



UNIVERSITAS INDONESIA

**KARAKTERISTIK PIPA KALOR MELINGKAR DENGAN
PENGUNAAN SUMBU KAPILER BIOMATERIAL DAN
*SINTERED-CU***

SKRIPSI

ZEIN

0806330586

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

DEPOK

JUNI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**KARAKTERISTIK PIPA KALOR MELINGKAR DENGAN
PENGUNAAN SUMBU KAPILER BIOMATERIAL DAN
*SINTERED-CU***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik

ZEIN

0806330586

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

DEPOK

JUNI 2012

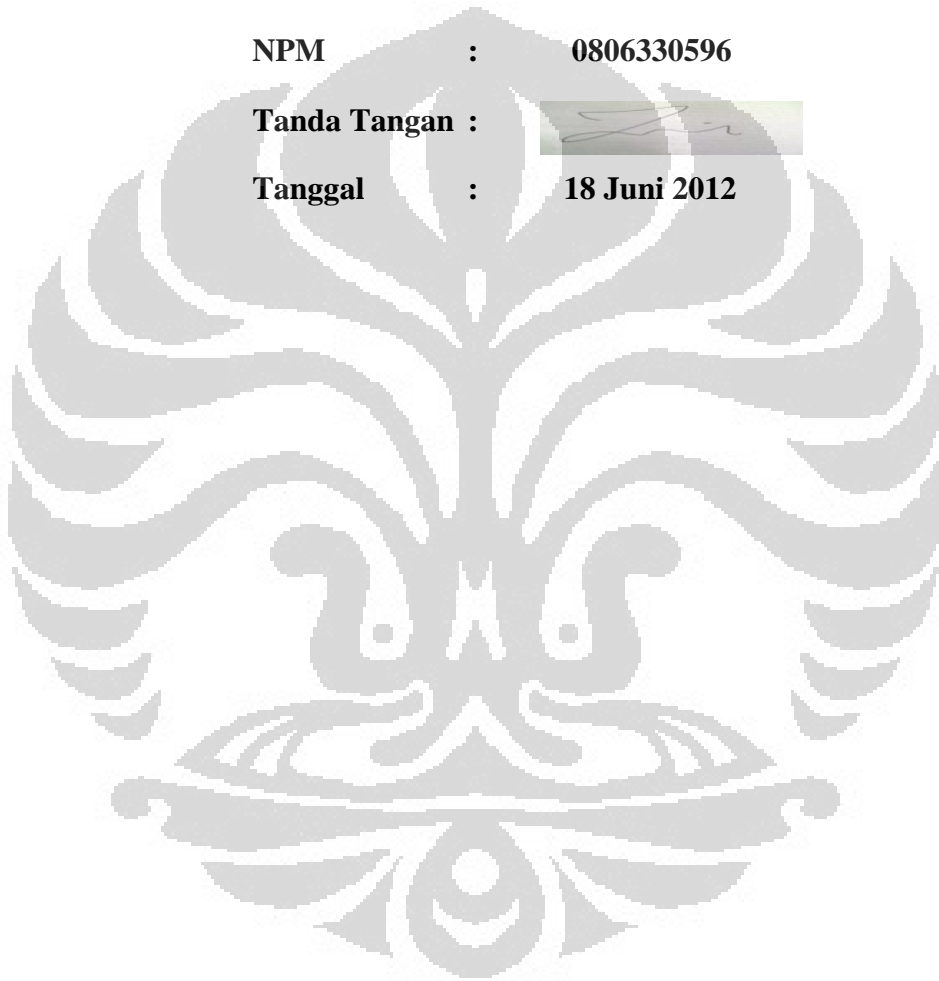
i

Universitas Indonesia

HALAMAN PERNYATAN ORISINALITAS

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

Nama : ZEIN
NPM : 0806330596
Tanda Tangan : 
Tanggal : 18 Juni 2012



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Zein
NPM : 0806330586
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Characteristic of Loop heat pipes using biomaterial
and *sintered* Cu Wick

