembuatan <i>Wick</i> (Sumbu Kapiler) .....	27
3.2.1	Pembuatan Sumbu Kapiler <i>Sintered Cu</i> .....	27
3.2.2	Pembuatan Sumbu Kapiler Biomaterial .....	28
3.3	Pembuatan <i>Loop Heat Pipe</i> (Pipa Kalor Melingkar) .....	28
3.4	Karakteristik Sumbu Kapiler .....	30
3.5	Skematik Pengujian .....	31
BAB 4	PEMBAHASAN .....	40
4.1	Hasil dan Analisa Pengujian .....	40
4.2	Kinerja Pipa Kalor Melingkar .....	43
4.3	Hambatan Termal pada Pipa Kalor Melingkar .....	51
4.4	Distribusi Fluks Panas pada Pipa Kalor Melingkar Berdasarkan Konsentrasi Nanofluida .....	57
4.5	Perbandingan Kinerja Pipa Kalor Melingkar Berdasarkan Perlakuan pada Fluida Kerja (Vakum dan tanpa Vakum) .....	59
4.6	Perbandingan Kinerja Pipa Kalor Melingkar Berdasarkan Perbedaan Sumbu Kapiler .....	61
4.7	Perbandingan Kinerja Pipa Kalor Melingkar dengan Fluida Kerja Air dan Nanofluida .....	63
BAB 5	KESIMPULAN .....	65
5.1	Kesimpulan .....	65
	DAFTAR PUSTAKA .....	67
	LAMPIRAN .....	73

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 <i>Roadmap</i> Perkembangan Penelitian Pipa Kalor Melingkar .....	2
Gambar 1.2 <i>Roadmap</i> Perkembangan Penelitian Nanofluida pada Pipa Kalor .....	4
Gambar 2.1 Pipa Kalor [78] .....	8
Gambar 2.2 Skematik Kerja Pipa Kalor [74] .....	11
Gambar 2.3 Skematik aliran Pipa Kalor Melingkar (LHP) [33] .....	13
Gambar 2.4 Kurva Didih Nukiyama untuk Air [36] .....	14
Gambar 2.5 Lapisan Film Kondensasi [36] .....	14
Gambar 2.6 Permeabilitas pada Struktur Pori Mono <i>Dispersed</i> [46] .....	20
Gambar 2.7 (a) Sumbu <i>Screen Mesh</i> , (b) Sumbu <i>Fiber Spiral</i> [14], (c) <i>Cooper Foam</i> .....	21
Gambar 2.8 Sumbu Kapiler <i>Biporous</i> [51] .....	22
Gambar 3.1 Proses Preparasi Nanofluida.....	26
Gambar 3.2 bubuk tembaga dan proses <i>sintering</i> .....	27
Gambar 3.3 biomaterial sebagai sumbu kapiler .....	28
Gambar 3.4 Skematik Pembuatan Pipa Kalor Melingkar .....	29
Gambar 3.5 SEM <i>Sintered Cu</i> ukuran 30 $\mu\text{m}$ perbesaran 100x.....	30
Gambar 3.6 SEM Karang ukuran 30 $\mu\text{m}$ perbesaran 100x .....	31
Gambar 3.7 Desain Pipa Kalor Melingkar .....	31
Gambar 3.8 Posisi Peletakan Termokopel pada Pipa Kalor Melingkar.....	32
Gambar 3.9 Pemasangan <i>Heater</i> pada Evaporator .....	33
Gambar 3.10 Isolasi Pipa Kalor Melingkar dengan <i>Polyurethane dan Glasswool</i> .....	34
Gambar 3.11 Penentuan Posisi Evaporator dan Kondensor .....	34
Gambar 3.12 Proses Penyuntikan Fluida Kerja Ke dalam Pipa Kalor Melingkar .....	36
Gambar 3.13 Pompa Vakum .....	36
Gambar 3.14 Catu Daya DC [76].....	37
Gambar 3.15 NI 9213 dan cDAQ 9172 [77].....	38
Gambar 3.16 <i>Circulating Thermostatic Bath</i> [75] .....	38
Gambar 3.17 Skematik Pengujian.....	39
Gambar 4.1 Grafik Perbandingan Sumbu Kapiler Biomaterial daya 10 Watt.....	43
Gambar 4.2 Grafik Perbandingan Sumbu Kapiler <i>Sintered Cu</i> daya 10 Watt.....	44
Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Sumbu Kapiler Biomaterial daya 20 Watt.....	45
Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Sumbu Kapiler <i>Sintered Cu</i> daya 20 Watt.....	46
Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Sumbu Kapiler Biomaterial daya 30 Watt.....	47
Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Sumbu Kapiler <i>Sintered Cu</i> daya 30 Watt.....	48
Gambar 4.7 Grafik perbandingan Terhadap Penelitian Shafahi et al. [71].....	50
Gambar 4.8 Grafik Hambatan Termal antara Evaporator dan Kondensor.....	53
Gambar 4.9 Hambatan Termal antara Evaporator dan <i>liquid line</i> .....	54
Gambar 4.10 Perbandingan Hambatan Termal Terhadap Penelitian Jian Qu dan Huiying Wu [72].....	55

Gambar 4.11 Perbandingan Hambatan Termal Terhadap Penelitian Nandy Putra et al. [69].....	57
Gambar 4.12 Grafik Fluks Panas .....	59
Gambar 4.13 Grafik Perbedaan Perlakuan, antara vakum dan tanpa vakum.....	60
Gambar 4.14 Grafik Perbedaan Pemberian Perlakuan pada Sumbu Kapiler.....	61
Gambar 4.15 (A) Bubuk Tembaga (B) <i>Sintered</i> Tembaga (C) <i>Sintered</i> Tembaga setelah pengujian .....	62
Gambar 4.16 Sumbu Kapiler Biomaterial (A) Sebelum Pengujian (B) Setelah Pengujian .....	62
Gambar 4.17 Grafik Perbedaan Perlakuan fluida kerja, Air dan Nanofluida .....	63
Gambar 4.18 Konduktivitas Termal Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> dengan variasi fraksi volume dan diameter nanopartikel berdasarkan penelitian Calvin H. Li dan G.P. Peterson [73].....	64



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik Pengoperasian Beberapa <i>Heat Pipe</i> [30].....	11
Tabel 2.2 Tabel Tekanan pada beberapa kondisi .....	15
Tabel 2.3 Karakteristik Struktur Kapilaritas [31] .....	17
Tabel 3.1 Properties Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [68] .....	26
Tabel 3.2 Tabel Variasi Percobaan .....	35
Tabel 4.1 Tabel Hasil Pengambilan Data Nanofluida 1% .....	40
Tabel 4.2 Tabel Hasil Pengambilan Data Nanofluida 3% .....	41
Tabel 4.3 Tabel Hasil Pengambilan Data Nanofluida 5% .....	42
Tabel 4.4 Hambatan Termal antara Evaporator dan Kondensor.....	52
Tabel 4.5 Hambatan Termal antara Evaporator dan <i>Liquid Line</i> .....	52
Tabel 4.6 Hambatan Termal Pipa Kalor pada Variasi Fluida Kerja [69].....	56



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

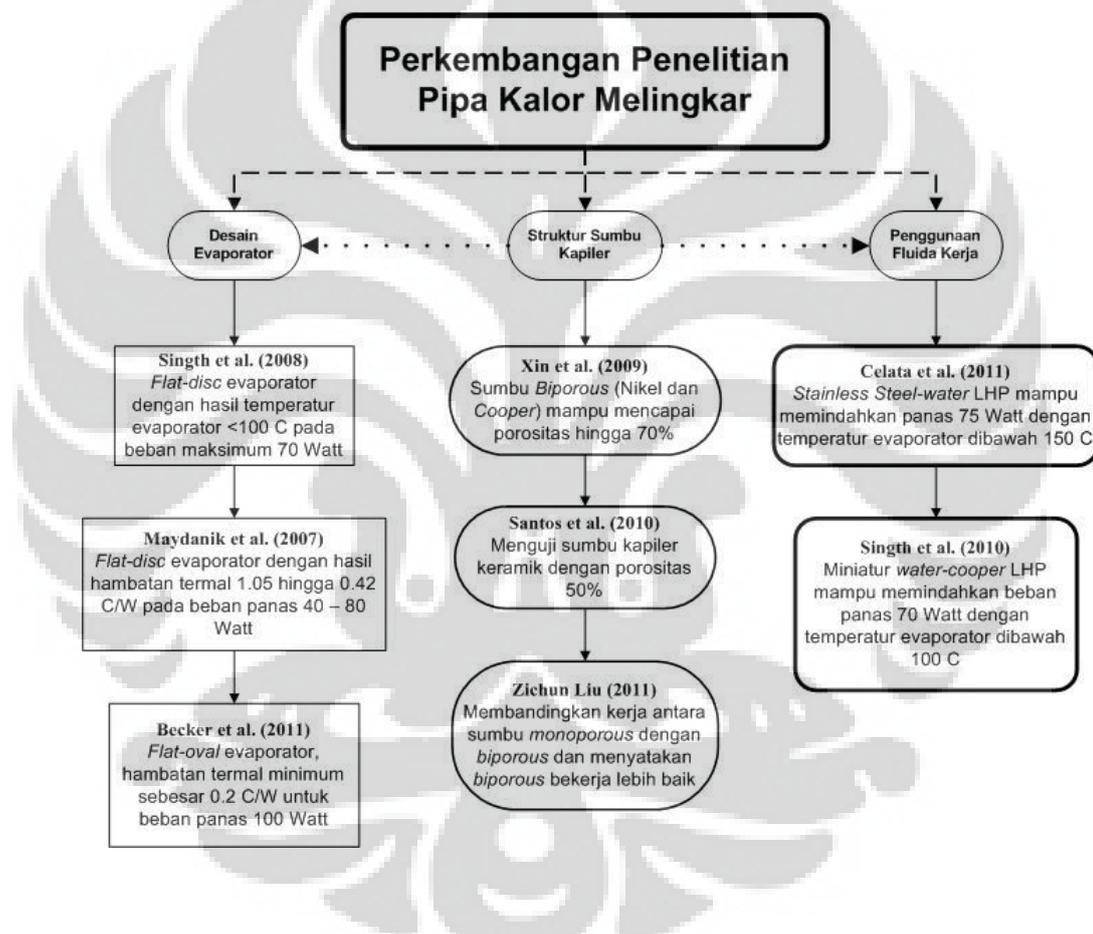
Pada beberapa tahun ke belakang, penggunaan pipa kalor pada pendinginan elektronik telah mengalami peningkatan secara pesat. Alat elektronik seperti laptop, komputer, atau box vaksin telah banyak menggunakan pipa kalor sebagai proses pendinginan. Panas yang dihasilkan pada sebuah PC akan bertambah besar seiring naiknya fluks panas dari CPU dan VGA [1]. Bar-Cohen et al. Pada tahun 1983 [2] menjelaskan bahwa kemampuan perangkat elektronik akan menurun sebesar 10% setiap kenaikan  $2^{\circ}\text{C}$  dari temperatur kerjanya. Sehingga apabila temperatur kerja yang terlalu tinggi akan menyebabkan performa dan stabilitas komponen elektronik akan menurun. Jadi penurunan temperatur kerja sangatlah dibutuhkan untuk melepaskan panas yang dihasilkan.

Penggunaan pipa kalor diterapkan oleh Gaugler pada tahun 1942 [3], diaplikasikan karena panas dari *processor* tidak mampu lagi diserap oleh *heat sink* konvensional. Metode yang digunakan adalah memvariasikan *heat sink* yang digabungkan dengan pipa kalor. Tujuannya adalah untuk memindahkan panas pada saat fluks yang tinggi dari *processor*. *Processor* menghasilkan fluks panas harus direduksi secara maksimal agar mencapai kemampuan kerja yang optimal dan ketahanan yang tinggi. Sebelum penggunaan pipa kalor, metode mereduksi fluks panas adalah dengan metode pendinginan model *heat sink*, yaitu berupa media pemindah panas berbahan logam dan bentuk menyerupai sirip-sirip. Pada generasi selanjutnya, metode ini mengalami perkembangan berupa penambahan kipas (fan) pada *heat sink*.

Aplikasi dari pipa kalor sangat banyak digunakan, misalnya pada *solar collector* yang digunakan untuk memanaskan air [4], modul penyerapan panas pada *thermoelectric* hingga sistem pendinginan darurat pada reaktor nuklir [5], serta pengaturan panas pada *solar battery drive* [6].

Perkembangan dari pipa kalor melingkar (*loop heat pipe*) berawal dari 1972, ketika perangkat pertama dengan panjang 1.2 m dan kapasitas sekitar 1 kW, dengan air sebagai fluida kerja, diciptakan dan sukses diuji coba oleh seorang

peneliti Rusia Gerasimov dan Maydanik dari Ural Polytechnical Institute [7]. Pipa kalor melingkar merupakan alat penukar kalor yang mengabsorpsi kalor menggunakan evaporator dan melepaskan kalor pada kondensor. Di dalam LHP terdapat dua fasa fluida kerja yaitu fasa uap dan cair yang disirkulasi berdasarkan gaya kapilaritas karena terdapat sumbu kapiler (*wick*). Pipa melingkar kalor sangat menjanjikan dibandingkan pipa kalor konvensional karena pipa melingkar kalor mampu memindahkan kalor secara efisien dan memiliki kemampuan memompa fluida kerja dengan baik.



Gambar 1.1 Roadmap Perkembangan Penelitian Pipa Kalor Melingkar

Konsepsi pipa kalor melingkar hingga batas tertentu memungkinkan tidak hanya untuk pengganti dari pipa kalor konvensional, tetapi juga untuk mendapatkan beberapa keuntungan tambahan, namun tetap menggunakan mekanisme kapilaritas dan penggunaan segala keuntungannya. Untuk realisasi

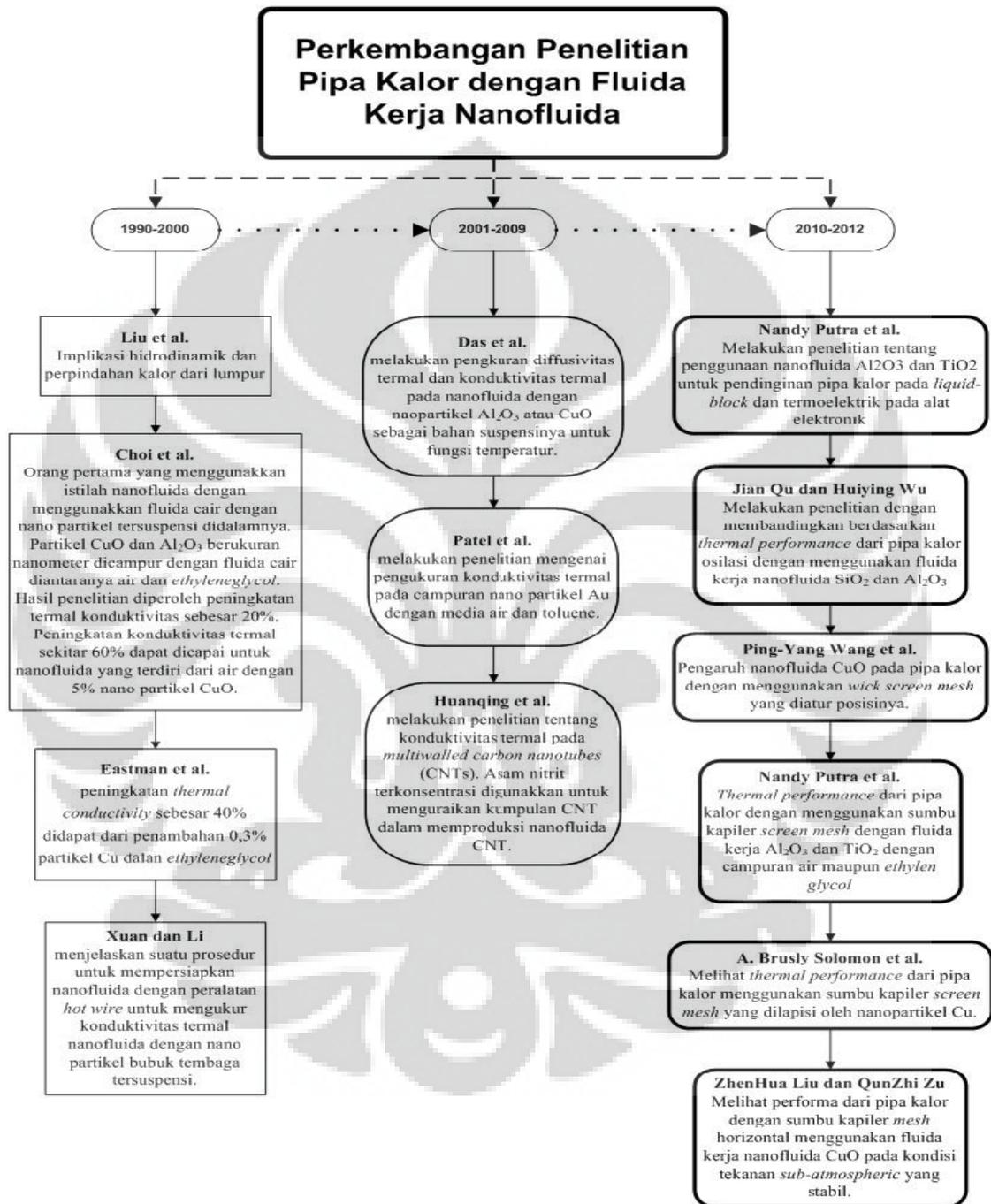
dari konsep ini, sumbu kapiler dibentuk dari nikel, titanium, atau tembaga yang disinter (*sintered*) dengan jari-jari efektif  $0.7 - 15 \mu\text{m}$  dan porositas 55-75%. Material-material tersebut memiliki kekuatan yang mampu menghasilkan tekanan kapiler yang besar dengan penggunaan fluida bertemperatur rendah. *Sintered powder wick* secara luas digunakan pada teknologi pipa kalor. Pemilihan ini karena sumbu kapiler mampu memindahkan fluida kerja kembali ke evaporator melalui efek kapilaritas.

Penelitian tentang nanofluida sebagai media penghantar kalor mulai banyak dilakukan. Fluida ini diperkirakan dapat digunakan sebagai fluida kerja alternatif untuk menggantikan fluida kerja konvensional [8]. Nanofluida adalah suatu campuran antara fluida dasar dengan partikel solid yang mempunyai ukuran diameter dalam nanometer atau  $10^{-9}$  m. Tsai et al. [9]. Secara teoritis campuran ini memiliki termal konduktivitas yang lebih baik daripada fluida dasar pencampurnya, karena partikel solid memiliki termal konduktivitas yang lebih tinggi daripada termal konduktivitas fluida dasar, sehingga campuran keduanya akan memiliki termal konduktivitas lebih tinggi dari fluida dasar pencampurnya tetapi lebih rendah dari termal konduktivitas partikel solid.

Selain itu Bhattacharya et al. [10], menjelaskan efek gerak Brown diperkirakan akan terjadi pada partikel-partikel solid yang berukuran sangat kecil sekali itu di dalam fluida dasarnya, hal ini yang menyebabkan pengurangan sedimentasi yang terbentuk, karena nanopartikel tersebut akan melayang-layang di dalam fluida dasar. Kemudian, karena tidak terjadinya sedimentasi maka kemungkinan terjadinya penyumbatan (*clogging*) di dalam saluran kecil sekali, lalu karena kecilnya partikel maka abrasi antara fluida dan dinding saluran kecil sekali terjadi.

Paras et al. [11] melakukan investigasi dari penggunaan nanofluida sebagai pendingin pada alat penukar kalor tipe pelat dimana viskositas, volume fluida dan turbulensi sangat berpengaruh terhadap efektifitas perpindahan kalor dari nanofluida yang digunakan. Sedangkan Choi [12] merupakan orang pertama yang menggunakan istilah nanofluida dengan menggunakan fluida cair dan nano partikel tersuspensi didalamnya. Peningkatan nilai konduktivitas termal dengan

mengembangkan nanofluida juga dilakukan Eastman et al. [13], hasilnya adalah ditemukannya keterkaitan antara konsentrasi dari *nanocrystalline* terhadap konduktivitas termal.



Gambar 1.2 Roadmap Perkembangan Penelitian Nanofluida pada Pipa Kalor

Meskipun *sintered powder* pada kenyataannya sangat baik, namun proses pembuatannya masih tergolong sangat sulit dan lama. Kemudian penulis mencoba melakukan penelitian tentang sumbu kapiler yang berupa biomaterial, dimana ternyata strukturnya jauh lebih homogen daripada *sintered powder*. Biomaterial memiliki struktur pori yang relatif seragam dan kecil. Dengan struktur pori yang seragam diharapkan biomaterial ini memiliki nilai permeabilitas yang tinggi sehingga gaya kapilaritas yang terbentuk juga besar. Selain itu proses pembuatannya jauh lebih mudah dan hanya membutuhkan waktu yang singkat.

Penelitian dengan menggunakan biomaterial sebagai sumbu kapiler pada pipa kalor melingkar belum pernah dilakukan sebelumnya. Tujuannya adalah untuk mengetahui karakteristik dari biomaterial sebagai sumbu kapiler pada pipa kalor melingkar dengan nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sebagai fluida kerja.

## 1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang muncul berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan antara lain:

1. Apakah pengaruh dari pemakaian satu sisi *full* sumbu kapiler berupa *sintered powder*, biomaterial, atau tanpa menggunakan sumbu kapiler pada pipa kalor melingkar ?
2. Bagaimana pengaruh dari penggunaan nanopartikel berupa  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sebagai bahan pencampur fluida kerja pada kinerja pipa kalor melingkar ?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan yang hendak dicapai berupa :

1. Merancang pipa kalor melingkar yang memiliki kemampuan pendinginan yang baik dengan menggunakan dua jenis *wick*, yaitu *sintered powder* dan biomaterial pada satu sisi serta tanpa sumbu kapiler sebagai perbandingan
2. Mengetahui kemampuan dari penggunaan nanofluida berupa  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sebagai fluida kerja pada pipa kalor melingkar .

#### 1.4 Batasan Penelitian

Dalam pelaksanaan penelitian ini penulis memberikan beberapa batasan masalah, antara lain:

1. Pipa kalor melingkar dibuat dari pipa tembaga berdiameter 8 mm pada saluran uap dan air dan 24 mm pada bagian evaporator dan kondensor dengan tebal 0.56 mm
2. Keliling pipa kalor melingkar adalah 630 mm.
3. Sumbu kapiler pipa kalor melingkar dibuat dari *full sintered powder Cu*, biomaterial, dan tanpa sumbu kapiler sebagai perbandingan pada satu bagian sisinya.
4. Fluida yang digunakan aquades dengan nanopartikel  $Al_2O_3$  pada fraksi volume (konsentrasi) 1% , 3% dan 5%.
5. Penelitian sebatas pada pengkajian, kemampuan pipa kalor dalam mereduksi temperatur pada bagian evaporator, hambatan termal dari pipa kalor.

#### 1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan pada penelitian pipa kalor melingkar antara lain :

1. **Studi Literatur**  
Studi literatur merupakan proses pembelajaran bahan-bahan yang berkaitan dengan materi bahasan yang berasal dari buku-buku, jurnal, dan situs-situs internet.
2. **Perancangan pipa kalor melingkar**  
Perancangan pipa kalor melingkar dilakukan dengan pertimbangan seperti sifat material, kemudahan dalam mencari komponen-komponen yang dibutuhkan di pasar.
3. **Pembuatan prototipe**  
Pembuatan prototipe dibuat dengan tujuan untuk mengetahui kinerja pipa kalor melingkar yang telah dirancang.

#### **4. Pengujian pipa kalor melingkar**

Pengujian dilakukan dengan proses pengambilan data temperatur pada setiap bagian dan pengolahan data.

#### **5. Analisa dan kesimpulan hasil pengujian**

Setelah data dari hasil pengujian didapatkan, data tersebut diolah sehingga menjadi grafik. Dari grafik tersebut dilakukan perbandingan dengan data lainnya kemudian melihat fenomena apa saja yang terjadi pada pengujian ini.

### **1.6 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan skripsi ini dilakukan menurut urutan bab-bab sebagai berikut:

#### **BAB 1 PENDAHULUAN**

Bagian ini berisi latar belakang yang melandasi penulisan skripsi, permasalahan, tujuan penelitian, pembatasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan.

#### **BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA**

Bagian ini berisi tentang dasar teori yang dijadikan landasan literatur dalam pengujian Pipa kalor melingkar yang dilakukan.

#### **BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN**

Bagian ini berisi tentang bagaimana bentuk, manufaktur konstruksi dari Pipa kalor melingkar yang telah didesain, dan berisi tentang skema pengujian Pipa kalor melingkar .

#### **BAB 4 ANALISA DAN HASIL**

Bagian ini berisi tentang analisa dari data dan grafik dari pengujian Pipa kalor melingkar yang telah dilakukan.

#### **BAB 5 KESIMPULAN**

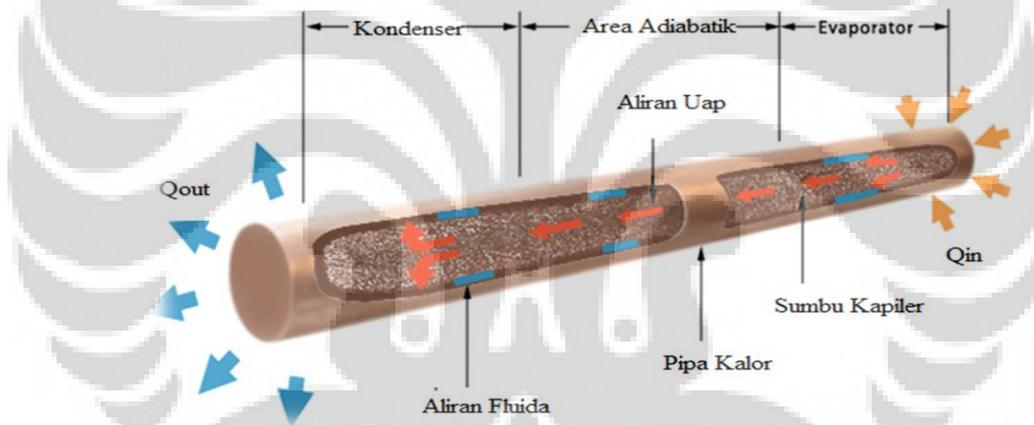
Bagian ini berisi tentang kesimpulan apa yang bisa diambil dari pengujian yang telah dilakukan.

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 *Heat Pipe* (Pipa Kalor)

*Heat pipe* (pipa kalor) adalah sebuah alat yang memiliki nilai konduktivitas termal tinggi, yang digunakan untuk memindahkan kalor, dimana jumlah kalor yang dipindahkan jauh lebih besar daripada kenaikan temperaturnya yang kecil antara permukaan panas dan dingin [14]. Pipa kalor dapat digunakan pada keadaan dimana sumber panas dan pelepas panas diharuskan terpisah, untuk membantu konduksi atau menyebarkan panas pada bidang. Tidak seperti pendinginan pada termoelektrik, pipa kalor tidak mengkonsumsi energi maupun menghasilkan panas sendiri.



Gambar 2.1 Pipa Kalor [78]

Perkembangan pipa kalor dimula oleh **Angier March Perkins** yang mengawali konsep tentang fluida kerja dengan satu fase (*hermetic tube boiler* – memperoleh paten pada tahun 1839). **Jacob Perkins** yang merupakan salah satu keturunan dari Angier March mematenkan alat yang dinamakan *Perkins Tube* tahun 1936 dan berkembang luas penggunaannya pada boiler lokomotif dan *baking oven*. *Perkins Tube* adalah sebuah sistem yang memiliki pipa panjang melingkar yang melewati evaporasi dan kondensor, sehingga air yang berada di dalam *tube* beroperasi pada dua fasa. Disain awal ini mengandalkan gravitasi

untuk mengembalikan air ke evaporator (*Thermosypon*) [15].

Perkins *Tube* merupakan lompatan penting bagi perkembangan pipa kapiler dewasa ini. Konsep dari pipa kalor modern adalah penggunaan struktur sumbu kapiler untuk memindahkan fluida kerja ke bagian kondensor dengan melawan efek dari gravitasi. Konsep ini dijelaskan oleh **R.S. Gaugler** dari *General Motors Corporation*, dia memaparkan bahwa pipa kalor dapat diaplikasikan dalam sistem refrigerasi karena memasang prinsip kerja dari fluida kerja pada sebuah pipa kalor sama dengan yang terdapat pada sistem refrigerasi secara umum.

Kemudian pipa kalor didemonstrasikan pertama oleh **Georger Grover** di Los Alamos National Laboratory pada tahun 1963 dan diumumkan pada jurnal fisika tahun 1964. Seiring penelitian **Grover** di *Los Alamos National Laboratory*, pada saat yang sama **Bainton** di Laboratorium Energi Atom di Inggris melakukan percobaan yang sama mengenai pipa kalor [16]. Percobaan dilakukan dengan penggunaan pada *converter diode nuclear thermionic*, yang bekerja sama dengan *Nuclear Reasearch Centre*, Ispra, Italy. Pekerjaan Ispra tersebut menjadi pusat mengembangkan pipa kalor dengan mengkaji aplikasi teori pipa kalor. Cheung [17] mampu menerbitkan 80 paper tentang pengembangan pipa kalor.

RCA sebagai perusahaan di Amerika Serikat yang pertama melakukan penelitian dan pengembangan pipa kalor untuk aplikasi komersial tepatnya pada tahun 1964 dan 1966 [18,19]. Perusahaan tersebut mengembangkan material pipa menggunakan kaca, tembaga, nikel, *stainless steel*, *molybdenum*, dan *TZM molybdenum* sebagai material dinding pipa kalor. Fluida juga termasuk yang divariasikan seperti air, *caesium*, *sodium*, *lithium*, dan *bismuth* dengan temperatur yang mampu dipindahkan oleh pipa kalor sampai 1650°C. Tidak semua penelitian tentang pipa kalor pada waktu tersebut difokuskan untuk temperatur yang tinggi. Deverall dan Kemme [20] mengembangkan pipa kalor untuk aplikasi satelit dengan air sebagai fluida kerja, dan penelitian pertama untuk pipa kalor dengan variasi konduktasin yang digunakan untuk aplikasi juga [21].

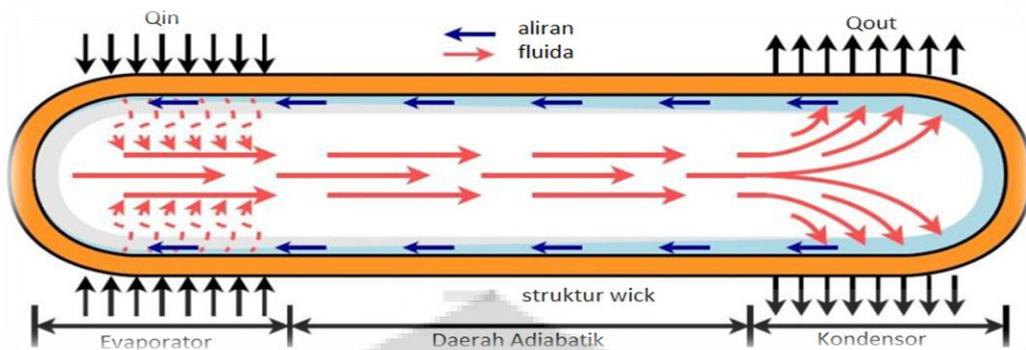
Selama tahun 1964, NASA memainkan peran besar dalam pengembangan pipa kalor dengan pendanaan besar untuk penelitian yang aplikasinya pada ruang kendali di luar angkasa. Penelitian NASA saat itu menghasilkan sebuah sistem

perpindahan panas dengan bobot rendah, fluks panas tinggi, dan energi yang rendah. Hal lain yang bisa ditonjolkan dari pipa kalor adalah sistem ini tidak terpengaruh oleh lingkungan dengan gravitas nol [22]. Teori pipa kalor yang berkembang dengan baik dan banyak dihasilkan oleh Cotter [23] yang bekerja di *Los Alamos Scientific Laboratory*.

Setelah percobaan pipa kalor pertama di ruang angkasa pada tahun 1967 [20], penggunaan selanjutnya untuk pengendali satelit termal yang berada di satelit GEOS-B. Satelit itu diluncurkan dari *Vandenburg Air Force* pada tahun 1968 [24]. Pipa kalor tersebut menggunakan material paduan aluminium 6061 T-6, dengan sumbu kapiler *screen mesh* aluminium 120 mesh. Fluida kerja yang digunakan adalah Freon 11. Tujuan dari pipa kalor tersebut adalah mengurangi perbedaan suhu antara berbagai transponder satelit.

Pada tahun 1967 dan 1968 Feldman, Eastman dan Katzoff mengembangkan aplikasi pipa kalor untuk alat-alat komersial seperti AC, pendingin motor bakar, dan pendingin elektronik [25,26,27]. Publikasinya juga pada tahun 1969 memperkenalkan konsep pipa kalor rotasi yang digunakan pada pendingin turbin *cryogenic*.

Mekanisme penghantaran panas pada pipa kalor dilakukan melalui tiga daerah hantaran, yaitu, evaporator, daerah adiabatik, dan kondensor serta struktur sumbu kapiler dimana cairan diuapkan oleh daerah evaporator pada keadaan *vapour* melewati daerah adiabatik mencapai daerah kondensor [28]. Uap dilepaskan pada daerah kondensor sehingga uap mengalami kondensasi dan cairan mengalir menuju daerah evaporator kembali melalui daya kapilaritas sumbu kapiler. Walaupun pipa kalor secara berkesimbangan menghantarkan panas ke daerah kondensor, proses ini akan berlanjut selama ada tekanan kapiler yang cukup membawa cairan kembali ke daerah evaporator [29].



Gambar 2.2 Skematik Kerja Pipa Kalor [74]

Tabel 2.1 Karakteristik Pengoperasian Beberapa *Heat Pipe* [30]

Rentang Temperatur (°C)	Fluida kerja	Material Pipa Kalor
-200 to -80	Liquid Nitrogen	Stainless Steel
-70 to +60	Liquid Ammonia	Nickel, Aluminum, Stainless Steel
-45 to +120	Methanol	Copper, Nickel, Stainless Steel
+5 to +230	Water	Copper, Nickel
+190 to +550	Mercury* +0.02% Magnesium 0.001%	Stainless Steel
+400 to +800	Potassium*	Nickel, Stainless Steel
+500 to +900	Sodium*	Nickel, Stainless Steel
+900 to +1,500	Lithium*	Niobium +1% Zirconium
1,500 to +2,000	Silver*	Tantalum +5% Tungsten

\* Tested at Los Alamos Scientific Laboratory

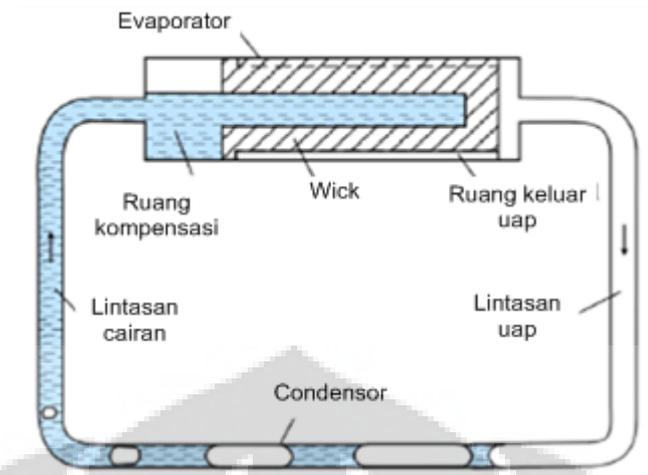
\* Measured value based on reaching the sonic limit of mercury in the heat pipe

## 2.2 Loop Heat Pipe (Pipa Kalor Melingkar)

Pipa kalor melingkar merupakan perangkat perpindahan panas yang bekerja berdasarkan gaya kapilaritas yang awalnya dikembangkan oleh maydanik [31] dengan panjang 1.2 m dan kapasitas perpindahan panas sekitar 1 kW. Seperti

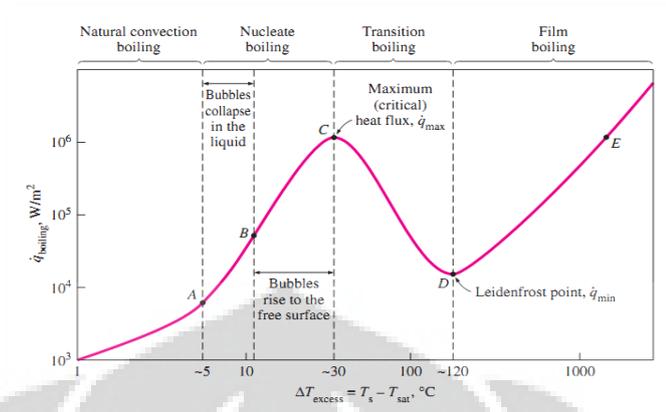
pipa kalor konvensional, pipa kalor melingkar menggunakan dua fasa fluida kerja yang digunakan untuk memindahkan panas dari evaporator menuju kondensor yang dipisahkan dengan pipa panjang dan fleksibel. Wolf et al. [32] menyatakan bahwa pipa kalor melingkar mengkombinasikan keuntungan dari pipa kalor tradisional dan *capillary pumped loop* (CPL). Selain itu, pipa kalor melingkar memiliki keuntungan tersendiri seperti efisiensi termal yang tinggi dalam memindahkan panas, tidak membutuhkan input daya dalam proses pendinginan, tidak ada bagian yang berpindah, kemampuan yang handal, dan juga dapat beroperasi melawan gravitasi. Dikarenakan keuntungan tersebut, pipa kalor melingkar banyak digunakan di *space craft*, *electronic cooling*, dan *solar thermal system*.

Skematik kerja dari LHP adalah sebagai berikut, evaporator menyerap panas sehingga fluida kerja menguap dan menuju ruang uap untuk dialirkan ke saluran atau lintasan uap menuju ke kondensor. Di bagian kondensor uap mengalami kondensasi dan kembali ke bentuk cairan, karena tekanan kapilaritas dari sumbu berpori maka cairan akan mengalir ke bagian ruang kondensasi melalui lintasan cairan. Mekanisme perpindahan kalor, yakni beban kalor yang diserap pada evaporator dipindahkan ke bagian kondensor dengan kalor laten dan di bagian kondensor, kalor laten diserap dan uap didinginkan kembali dimana kondensat akan kembali menuju evaporator [33]. Selanjutnya sirkulasi dari fluida kerja di dalam pipa kalor melingkar tidak akan terjadi sebelum gaya kapilaritas yang dihasilkan sumbu kapiler lebih besar dari total penurunan tekanan sistem [34]. Pipa kalor melingkar dengan bagian lintasan fluida uap dan cair yang berbeda memberikan suatu kinerja yang lebih besar dan pengaruh gaya gravitasi pada aliran relatif kecil dimana lintasan fluida kerja yang pada umumnya sangat kecil menjadikan pipa kalor melingkar lebih fleksibel [35].



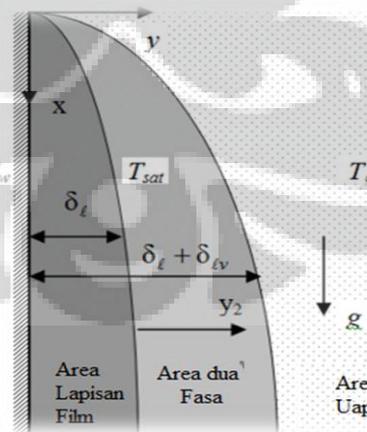
**Gambar 2.3 Skematik aliran Pipa Kalor Melingkar (LHP) [33]**

Evaporasi dan kondensasi merupakan fenomena yang terjadi dalam sirkulasi fluida kerja di dalam pipa kalor melingkar. Evaporasi merupakan proses perubahan fasa fluida kerja yang terjadi di evaporator dari cairan menjadi uap. Evaporasi terjadi antara perbatasan cairan-uap ketika tekanan uap lebih rendah dari tekanan saturasi pada temperatur tertentu. Perbedaan utama antara proses evaporasi dengan pendidihan adalah dimana pada proses pendidihan terjadi pembentukan gelembung dan prosesnya pembentukan gelembung terjadi antara lapisan padatan - cairan. Titik didih dalam proses pendidihan dapat menurun dalam keadaan vakum. Proses pendidihan terjadi baik pendidihan kolam atau pendidihan berpindah, perbedaan antara kedua jenis pendidihan tersebut terletak pada hadirnya pergerakan *bulk* dari fluida kerja. Gambar 2.4 menunjukkan propagasi proses pendidihan kolam. Proses kondensasi terjadi pada kondenser ketika temperatur uap lebih kecil dari temperatur saturasi dimana uap bersentuhan dengan permukaan yang temperaturnya dibawah temperatur saturasi uap [36].



**Gambar 2.4 Kurva Didih Nukiyama untuk Air [36]**

Terdapat dua macam proses kondensasi, *film condensation* dan *dropwise condensation*. Kondensasi lapisan merupakan kondensasi yang umum terjadi, dimana uap yang terkondensasi membasahi permukaan padatan dan ketebalan lapisan cairan meningkat seiring dengan peningkatan uap yang terkondensasi, gradien lapisan batas kecepatan dan temperatur hadir pada jenis kondensasi ini. Kondensasi titik merupakan kondensasi pada permukaan padatan yang berbentuk tetesan dengan diameter yang bervariasi dan tidak membentuk lapisan seperti *film condensation*. [36].



**Gambar 2.5 Lapisan Film Kondensasi [36]**

### 2.2.1 Proses Vakum

Proses vakum pada pipa kalor melingkar merupakan proses pengosongan pipa dari fluida mampu mampat yang menyebabkan tekanan di dalam pipa kalor melingkar jauh dibawah tekanan atmosfer sehingga titik didih fluida kerja yang disirkulasi di dalam pipa kalor melingkar lebih rendah dibandingkan dengan keadaan atmosferiknya. Hal ini menyebabkan sirkulasi dari fluida kerja lebih cepat dibandingkan kondisi tanpa vakum, sehingga pipa kalor dapat bekerja lebih baik dalam memindahkan panas yang ditandai dengan fluida kerja dapat berubah fasa lebih cepat. Tabel 2.2 menunjukkan besar perbedaan tekanan atmosfer dan tekanan vakum

Tabel 2.2 Tabel Tekanan pada beberapa kondisi

Jenis Tekanan	Tekanan (Torr)	Tekanan (Pa)
Tekanan Atmosphere	760	101.3 kPa
<i>Low Vacuum</i>	760 - 25	100 kPa – 3 kPa
<i>Medium Vacuum</i>	25 – $10^{-3}$	3 kPa – 100 mPa
<i>High Vacuum</i>	$10^{-9}$ – $10^{-12}$	100 mPa – 100nPa
<i>Perfect Vacuum</i>	0	0 Pa

### 2.3 Struktur Wick (Sumbu Kapiler)

Sumbu kapiler merupakan struktur kapilaritas yang berfungsi sebagai saluran balik dari fluida kerja pada daerah kondensor menuju daerah evaporator melalui bagian adiabatik [37]. Batasan operasional dari sumbu kapiler pada pipa

kalor dapat digambarkan melalui hambatan termal dari pipa kalor tersebut. Hambatan termal dari pipa kalor dirumuskan melalui persamaan [23]:

$$R = \frac{T_{panas} - T_{dingin}}{\dot{Q}} \quad (2.1)$$

Pemilihan struktur sumbu kapiler untuk pipa kalor tergantung dari banyak faktor, salah satunya adalah terkait dengan sifat dari fluida kerja. Tujuan utama dari sumbu kapiler adalah untuk menghasilkan tekanan kapiler untuk mengalirkan fluida kerja kembali ke daerah kondensor menuju daerah evaporator. Disamping itu pula sumbu kapiler harus mampu mendistribusikan cairan yang ada disekitar evaporator ke daerah dimana panas diterima evaporator. Dalam pipa kalor, daya kapilaritas maksimum ( $\Delta P_c$ ) pada sumbu kapiler harus lebih besar atau sama dengan penjumlahan seluruh *pressure drop* untuk memastikan bahwa kedua fasa tersebut dapat mengalir [14].

Memperkecil ukuran pori pada sumbu kapiler akan menghasilkan *head* kapilaritas maksimum dari sumbu kapiler tersebut. Namun nilai permeabilitas akan menurun jika ukuran pori diperkecil. Untuk *homogeneous wick*, ada ukuran pori yang optimum. Cara lain untuk memaksimalkan *head* kapilaritas adalah dengan ketebalan sumbu kapiler, kemampuan mengalirkan panas pada pipa kalor meningkat saat menambah ketebalan sumbu kapiler [38]. Tetapi dengan menambah ketebalan sumbu kapiler, fluks panas tidak dapat diserap secara maksimal karena hambatan panas dari sumber panas ke dalam pipa kalor akan bertambah.

*Sintered powder wick* secara luas digunakan pada teknologi pipa kalor. Pemilihan ini karena sumbu kapiler mampu memindahkan fluida kerja kembali ke evaporator melalui efek kapilaritas. Maydanik [31] menjelaskan bahwa *sintered Ni* dan *sintered Cu* merupakan sumbu kapiler yang paling baik karena memiliki pori-pori yang kecil, kekuatannya yang besar, dan mampu bertahan pada fluida kerja bersuhu rendah.

**Tabel 2.3 Karakteristik Struktur Kapilaritas [31]**

Characteristics of capillary structures

Material	Porosity, %	Effective pore radius, $\mu\text{m}$	Permeability, $\times 10^{13}$ , $\text{m}^2$	Thermal conductivity, W/mK
Nickel	60-75	0.7-10	0.2-20	5-10
Titanium	55-70	3-10	4-18	0.6-1.5
Copper	55-75	3-15	-	-

Konduktivitas fluida kerja pada sumbu kapiler juga mempengaruhi jumlah total hambatan panas pada evaporator. Fluida kerja berupa air dengan sumbu kapiler berupa *sintered Cu* memiliki Temperatur uap sebesar  $60^{\circ}\text{C}$  dan fluks panas rata-rata  $8.2 \text{ W/cm}^2$  [14]. Hal lain yang penting dari sumbu kapiler adalah kecocokan dengan fluida kerja dan daya basahnya. Sumbu kapiler juga harus memungkinkan untuk dapat digunakan pada pipa kalor berulang-ulang dalam jangka waktu yang lama.

### 2.3.1 Konduktivitas Termal Sumbu Kapiler pada Pipa Kalor

Konduktivitas termal ( $k$ ) adalah sifat bahan yang menunjukkan jumlah panas yang mengalir melintasi satu-satuan luas jika gradien temperaturnya satu. Persamaan *fourier* merupakan persamaan dasar tentang konduktivitas termal. Persamaan tersebut dapat digunakan dalam perhitungan untuk menentukan konduktivitas termal suatu benda. Proses perpindahan kalor dapat digambarkan dengan jaringan tahanan. Perpindahan kalor menyeluruh merupakan hasil bagi beda temperatur menyeluruh dengan jumlah tahanan termal [39].

### 2.3.2 Struktur Sumbu Kapiler Homogen

Bentuk pori sumbu kapiler yang homogen terdapat pada sebuah *screen mesh* dan kasa. Jenis ini banyak diproduksi dalam berbagai ukuran pori maupun material yang digunakan, termasuk *stainless steel*, nikel, baja, tembaga, dan alumunium.

Pada aplikasi pipa kalor melingkar porositas spesifik dan ukuran pori tertentu dibutuhkan untuk meningkatkan daya kapilaritas secara

ekstrim, beberapa material polimer seperti keramik, *polyethylene* digunakan untuk memindahkan fluks panas yang besar, hingga 10.000 W/m<sup>2</sup>K dari evaporator [40] seperti yang dilakukan oleh Figus di Astrium SAS, Perancis. Pori sumbu kapiler dari polimer dibuat sangat kecil untuk meningkatkan kapilaritas, namun pada kenyataannya, pori yang sangat kecil akan memperkecil permeabilitasnya.

### 2.3.3 Hambatan Termal Sumbu Kapiler pada Pipa Kalor

Konduktivitas termal pada jenis sumbu kapiler yang digunakan dalam pipa kalor ternyata mempengaruhi hambatan termalnya. Wei-Chiang et al. [41] mengatakan bahwa hambatan termal dari pipa kalor merupakan suatu perbandingan antara temperatur *difference* ( $dT = T_{\text{evaporator}} - T_{\text{kondensor}}$ ) dengan beban panas yang diterima (Q), persamaannya adalah [14]:

$$R = \frac{dT}{Q} \quad (2.2)$$

### 2.3.4 Pengaruh Kapilaritas

Kemampuan untuk menahan perbedaan tekanan antar cairan dengan gas atau uap dalam struktur berongga disebut kapilaritas [42]. Ini dipengaruhi oleh material yang memiliki pori pada ukuran tertentu dan dapat dianggap sebagai sekat tabung kapiler yang memiliki luas penampang pada arah *cross-sectional* [43]. Wheatcraft dan Tyler [44] menjelaskan bahwa pada media berpori yang diameternya semakin besar, maka daya kapilaritasnya akan semakin kecil, sehingga didapat hubungan antara diameter dan panjang pori dirumuskan :

$$Lt(\lambda) = \lambda^{1-D\tau} L_0^{D\tau} \quad (2.3)$$

Dimana :

L : panjang media berpori

$\lambda$  : diameter pori-pori kapiler

$D\tau$  : dimensi dari *fracta turtositi*

Kapilaritas berperan dalam perpindahan panas pada pipa kalor dengan membuat sebuah mekanisme otomatis mensirkulasikan fluida yang ada di dalam pipa kalor. Besarnya perbedaan tekanan di evaporator dengan

kondensor yang dapat dipertahankan menyebabkan tekanan kapilaritas dapat berlangsung berkesinambungan.

### 2.3.5 Porositas dan Permeabilitas

Porositas adalah perbandingan ukuran ruang kosong dengan total volume pada material [45]. Dinyatakan dalam nilai  $0 < \delta < 1$  atau dalam skala presentase 0-100%. Jadi porositas pada struktur sumbu kapiler adalah perbandingan antara volume pori dengan padatan pada struktur sumbu kapiler. Jika kita melakukan pengukuran dengan air untuk mengisi kekosongan pada media berpori sehingga volume air yang mengisi pori-pori dilambangkan dengan  $V^w$  dan volume solidnya adalah  $V^s$ , maka porositas dapat dituliskan :

$$\varepsilon = \frac{V^w}{V^s + V^w} = 0.1 < \varepsilon \leq 1 \quad (2.4)$$

Sehingga,

$$\varepsilon = 1 - \left( \frac{1}{V} \int_{V^s} dV \right) \quad (2.5)$$

Porositas menjadi salah satu peranan yang penting dalam menentukan permeabilitas suatu material. Laju aliran masa total dari media berpori ( $Q$ ) merupakan jumlah dari laju alir masa oleh masing-masing pori secara individual ( $\lambda$ ), melalui persamaan Hagen-Poiseuille dirumuskan [46]:

$$q(\lambda) = \frac{\pi}{128} \frac{\Delta P}{L_t(\lambda)} \frac{\lambda^4}{\mu} \quad (2.6)$$

Dimana :

$\lambda$  : diameter pori-pori kapiler

$\mu$  : viskositas cairan

$\Delta P$  : penurunan tekanan

$L_t$  : panjang dari media berpori

Permeabilitas juga menentukan laju perpindahan panas, karena permeabilitas adalah kapasitas dari media berpori untuk mengalirkan fluida. Untuk itu, permeabilitas sangat erat kaitannya dengan karakteristik dari material, seperti luas permukaan pori dan distribusi pori.

Permeabilitas dapat dirumuskan berdasarkan persamaan *Blake-Koseny* [47] :

$$K = \frac{d_w^2(1-\varepsilon)^3}{66,62} \quad (2.7)$$

Dimana :

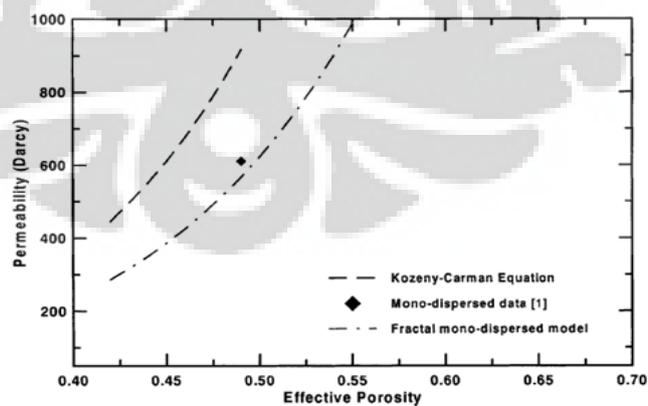
$K$  : Permeabilitas ( $m^2$ )

$d$  : diameter kawat pada *mesh* atau diameter butiran pada *sintered powder* (m)

$\varepsilon$  : porositas

Pengaruh porositas sangat mempengaruhi nilai maksimum dari perpindahan kalor [48]. Peningkatan 10% porositas mampu meningkatkan perpindahan kalor hingga dua kali. Dari percobaannya lainnya, pipa kalor dengan porositas 37,1% dan 51,6% mempunyai pengaruh yang besar terhadap perpindahan panas [49]. Dapat disimpulkan bahwa semakin besar tingkat porositas maka semakin tinggi pula rata-rata perpindahan kalornya karena porositas mempengaruhi daya kapilaritas sumbu kapiler.