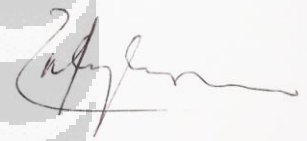
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

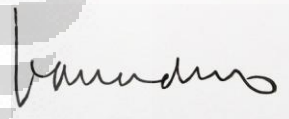
Pembimbing : Prof. Dr.Ing. Nandy Putra



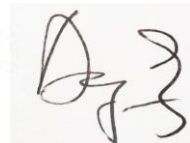
Penguji : Prof. Dr. Ir. Raldi Artono Koestoer, D.E.A



Penguji : Dr. Ir.R.Danardono AS DEA



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



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 18 Juni 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas rahmat dan anugerahNya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini tepat waktu. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Dalam penulisan skripsi ini, tentunya banyak pihak yang telah memberikan bantuan baik moril maupun materil. Oleh karena itu penulis ingin menyampaikan ucapan terimakasih yang tiada hingganya kepada

1. Prof. Dr. Ir. Nandy Putra selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini.
2. Secara khusus terima kasih kepada abah dan mamah atas doa dan dukungannya yang tiada henti. Kepada nadia dan kak fahmi, sebagai panutan bagi penulis, terimakasih atas siraman semangat yang tiada henti.
3. Mas wayan yang telah membimbing dan banyak memberikan bantuan dalam penyelesaian karya ini.
4. Ashar Okta D sebagai seorang sahabat dan teman seperjuangan dalam menyelesaikan karya ini yang sering meneror saya dan juga saya teror.
5. M. Hudi Wibowo dan Rachmi Satarsyah, sahabat dan juga manusia terlabil yang saya kenal di FTUI.
6. Christoforus Deberand sebagai sahabat penulis. Terimakasih atas sindiran panas yang sangat membangun. Sayang penulis tidak bisa menepati janjinya dengan tepat.
7. Annisa Nurulianthy, Edwin Dwi Novianto, Rio Wirawan, Retsa Anugrah, dan Muhammad Husin yang telah menjadi sahabat penulis.
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, Hedri yang telah memberikan ilmu serta canda dan tawa di lab.

9. Teman – teman angkatan 2008 Teknik Mesin dan Teknik Perkapalan, terimakasih atas pengalaman yang berharga selama menjadi mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
10. Para sahabat dan semua pihak yang telah membantu dalam bentuk doa yang tidak bisa disebutkan satu-persatu.

Penulis berharap semoga Tuhan berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini dapat membawa manfaat untuk perkembangan ilmu pengetahuan.



HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Zein
NPM : 0806330586
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 :

Karakteristik pipa kalor melingkar dengan penggunaan sumbu biomaterial dan sintered-Cu

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama 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



(Zein)

ABSTRAK

Nama : Zein

Program Studi : Teknik Mesin

Judul : Karakteristik Pipa Kalor Melingkar Dengan Penggunaan Sumbu Kapiler Biomaterial dan *Sintered Cu*

Permasalahan pendinginan komponen elektronik semakin meningkat seiring peningkatan fluks panas yang dihasilkan oleh peralatan elektronik khususnya CPU komputer. Penggunaan pipa kalor dalam pendinginan komponen elektronik tersebut menjadi salah satu solusi alternatif guna menyerap kalor yang dihasilkan. Pipa kalor melingkar (LHP) merupakan tanggapan terhadap tantangan yang berkaitan dengan permintaan teknologi untuk perangkat yang sangat panas dengan kemampuan transmisi panas yang efisien. Sementara itu pipa kalor melingkar masih jarang dijumpai, eksperimen pipa kalor melingkar menggunakan salah satu sisi *full wick sintered powder*. Lalu eksperimen ini dilakukan dengan penggunaan sintered-Cu dan biomaterial sebagai sumbu kapiler. Hasil menunjukkan biomaterial mampu mereduksi panas pada bagian evaporator lebih baik dari sumbu sintered-Cu. Hal ini dikarenakan biomaterial memiliki porositas yang lebih baik sehingga menghasilkan permeabilitas yang baik. Kinerja pipa kalor melingkar masih sangat berpengaruh pada gravitasi, maka dilakukanlah beberapa eksperimen terhadap posisi yang baik pada peletakan pipa kalor melingkar dan didapatkan bahwa posisi kondensor yang berada di atas evaporator secara vertikal atau pada sudut paling baik. Hal ini dikarenakan pada evaporator terdapat banyak fluida yang berfungsi sebagai penghantar dan pereduksi kalor. Kondisi vacuum juga merupakan kondisi dimana hambatan thermal menurun sehingga menghasilkan transfer panas yang lebih efisien dari evaporator ke kondenser.

Kata Kunci : *loop heat pipe, biomaterial, sintered Cu*

ABSTRACT

Name : Zein

Study Program : Mechanical Engineering

Judul : Characteristic of Loop Heat Pipes using Biomaterial and Sintered Cu Wick

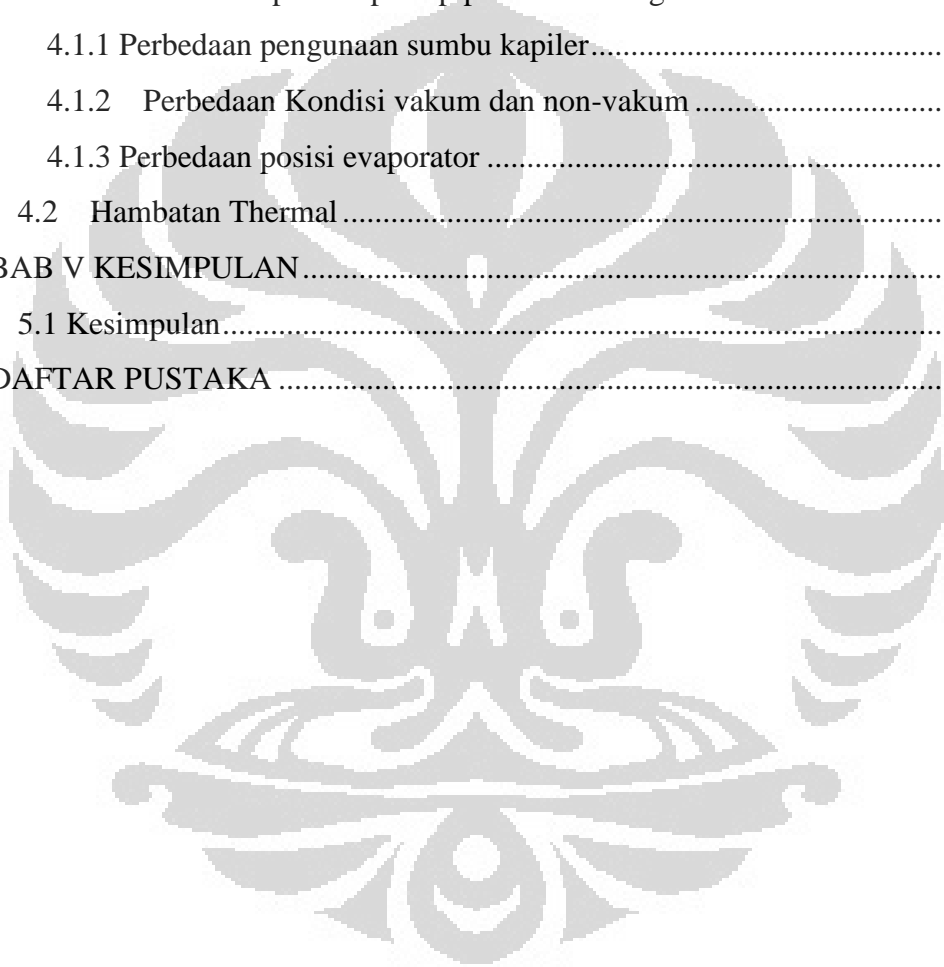
Problems of cooling the electronic components are increasing with increasing heat flux generated by electronic equipment, especially the CPU computers. The use of heat pipes in the cooling of electronic components has become one of the alternative solutions in order to absorb the heat generated. circular heat pipe (LHP) is a response to the challenges of technology berkaitan dengan demand for devices that are very hot with efficient heat transmission capability. Meanwhile, a circular heat pipes are still rare, circular heat pipe experiments using one side of the sintered powder wick full. Then the experiment was conducted with the use of sintered-Cu and biomaterial the capillary axis. The results show the biomaterial is able to reduce the heat to the evaporator section is better than sintered-Cu axis. this is because of Biomaterials have better porosity resulting in a good permeability. circular heat pipe performance is still very influential in gravity, we conducted several experiments to be well positioned in a circular heat pipe laying and found that the position of the condenser is located above the evaporator in vertical or at an angle best. This is because the evaporator terdapat lot of fluid that serves as a conductor of heat and reducing agents. Vacuum conditions is also a condition in which the thermal resistance decreases resulting in a more efficient heat transfer from the evaporator to the condense.