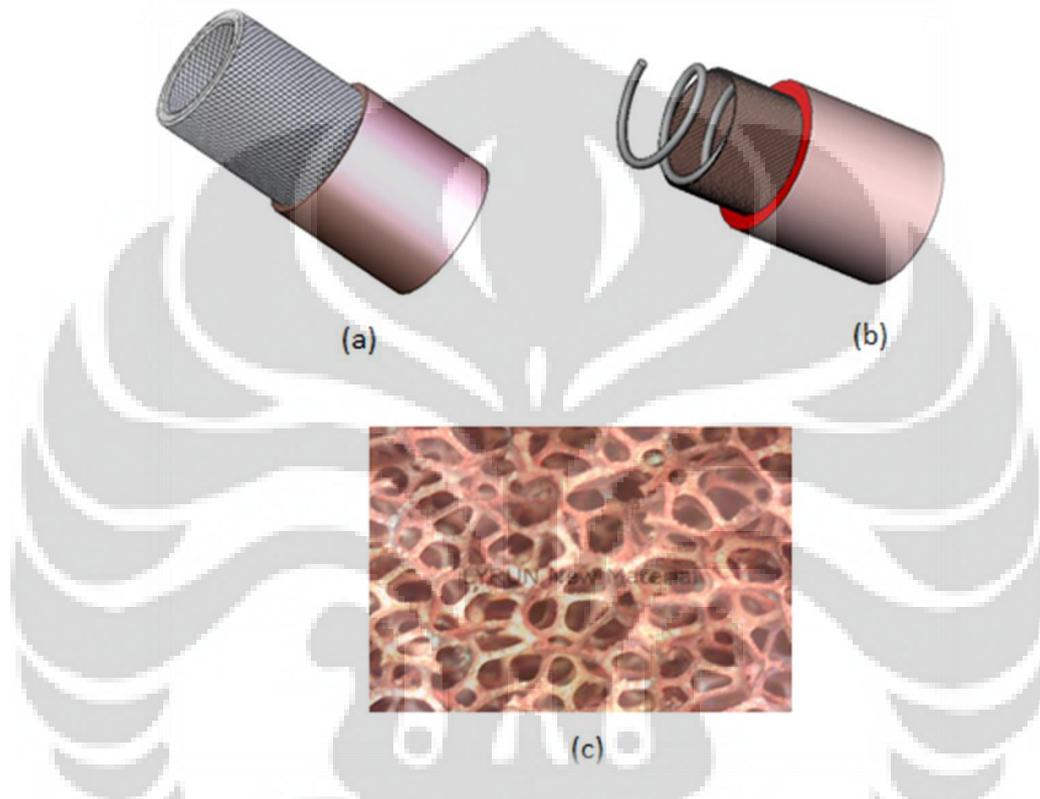
Daya pompa kapilaritas pada sumbu berpori sangat dipengaruhi oleh porositas dari sumbu tersebut dimana semakin besar porositas dari material maka semakin besar daya kapilaritas dari material tersebut. Meningkatnya porositas efektif dari suatu media berpori tentunya akan meningkat pula nilai dari permeabilitas dari media berpori tersebut [46,50]



Gambar 2.6 Permeabilitas pada Struktur Pori Mono Dispersed [46]

### 2.3.6 Jenis Struktur Sumbu Kapiler

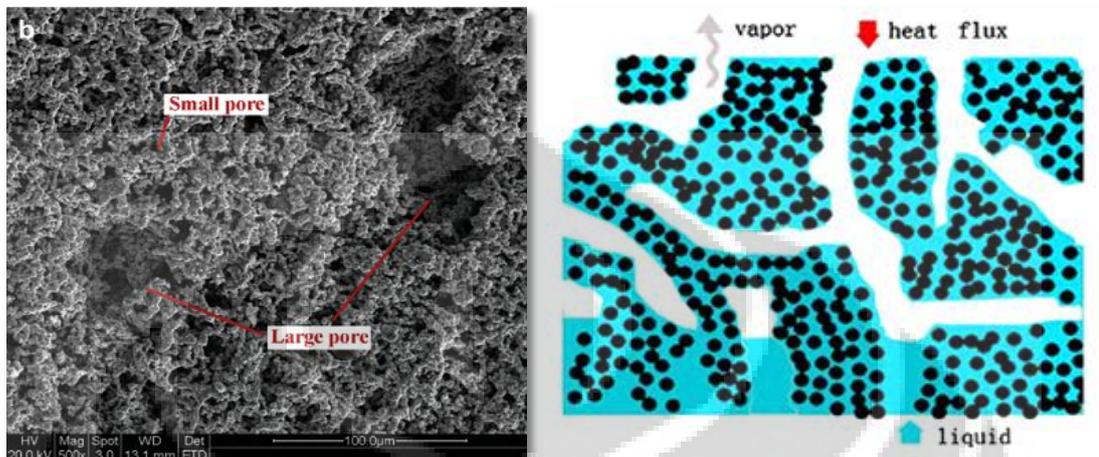
Jenis struktur Sumbu Kapiler pada umumnya terdapat beberapa jenis, *wick* yang banyak digunakan pada produk-produk *heat pipe* komersial diantaranya : *Axial Groove*, *Wire Screen Mesh*, *Sintered Powder Metal*, dan *Fiber-Spiral*.



Gambar 2.7 (a) Sumbu *Screen Mesh*, (b) Sumbu *Fiber Spiral* [14], (c) *Cooper Foam*

Untuk sumbu kapiler dengan proses *sintered powder*, terdapat dua jenis sumbu kapiler yang dapat digunakan yaitu *monoporous* dan *biporous*. Sumbu *monoporous* menggunakan satu jenis ukuran pori sumbu kapiler, sedangkan sumbu kapiler *biporous* menggunakan dua jenis ukuran pori sumbu kapiler yang menurut Zhi Chun Liu [51] dapat menghasilkan performa sumbu kapiler yang lebih baik pemisahan fluida kerja dibandingkan *monoporous*. Gambar dibawah menunjukkan hasil *scan* elektronik dari sumbu *biporous* dan Zhi Chun Liu menyatakan pori dengan ukuran besar dapat mengurangi hambatan aliran dari sumbu

kapiler dan meningkatkan perpindahan cairan menuju sumbu dan uap keluar dari sumbu. Pori dengan ukuran kecil menghasilkan gaya kapilaritas yang baik.



Gambar 2.8 Sumbu Kapiler *Biporous* [51]

## 2.4 Nanofluida

Peningkatan sifat termal fluida bisa dilakukan dengan mencampurkan partikel solid. Liu et al. Melakukan studi mengenai implikasi hidrodinamik dan perpindahan kalor dari lumpur [52]. Akan tetapi lumpur dengan partikel tersuspensi dengan ukuran mikrometer mempunyai permasalahan seperti sifat abrasif dari partikel yang dapat menyebabkan erosi, pengotoran, dan penyumbatan, serta penurunan tekanan aliran.

Perkembangan nano teknologi pada akhir-akhir ini telah mengarah pada fluida yang disebut sebagai nanofluida, yang memiliki potensi besar pada penerapan perpindahan kalor. Istilah nanofluida adalah campuran dua fasa, dimana fasa kontinu biasanya cairan dan fasa yang terdispersi adalah nano partikel padat yang sangat halus, dengan ukuran kurang dari 100 nm. Choi [12], orang pertama yang menggunakan istilah nanofluida dengan menggunakan fluida cair dengan nano partikel tersuspensi didalamnya. Partikel CuO dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> berukuran nanometer dicampur dengan fluida cair diantaranya air dan *ethyleneglycol*. Hasil penelitian

diperoleh peningkatan termal konduktivitas sebesar 20%. Peningkatan konduktivitas termal sekitar 60% dapat dicapai untuk nanofluida yang terdiri dari air dengan 5% nano partikel CuO. Eastman et al. [13], peningkatan konduktivitas termal sebesar 40% didapat dari penambahan 0,3% partikel Cu dalam *ethyleneglycol*. Xuan dan Li [53], menjelaskan suatu prosedur untuk mempersiapkan nanofluida dengan peralatan *hot wire* untuk mengukur konduktivitas termal nanofluida dengan nano partikel bubuk tembaga tersuspensi. Das et al. [54] melakukan pengukuran difusivitas termal dan konduktivitas termal pada nanofluida dengan nanopartikel Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> atau CuO sebagai bahan suspensinya untuk fungsi temperatur. Patel et al. [55], juga melakukan penelitian mengenai pengukuran konduktivitas termal pada campuran nano partikel Au dengan media air dan *toluene*. Huanqing et al. [56], melakukan penelitian tentang konduktivitas termal pada *multiwalled carbon nanotubes* (CNTs). Asam nitrit terkonsentrasi digunakan untuk menguraikan kumpulan CNT dalam memproduksi nanofluida CNT.

#### 2.4.1 Konduktivitas Termal Nanofluida

Nanofluida merupakan partikel yang cukup stabil dengan memiliki konduktivitas termal yang sangat baik. Penyebaran dalam jumlah kecil pada *nano tube*, dapat mengubah konduktivitas termal pada fluida dasar, yakni mengalami peningkatan 2,5% pada fraksi volume 1%. Konduktivitas termal efektif pada nanofluida meningkat dengan suhu lingkungan atau suhu ruangan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa nanofluida merupakan fluida yang peka terhadap lingkungan.

Bhattacharya et al. [57], menggunakan teknik simulasi dinamika *Brownian* untuk menghitung konduktivitas termal efektif nanofluida. Seok Pil Jang et al. [58], berpendapat bahwa gerak *Brownian* dari nano partikel pada tingkat skala nano dan molekul adalah suatu mekanisme pengatur sifat termal dari nanofluida.

Suatu permodelan yang komprehensif telah diusulkan pula untuk menjelaskan peningkatan yang besar dari konduktivitas termal di dalam nanofluida dan ketergantungan akan temperatur, dimana teori model

konvensional tidak mampu menjelaskannya. Model yang diusulkan tersebut adalah model partikel diam (*stationary particle model*), yang menjelaskan ketergantungan nilai  $k$  (*thermal conductivity*) pada konsentrasi volume dan ukuran partikel. Model kedua adalah model partikel bergerak (*moving particle model*) yang menjelaskan bahwa ketergantungan yang kuat akan temperatur pada medium dihubungkan dengan variasi kecepatan nano partikel dengan temperatur.

#### 2.4.2 Pembuatan Nanofluida

Pembuatan nanofluida yang baik adalah membuat campuran sedemikian sehingga tidak mengalami aglomerasi, tidak ada perubahan kimia dari cairan dan campuran bersifat lebih stabil [59]. Ada dua metode yang digunakan, yaitu metode satu langkah dan metode dua langkah. Akoh et al. [60] menyebutnya sebagai metode VEROS (*Vacuum Evaporation onto a Running Oil Substrate*). Modifikasinya dari VEROS ini adalah memberikan tekanan tinggi *magnetonsputtering* untuk membuat nanofluida dari nanopartikel logam seperti Ag dan Fe [61,13]. Zhu et al. [62] menyajikan metode satu langkah melalui metode kimia yang digabungkan dengan gelombang mikro.

Sedangkan metode dua langkah merupakan metode pembuatan nano partikel, kemudian dilakukan pencampuran dengan fluida dasar dengan menggunakan proses ultrasonik supaya benar-benar tercampur secara merata dan tidak terjadi aglomerasi, seperti yang dilakukan oleh Wang et al. [63] dan Lee et al. [64]. Agar mendapatkan hasil yang lebih baik, Nandy Putra et al. [65] Melakukan pencampuran dengan menggunakan *Ultrasonic Vibration* sehingga nano partikel dapat terdispersi dengan baik

Nanopartikel harus dilalukan dalam bentuk oksida karena lebih mudah dalam proses pendispresian fluida dasarnya dibanding hanya menggunakan partikel nano logam murni. Teori Maxwell dimodifikasi oleh Hamilton dan Crosser [66,67] membentuk suatu persamaan yang digunakan dalam menghitung konduktivitas termal dari fluida nano-oksida, yang dijelaskan dalam persamaan :

$$k_{eff} = k_0 \frac{k_p + (n-1)k_0 - (n-1)\varepsilon(k_0 - k_p)}{k_p + (n-1)k_0 + \varepsilon(k_0 - k_p)} \quad (2.8)$$

Dimana :

$K_{eff}$  : konduktivitas termal nanofluida

$K_p$  : konduktivitas termal nano partikel

$K_0$  : konduktivitas termal fluida dasar

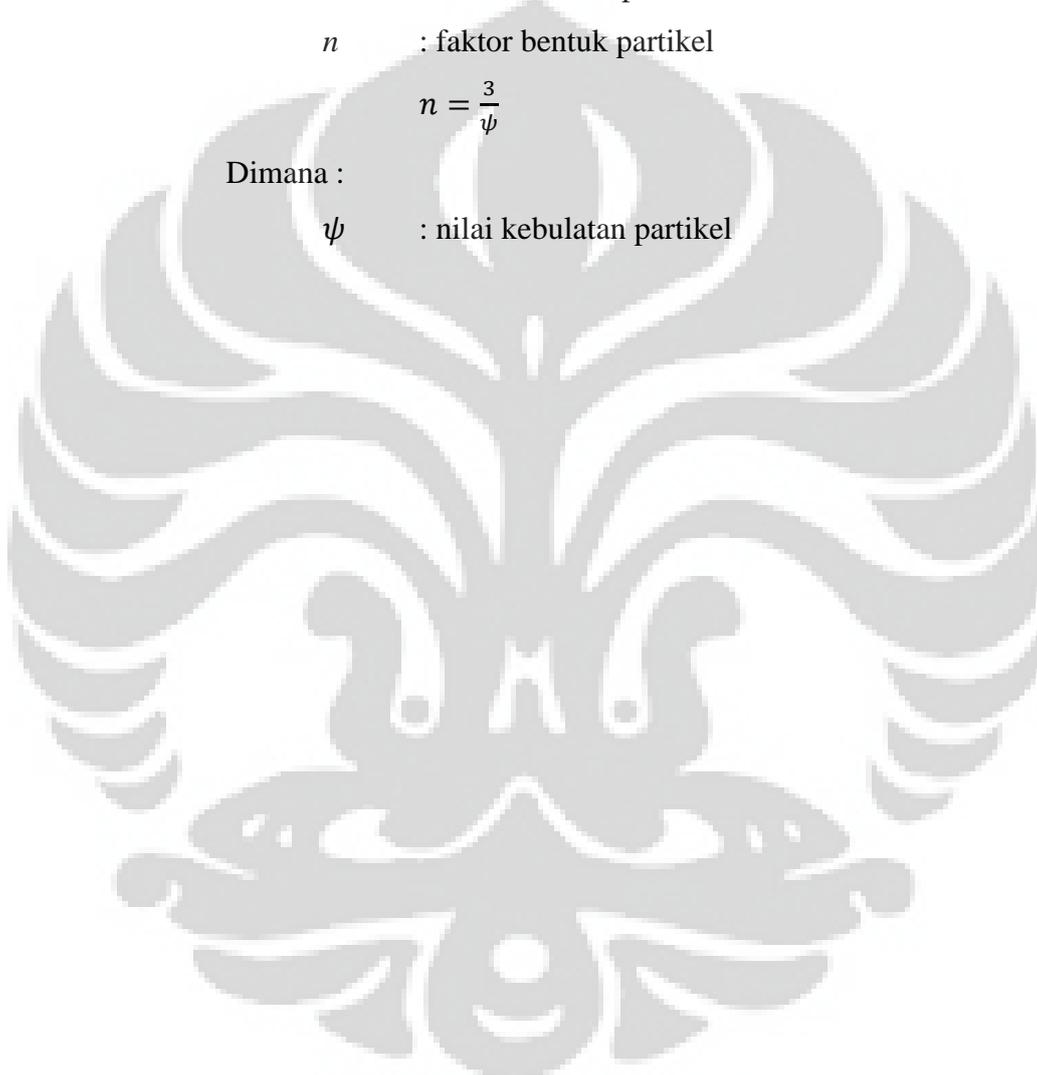
$\varepsilon$  : fraksi volume partikel

$n$  : faktor bentuk partikel

$$n = \frac{3}{\psi}$$

Dimana :

$\psi$  : nilai kebulatan partikel



## BAB 3

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Preparasi Nanofluida

Pada penelitian ini digunakan nano partikel  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dengan fluida dasar adalah aquades ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Karakteristik dari nano partikel  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dapat dilihat pada tabel 3.1. tahapan dalam pembuatan nanofluida, dimulai dengan mengaduk campuran nano partikel dengan fluida dasar menggunakan *magnetic stirrer* selama 15 menit hingga tercampur merata.



**Gambar 3.1** Proses Preparasi Nanofluida

**Tabel 3.1** Properties  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [68]

<b>Properties <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math></b>	
Konduktivitas Termal [W/m.K]	40
Densitas [kg/m <sup>3</sup> ]	260
Kalor Jenis [J/kg. K]	765
Diameter Rata-Rata Partikel [nm]	20

Pada tahap kedua, nanofluida dicampur dengan bantuan alat *ultrasonic processor*. Campuran nano partikel dan fluida dasar didispersikan pada intensitas 60% selama 60 menit. Penggunaan dua tahap dalam pembuatan nanofluida ini memiliki tujuan untuk mendapatkan larutan yang bersifat homogen.

Variasi yang dilakukan dengan penentuan fraksi volume pada nano partikel, yaitu sebesar 1%, 3%, dan 5%. Untuk menentukan fraksi volume dari nano fluida, digunakan persamaan [69]:

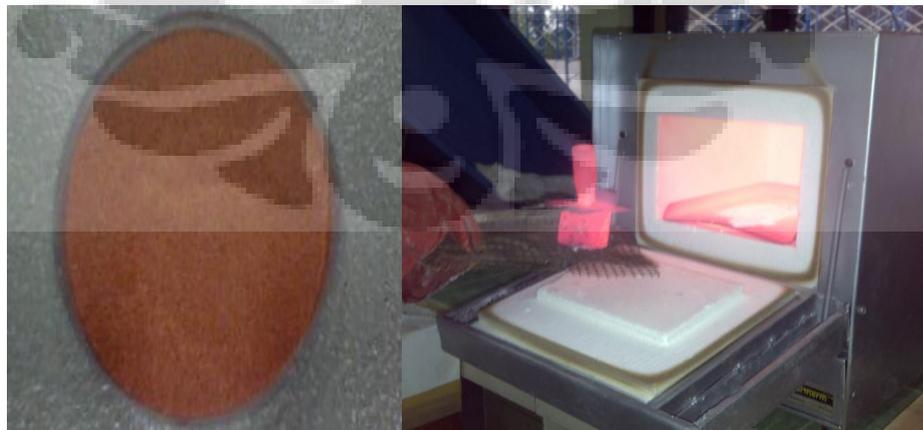
$$\% \text{ Fraksi Volume} = \frac{\frac{W_{\text{nano partikel}}}{\rho_{\text{nano partikel}}}}{\frac{W_{\text{nano partikel}}}{\rho_{\text{nano partikel}}} + \frac{W_{\text{fluida dasar}}}{\rho_{\text{fluida dasar}}}} \quad (3.1)$$

### 3.2 Pembuatan Wick (Sumbu Kapiler)

Rancangan pipa kalor melingkar ini menggunakan dua jenis sumbu kapiler yang berbeda, yaitu *sintered Cu* dan biomaterial. Proses pembuatannya dapat dilihat pada bagian selanjutnya.

#### 3.2.1 Pembuatan Sumbu Kapiler *Sintered Cu*

Material penyusun utama sumbu kapiler adalah bubuk tembaga (Cu) dari MHC Industrial CO., LTD dengan ukuran  $63\mu\text{m}$  yang dipanaskan pada tungku pembakaran hingga mencapai temperatur lelehnya, hingga  $920^{\circ}\text{C}$ , dan dilakukan selama 20 menit. Kemudian didinginkan secara alami dengan menggunakan suhu ruangan. Untuk memudahkan proses pemisahan antara cetakan pipa tembaga yang telah dipanaskan, digunakan *alumina* sebagai perekat berukuran  $10\mu\text{m}$  pada cetakan sebelum proses *sintering* dilakukan.



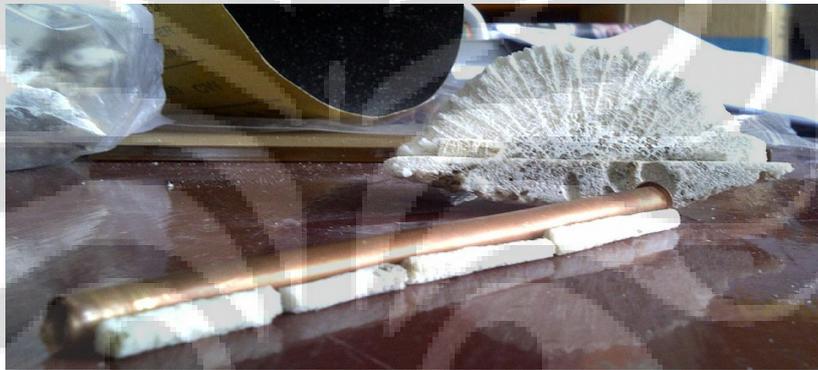
Gambar 3.2 bubuk tembaga dan proses *sintering*

Setelah bubuk tembaga *disintering*, dilakukan uji SEM di Departemen Metalurgi untuk melihat struktur *porous* sumbu kapiler dari *sintered Cu*.

### 3.2.2 Pembuatan Sumbu Kapiler Biomaterial

Batu karang (*collaria*) dipilih sebagai sumbu kapiler biomaterial. Batu karang ini dipotong dan digerinda hingga berbentuk balok, kemudian dilanjutkan dengan proses pengikiran. Untuk menghaluskan, material ini diampelas hingga berukuran  $\pm 6.5$  mm dan panjang 5 cm. Tujuannya adalah agar biomaterial masuk ke dalam pipa tembaga dengan ukuran yang tepat.

Struktur mikro dari batu karang juga diamati di Departemen Metalurgi FTUI untuk dibandingkan bentuknya dengan *sintered Cu*.



Gambar 3.3 biomaterial sebagai sumbu kapiler

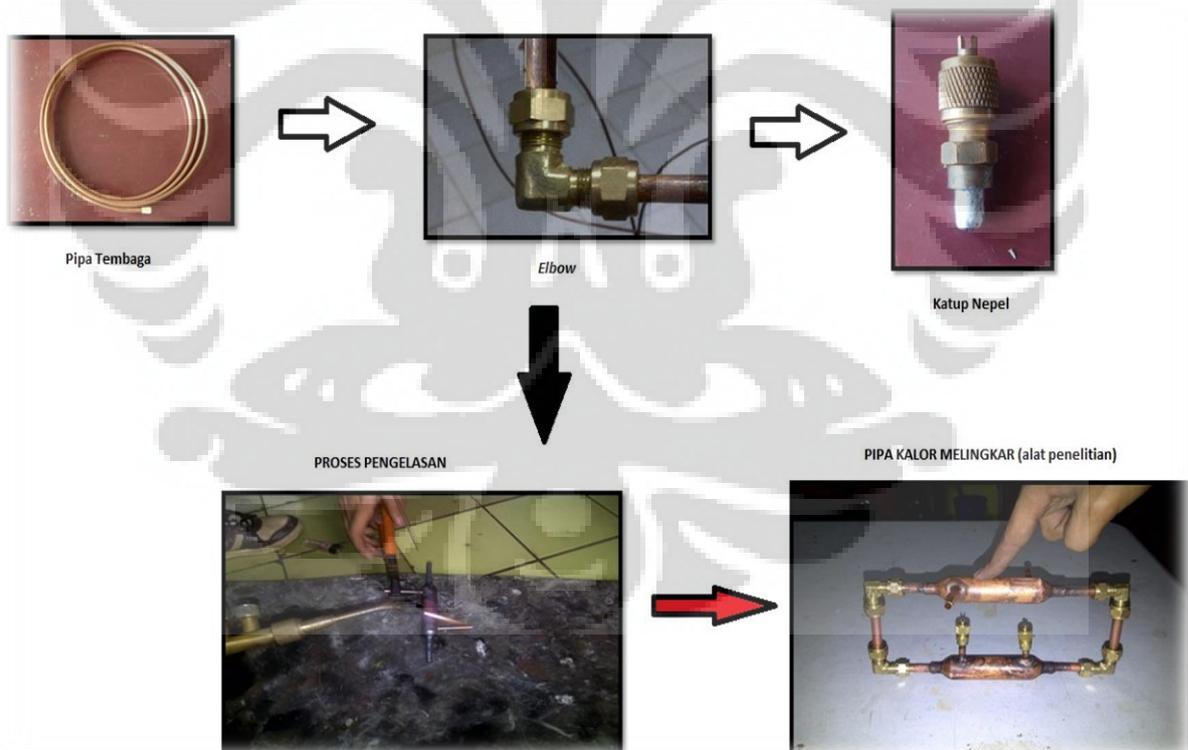
### 3.3 Pembuatan *Loop Heat Pipe* (Pipa Kalor Melingkar)

Pipa kalor melingkar disusun oleh beberapa elemen, yaitu pipa tembaga, katup nepl, dan *elbow* kuningan. Ada dua tipe pipa tembaga yang digunakan, yang pertama berdiameter 8 mm dan yang kedua berdiameter 24 mm yang ujungnya mengecil dengan diameter 10 mm dan panjangnya 115 mm yang dipilih untuk menjadi *container* dari fluida kerja. Masing-masing pipa memiliki ketebalan 0.85 mm dan kemudian disusun sehingga memiliki keliling 630 mm.

Setiap sudut dari pipa tembaga yang telah dipotong dengan panjang tertentu, dihubungkan dengan menggunakan *elbow* (siku). Empat buah siku digunakan pada setiap sudut pipa tembaga yang telah *dipitching* terlebih dahulu untuk memastikan tercipta kondisi sambungan yang sempurna. Katup nepl berfungsi untuk memasukkan fluida kerja dan untuk memastikan tidak ada udara

yang terjebak di dalam rangkaian pipa kalor melingkar ketika proses pemvakuman.

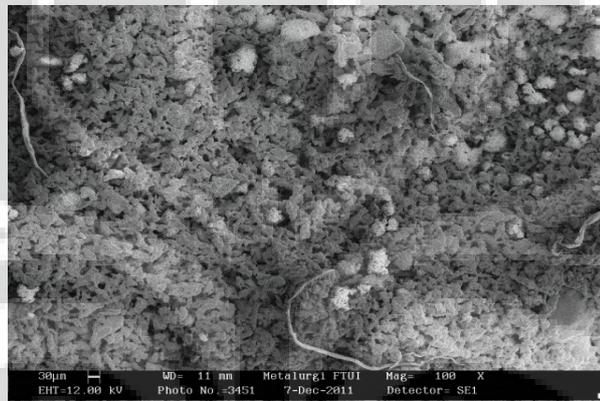
Proses perangkaian dilanjutkan ketika pipa tembaga dan sumbu kapiler siap digunakan. Setelah pipa tembaga dipotong dengan ukuran yang ditentukan dan sumbu kapiler telah berada pada salah satu sisi pipa, proses *pitching* dilakukan agar tercipta sambungan yang sempurna dengan siku. Kemudian pipa tembaga dengan diameter 24 mm yang akan digunakan sebagai evaporator dan kondensor dilas dengan pipa tembaga melalui proses *brazing*. Khusus pada kondensor, konsepnya adalah *double pipe* (pipa ganda) yang bertujuan untuk mensirkulasi fluida pendingin yang menyelimuti pipa tembaga pada bagian dalamnya. Dua buah katup nepel dilas pada bagian evaporator yang telah dilubangi terlebih dahulu. Begitu halnya dengan kondensor, dua pipa tembaga berdiameter 8 mm dilas sebagai saluran keluar-masuknya air.



**Gambar 3.4 Skematik Pembuatan Pipa Kalor Melingkar**

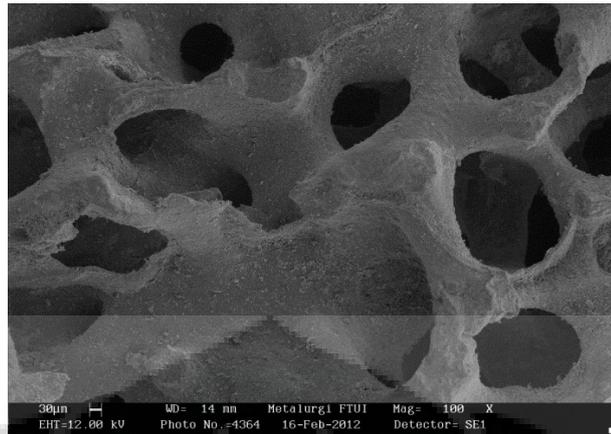
### 3.4 Karakteristik Sumbu Kapiler

Untuk mengetahui sifat dari sumbu kapiler yang digunakan, dilakukan uji SEM (*Scanning Electron Microscope*) di Departemen Metalurgi Universitas Indonesia. Hasil SEM menunjukkan sumbu kapiler *sintered Cu* memiliki pori-pori yang lebih rapat dibandingkan biomaterial pada perbesaran yang sama. Menurut W. Liu [34] pori sumbu kapiler dengan ukuran yang besar dapat mengurangi hambatan aliran. Sehingga meningkatkan *capillary performance* dari sumbu kapiler.



**Gambar 3.5 SEM *Sintered Cu* ukuran 30 µm perbesaran 100x**

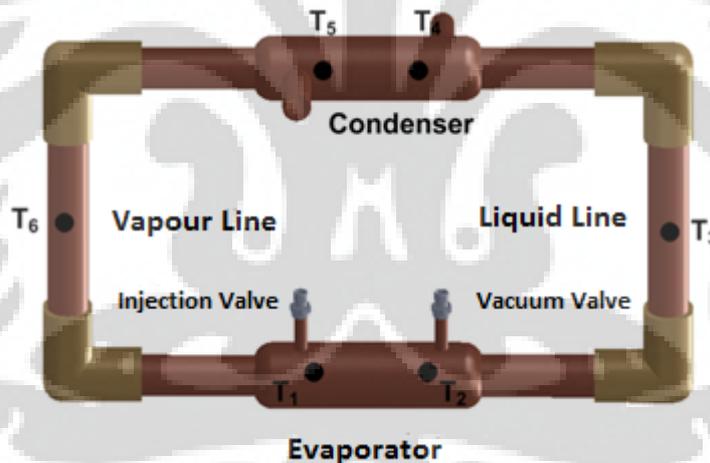
Pengukuran diameter pori berdasarkan hasil SEM dilakukan dengan cara skala yang diberikan pada hasil SEM. Diameter rata-rata pori untuk sumbu kapiler jenis *sintered Cu* sebesar 7.03 µm dan untuk biomaterial sebesar 291 µm. Perbedaan yang cukup besar ini dapat dilihat pada hasil SEM.



Gambar 3.6 SEM Karang ukuran 30  $\mu\text{m}$  perbesaran 100x

### 3.5 Skematik Pengujian

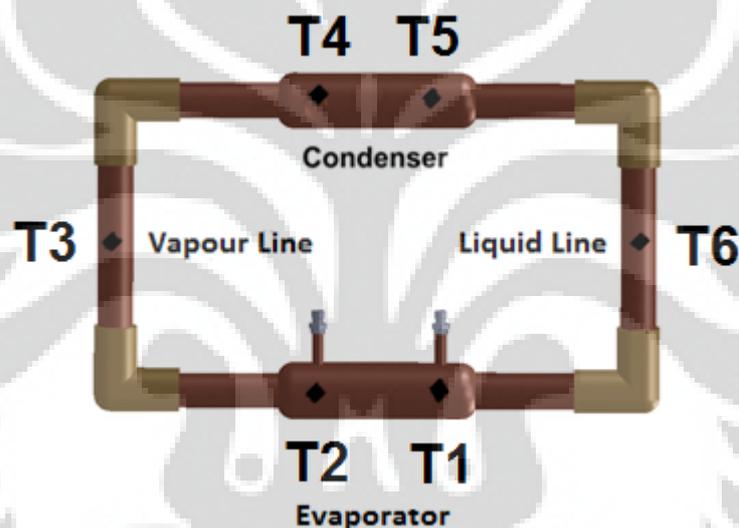
Seperti terlihat pada gambar 3.7, pipa kalor melingkar terdiri atas enam bagian yang berbeda, yaitu :



Gambar 3.7 Desain Pipa Kalor Melingkar

1. Kondensor, berfungsi sebagai tempat pendinginan dengan pipa ganda.
2. Evaporator, sebagai tempat penerima panas dari *heater* yang berisi banyak fluida. Bagian ini memiliki luas penampang yang lebih besar daripada daerah lainnya. Fungsinya adalah tempat penyimpanan fluida supaya tidak terjadi *dry out* karena banyaknya kalor yang masuk.

3. *Liquid line*, pipa tembaga yang didalamnya berisi sumbu kapiler berupa *sintered Cu* maupun biomaterial untuk tempat dilaluinya fluida kerja berupa fasa cair.
4. *Vapour line*, memiliki panjang yang sama dengan *liquid line* namun tidak terdapat sumbu kapiler didalamnya. Fungsinya adalah tempat dilaluinya fluida kerja berupa fasa gas.
5. *Injection valve*, katup yang digunakan untuk memasukan fluida kerja dengan cara metode penyuntikkan.
6. *Vacuum valve*, katup yang digunakan untuk memvakum pipa kalor melingkar, dihubungkan dengan pompa vakum melalui selang.



**Gambar 3.8 Posisi Peletakan Termokopel pada Pipa Kalor Melingkar**

Pada gambar 3.8 dapat dilihat skema pengujian pipa kalor melingkar, yang dilakukan dengan mengukur temperatur pada 6 buah titik dengan posisi termokopel 4 cm, 8 cm, 21 cm, 31 cm, 43 cm, 53cm, dari titik 0 pada pipa kalor melingkar. Posisi termokopel lebih jelas terletak pada :

1. Evaporator 1 (4 cm)
2. Evaporator 2 (8 cm)
3. *Vapour line* (21 cm)
4. Kondensor 1 (31 cm)

5. Kondensor 2 (43 cm)
6. *Liquid line* (53 cm)

Kemudian *heater* yang berbentuk kabel dengan panjang 1 m dan besar daya 10 Watt yang dapat menghasilkan panas hingga mencapai  $120^{\circ}\text{C}$  dililitkan pada sisi evaporator tepatnya pada titik 1 hingga titik 2, seperti yang terlihat pada gambar 3.9. *heater* (pemanas elektrik) digunakan untuk menghasilkan beban panas pada sisi evaporator.



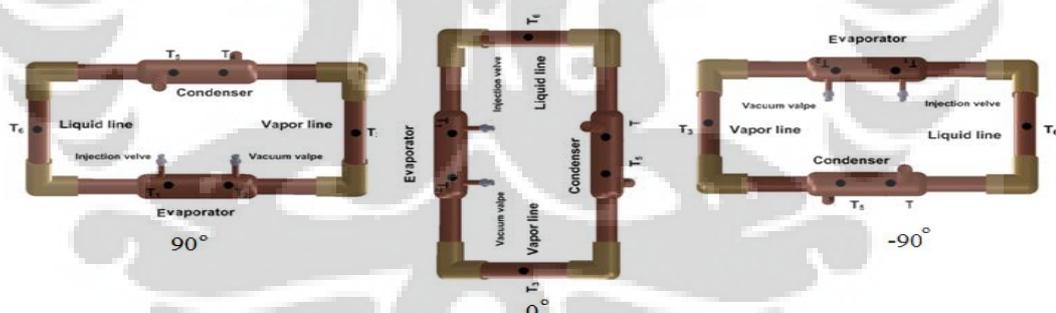
**Gambar 3.9 Pemasangan *Heater* pada Evaporator**

Pada kondensor yang menggunakan pipa ganda, disambungkan selang yang terhubung oleh *circulating thermostatic bath* dengan temperatur konstan sebesar  $25^{\circ}\text{C}$  dan laju aliran massa 1 liter/min. Untuk menghindari kehilangan kalor, pipa kalor melingkar diisolasi dengan menggunakan *polyurethane* box dengan ukuran 30 cm x 20 cm x 8 cm agar sebisa mungkin panas tidak lepas ke lingkungan. Material ini memiliki konduktivitas termal yang rendah ( $0.12 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ). Lubang-lubang yang belum tertutup dengan sempurna, ditambal menggunakan *glasswool*. Fungsinya adalah untuk memperkecil kehilangan kalor karena bentuk dari *polyurethane* yang kaku yang mengakibatkan banyak celah sehingga memungkinkan banyaknya panas yang keluar dan akan mengurangi keakuratan daya yang diperoleh.



**Gambar 3.10 Isolasi Pipa Kalor Melingkar dengan *Polyurethane* dan *Glasswool***

Pengujian pipa kalor melingkar dilakukan dengan variasi posisi evaporator untuk membuktikan pengaruh gravitasi terhadap performa dari pipa kalor melingkar. Posisi  $90^{\circ}$  menunjukkan evaporator di bawah kondensor, posisi  $0^{\circ}$  menunjukkan evaporator sejajar dengan kondensor, dan posisi  $-90^{\circ}$  menunjukkan posisi evaporator berada di atas kondensor, seperti terlihat pada gambar 3.11.



**Gambar 3.11 Penentuan Posisi Evaporator dan Kondensor**

Pengujian dilakukan dengan menggunakan tiga jenis pipa kalor melingkar yang berbeda, yaitu dengan menggunakan sumbu kapiler biomaterial, *sintered Cu*, dan juga tanpa menggunakan sumbu kapiler. Fluida kerjanya berupa aquades dan nanofluida  $Al_2O_3$  dengan variasi perbedaan fraksi volume. Metode pengisian fluida kerja menggunakan metode vakum, yakni fluida kerja dibekukan dengan merendam pipa

kalor melingkar pada suhu dibawah  $0^{\circ}\text{C}$  pada CTB, kemudian divakum dengan pompa vakum hingga mencapai tekanan 30 cmHg atau 0.039 atm. Berikut ini adalah variasi pengujian yang dilakukan pada pipa kalor melingkar :

**Tabel 3.2 Tabel Variasi Percobaan**

<b>Pipa Kalor Melingkar</b>	<b>Sumbu Kapiler</b>	<b>Fluida</b>	<b>Daya</b>	<b>Posisi</b>
<b>Perbedaan Fluida</b>	<i>Sintered Cu</i>	Nanofluida 1%	10, 20, 30 Watt	$90^{\circ}$
	Biomaterial	Nanofluida 3%	10, 20, 30 Watt	$90^{\circ}$
	Tanpa <i>wick</i>	Nanofluida 5%	10, 20, 30 Watt	$90^{\circ}$
<b>Perbedaan Posisi Evaporator</b>	<i>Sintered Cu</i>	Air	10, 20, 30 Watt	$90^{\circ}$ , $0^{\circ}$ , dan $-90^{\circ}$
	Biomaterial	Air	10, 20, 30 Watt	$90^{\circ}$ , $0^{\circ}$ , dan $-90^{\circ}$
	Tanpa <i>wick</i>	Air	10, 20, 30 Watt	$90^{\circ}$ , $0^{\circ}$ , dan $-90^{\circ}$

Pengisian fluida kerja pada pipa kalor melingkar dilakukan dengan metode vakum. Sebelumnya pipa kalor melingkar diisi dengan metode penyuntikkan sekitar 60% dari volume total, seperti yang terlihat pada gambar 3.12. Besar pengisian volume fluida kerja menjadi variabel yang dijaga konstan pada setiap pengambilan data untuk memperoleh distribusi temperatur yang seragam di setiap zona pengukuran.



**Gambar 3.12 Proses Penyuntikan Fluida Kerja Ke dalam Pipa Kalor Melingkar**

Selanjutnya pipa kalor melingkar yang telah terisi fluida, dibekukan dengan *coolant* yang mampu tidak membeku pada suhu dibawah  $0^{\circ}\text{C}$  pada CTB. *Coolant* yang digunakan adalah *radiator coolant* merek Prestone Precision Blend<sup>TM</sup>. Pendinginan dilakukan pada suhu  $-5^{\circ}\text{C}$  selama 20 menit supaya keseluruhan fluida dipastikan benar-benar membeku. Proses pembekuan dilakukan supaya pada saat melakukan vakum, fluida kerja tidak ikut terhisap oleh pompa vakum. Kemudian, metode vakum dilakukan untuk menghisap udara yang terjebak didalam pipa kalor melingkar. Proses vakum dilakukan hingga mencapai tekanan 30 cmHg (atmosfer).



**Gambar 3.13 Pompa Vakum**

Peralatan yang menunjang dibutuhkan agar pengujian dan pengambilan data dapat dilakukan, berupa DC *power supply*, termokopel, dan data akuisisi. Daya dari catu daya divariasikan pada 10 Watt, 20 Watt, 30 Watt. Arus listrik DC dari catu daya digunakan dengan tegangan maksimum 30 Volt DC dan arus maksimum 20 A. Catu daya memiliki merek BK Precision tipe 9123A.

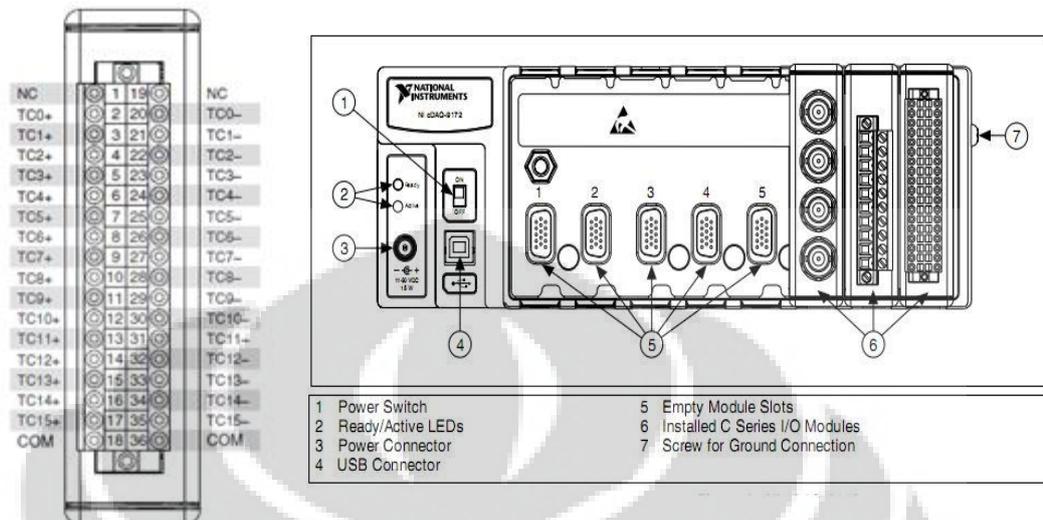


**Gambar 3.14** Catu Daya DC [76]

Data temperatur yang terukur oleh termokopel jenis K pada beberapa posisi. Material pembentuknya adalah Kromel (*Nikel – Kromium*) dan Alumel (*Nikel – Aluminium*). Termokopel menggunakan efek *Seebeck* dalam pengukuran temperatur, dengan pembangkit tegangan sebagai fungsi dari gradien temperatur. Nilai dan fungsi dari gradien temperatur dari termokopel bergantung pada jenis komposisi material yang digunakan, output dari termokopel berupa tegangan (mV), maka untuk membaca data masukan digunakan data akuisisi.

Dalam pengambilan data digunakan data akuisisi untuk membaca termokopel tipe K yang digunakan. Data akuisisi yang digunakan pada pengujian ini adalah NI 9213 dengan 16 *channel* termokopel produksi *National Instruments*. Data akuisisi ini menggunakan *software* sebagai *interface* yang dioperasikan dengan menggunakan sistem operasi Windows 7 dengan menggunakan *software Lab View 8.5* untuk pengambilan data berupa pembacaan temperatur dari termokopel. modul

NI 9213 dipasang pada salah satu *port* yang terdapat pada *chasis* cDAQ 9172, dari *chasis* ini akan dihubungkan ke komputer melalui kabel USB.



**Gambar 3.15** NI 9213 dan cDAQ 9172 [77]

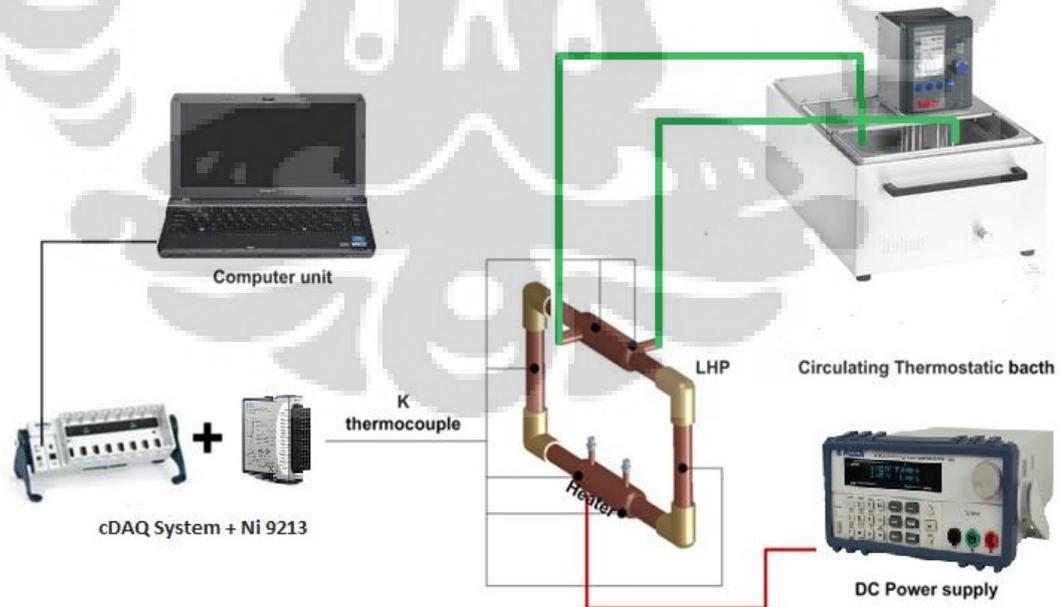
*Circulating Thermostatic Bath* digunakan untuk mengatur temperatur fluida kerja yang berfungsi sebagai pendinginan dan menyerap kalor dari kondensor dalam pengujian pipa ganda. Pada CTB terdapat beberapa komponen seperti bak penampung air, *controller*, pompa, *heater*, dan *chiller*. CTB yang digunakan adalah dengan merek *Hubber* tipe K12-cc-NR dan memiliki temperatur kerja dari  $-20^{\circ}\text{C}$  –  $200^{\circ}\text{C}$ .



**Gambar 3.16** *Circulating Thermostatic Bath* [75]

Secara keseluruhan, proses pengambilan data dijelaskan pada :

1. Pemasangan termokopel pada titik-titik pengukuran. Dua termokopel pada sisi evaporator, dua termokopel pada kondensor, satu pada *vapour line*, dan satu lagi pada *liquid line*.
2. *Heater* kabel digulung di sisi luar evaporator, kemudian ditutup dengan *aluminium foil*.
3. Meletakkan sisi evaporator, *vapour line*, dan *liquid line* ke dalam *polyurethane* dan mengisi segala celah dengan *glasswool*.
4. Pemasangan selang pada sisi kondensor yang dihubungkan pada *circulating thermostatic bath*.
5. Menghubungkan kabel *heater* dengan catu daya DC.
6. Ujung termokopel lainnya dihubungkan dengan data akuisi *National Instruments NI 9213*.
7. Menjalankan *circulating thermostatic bath* dan menunggu hingga temperatur konstan  $25^{\circ}\text{C}$ .
8. Menghubungkan data akuisisi dengan komputer.
9. Menghidupkan catu daya DC dengan variasi 10 W, 20 W, dan 30 W.
10. Pengambilan data dilakukan.



Gambar 3.17 Skematik Pengujian

## BAB 4

### PEMBAHASAN

#### 4.1 Hasil dan Analisa Pengujian

Pada bab ini disajikan data-data dan analisa hasil pengujian dari pipa kalor melingkar dengan variasi penambahan fraksi volume dari nano partikel  $Al_2O_3$  ke dalam fluida kerja berupa aquades. Pipa kalor melingkar yang diuji menggunakan sistem pendinginan berupa air yang dijaga suhunya konstan sebesar  $25^{\circ}C$  memaki CTB (*circulating thermostating bath*) pada bagian kondensor.

Pengujian dilakukan dengan memvariasikan fraksi volume dari  $Al_2O_3$  sebesar 1%, 3%, dan 5% yang dicampurkan ke dalam fluida kerja berupa DI-water. Daya yang diberikan pun divariasikan sebesar 10 Watt, 20 Watt, dan 30 Watt melalui *heater* (pemanas) yang dihubungkan dengan *power supply DC*.

Pengambilan data dilakukan rata-rata selama 60-100 menit hingga temperatur di evaporator tidak naik lagi atau mencapai kondisi stabil. Data yang diambil berupa 1 data per detik dengan menggunakan modul dari *National Instrument* dan dicatat dengan dalam bentuk file .lvm melalui perangkat lunak *Labview 8.5*. kemudian pengolahan data dan analisa dilakukan dengan menggunakan program *Microsoft Excel* dan *Origin Lab*.

Dari pengujian kinerja pipa kalor melingkar, melalui pengukuran berupa beberapa titik di daerah evaporator, *vapour line*, kondensor, dan *liquid line*, didapatkan rata-rata temperatur seperti pada tabel 4.1.