Keywords : *loop heat pipe, biomaterial, sintered Cu,*

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Pendahuluan	1
1.2 Permasalahan	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Pembatasan Masalah	3
1.5 Metodologi Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 HEAT PIPE	5
2.2 LOOP HEAT PIPE.....	8
2.3 STRUKTUR SUMBU KAPILER.....	11
2.3.1 Konduktivitas Termal sumbu kapiler Pada pipa kalor.....	12
2.3.2 Struktur sumbu kapiler Homogen	12
2.3.3 Hambatan Termal pada sumbu kapiler pipa kalor	13
2.3.4 Pengaruh Kapilaritas	13
2.3.5 Porositas	13
2.3.6 Jenis Struktur Wick (sumbu kapiler)	14
2.4 FLUIDA KERJA.....	16
2.4.1 Perubahan Fase Aliran Fluida pada pipa kalor melingkar.....	17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	19
3.1 Pembuatan Sumbu Kapiler.....	19

3.1.1 Pembuatan Sumbu Sinteread Cu	19
3.1.2 Pembuatan Sumbu Biomaterial	20
3.1.3 Pembuatan LHP	20
3.2 Karakteristik Sumbu Kapiler.....	22
3.3 Peletakan Termokopel dan heater	23
3.4 Skematik Percobaan	26
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	33
4.1 Distribusi temperatur pada pipa kalor melingkar.....	33
4.1.1 Perbedaan penggunaan sumbu kapiler.....	33
4.1.2 Perbedaan Kondisi vakum dan non-vakum	38
4.1.3 Perbedaan posisi evaporator	39
4.2 Hambatan Thermal	43
BAB V KESIMPULAN	48
5.1 Kesimpulan.....	48
DAFTAR PUSTAKA	50



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Pipa Kalor [17]	5
Gambar 2. 2 Pipa Kalor [17]	8
Gambar 2. 3 Pipa Kalor Melingkar [2].....	9
Gambar 2. 4 Kurva Didih Nukiyama [31].....	10
Gambar 2. 5 <i>Film Condensation</i> [31].....	10
Gambar 2. 6 kurva porositas terhadap kapilaritas	14
Gambar 2. 7 Sumbu <i>Biporous</i>	15
Gambar 2. 8 Sumbu <i>Screen Mesh</i>	15
Gambar 2. 9 Sumbu <i>Fiber Spiral</i>	16
Gambar 2. 10 <i>Copper Foam</i>	16
Gambar 2. 11 sirkulasi fluida kerja	18
Gambar 3. 1 Bubuk Tembaga dan proses <i>sintering</i>	19
Gambar 3. 2 Coolaria dan Pipa tembaga	20
Gambar 3. 3 Pipa Tembaga	20
Gambar 3. 4 Elbow Kuningan	21
Gambar 3. 5 Katup Nepel	21
Gambar 3. 6 Proses <i>Brazing</i> pada bagian kondensor	22
Gambar 3. 7 Pipa Kalor Melingkar	22
Gambar 3. 8 SEM <i>Sintered</i> Cu perbesaran 100 kali.....	23
Gambar 3. 9 SEM Biomaterial perbesaran 100 kali.....	23
Gambar 3. 10 Skematik LHP.....	24
Gambar 3. 11 Pemasangan Pemanas elektrik.....	25
Gambar 3. 12 isolasi menggunakan polyurethane box.....	25
Gambar 3. 13 Orientasi posisi evaporator 90, 0 dan - 90	26
Gambar 3. 14 Proses Vakum	27
Gambar 3. 15 skematik pengujian pipa aksor melingkar.....	28
Gambar 3. 16 <i>power supply</i>	30
Gambar 3. 17 Data akusisi NI 9123 dan Chasis NI cDaq-9172.....	30
Gambar 3. 18 pemanas elektrik	31
Gambar 3. 19 Material <i>polyurethane</i>	31
Gambar 3. 20 <i>Glasswool</i>	32
Gambar 3. 21 Pompa Vakum	32
Gambar 4. 1 Distribusi temperatur pipa kalor melingkar, sumbu kapiler <i>sintered</i> -Cu dengan masukan daya Q=10, 20, 30 Watt.....	36
Gambar 4. 2 Distribusi temperatur pipa kalor melingkar, sumbu kapiler tipe Biomaterial dengan masukan daya Q=10, 20, 30 Watt.....	36

Gambar 4. 3 Distribusi temperatur pipa kalor melingkar, tanpa sumbu kapiler dengan masukan daya $Q=10, 20, 30$ Watt	37
Gambar 4. 4 Distribusi temperatur pipa kalor melingkar sintered Cu dengan daya masukan $Q=10$ Watt.....	39
Gambar 4. 5 Temperatur pada beberapa titik pipa kalor melingkar dengan kalor masukan 10 Watt.....	41
Gambar 4. 6 Temperatur pada beberapa titik pipa kalor melingkar dengan kalor masukan 10 W.....	42
Gambar 4. 7 perubahan hambatan thermal terhadap posisi pipa kalor melingkar	43
Gambar 4. 8 Hambatan Thermal pipa kalor melingkar antara evaporator dan kondensor dengan kalor masukan 10,20 dan 30 Watt.....	45
Gambar 4. 9 Hambatan Thermal pipa kalor melingkar dengan kalor masukan 10,20 dan 30 Watt	46
Gambar 4. 10 Distribusi temperatur pada penelitian ZhiChun Liu [7]	47



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Tabel Besar Tekanan [32]	11
Tabel 2. 2 Fluida kerja pada pipa kalor [28]	16
Tabel 3. 1 Tabel Pengujian LHP	26
Tabel 3. 2 Spesifikasi CTB.....	29
Tabel 3. 3 Spesifikasi <i>power supply</i>	29
Tabel 4. 1 Temperatur pada beberapa titik pipa kalor melingkar dengan kalor masukan 10 Watt dalam keadaan vakum.	33
Tabel 4. 2 Temperatur pada beberapa titik pipa kalor melingkar dengan kalor masukan 10 Watt dalam keadaan non vakum.	34
Tabel 4. 3 Temperatur pada beberapa titik pipa kalor melingkar dengan kalor masukan 20 Watt dalam keadaan vakum.	34
Tabel 4. 4 Temperatur pada beberapa titik pipa kalor melingkar dengan kalor masukan 20 Watt dalam keadaan non vakum.....	34
Tabel 4. 5 Temperatur pada beberapa titik pipa kalor melingkar dengan kalor masukan 30 Watt dalam keadaan vakum.....	35
Tabel 4. 6 Temperatur pada beberapa titik pipa kalor melingkar dengan kalor masukan 30 Watt dalam keadaan non vakum.....	35
Tabel 4. 7 Distribusi temperatur pipa kalor melingkar dengan kondisi vakum dan non vakum $Q=10\text{Watt}$	38
Tabel 4. 8 Temperatur pada beberapa titik pipa kalor melingkar dengan kalor masukan 10 Watt.....	40
Tabel 4. 9 Temperatur pada beberapa titik pipa kalor melingkar dengan kalor masukan 10 Watt.....	40
Tabel 4. 10 Hambatan thermal antara evaporator dan kondensor	44
Tabel 4. 11 Hambatan thermal antara evaporator dan saluran air.....	46