**Tabel 4.1 Tabel Hasil Pengambilan Data Nanofluida 1%**

NANOFLUIDA 1%					
	Temperatur	Nanofluida 1% Vakum		Nanofluida 1% tanpa Vakum	
		Biomaterial	Sintered Cu Wick	Biomaterial	Sintered Cu Wick
<b>10 Watt</b>	Evap 1	43.68	47.272	60.060	62.371
	Evap 2	38.858	45.629	57.918	62.318
	<i>Vapour line</i>	30.291	30.720	38.631	37.470
	Konde in	26.734	26.136	26.865	26.657
	Konde out	26.545	25.942	26.613	26.372
	<i>Liquid line</i>	30.045	29.046	35.112	36.526

20 Watt	Temperatur	Nanofluida 1% Vakum		Nanofluida 1% tanpa Vakum	
		Biomaterial	Sintered Cu Wick	Biomaterial	Sintered Cu Wick
	Evap 1	69.852	75.832	93.409	98.815
Evap 2	67.804	72.059	90.753	95.887	
<i>Vapour line</i>	36.807	39.495	90.753	46.082	
Konde in	27.608	28.377	28.719	28.658	
Konde out	27.563	26.484	28.284	27.760	
<i>Liquid line</i>	35.045	33.372	45.554	46.047	

30 Watt	Temperatur	Nanofluida 1% Vakum		Nanofluida 1% tanpa Vakum	
		Biomaterial	Sintered Cu Wick	Biomaterial	Sintered Cu Wick
	Evap 1	93.239	102.275	104.312	114.492
Evap 2	90.234	95.168	100.787	111.714	
<i>Vapour line</i>	43.475	45.672	61.908	59.490	
Konde in	29.262	29.838	30.377	33.841	
Konde out	29.090	26.696	29.206	29.072	
<i>Liquid line</i>	41.747	34.266	57.622	58.612	

Tabel 4.2 Tabel Hasil Pengambilan Data Nanofluida 3%

NANOFLUIDA 3%					
10 Watt	Temperatur	Nanofluida 3% Vakum		Nanofluida 3% tanpa Vakum	
		Biomaterial	Sintered Cu Wick	Biomaterial	Sintered Cu Wick
	Evap 1	43.182	47.045	56.773	60.349
Evap 2	42.744	44.400	55.966	57.459	
<i>Vapour line</i>	30.753	30.624	36.510	37.079	
Konde in	25.867	25.933	27.027	27.893	
Konde out	25.125	25.648	26.864	27.063	
<i>Liquid line</i>	29.794	30.482	34.083	36.848	

20 Watt	Temperatur	Nanofluida 3% Vakum		Nanofluida 3% tanpa Vakum	
		Biomaterial	Sintered Cu Wick	Biomaterial	Sintered Cu Wick
	Evap 1	66.870	75.292	85.629	91.365
Evap 2	66.563	70.288	83.960	86.855	
<i>Vapour line</i>	36.299	37.372	41.887	51.690	
Konde in	28.267	28.861	29.080	29.420	
Konde out	26.010	27.021	27.981	29.197	
<i>Liquid line</i>	35.302	36.928	41.863	48.429	

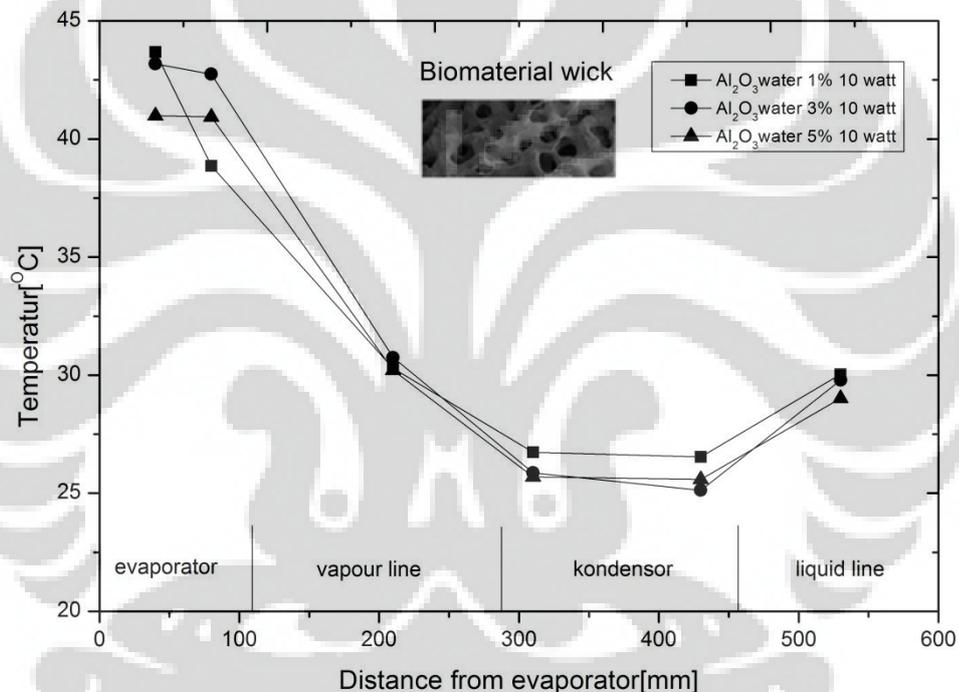
30 Watt	Temperatur	Nanofluida 3% Vakum		Nanofluida 3% tanpa Vakum	
		Biomaterial	Sintered Cu Wick	Biomaterial	Sintered Cu Wick
	Evap 1	91.715	101.557	101.951	103.861
Evap 2	90.490	94.542	99.443	98.068	
<i>Vapour line</i>	44.410	43.109	56.393	57.591	
Konde in	30.603	33.307	35.078	32.319	
Konde out	26.803	28.378	30.203	28.961	
<i>Liquid line</i>	40.647	42.083	51.052	57.145	

Tabel 4.3 Tabel Hasil Pengambilan Data Nanofluida 5%

NANOFLUIDA 5%					
10 Watt	Temperatur	Nanofluida 5% Vakum		Nanofluida 5% tanpa Vakum	
		Biomaterial	Sintered Cu Wick	Biomaterial	Sintered Cu Wick
	Evap 1	40.979	44.062	56.233	59.384
Evap 2	40.935	41.792	54.831	57.726	
<i>Vapour line</i>	30.207	30.334	36.135	35.928	
Konde in	25.698	25.599	26.768	26.526	
Konde out	25.584	25.048	25.793	26.498	
<i>Liquid line</i>	29.023	29.123	32.836	35.482	
20 Watt	Temperatur	Nanofluida 5% Vakum		Nanofluida 5% tanpa Vakum	
		Biomaterial	Sintered Cu Wick	Biomaterial	Sintered Cu Wick
	Evap 1	64.169	71.636	78.098	89.668
Evap 2	63.126	66.444	75.588	87.650	
<i>Vapour line</i>	37.331	37.834	45.702	48.413	
Konde in	26.467	26.636	29.094	29.224	
Konde out	26.176	25.996	26.863	28.784	
<i>Liquid line</i>	34.576	35.463	42.222	46.662	
30 Watt	Temperatur	Nanofluida 5% Vakum		Nanofluida 5% tanpa Vakum	
		Biomaterial	Sintered Cu Wick	Biomaterial	Sintered Cu Wick
	Evap 1	90.612	96.172	100.348	102.834
Evap 2	88.676	86.769	97.650	99.877	
<i>Vapour line</i>	41.578	45.546	52.197	49.404	
Konde in	27.810	28.103	30.400	31.268	
Konde out	25.982	26.673	27.583	28.975	
<i>Liquid line</i>	40.691	39.202	46.157	47.800	

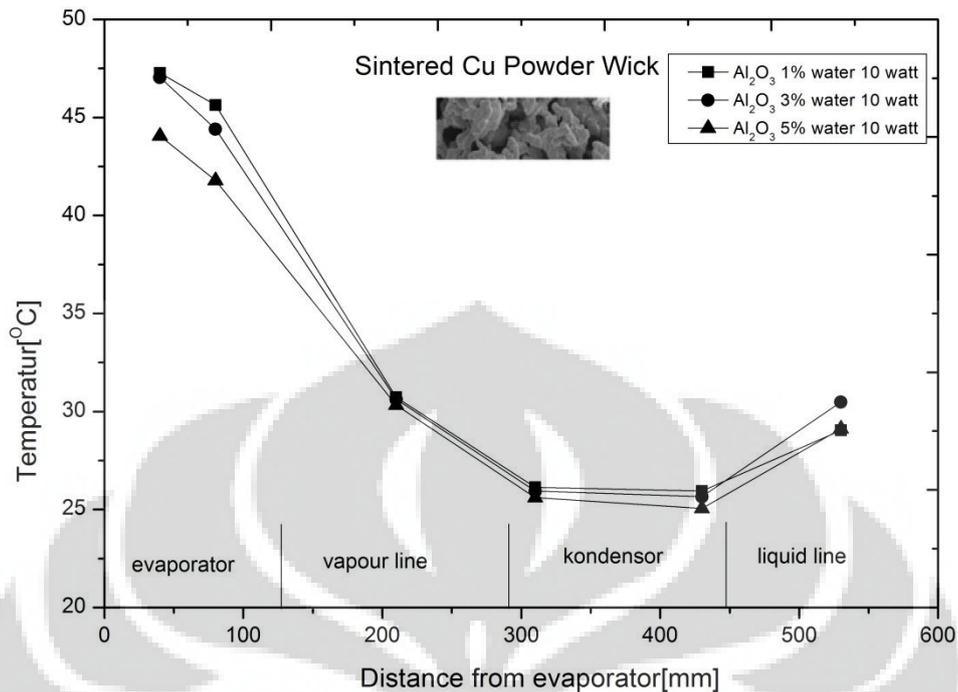
Data pada tabel 4.1, 4.2, dan 4.3 menunjukkan distribusi temperatur pada pipa kalor melingkar dengan menggunakan sumbu kapiler biomaterial dan *sintered Cu* dengan menggunakan fluida kerja nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$  konsentrasi 1%, 3%, 5% dan daya masukan 10 Watt, 20 Watt, dan 30 Watt. Pemberian kalor pada evaporator ternyata mempengaruhi distribusi temperatur pada pipa kalor melingkar. Kenaikan temperatur terbesar terdapat pada evaporator di mana sumber panas diberikan sebagai pembebanan.

#### 4.2 Kinerja Pipa Kalor Melingkar



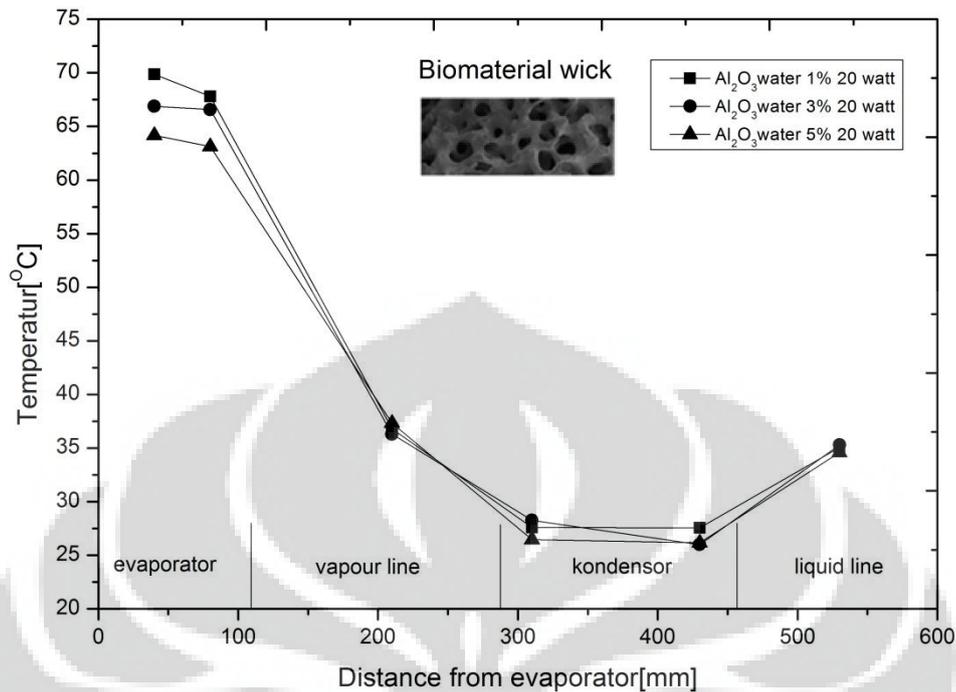
Gambar 4.1 Grafik Perbandingan Sumbu Kapiler Biomaterial daya 10 Watt

Pada gambar 4.1 dijelaskan distribusi temperatur dari pipa kalor melingkar dengan sumbu kapiler biomaterial menggunakan fluida kerja  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang divariasikan pada daya masukan 10 watt. Terlihat bahwa pada konsentrasi 5%, distribusi temperatur pada sisi evaporator memiliki nilai terendah, yaitu sebesar  $40.935^{\circ}\text{C}$  dan nilai tertinggi ada pada konsentrasi 1%, yaitu sebesar  $43.68^{\circ}\text{C}$ . begitu pula pada sisi *liquid line* konsentrasi 5% memiliki nilai sebesar  $29.023^{\circ}\text{C}$ , yang merupakan temperatur terendah.



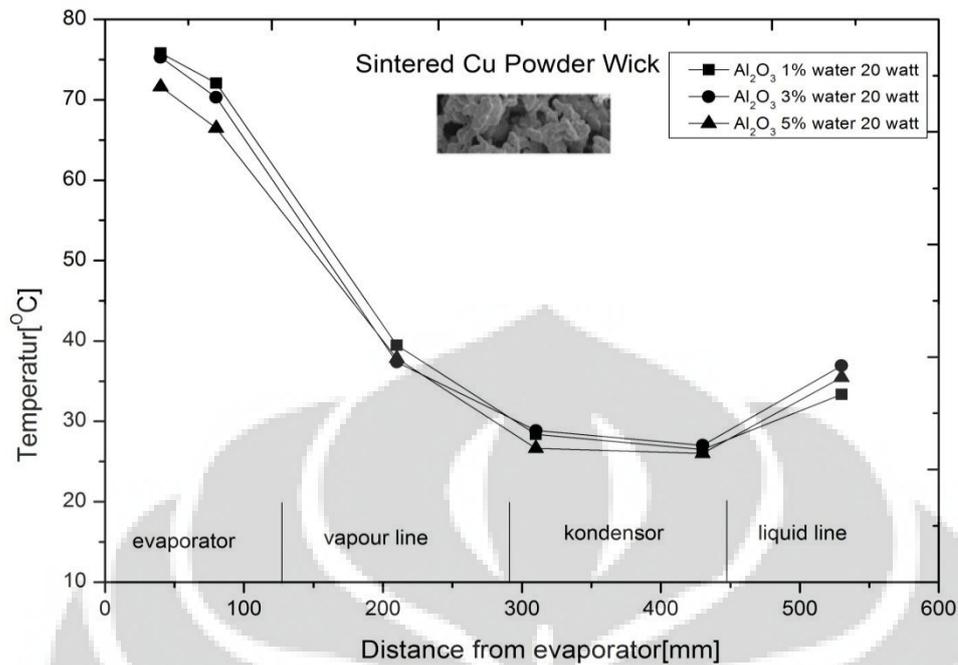
**Gambar 4.2 Grafik Perbandingan Sumbu Kapiler Sintered Cu daya 10 Watt**

Gambar 4.2, menjelaskan distribusi temperatur pada pipa kalor melingkar menggunakan sumbu kapiler *sintered Cu* daya masukan 10 Watt. Apabila dilihat, dengan konsentrasi 1%, temperatur pada sisi evaporator memiliki nilai tertinggi, yaitu sebesar  $47.272^{\circ}\text{C}$ . Untuk konsentrasi 3% pada sisi evaporator, temperturnya adalah  $43.182^{\circ}\text{C}$ . Sisi *vapour line* yang masih dapat pengaruh panas pipa kalor dari sisi evaporator pun demikian, dengan konsentrasi terendah, temperturnya memiliki nilai yang terbesar, yaitu  $30.72^{\circ}\text{C}$ .



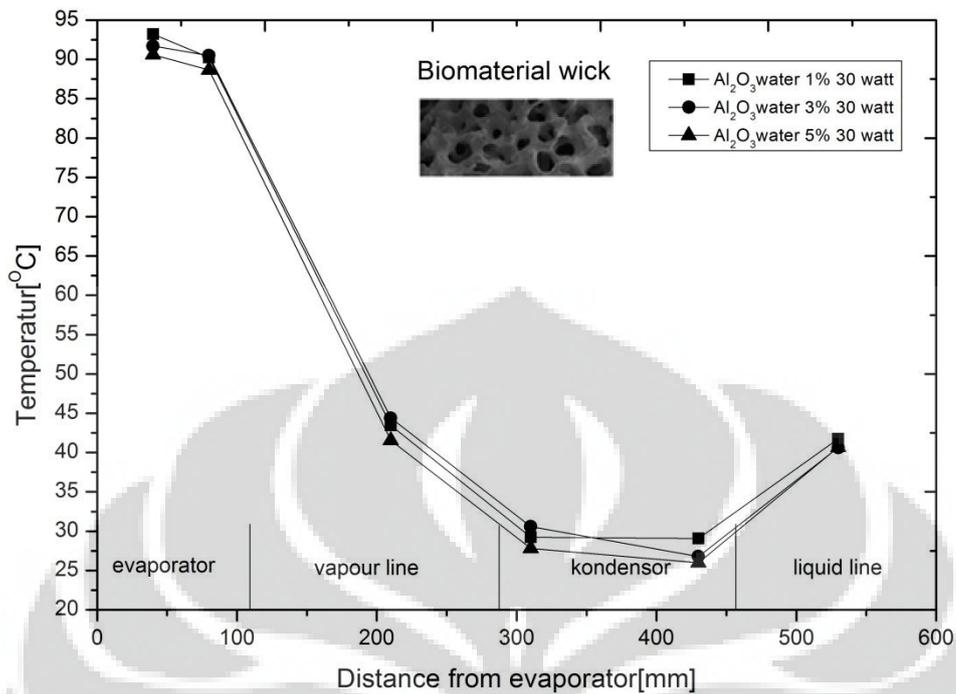
**Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Sumbu Kapiler Biomaterial daya 20 Watt**

Gambar 4.3 merupakan distribusi temperatur pipa kalor melingkar dengan daya masukan 20 Watt menggunakan sumbu kapiler biomaterial. Pada konsentrasi 5%, temperatur pada sisi evaporator memiliki nilai terendah, yaitu sebesar  $63.126^{\circ}\text{C}$ . dengan konsentrasi 1%, ternyata didapat distribusi temperatur pada sisi evaporator adalah sebesar  $69.852^{\circ}\text{C}$ , dimana itu merupakan temperatur tertinggi. Temperatur pada sisi kondensor, seharusnya diatur selalu stabil pada  $25^{\circ}\text{C}$ , tetapi kenyataannya, pada konsentrasi 5%, temperatur kondensor adalah sebesar  $26.467^{\circ}\text{C}$ .



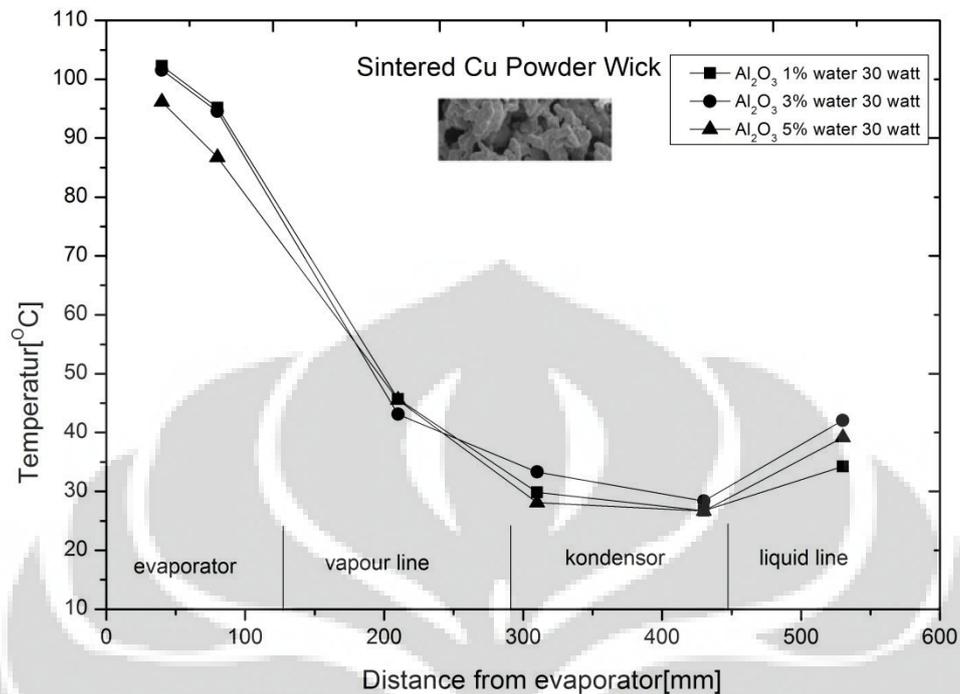
**Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Sumbu Kapiler *Sintered Cu* daya 20 Watt**

Gambar 4.4 menunjukkan distribusi temperatur pipa kalor melingkar dengan sumbu kapiler *sintered Cu* menggunakan daya masukan 20 Watt. Perbedaan temperatur pada sisi evaporator dengan konsentrasi 1% dan 3% ternyata sangatlah sedikit, yaitu sebesar  $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ . Namun pada konsentrasi 5%, sisi evaporator tetap memiliki temperatur terendah, yaitu sebesar  $66.444^{\circ}\text{C}$ .



**Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Sumbu Kapiler Biomaterial daya 30 Watt**

gambar 4.5 menunjukkan grafik perbandingan pipa kalor melingkar menggunakan sumbu kapiler biomaterial daya masukan 30 Watt. Pada konsentrasi 1%, sisi *liquid line* memiliki temperatur tertinggi, yaitu sebesar  $41.747^{\circ}\text{C}$  dan  $40.691^{\circ}\text{C}$  merupakan temperatur sisi *liquid line* pada konsentrasi 5%. Sisi evaporator dengan konsentrasi 5% memiliki nilai temperatur terendah, yaitu sebesar  $88.676^{\circ}\text{C}$ .



**Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Sumbu Kapiler *Sintered Cu* daya 30 Watt**

gambar 4.6 menjelaskan distribusi temperatur pipa kalor melingkar dengan menggunakan sumbu kapiler *sintered Cu* daya masukan 30 Watt. Beda temperatur pada konsentrasi 1% dan 3% di sisi evaporator sangat kecil, yaitu  $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ . namun tetap pada konsentrasi 5%, sisi evaporator memiliki temperatur terendah, yaitu  $86.769^{\circ}\text{C}$ . apabila dilihat pada gambar 4.6, sisi *liquid line* konsentrasi 3% memiliki nilai temperatur yang lebih tinggi dibandingkan konsentrasi 1%, yaitu  $42.083^{\circ}\text{C}$  dengan  $34.266^{\circ}\text{C}$ .

Analisa berdasarkan pola dari grafik adalah distribusi temperatur akan menurun dari sisi evaporator menuju *liquid line*, kemudian akan sedikit menurun kembali pada sisi kondensor dan bergerak naik pada sisi *liquid line*. Sisi *liquid line* adalah sisi yang terdapat sumbu kapiler di dalamnya, baik biomaterial maupun *sintered Cu*.

Perbedaan temperatur dari sisi evaporator 1 dan evaporator 2 disebabkan oleh posisi pemasangan pemanas (*heater*) yang tidak seragam pada berbagai kondisi pengambilan data, sehingga persebaran panasnya pun cenderung kurang merata. Pada sisi *vapour line* maupun *liquid line*, dimana masih mendapat pengaruh panas dari sisi evaporator, akibat adanya konduksi dari pipa kalor tersebut, sehingga temperturnya masih tergolong cukup tinggi. perbedaannya hanya terletak pada fasanya saja. Sisi kondensor, dimana menggunakan *double pipe* sebenarnya diatur selalu stabil pada temperatur  $25^{\circ}\text{C}$ . Kenyataannya semakin besar daya masukan, temperturnya pun meningkat di atas  $25^{\circ}\text{C}$ , ini dikarenakan adanya pengaruh panas akibat konduksi yang mengalir dari sisi evaporator.

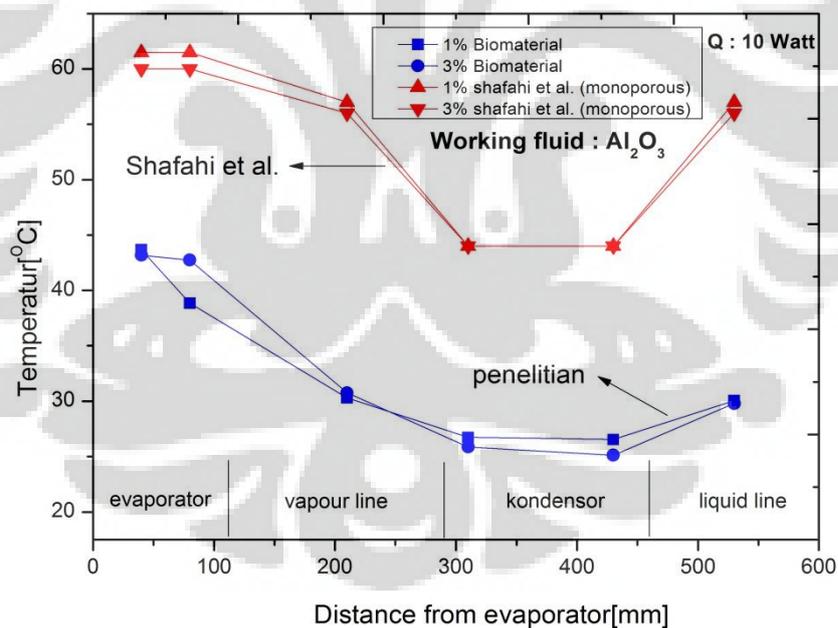
Apabila dilihat dari perbedaan temperturnya, pada setiap kenaikan konsentrasi volume, penurunan temperatur pada sisi evaporator dapat mencapai sekitar  $2^{\circ}\text{C}$ - $3^{\circ}\text{C}$ . Berdasarkan pada setiap kenaikan daya masukan, temperatur pada sisi evaporator akan naik sekitar  $24^{\circ}\text{C}$ .

Dari semua grafik menunjukkan bahwa pada konsentrasi 5% disemua daya masukan, temperatur pada sisi evaporator memiliki nilai terendah. Hal ini disebabkan karena nanofluida yang memiliki konsentrasi yang lebih besar, memiliki konduktivitas termal yang lebih besar pula. Itu berarti panas yang mampu dipindahkan akan menjadi semakin banyak. Akibatnya adalah dengan daya masukan yang sama, temperatur pada sisi evaporator akan memiliki nilai yang lebih kecil.

Temperatur pada sisi yang terdapat sumbu kapiler, akan memiliki temperatur yang lebih rendah dan memiliki fluida kerja dengan fasa cair dibandingkan sisi tanpa sumbu kapiler yang memiliki fasa uap karena terdapat

kapiler-kapiler yang menyebabkan luas penampangnya lebih besar. Sehingga penyerapan panasnya akan menjadi semakin baik.

Pipa kalor melingkar dengan sumbu kapiler biomaterial ternyata memiliki temperatur yang lebih rendah pada sisi evaporator apabila dibandingkan dengan sumbu kapiler *sintered Cu*. Perbedaannya dapat mencapai  $6^{\circ}\text{C}$ . Hal ini ditandai pipa kalor melingkar dengan sumbu kapiler biomaterial memiliki porositas yang lebih besar sehingga menghasilkan *capillary pumping rate* yang lebih besar. Efeknya adalah fluida kerja dapat tersirkulasi dengan baik, dalam mengalirkan panas dari evaporator menuju kondensor. Dengan nilai porositas yang besar, nilai permeabilitas yang dihasilkan juga akan semakin baik [70]. Selain itu, W. Liu [34] menyatakan semakin besar pori dari sumbu kapiler, semakin kecil hambatan aliran yang dihasilkan dan akan meningkatkan perpindahan fluida kerja didalam pipa kalor melingkar.



Gambar 4.7 Grafik perbandingan Terhadap Penelitian Shafahi et al. [71]

Berdasarkan penelitian Shafahi et al. [71], dimana mereka melakukan penelitian dengan pipa kalor menggunakan sumbu kapiler *monoporous*, pada masukan 10 Watt, dengan fluida kerja  $\text{Al}_2\text{O}_3$  konsentrasi 1%, sisi evaporatornya memiliki temperatur sebesar 334.5 K atau  $61.5^\circ\text{C}$  dan pada konsentrasi 3% memiliki temperatur sebesar 333 K atau  $60^\circ\text{C}$ . Kemudian dibagian kondensor memiliki temperatur sebesar  $44^\circ\text{C}$  dan pada sisi adiabatik sebesar  $57^\circ\text{C}$  dan  $56^\circ\text{C}$  pada konsentrasi 1% dan 3%. Apabila dibandingkan dengan data penelitian, dengan daya (Q) dan fluida kerja dengan konsentrasi yang sama, didapat pada konsentrasi 1% sumbu kapiler biomaterial memiliki temperatur sebesar  $43.68^\circ\text{C}$  dan pada konsentrasi 3% sebesar  $42.74^\circ\text{C}$ . perbedaan temperatur yang hampir mencapai  $17^\circ\text{C}$  disebabkan oleh perbedaan tipe dari pipa kalor, dimana pada Shafahi et al. Menggunakan pipa kalor silinder. Perbedaan ini disebabkan oleh pada pipa kalor melingkar, kemampuan melawan gravitasi lebih baik daripada pipa kalor. Kemudian luas area pada pipa kalor melingkar juga lebih baik sehingga kalor yang dipindahkan juga semakin besar.