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pendahuluan

Sejarah perkembangan dari pipa kalor melingkar (LHP) berawal dari tahun 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 [1,2]

Kemunculan dari pipa kalor melingkar adalah bentuk respon terhadap tantangan permintaan teknologi *aerospace* untuk perangkat pemindah panas yang efisien dengan segala keuntungan dari konvensional pipa kalor melingkar [3], tetapi kurang sensitif terhadap perubahan medan gravitasi dan mampu mentransfer panas pada jarak jauh dengan perbedaan temperatur yang kecil. Seperti pipa kalor konvensional, pipa kalor melingkar bekerja dengan dua fasa fluida kerja untuk mentransfer panas dimana evaporator dan kondenser dihubungkan dengan pipa fleksibel yang cukup panjang. Wolf et al. [4] menyatakan bahwa pipa kalor melingkar mengkombinasi keuntungan dari pipa kalor konvensional dan *capillary pumped loop*. Pipa kalor melingkar memiliki beberapa keuntungan seperti ; kemampuan mentransfer panas yang baik, saluran transportasi yang fleksibel, dan mampu mentransfer panas untuk jarak yang cukup jauh. Pipa kalor melingkar diaplikasikan pada *space craft*, *electronic device cooling*, dan *solar thermal system* [5].

Banyak Peneliti yang mempelajari tentang prinsip operasi pipa kalor melingkar secara eksperimen dan teoritis. komponen utama penyusun pipa kalor melingkar adalah evaporator , kondensor, dan struktur kapiler (*wick*). Banyak peneliti yang melakukan eksperimen dengan mengubah desain evaporator, baik silinder ataupun datar. Umumnya sumber

panas memiliki profil datar, oleh karena itu transfer panas ke evaporator akan lebih baik dengan desain datar. Desain silinder membutuhkan *interface* penghubung ke sumber panas berbentuk datar dan hal ini menyebabkan naiknya resistansi termal [6]. Singh et al [7] menguji pipa kalor melingkar dengan desain *flat-disk* evaporator dan mampu mentransfer panas hingga 70 W dengan besar temperatur evaporator dibawah 100° C. Maidanik et al [8] menguji pipa kalor melingkar dengan desain *flat-disk* evaporator dengan besar resistansi termal terukur 1.05 hingga 0.42 C/W pada beban panas 40 – 80 W. Becker [9] melakukan percobaan dengan desain *flat-oval* evaporator dan menghasilkan tahanan panas 0.2 C/W pada beban panas 100 W. Performa kerja dari pipa kalor melingkar juga berkaitan erat dengan fluida kerja yang digunakan dan sudut kerja dari pipa kalor melingkar [10] . Liu et al [11] Melakukan percobaan dengan berbagai macam fluida kerja yaitu methanol dan acetone. Celata et al [12] melaporkan bahwa *stainless steel* – water pipa kalor melingkar dengan *flat* evaporator mampu mentrasfer panas hingga 75 W dengan temperatur evaporator dibawah 150 C. Fluida kerja disirkulasi oleh gaya kapilaritas yang dikembangkan dari struktur kapiler. Struktur kapiler merupakan komponen penting pada pipa kalor melingkar. Banyak peneliti melakukan percobaan dengan jenis sumbu kapiler *monoporous* dan *biporous*. ZhiChun Liu [13] melakukan percobaan membandingkan performa sumbu sintered Nikel *monoporous* dan *biporous* dengan Sodium Carbonat sebagai pengisi, hasil percobaan menunjukkan sumbu *biporous* memiliki porositas yang lebih besar dibandingkan sumbu *monoporous*. Wang dan catton [14] melakukan eksperimen menggunakan struktur *biporous* dan menyatakan struktur *biporous* meningkatkan distribusi uap dan cairan dibandingkan dengan *monoporous*. Yeth at al [15] mempelajari evaporasi pada sumbu *biporous* dengan hasil koefisien perpindahan panas mencapai nilai maksimum 64 000W/m².K pada temperatur heat sink 10° C dan temperatur evaporator 85° C. Gaya kapilaritas yang tinggi menghasilkan perpindahan panas yang baik, Lin cheng [16] melakukan penelitian dengan mengukur kenaikan

kapiler fluida kerja dan menemukan satu hubungan bahwa permeabilitas, porositas dan diameter bubuk partikel merupakan faktor penting dalam penghasil gaya kapilaritas.

1.2 Permasalahan

Dari latar belakang yang telah dijelaskan, maka timbul beberapa permasalahan antara lain:

1. Bagaimanakah kinerja sebuah pipa kalor melingkar menerima panas?
2. Bagaimanakah kinerja sebuah pipa kalor melingkar dengan menggunakan sumbu kapiler *sintered-Cu*, Biomaterial, dan juga tanpa menggunakan sumbu kapiler?
3. Sejauh mana perubahan posisi antara kondensor dan evaporator mempengaruhi kinerja pipa kalor melingkar?

1.3 Tujuan Penelitian

Penulis memiliki beberapa tujuan yang hendak dicapai dalam penelitian ini:

1. Merancang pipa kalor melingkar yang memiliki kemampuan yang baik dengan menggunakan dua jenis sumbu kapiler yaitu *sintered-Cu*, biomaterial dan tanpa sumbu kapiler sebagai perbandingan
2. Mengetahui kinerja pipa kalor melingkar dengan tiga macam posisi berdasarkan posisi evaporator dan kondenser untuk menguji efek gravitasi pada pipa kalor melingkar.

1.4 Pembatasan Masalah

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 dibuat dari full *sintered powder Cu*, Biomaterial, dan tanpa wick sebagai perbandingan pada satu bagian sisinya.

4. 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 adalah sebagai berikut:

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. Pengujian pipa kalor melingkar

Unjuk kerja alat dilakukan pengambilan data temperatur pada alat dan pengolahan data pengujian.

4. Analisa dan Kesimpulan Hasil Pengujian

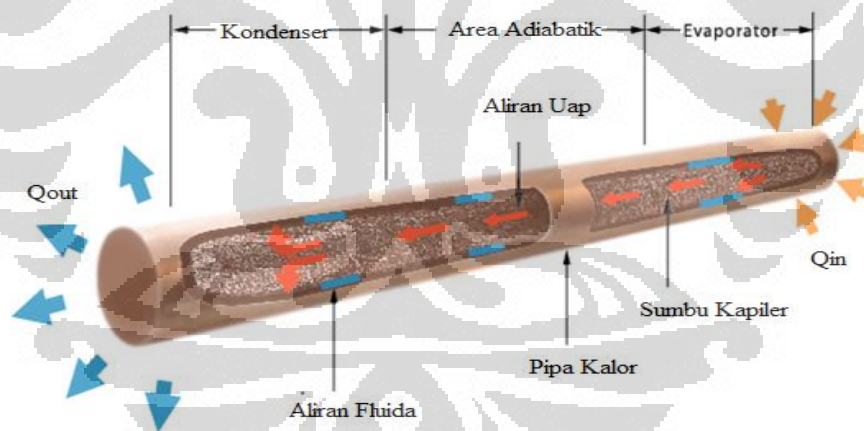
Setelah data dari hasil pengujian didapatkan, data tersebut diolah sehingga menjadi grafik. Dari grafik tersebut dilakukan perbandingan dengan data lainnya kemudian melihat fenomena apa saja yang terjadi pada pengujian ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 HEAT PIPE

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. 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, oleh karena itu pipa kalor melingkar dikategorikan sebagai alat penukar kalor pasif [17].