### 4.3 Hambatan Termal pada Pipa Kalor Melingkar

Berdasarkan pengujian dan perhitungan didapat nilai hambatan termal pada pipa kalor melingkar. Nilai hambatan termal dihitung melalui dua cara, pertama dengan membandingkan temperatur evaporator dan kondensor, yang kedua adalah dengan perbandingan temperatur evaporator dengan *liquid line*. Keduanya dipengaruhi oleh besarnya pembebanan yang diberikan.

$$R_{e-c} = \frac{\Delta T(T_e - T_c)}{Q} \quad (4.1)$$

$$R_{e-a} = \frac{\Delta T(T_e - T_{\text{liquid line}})}{Q} \quad (4.2)$$

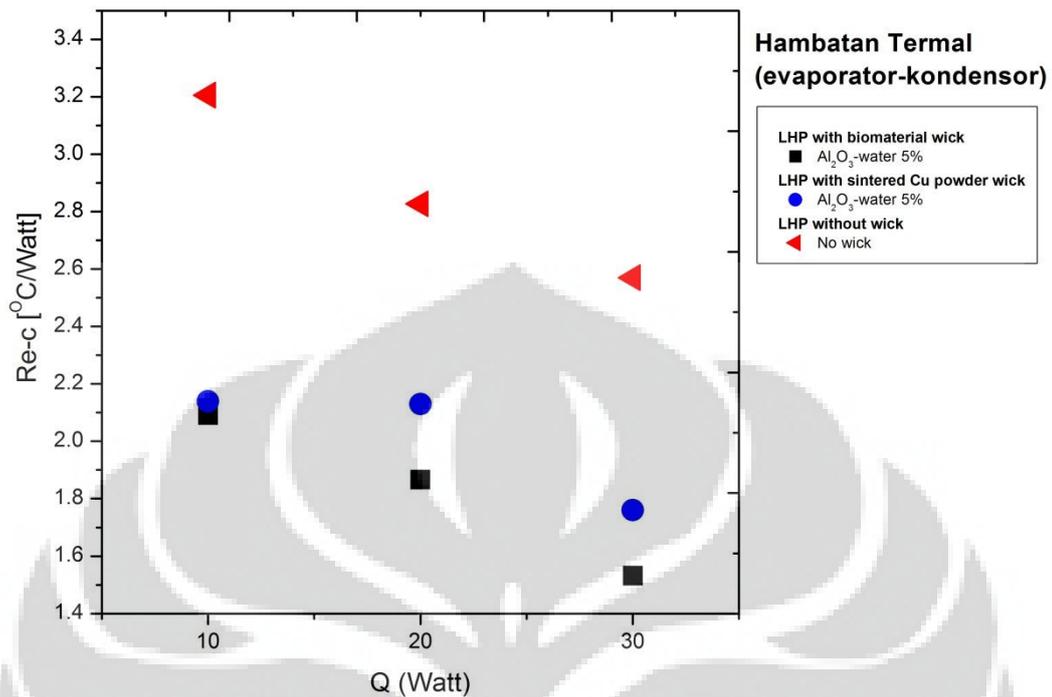
Konsentrasi dari nanofluida mempengaruhi hambatan termal pada pipa kalor melingkar. Untuk lebih jelasnya, pengaruh konsentrasi dari nanofluida terhadap besarnya hambatan termal dapat dilihat pada tabel 4.4 dan 4.5 :

**Tabel 4.4 Hambatan Termal antara Evaporator dan Kondensor**

	Q (Watt)	Re-c ( $^{\circ}\text{C}/\text{Watt}$ )		
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 3%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 5%
<b>Biomaterial</b>	10	2.085	2.080	2.092
	20	2.062	1.979	1.866
	30	1.463	1.747	1.532
<b>Sintered Cu</b>	Q (Watt)	Re-c ( $^{\circ}\text{C}/\text{Watt}$ )		
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 3%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 5%
	10	2.348	2.240	2.136
	20	2.326	2.242	2.136
	30	2.041	1.993	1.760

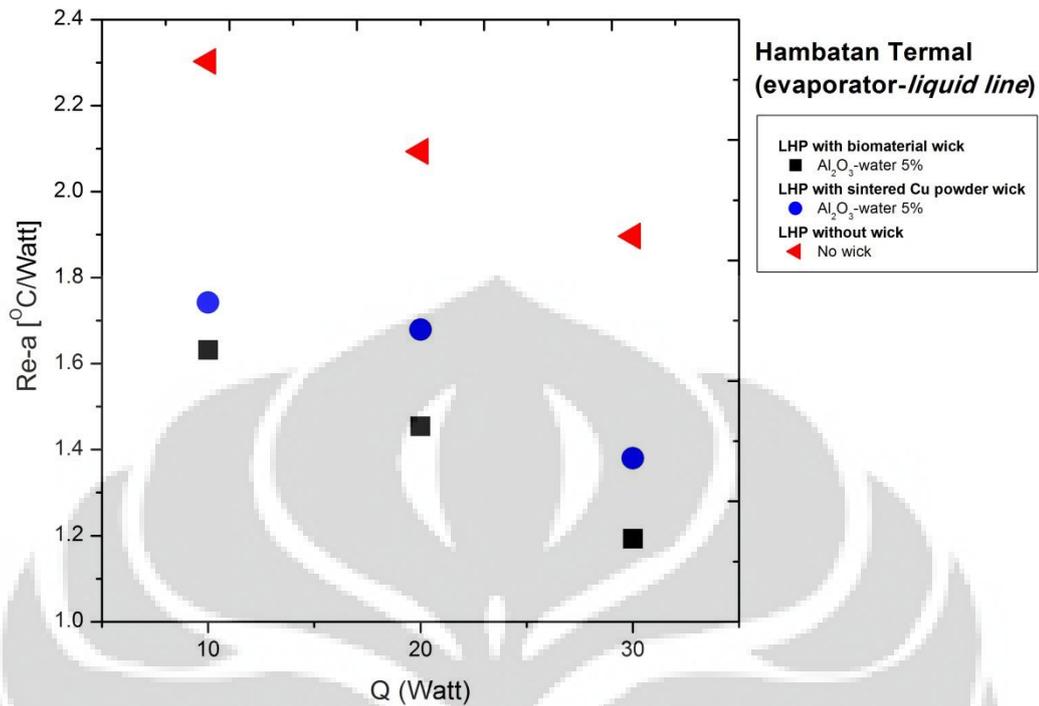
**Tabel 4.5 Hambatan Termal antara Evaporator dan *Liquid Line***

	Q (Watt)	Re-a ( $^{\circ}\text{C}/\text{Watt}$ )		
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 3%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 5%
<b>Biomaterial</b>	10	1.666	1.682	1.632
	20	1.689	1.571	1.454
	30	1.122	1.317	1.193
<b>Sintered Cu</b>	Q (Watt)	Re-a ( $^{\circ}\text{C}/\text{Watt}$ )		
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 3%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 5%
	10	2.149	1.866	1.742
	20	2.029	1.793	1.679
	30	1.741	1.524	1.380



**Gambar 4.8 Grafik Hambatan Termal antara Evaporator dan Kondensor**

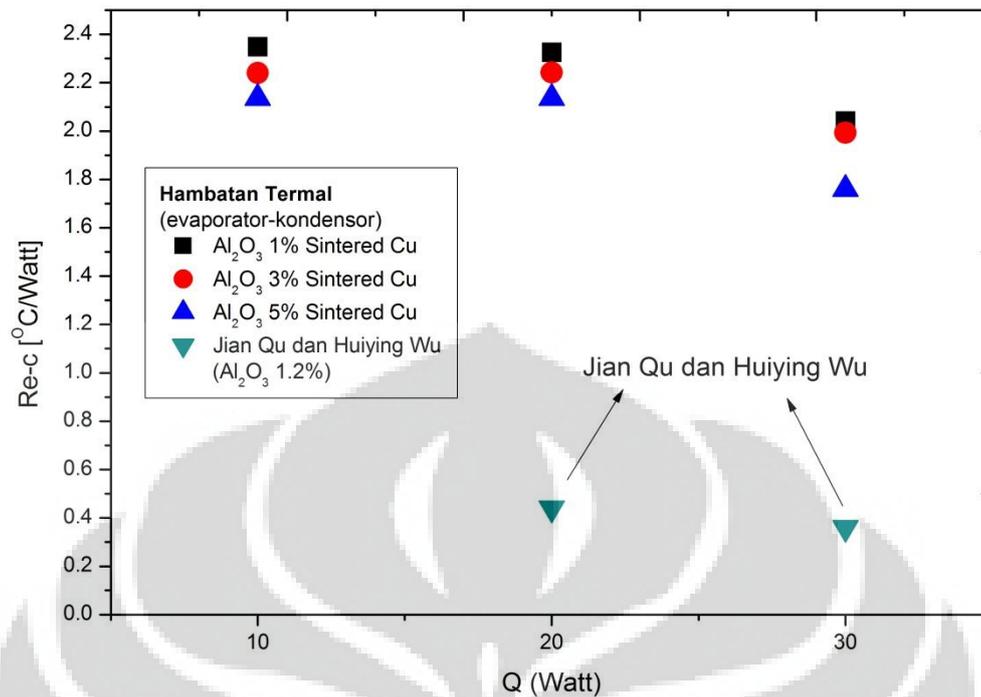
Pada hambatan termal yang dihitung berdasarkan perbandingan temperatur evaporator dan kondensor terlihat bahwa pada konsentrasi nanofluida sebesar 5% dengan sumbu kapiler biomaterial mempunyai nilai yang paling kecil yaitu  $1.532^{\circ}\text{C}/\text{Watt}$  pada daya 30 Watt. Untuk pembebanan yang sama, pipa kalor melingkar dengan menggunakan sumbu kapiler *sintered Cu* memiliki hambatan termal yang lebih besar, yaitu  $1.76^{\circ}\text{C}/\text{Watt}$ . Begitu pula dengan hambatan termal yang dipengaruhi berdasar temperatur evaporator dan *liquid line*, pada konsentrasi volume 5% sumbu kapiler biomaterial, hambatan termal memiliki nilai terkecil, yaitu  $1.193^{\circ}\text{C}/\text{Watt}$ , lebih kecil  $0.187^{\circ}\text{C}/\text{Watt}$  daripada sumbu kapiler *sintered Cu* dengan pembebanan dan fluida kerja yang sama.



**Gambar 4.9 Hambatan Termal antara Evaporator dan *liquid line***

Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi volume dari nanofluida dan juga jenis sumbu kapiler mempengaruhi besarnya hambatan termal, dimana konsentrasi yang lebih besar dan juga sumbu kapiler biomaterial memiliki hambatan termal yang lebih kecil dengan daya pembebanan sama yang diberikan pemanas pada evaporator. Selain itu pengaruh daya yang diberikan juga mempengaruhi nilai dari hambatan termal, dimana daya yang lebih besar akan menghasilkan hambatan yang lebih kecil [38].

Hambatan termal yang lebih kecil menyebabkan evaporator mereduksi panas yang lebih besar. Seperti yang telah diketahui bahwa hambatan termal nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$  lebih kecil dibandingkan dengan  $\text{H}_2\text{O}$ , sehingga reduksi panas yang dilakukan oleh nanofluida lebih besar daripada air murni.



**Gambar 4.10 Perbandingan Hambatan Termal Terhadap Penelitian Jian Qu dan Huiying Wu [72]**

Berdasarkan jurnal Jian Qu dan Huiying Wu [72] yang menjelaskan gambar 4.9, pada daya masukan yang sama, yaitu 20 Watt, mereka menjelaskan bahwa hambatan termal pada konsentrasi 1.2% fluida kerja Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> adalah sebesar 0.44<sup>0</sup>C/W. Kemudian pada daya masukan 30 Watt, pada konsentrasi yang sama, hambatan termal yang terjadi adalah sebesar 0.36<sup>0</sup>C/W.

Apabila dibandingkan dengan data penelitian yang paling mendekati adalah pada konsentrasi 1% fluida kerja Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Seperti yang terlihat pada tabel, hambatan termal pada daya masukan 20 Watt sumbu kapiler *sintered Cu* adalah sebesar 2.326<sup>0</sup>C/W dan pada daya masukan 30 sebesar 2.041<sup>0</sup>C/W. Perbedaan yang cukup signifikan ini disebabkan oleh pada penelitian yang dilakukan Jian Qu dan Huiying Wu adalah tipe dari pipa kalor, yaitu mereka menggunakan pipa kalor osilasi. Sehingga luas penampang yang dihasilkan pada pipa kalor osilasi lebih besar. Luas penampang yang lebih besar menyebabkan laju perpindahan panas dan kemampuan memindahkan panas akan lebih besar sehingga pada sisi evaporator memiliki temperatur yang lebih kecil. Seperti yang sudah dijelaskan

bahwa semakin besar kemampuan memindahkan panas, maka hambatan termalnya pun akan semakin kecil.

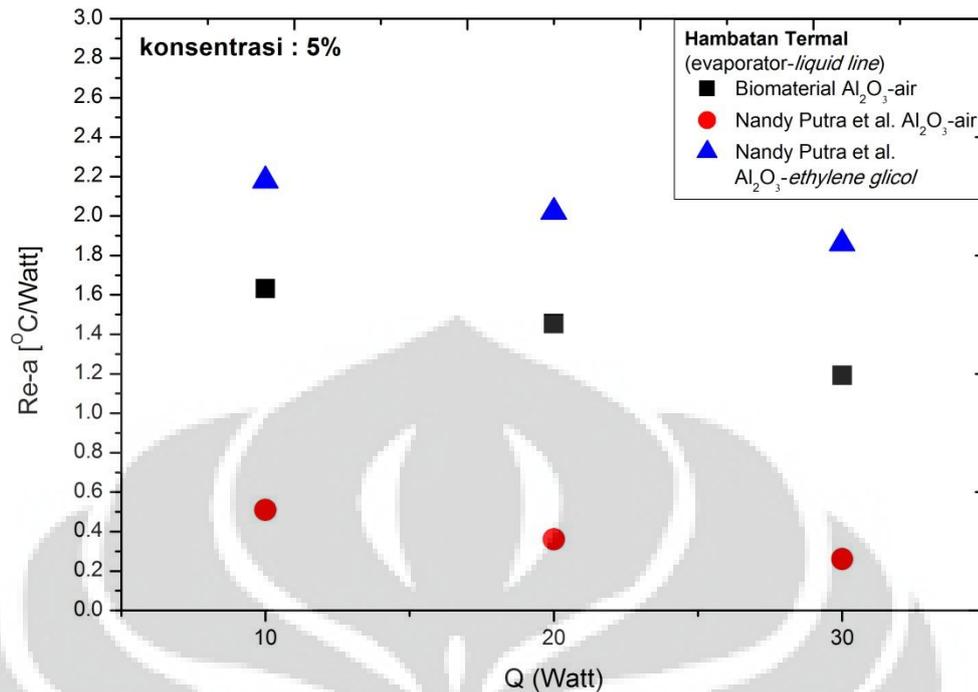
Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Nandy et al. [69] tentang *Thermal Performance of Screen Mesh Wick Heat Pipes with Nanofluids*, hambatan termal yang terjadi fluida kerja  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air konsentrasi 5 % menggunakan *screen mesh wick* adalah sebesar 0.51, 0.36, 0.26  $^{\circ}\text{C}/\text{Watt}$  pada daya masukan 10, 20, 30 Watt dengan melakukan perbandingan pada temperatur evaporator dan *liquid line*.

**Tabel 4.6 Hambatan Termal Pipa Kalor pada Variasi Fluida Kerja [69]**

The thermal resistances of the heat pipe with various working fluids.

No	Working fluids	Thermal resistance $R_{e-a}$ ( $^{\circ}\text{C}/\text{Watt}$ )		
		10 Watt	20 Watt	30 Watt
1	Ethylene glycol	2.44	2.28	2.16
2	Water	2.36	2.20	2.11
3	$\text{Al}_2\text{O}_3$ -ethylene glycol	2.18	2.02	1.86
4	$\text{TiO}_2$ -ethylene glycol	2.38	2.23	2.11
5	$\text{ZnO}$ -ethylene glycol	1.82	1.67	1.55
6	$\text{Al}_2\text{O}_3$ -water	0.51	0.36	0.26
7	$\text{TiO}_2$ -water	0.76	0.63	0.54

Untuk fluida kerja  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -ethylene glycol sebesar 2.18, 2.02, 1.86  $^{\circ}\text{C}/\text{Watt}$  pada kenaikan daya masukan yg sama. Sedangkan pada penelitian yang dilakukan, hambatan termal pada fluida kerja  $\text{Al}_2\text{O}_3$  konsentrasi 5% menggunakan sumbu kapiler biomaterial adalah 1.632, 1.454, dan 1.193  $^{\circ}\text{C}/\text{Watt}$  pada daya masukan 10, 20, 30 Watt. Ternyata perbedaannya cukup besar, yaitu mencapai lebih dari 1 $^{\circ}\text{C}/\text{Watt}$ . Ini dikarenakan bentuk dari pipa kalor yang berbeda dan penggunaan sumbu kapiler yang berbeda.



Gambar 4.11 Perbandingan Hambatan Termal Terhadap Penelitian Nandy Putra et al. [69]

#### 4.4 Distribusi Fluks Panas pada Pipa Kalor Melingkar Berdasarkan Konsentrasi Nanofluida

Fluks panas pada bagian evaporator dapat ditentukan dari besarnya panas yang diberikan ( $Q$ ) dibagi dengan luasan evaporator, yakni:

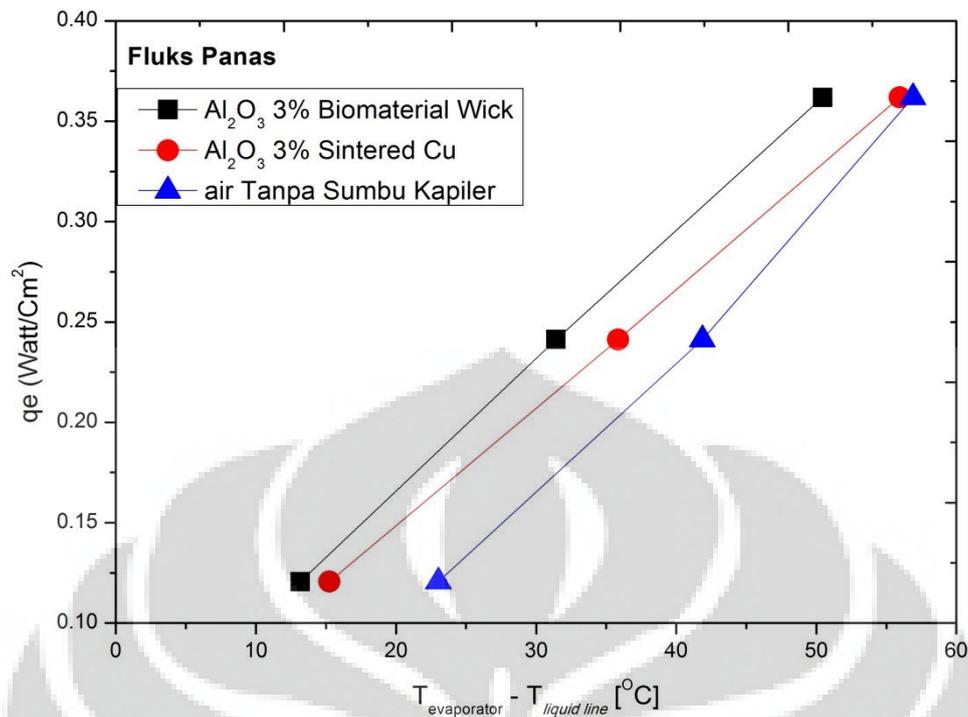
$$q_e = \frac{Q}{(2\pi r_o l_e)} \quad (4.3)$$

Evaporator pada pipa kalor melingkar memiliki diameter pipa tembaga yang lebih besar daripada pipa tembaga pada bagian lainnya. Ruang ini disebut dengan *chamber*. Luasan dinding evaporator dihitung dengan mengalikan diameter dari pipa dan panjang dari evaporator tersebut. Sehingga didapat bahwa semakin besar diameter maka luasannya akan menjadi semakin besar tetapi fluks panas yang dihasilkan akan semakin kecil. Hal ini berpengaruh pada temperatur pada evaporator, sehingga perbandingan temperatur yang terbentuk akan lebih kecil. Dengan diameter yang lebih besar, evaporator dapat menampung fluida yang lebih banyak pula.

Dengan meningkatnya fluks panas pada permukaan sumbu kapiler, terutama pada pipa kalor melingkar dengan sumbu kapiler biomaterial yang memiliki fluks panas yang tinggi, mengakibatkan penurunan panas pada sisi evaporator. Kemudian pada tekanan yang lebih rendah, dimana fluida akan lebih cepat mendidih, sehingga akan mencapai tingkat di atas *superheated*, maka perpindahan kalor dapat terjadi. Akibatnya temperatur pada evaporator menjadi lebih rendah.

Distribusi fluks panas pada pipa kalor melingkar dihitung berdasarkan konsentrasi dari nanofluida dan jenis sumbu kapiler. Semakin besar fluks panasnya maka perbedaan temperatur antara evaporator dan kondensor juga semakin besar. Namun pada nilai fluks panas yang sama, perbedaan temperatur pada sisi evaporator dan kondensor memiliki nilai yang paling kecil pada saat memakai sumbu kapiler biomaterial. Berdasarkan gambar 4.12 dapat dijelaskan grafik fluks panas berdasarkan sumbu kapiler yang digunakan, dimana sumbu kapiler biomaterial memiliki perbedaan temperatur yang paling kecil antara evaporator dan *liquid line*.

. Dengan adanya porositas yang lebih baik dan bentuknya lebih seragam, sumbu kapiler biomaterial dapat memindahkan panas lebih cepat sehingga temperatur pada sisi evaporator akan semakin kecil, yang berakibat  $\Delta T$  juga akan semakin kecil.

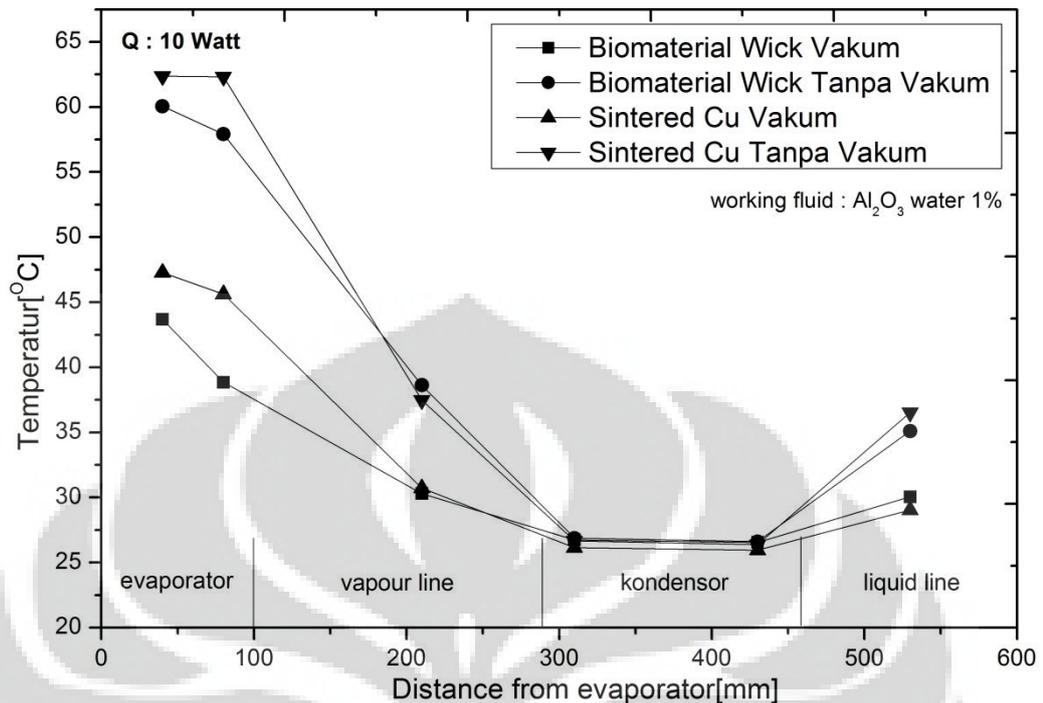


Gambar 4.12 Grafik Fluks Panas

#### 4.5 Perbandingan Kinerja Pipa Kalor Melingkar Berdasarkan Perlakuan pada Fluida Kerja (Vakum dan tanpa Vakum)

Proses vakum dilakukan agar sirkulasi dari fluida kerja lebih cepat berjalan karena sirkulasi dimulai ketika gaya kapilaritas yang dihasilkan sumbu kapiler lebih besar daripada total penurunan tekanan sistem [34].

Pipa kalor melingkar divakum dengan menggunakan pompa vakum bertekanan 30 CmHg dibawah tekanan atmosfer sehingga fluida kerja di dalam pipa kalor melingkar mendidih pada temperatur dibawah 100<sup>0</sup>C, lebih cepat daripada keadaan tanpa divakum. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya pada bab 3 bahwa pipa kalor melingkar hanya berisi fluida kerja sebesar 60% dari volume totalnya. Sehingga proses vakum dilakukan untk mengeluarkan udara yang terdapat pada ruang-ruang kosong.



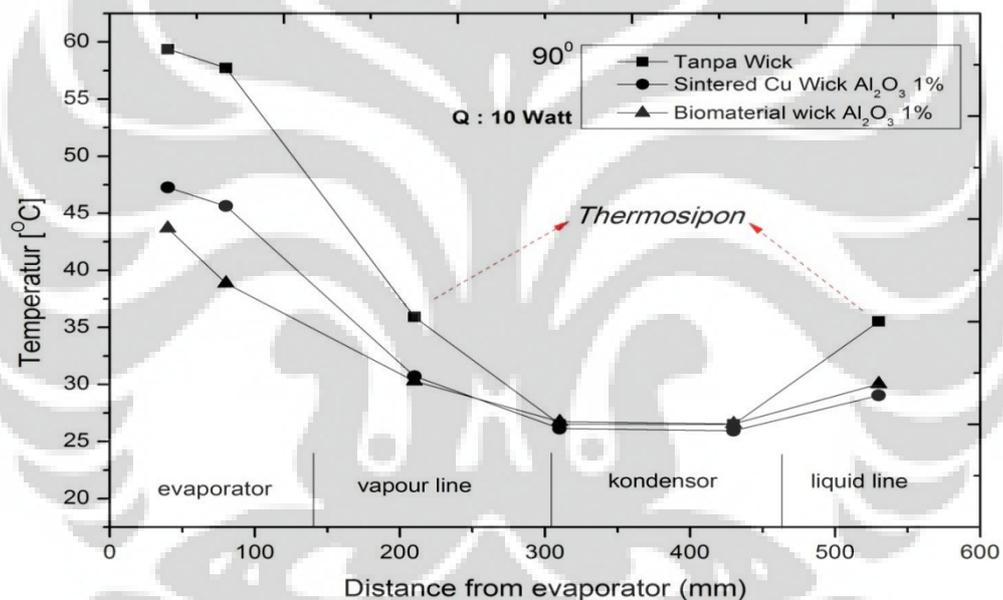
**Gambar 4.13 Grafik Perbedaan Perlakuan, antara vakum dan tanpa vakum**

Dari grafik 4.13 dapat dilihat bahwa kondisi vakum menunjukkan penurunan temperatur pada setiap sisinya untuk setiap jenis sumbu kapiler yang digunakan. Penurunannya pun cukup signifikan dimana pada pembebanan daya yang sama, yaitu sebesar 10 Watt dengan konsentrasi volume nanofluida 1%, penurunan suhu yang terjadi pada sisi evaporator dapat mencapai 15<sup>0</sup>C. Penurunan ini disebabkan karena dengan tekanan yang lebih rendah, fluida kerja akan lebih cepat berubah fasa (evaporasi). Penurunan tekanan itu akan menyebabkan titik didih dari suatu fluida akan menurun. Perubahan fasa yang lebih cepat ini mengakibatkan uap akan lebih cepat naik melalui sisi *vapour line* kemudian menuju kondensor. Sehingga sirkulasi fluida kerja dapat terjadi lebih cepat.

#### 4.6 Perbandingan Kinerja Pipa Kalor Melingkar Berdasarkan Perbedaan Sumbu Kapiler

Variasi pemakaian sumbu kapiler pada pipa kalor melingkar digunakan untuk melihat sejauh mana pemindahan panas dapat dilakukan. Ada 3 perlakuan yang diberikan pada penelitian ini, yaitu pipa kalor melingkar dengan sumbu kapiler biomaterial, *sintered Cu*, dan tanpa menggunakan sumbu kapiler.

Apabila dilihat pada grafik 4.14, terlihat bahwa pipa kalor melingkar dengan menggunakan sumbu kapiler biomaterial memiliki nilai temperatur yang paling rendah pada sisi evaporator dan yang tanpa sumbu kapiler memiliki temperatur yang paling besar pada sisi evaporator, yaitu hampir mencapai  $60^{\circ}\text{C}$  dengan daya masukan 10 Watt.

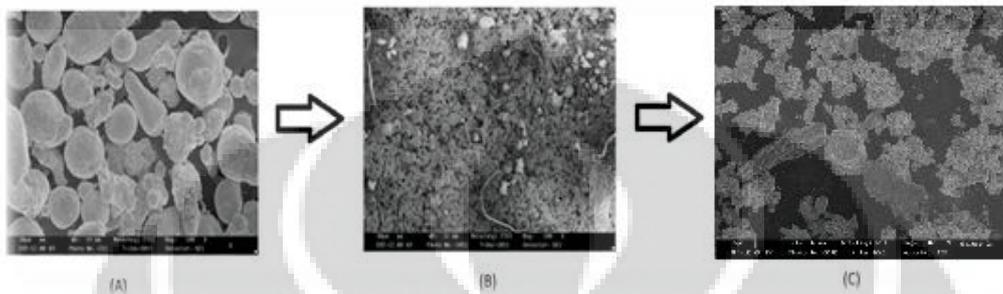


Gambar 4.14 Grafik Perbedaan Pemberian Perlakuan pada Sumbu Kapiler

Biomaterial memiliki sifat porositas yang baik dan nilai permeabilitas yang tinggi. Permeabilitas merupakan banyaknya cairan yang mampu dilewatkan oleh suatu material atau *porous* media. Dengan nilai permeabilitas yang tinggi, maka penurunan tekanan akibat gesekan pada sumbu akan lebih kecil. Selain itu diameter rata-rata dari biomaterial, yang sudah dijelaskan pada bab sebelumnya, dimana memiliki diameter yang lebih kecil menyebabkan fluks panas juga akan meningkat. Porositas, yang merupakan perbandingan antara volume ruang kosong media berpori dan volume total dari media berpori, dinyatakan memiliki sifat yang baik pada sumbu kapiler biomaterial. Porositas ternyata sangat berpengaruh

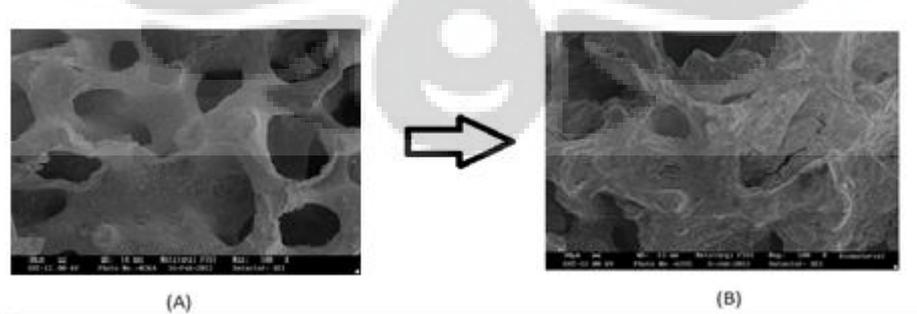
terhadap gaya kapilaritas karena porositas sendiri sebanding dengan jari-jari kelengkungan dari ruang fluida sehingga menyebabkan jari-jari kelengkungan fluida memiliki nilai yang sama besar.

Berdasarkan hasil pengujian SEM untuk sumbu kapiler yang digunakan, bisa dilihat pada gambar 4.15 dengan perbesaran 100x.



**Gambar 4.15 (A) Bubuk Tembaga (B) Sintered Tembaga (C) Sintered Tembaga setelah pengujian**

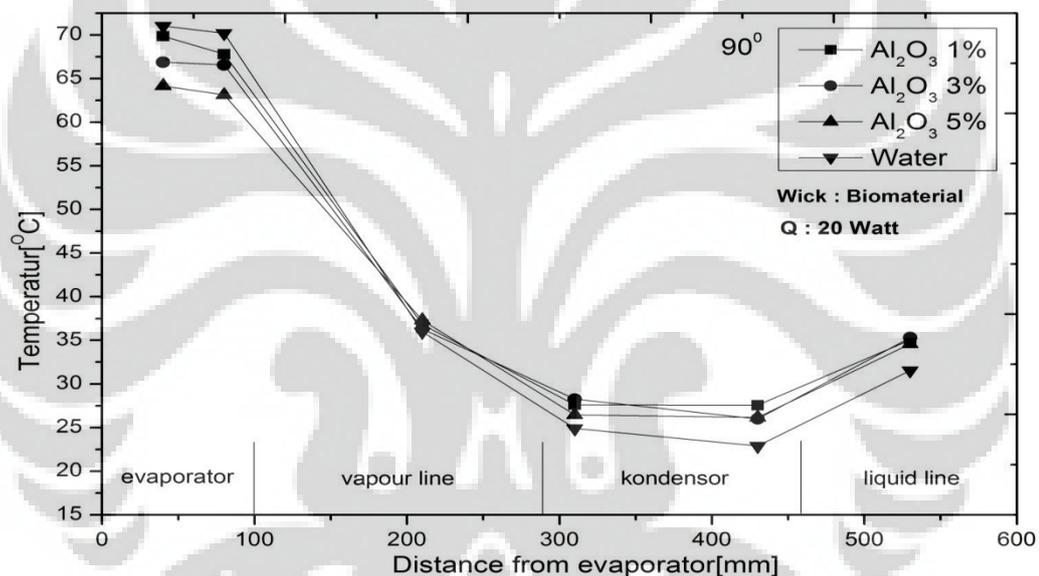
Hasil pengujian menjelaskan bahwa pada bubuk tembaga sebelum dilakukan proses *sintering*, struktur masih tidak beraturan, baik posisi maupun ukuran partikelnya. Bisa dikatakan strukturnya masih *biporous*. Sedangkan setelah dilakukan proses *sintering*, struktur menjadi lebih beraturan dan memiliki ukuran pori yang hampir sama (*monoporous*). Kemudian setelah dilakukan pengujian, strukturnya sudah tidak beraturan, baik ukuran partikelnya, maupun porinya. Kemudian dijelaskan juga terdapat endapan sisa dari fluida kerja yang mengandung nano partikel  $Al_2O_3$ .



**Gambar 4.16 Sumbu Kapiler Biomaterial (A) Sebelum Pengujian (B) Setelah Pengujian**

Bisa dilihat pada gambar 4.16 dimana struktur sumbu kapiler biomaterial sebelum dilakukan pengujian masih sangat beraturan dan seragam dengan pori yang besar (*monoporous*) dengan perbesaran 100x. Setelah dilakukan pengujian, strukturnya menjadi tidak beraturan, pori-porinya pun sudah mulai tidak terlihat. Ini dikarenakan adanya endapan yang tertinggal dari fluida kerja yang berupa nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Berdasarkan hasil EDS (*Energy Dispersive X-Ray Analysis*) endapan Al yang terkandung pada sumbu kapiler biomaterial adalah sebesar 41% sedangkan endapan Oksida (O) adalah sebesar 46%.

#### 4.7 Perbandingan Kinerja Pipa Kalor Melingkar dengan Fluida Kerja Air dan Nanofluida

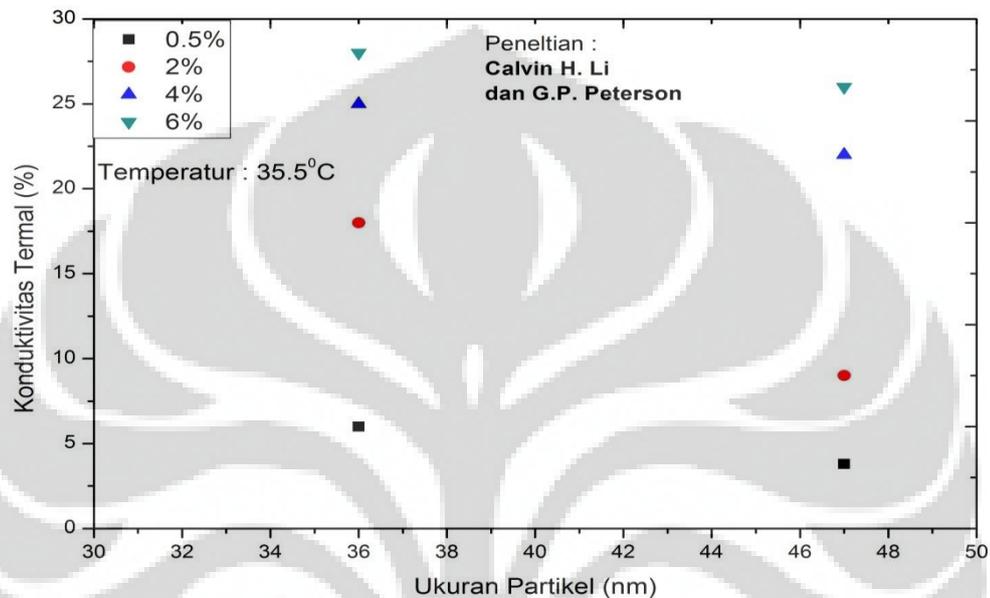


Gambar 4.17 Grafik Perbedaan Perlakuan fluida kerja, Air dan Nanofluida

Kinerja pipa kalor melingkar juga divariasikan berdasarkan fluida kerjanya. Dimana penelitian ini menggunakan dua jenis fluida kerja yang berbeda, yaitu air dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dengan berbagai jenis konsentrasi. Terlihat bahwa fluida kerja dengan menggunakan air memiliki nilai temperatur yang paling tinggi pada sisi evaporator, yaitu  $71.03^\circ\text{C}$  dan terendah dimiliki oleh pipa kalor melingkar dengan sumbu kapiler biomaterial dengan konsentrasi 5%, yaitu  $63.12^\circ\text{C}$ .

Penggunaan nanofluida sebagai fluida kerja ternyata berpengaruh terhadap penurunan temperatur dari sisi evaporator. Ini dikarenakan jumlah konsentrasi

pada fluida yang meningkat menyebabkan luas area juga semakin besar. Akibatnya laju perpindahan kalor juga meningkat. Selain itu penurunan temperatur pada sisi evaporator juga disebabkan karena konduktivitas termal dari nanofluida  $Al_2O_3$  lebih tinggi dari pada air, yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya.



**Gambar 4.18** Konduktivitas Termal  $Al_2O_3$  dengan variasi fraksi volume dan diameter nanopartikel berdasarkan penelitian Calvin H. Li dan G.P. Peterson [73]

Konduktivitas termal yang baik dikarenakan ukuran partikel dan konsentrasi nanopartikel dibuktikan oleh penelitian yang dilakukan oleh Calvin H. Li dan G.P. Peterson [73] tentang efek ukuran nano partikel terhadap konduktivitas termal dari fluida kerja  $Al_2O_3$ , menjelaskan dari grafik yang diperoleh bahwa semakin besar konsentrasi dari nanofluida, konduktivitas termal juga akan semakin membesar. Ukuran nano partikelnya pun juga mempengaruhi konduktivitas termal, dimana ternyata semakin kecil ukuran nano partikel, konduktivitas termalnya juga akan semakin besar. Pengaruh dari temperatur nanopartikel adalah dengan adanya temperatur yang lebih tinggi, konduktivitas termalnya pun juga akan semakin besar. Dengan bertambahnya konduktivitas termal, maka laju perpindahan panas juga akan semakin baik.

## BAB 5

### KESIMPULAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan beberapa hal, yaitu :

1. Perbedaan konsentrasi nanofluida sebagai fluida kerja ternyata mempengaruhi kinerja dari pipa kalor melingkar. Konsentrasi nanofluida 5% memiliki kinerja yang paling baik dibandingkan dengan konsentrasi 1% dan 3%, yang dapat mereduksi temperatur pada bagian evaporator hingga mencapai 2<sup>0</sup>C setiap kenaikan konsentrasi nanofluida.
2. Perbedaan sumbu kapiler pada pipa kalor melingkar juga berpengaruh terhadap peningkatan kinerja dari pipa kalor melingkar. Sumbu material biomaterial memiliki performa yang lebih baik daripada *sintered Cu*, dimana dapat mereduksi temperatur pada sisi evaporator hingga mencapai rata-rata 6<sup>0</sup>C. Ini disebabkan karena sumbu kapiler biomaterial memiliki porositas yang baik sehingga menghasilkan permeabilitas yang lebih baik pula.
3. Hambatan termal pada daerah evaporator hingga kondensor memiliki nilai terendah terjadi pada pipa kalor melingkar dengan sumbu material biomaterial dengan nanofluida konsentrasi 5%, yaitu sebesar 1.532 <sup>0</sup>C/Watt dengan daya masukan 30 Watt. Sama halnya dengan hambatan termal pada daerah evaporator hingga *liquid line* memiliki nilai terendah pada pipa kalor melingkar sumbu material biomaterial dengan nanofluida konsentrasi 5%, yaitu sebesar 1.193<sup>0</sup>C dengan daya masukan 30 Watt.
4. Distribusi perbedaan temperatur terhadap fluks panas pada pipa kalor melingkar dengan sumbu material biomaterial dan nanofluida konsentrasi 5% memiliki nilai terkecil pada setiap daya masukan yang diberikan
5. Perbedaan perlakuan fluida kerja, dengan vakum atau tanpa vakum juga mempengaruhi kinerja dari pipa kalor melingkar, dimana pada sisi evaporator, temperatur dapat direduksi hingga mencapai 15<sup>0</sup>C karena dengan adanya kondisi vakum, fluida akan lebih cepat berubah fasa.

6. Dengan nilai konduktivitas termal yang lebih besar, fluida kerja nanofluida memiliki nilai temperatur yang lebih rendah pada sisi evaporator dibandingkan dengan fluida kerja air, perbandingannya antara air dan nanofluida konsentrasi 1% dapat mencapai  $3^{\circ}\text{C}$ .

Dapat ditarik kesimpulan bahwa kinerja pipa kalor melingkar sangat dipengaruhi oleh fluida kerja dan sumbu kapilernya. Hasilnya adalah sumbu kapiler biomaterial memiliki kinerja yang lebih baik daripada *sintered Cu* dan semakin besar konsentrasi dari nanofluida, maka kinerjanya pun juga semakin baik.



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Shung-Weng Kang, "Effect of Nanofluid Concentration on Heat Pipe Thermal Performance," *Electro-Mechanical Engineering*, Tamkang University, Taiwan,.
- [2] A. Bar-Cohen, A.D. Kraus, and S.F. Davidson, "Thermal Frontiers in the Design and Packaging Microelectric Equipment," vol. 105, no. 6, pp. 53-59, 1983.
- [3] K.S. Kim, M.H. Won, J.W. Kim, and B.J. Back, "Heat Pipe Cooling Technology for Desktop PC CPU," *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, pp. 1137-1144, 2003.
- [4] N. Ghaddar and Y. Nasr, *International of Journal Energy Research*, vol. 22, pp. 625-638, 1998.
- [5] Igor I. Sviridenko, "Heat Exchangers Based on Low Temperature Heat Pipes for Autonomous Emergency WWER Cooldown Systems," *Journal of Applied Thermal Engineering*, 2006.
- [6] V. Barantsevich and V. Shabalkin, "Heat Pipes for Thermal Control of ISS Solar Battery Device," *Research Institute of Electromechanics*, Moscow, 2003.
- [7] Yu. F. Gerasimov, Yu. F. Maydanik, and G.T. Shchogolev, "Low-Temperature Heat Pipes with Separate Channels for Vapor and Liquid," *Journal of Engineering Physics*, vol. 28, no. 6, pp. 957-960, 1975.
- [8] M.N. Pantzali, A.G. Kanaris, K.D. Antoniadis, and A.A. Mouza, "Effect of Nanofluids on the Performance of Miniature Plate Heat Exchanger with Modulated Surface," *International Journal of Heat and Fluids Flow*, vol. 30, pp. 691-699, 2009.
- [9] C.Y. Tsai et al., "Effect of Structural Character of Gold Nanoparticles in Nanofluid on Heat Pipe Thermal Performance," *Material Letters*, vol. 58, no. 9, pp. 1461-1465, 2004.
- [10] P. Bhattacharya, S.K. Saha, A. Yadav, and P.E. Phelan, "Brownian Dynamica Simulation to Determine the Effective Thermal Conductivity of Nanofluids," *International Journal of Applied Physics*, vol. 95, 2004.
- [11] M.N. Pantzali, A.A. Mouza, and S.V. Paras, "Investigating the Efficiency of Nanofluids as Coolants in Plate Heat Exchangers (PHE)," *International Journal of Chemical Engineering Science*, vol. 64, pp. 3290-3300, 2009.
- [12] U.S. Choi, "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles, Development and Applications of Non-Newtonian Flows," *ASME*, vol. FED-vol. 231/MD-vol. 66, pp. 99-105, 1995.

- [13] J.A. Eastman, U.S. Choi, S. Li, Thompson L.J., and S. Lee, "Enhancement Thermal Conductivity Through the Development of Nanofluids," *Nanophase and Anocomposite Materials*, vol. II, pp. 3-11, 1997.
- [14] P. Dunn and D.A. Reay, *Heat Pipes*, 2nd ed., Oxford, Ed. England: Pergamon Press, 1978.
- [15] Incopera, Frank P., Dewitt, and David P, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New York: John Wiley and Sons, 2002.
- [16] K.F. Bainton, "Appl. Phys.," *Experimental Heat Pipes*, vol. AERE-M1610, 1965.
- [17] H. A. Cheung, "An Article Review of Heat Pipe Theory and Applications," Lawrence Radiation Laboratory, University of California, USAEC Report UCRL-50453 1968.
- [18] B.I. Leefer, "Nuclear Thermionic Energy Converter," Atlantic City, 24-26 May 1966, pp. 172-175.
- [19] J.F. Judge, "RCA Test Thermal Energy Pipe," *Missiles Rockets*, vol. 18, pp. 36-38, 1966.
- [20] J.E. Deverall and J.E. Kemme, "Satellite Heat Pipe," Los Alamos Scientific Laboratory, University of California, USAEC Report LA-3278 Contract W-7405-eng-36, 1970.
- [21] T.A. Wyatt, "Controllable Heat Pipe Experiment for the SE-4 Satellite," *Journal of Applied Physics Laboratory*, vol. APL-SDO-1134, March 1965.
- [22] Swanson T.D. and G.C. Birur, "Thermal Control Technologies for Robotic Spacecraft," *Journal of Applied Thermal Engineering*, vol. 23, pp. 1055-1065, 2003.
- [23] T.P. Cotter, "Theory of Heat Pipes," Los Alamos Scientific Laboratory, University of California, USAEC Report LA-3246 Contract W7405-3ng-36, 1965.
- [24] D.K. Anand, "Heat Pipe Application to a Gravity Gradient Satellite," in *ASME Annual Aviation and Space Conference*, Beverly Hills, California, 16-19 June 1968, pp. 634-658.
- [25] K.T. Feldman and G.H. Whitting, *The Heat Pipe and its Potentialities*, vol. 28, no. 3, p. 86, 1967.
- [26] G.Y. Eastman, "Sci. Am.," *The Heat Pipe*, vol. 218, no. 5, pp. 38-46, 1968.
- [27] K.T. Feldman and G.H. Whitting, "Application of The Heat Pipe," *Mechanical Engineering*, vol. 90, pp. 48-53, 1968.

- [28] Arthur and P. Frass, *Heat Exchanger Design 2nd Edition*. New York, United States of America: John Wiley and Sons, 1989.
- [29] W. Wits, R. Legtenberg, and J.H. Mannak, "Selecting Capillary Structure for Heat Pipe in Multilayer Printed Circuit Boards," *European Thermal-Science*, 2008.
- [30] J.P. Holman, *Heat Transfer*, 5th ed. New York, United States of America: McGraw-Hill.
- [31] YU. F. Maydanik, "Review Loop Heat Pipes," *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, pp. 635-657, 2005.
- [32] D. A. Wolf, D. M. Ernst, and A.L. Phillips, "Loop Heat Pipes Their Performance and Potential," SAE Paper 941575,.
- [33] M.A. Chernysheva, S.V. Vershinin, and Yu.F. Maydanik, "Operating Temperature and Distribution of a Working Fluid in Loop Heat Pipes," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, pp. 2704-2713, 2007.
- [34] W. Liu, "Experimental Investigation of Loop Heat Pipe with Flat Evaporator Using Biporous Wick," University of Science and Technology, China, 2012.
- [35] Randeep Sing, Aliakbar Akbarzadeh, and Masataka Mochizuki, "Operational Characteristics of the Miniature Loop Heat Pipe with Non-Condensable Gases," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, pp. 3471-3482, 2010.
- [36] Yunus A. Cengel, *Heat Transfer: A Practical Approach*, 2nd ed. New York, United States of America: John Wiley and Sons.
- [37] Jaiandran Sri and Munusamy L., "Heat Pipe in Electronic Packaging," 2006.
- [38] D. Reay and P. Kew, *Heat Pipe Theory, Design, and Applications*, 5th ed.: Elsevier, 2006.
- [39] Fabian Korn, "Heat Pipes and Its Applications," Faculty Engineering, Dept. of Energy Science , Sweden, 2008.
- [40] P.H. Forchheimer, "Z. Ver. Dtsch. Ing," vol. 45, pp. 1782-1788, 1901.
- [41] Brautsch A. and Kew P.A., "The Effect of Surface Conditions on Boiling Heat Transfer From Mesh Wick," in *12th International Heat Transfer Conference*, Grenoble, 2002.
- [42] Calvin C. Silverstein, *Design and Technology of Heat Pipes for Cooling and Heat Exchange Hand Book.:*

Taylor & Francis, 1992.

- [43] Boming Yu and Ping Cheng, "A Fractal Permeability Model for Bi-Dispersed Porous Media," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45, pp. 2983-2993, 2002.
- [44] S.W. Wheatcraft and S.W. Tyler, "An Explanation of Scale Dependent Dispersivity in Heterogeneous Aquifers Using Concepts of Fractal Geometry," *Water Resources*, vol. 24, pp. 566-578, 1988.
- [45] S.G. Lévesque, R.M. Lim, and M.S. Shoichet, "Macroporous Interconnected Dextran Scaffolds of Controlled Porosity for Tissue," *Journal of Engineering Applications*, vol. 26, pp. 7346-7446, 2005.
- [46] Boming Yu and Ping Cheng, "A Fractal Permeability Model for Bi-disperses Porous Media," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45, pp. 2983-2993, 2002.
- [47] Pinder, George F., and William G. Gray, *Essentials of Multiphase Flow and Transport in Porous Media*. New jersey: John Wiley & Sons, 2008.
- [48] Chang C.S., Jwo P.S., Fan S.H., and Pai, "Process Optimization and Material Properties for Nanofluid Manufacturing," *International Journal Manufacturing Technology*, vol. 34, pp. 300-306, 2007.
- [49] Y.M. Chen, S.C. Wu, and C.I. Chu, "Thermal Performance of Sintered Miniature Heat Pipes," 2001.
- [50] Boming Yu, Jianhua Li, Zhizua Li, and Mingqing Zou, "Permeabilities of Unsaturated Fractal Porous Media," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 29, pp. 1625-1642, 2003.
- [51] Zhi Chun Liu, "Operational Characteristics of Flat Type Loop Heat Pipe with Biporous Wick," School of Energy and Power Engineering, Taiwan, 2012.
- [52] Yu Zhi-Ying, Jin Liu, and Zhang Qing-Shu, "Consideration of Hydrodynamic Characteristics, Sediments and Environmental Problems of Muddy Coast in the Construction Lianyugang Harbour," *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, vol. 12, pp. 97-105.
- [53] Y. Xuan and Q. Li, "Heat Transfer Enhancement of Nanofluids," *International Journal Heat and Fluid Flow*, vol. 21, pp. 58-64, 2000.
- [54] Sarit K. Das, Nandy Putra, and Wilfried Roetzel, "Pool Boiling Characteristic of Nanofluids," *International Journal Heat and Mass Transfer*, vol. 46, pp. 851-862, 2003.

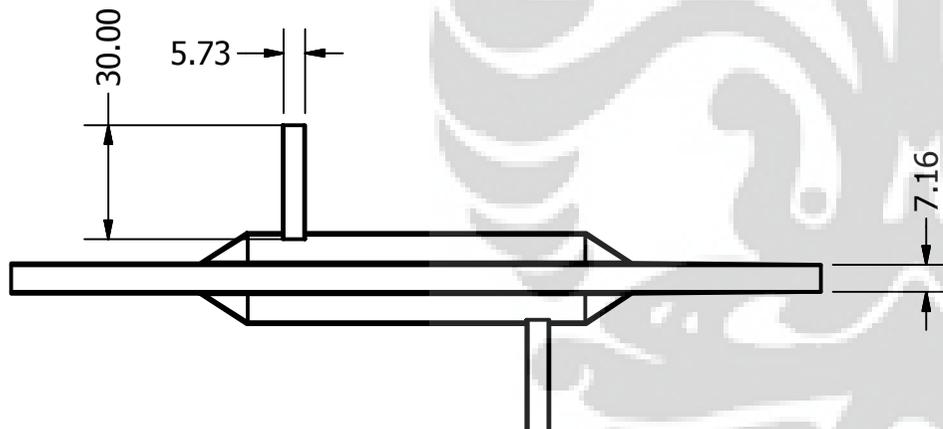
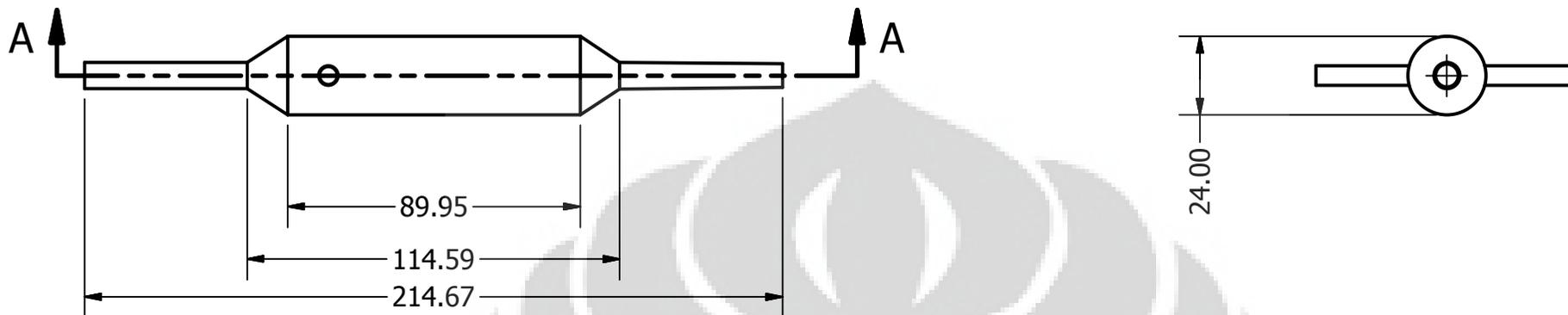
- [55] H.E. Patel, Sarit K. Das, and T. Sudararajan, "Thermal Conductivity of Naked and Monolayer Protected Metal Nanoparticle based Nanofluids : Manifestation of Anomalous Enhancement and Chemical Effect," *Applied Physics Letter*, vol. 83, no. 14, 2003.
- [56] Huanqing Xie, H. Lee, W. Youn, and M. Choi, "Nanofluids Containing Multiwalled Carbon Nanotubes and Their Enhanced Thermal Conductivities," *Journal of Applied Physics*, vol. 94, no. 8, 2003.
- [57] P. Bhattacharya, S.K. Saha, A. Yadav, and P.E. Phelan, "Brownian Dynamica Simulation to Determine the Effective Thermal Conductivity of Nanofluids," *Journal of Applied Physics*, vol. 95, no. 11, 2004.
- [58] Seok Pil Jang and Choi, "Role of Brownian Motion in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids," *Applied Physics Letter*, vol. 84, no. 21, 2004.
- [59] Xiang-Qi, Wang, and Arun S. Mujumdar, "Heat Transfer Characteristics of Nanofluids : a Review," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 46, pp. 1-19, 2007.
- [60] H. Akoh, Y. Tsukasaki, S. Yatsuya, and A. Tasaki, "Magnetic Properties of Ferromagnetic Ultrafine Particles Prepared by Vacuum Evaporation on Running Oil Substrate," *Journal of Crystal Growth*, vol. 45, pp. 495-500, 1978.
- [61] H.J. Wollenberger Parker, "Nanocrystalline and Nanocomposite Materials II," vol. 457, pp. 149-154, 1997.
- [62] H. Zhu, Y. Lin, and Y. Yin, "A Novel One-Step Chemical For Preparation of Copper Nanofluids," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 227, pp. 100-103, 2004.
- [63] X. Wang, X. Xu, and S.U.S. Choi, "Thermal Conductivity of Nanoparticle-Fluid Mixture," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 13, pp. 474-480, 1999.
- [64] S. Lee, S.U.S. Choi, S. Li, and J.A. Eastman, "Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticle," *Journal of Heat Transfer*, vol. 121, pp. 280-289, 1999.
- [65] Nandy Putra, R. Ferky, and R.A. Koestoer, "Peningkatan Koefisien Perpindahan Kalor dari Nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-air," *Jurnal Teknologi*, vol. XVIII, no. 2, 2004.
- [66] Seok Pil Jang, "Effect of Various Parameters on Nanofluids Thermal Conductivity," *Journal of Heat Transfer*, vol. 129, pp. 617-623, 2007.
- [67] J. Koo and C. Kleinstreuer, "Laminar Nanofluids Flow in Microheat-Sinks," *International Heat and Mass*

*Transfer*, vol. 48, pp. 2652-2661, 2005.

- [68] Ridho Irwansyah, "Didih Kolam Nanofluida Pada Media Berpori," Mechanical Engineering, University of Indonesia, Depok, Master Thesis 2012.
- [69] Nandy Putra, Wayan Nata, Haolia Rahman, and Ridho Irwansyah, "Thermal Performance of Screen Mesh Wick Heat Pipes with Nanofluids," *Experimental Thermal and Fluid Sciences*, vol. 40, pp. 10-17, 2012.
- [70] Lin Cheng, "Experimental Study on Capillary Pumping Performance of Porous Wicks for Loop Heat Pipe," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012.
- [71] Maryam Shafahi, Vincenzo Bianco, Kambiz Vafai, and Oronzio Manca, "An Investigation of the Thermal Performance of Cylindrical Heat Pipes Using Nanofluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, pp. 376-383, 2010.
- [72] Jian Qu and Huiying Wu, "Thermal Performance Comparison of Oscillating Heat Pipes with SiO<sub>2</sub>/water and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluids," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 50, pp. 1954-1962, 2011.
- [73] Calvin H. Li and G. P. Peterson, "The Effect of Particle Size on the Effective Thermal Conductivity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water Nanofluids," *Journal of Applied Physics*, vol. 101, 2007.
- [74] (2012, May) Encyclopedia2. [Online]. <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Heat-pipe>
- [75] (2012, May) Shop Sandberg. [Online]. <http://shop.sandberg.de/455150893/1/AD89/MTA1OTYxMjAx/Huber%20105961201%20Sandberg.html>
- [76] (2012, May) BK Precision. [Online]. <http://apps.bkprecision.com/products/model/9123A/30v-5a-programmable-dc-power-supply.html>
- [77] (2012, May) National Instrument. [Online]. <http://www.ni.com>
- [78] (2012, May) Aavid. [Online]. <https://www.aavid.com/product-group/heatpipe/operate>

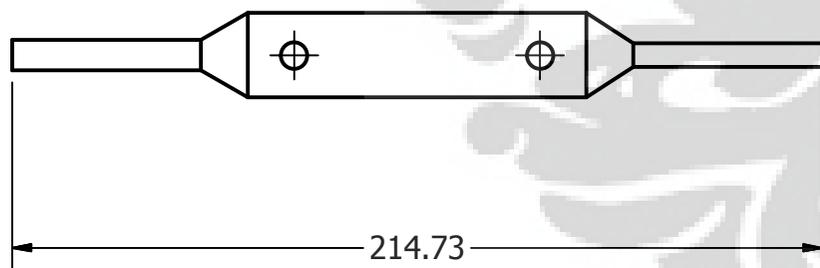
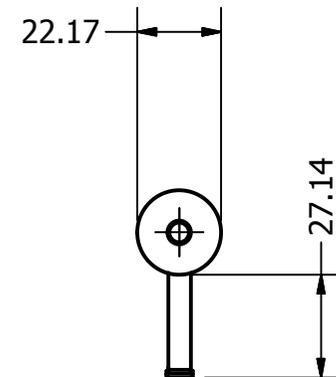
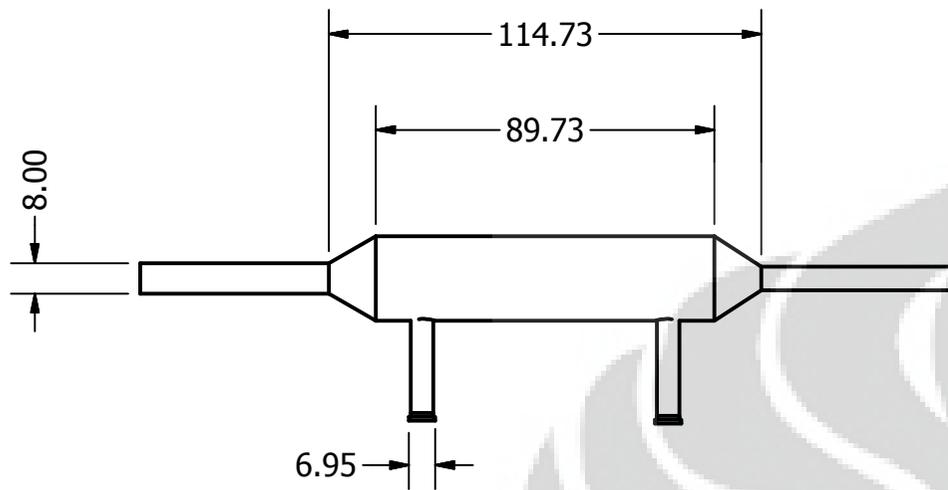
## LAMPIRAN

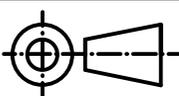


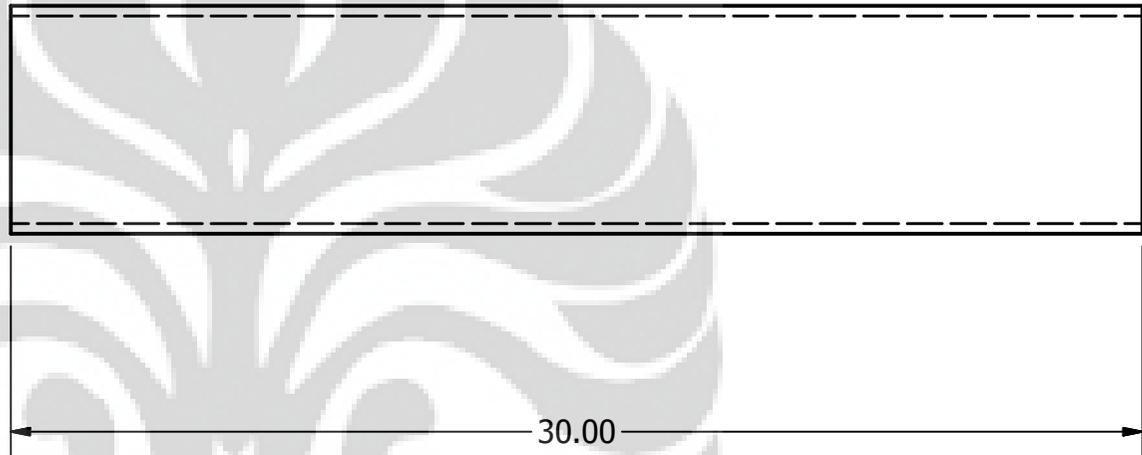
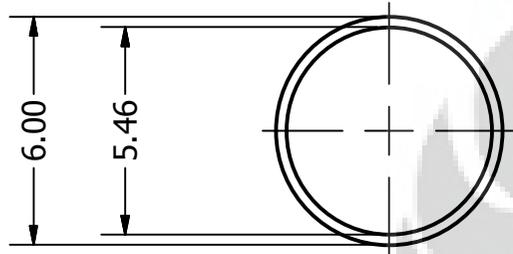


SECTION A-A  
SCALE 1 / 2

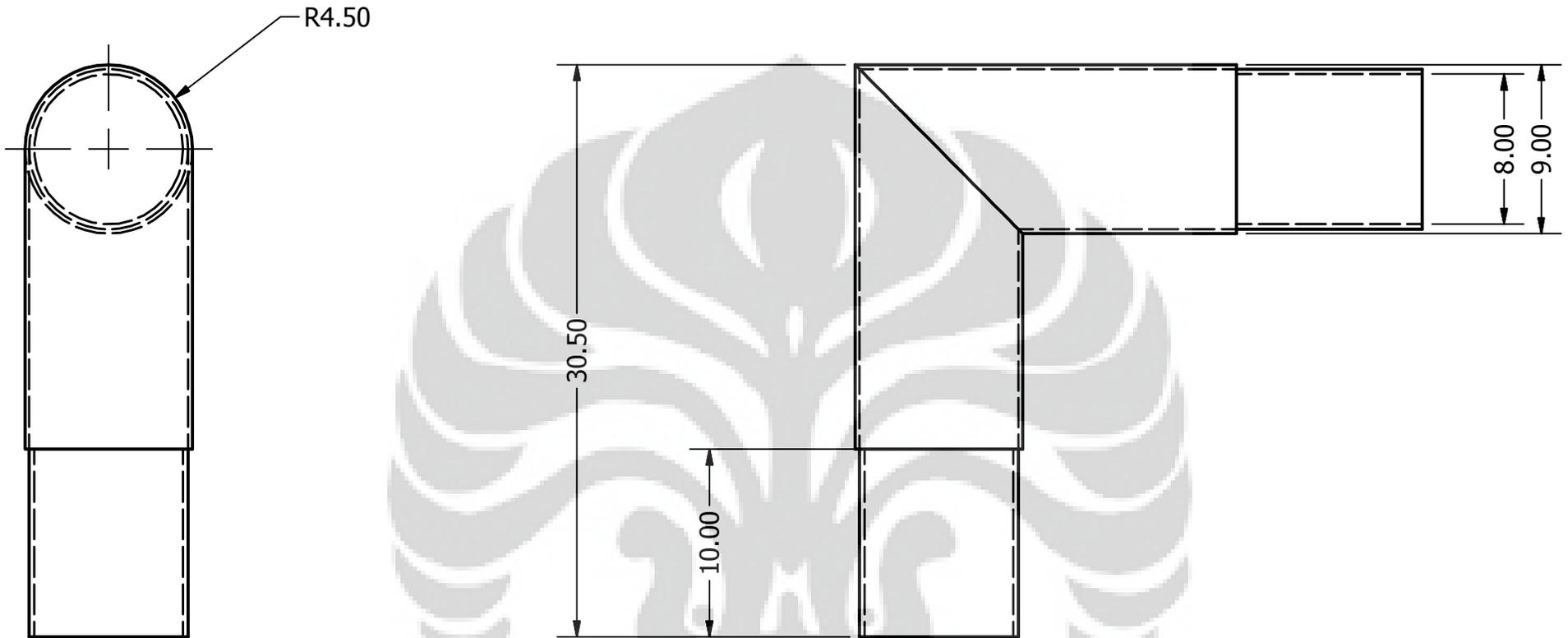
	SKALA: 1:2	DIGAMBAR: ASHAR OKTA D.	PERINGATAN
	SATUAN: mm	NPM: 0806454645	
	TANGGAL:	DISETUJUI: Prof. Dr.-Ing. Nandy P.	
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN UNIVERSITAS INDONESIA	KONDENSOR		A4



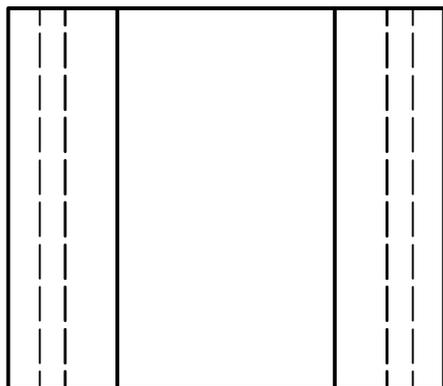
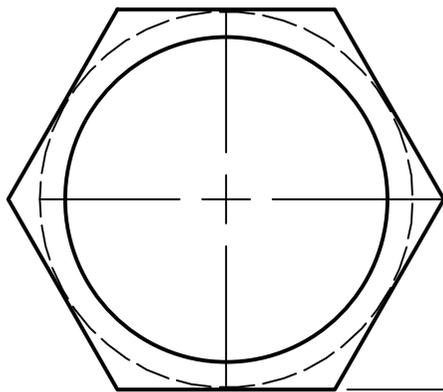
	SKALA: 1:2	DIGAMBAR: ASHAR OKTA D.	PERINGATAN
	SATUAN: mm	NPM: 0806454645	
	TANGGAL:	DISETUJUI: Prof. Dr.-Ing. Nandy P.	
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN UNIVERSITAS INDONESIA	EVAPORATOR		A4



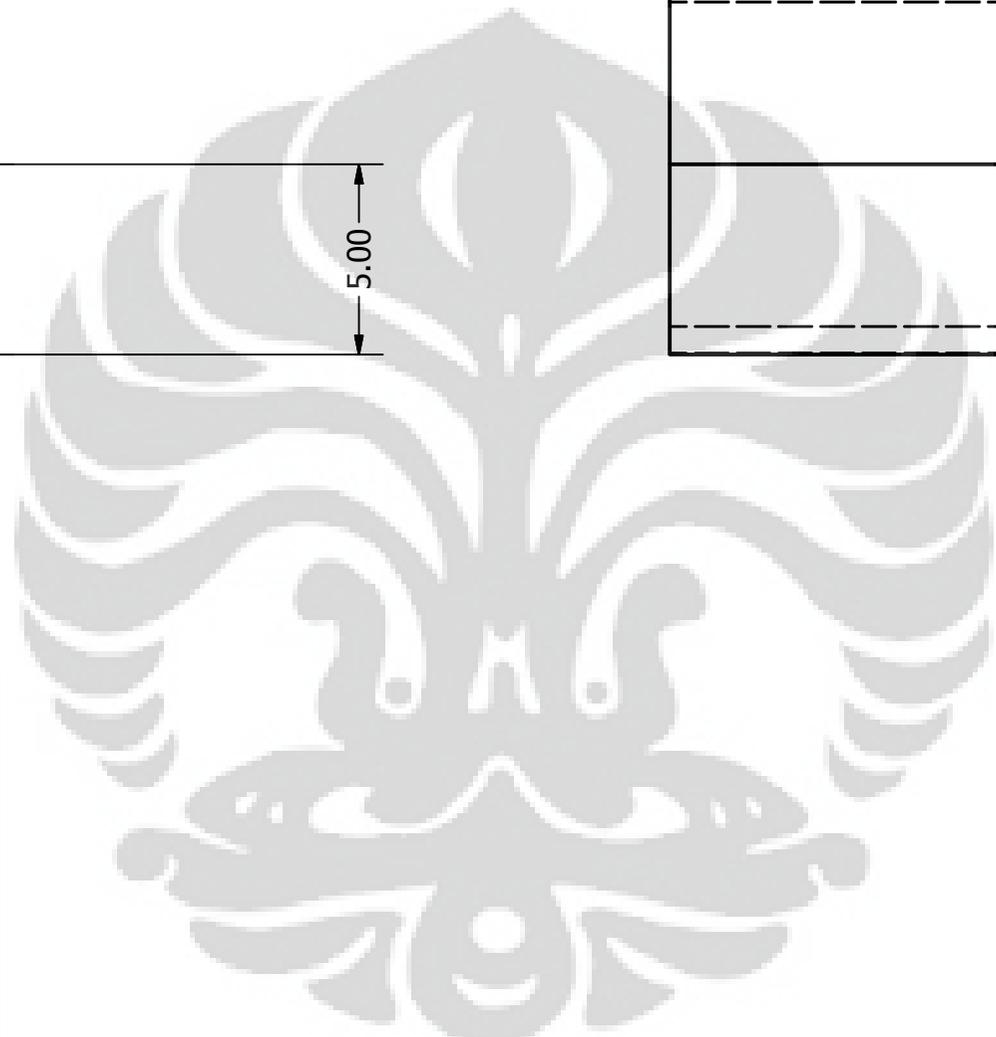
	SKALA: 5:1	DIGAMBAR: ASHAR OKTA D.	PERINGATAN
	SATUAN: mm	NPM: 0806454645	
	TANGGAL:	DISETUJUI: Prof. Dr.-Ing. Nandy P.	
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN UNIVERSITAS INDONESIA	LIQUID LINE		A4



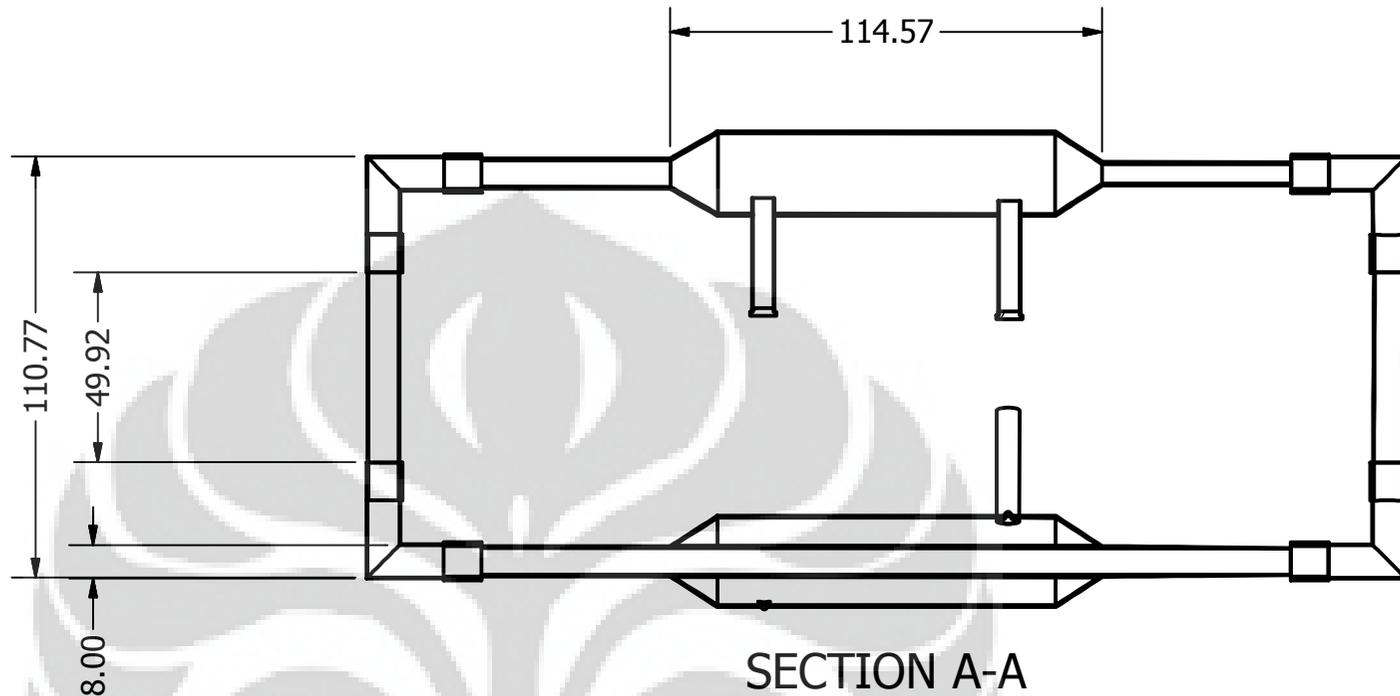
	SKALA: 3:1	DIGAMBAR: ASHAR OKTA D.	PERINGATAN
	SATUAN: mm	NPM: 0806454645	
	TANGGAL:	DISETUJUI: Prof. Dr.-Ing. Nandy P.	
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN UNIVERSITAS INDONESIA	ELBOW		A4



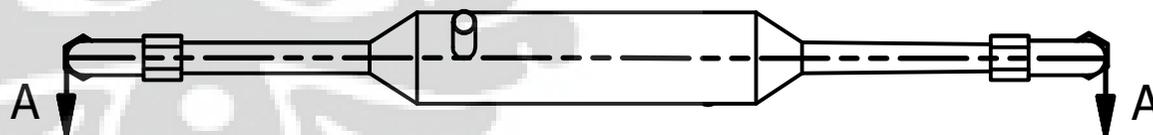
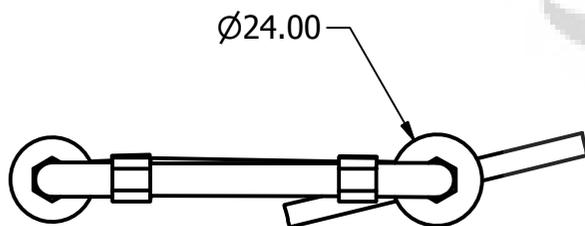
5.77

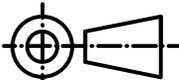


	SKALA: 5:1	DIGAMBAR: ASHAR OKTA D.	PERINGATAN
	SATUAN: mm	NPM: 0806454645	
	TANGGAL:	DISETUJUI: Prof. Dr.-Ing. Nandy P.	
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN UNIVERSITAS INDONESIA	MUR		A4



SECTION A-A  
SCALE 1 / 2



	SKALA: 1:2	DIGAMBAR: ASHAR OKTA D.	PERINGATAN
	SATUAN: mm	NPM: 0806454645	
	TANGGAL:	DISETUJUI: Prof. Dr.-Ing. Nandy P.	
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN UNIVERSITAS INDONESIA	ASSEMBLY LOOP HEAT PIPE		A4