Gambar 2. 1 Pipa Kalor [17]

Perkembangan pipa kalordimula oleh Angier March Perkins yang mengawali konsep tentang fluida kerja dengan satu fasa (*hermatic 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 evaporator dan kondensor, sehingga air yang berada di dalam tube beroperasi

pada dua fasa. Disain awal ini mengandalkan gravitasi untuk mengembalikan air ke evaporator. Perkins Tube merupakan lompatan penting bagi perkembangan pipa kapiler dewasa ini. Konsep dari modern pipa kalor 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. Percobaan dilakukan dengan penggunaan pada *converter diode nuclear thermionic*, yang bekerja sama dengan *Nuclear Reasearch Centre*, Ispra, Italy. Pekerjaan si Ispra tersebut menjadi pusat mengembangkan pipa kalordengan mengkaji aplikasi teori Pipa kalor Cheung [18] 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 [19]. Perusahaan tersebut mengembangkan material pipa kalor 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 kalordengan aplikasi satelit dengan air sebagai fluida kerja, dan penelitian pertama untuk pipa kalor dengan variasi besar konduktansi yang digunakan untuk aplikasi juga [21].

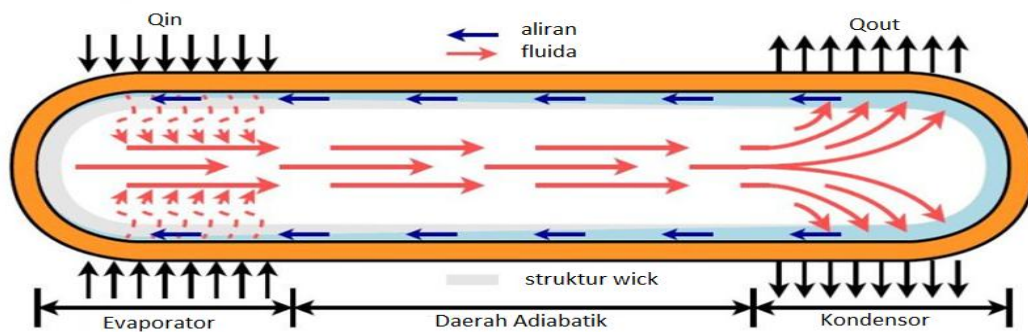
Selama tahun 1964, NASA memainkan peran besar dalam pengembangan pipa kalor dengan pendanaan besar untuk penelitian yang aplikasinya pada ruang kendali di luar angkasa. Penelitian NASA saat itu menghasilkan sebuah sistem

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 gravitasi nol [22]. Teori pipa kaloryang 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 [24], penggunaan selanjutnya untuk pengendali satelit termal yang berada di satelit GEOS-B. Satelit itu diluncurkan dari Vandenburg Air Force pada tahun 1968 [25]. Pipa kalor tersebut menggunakan material paduan aluminium 6061 T-6, dengan sumbu *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 kalorduntuk alat-alat komersial seperti AC, pendingin motor bakar, dan pendingin elektronik [26]. 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 seperti yang terlihat pada gambar 2.2 yaitu daerah evaporator, adiabatik, dan kondensor serta sumbu kapiler dimana cairan diuapkan oleh daerah evaporator pada keadaan uap melewati daerah adiabatik mencapai daerah kondensor [27]. 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 [28]

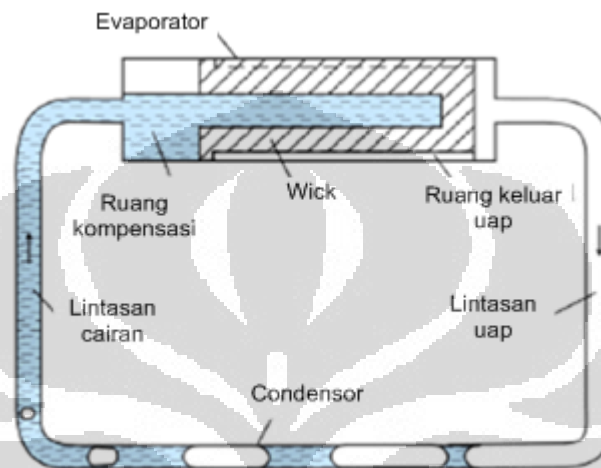


Gambar 2. 2 Pipa Kalor [17]

2.2 LOOP HEAT PIPE

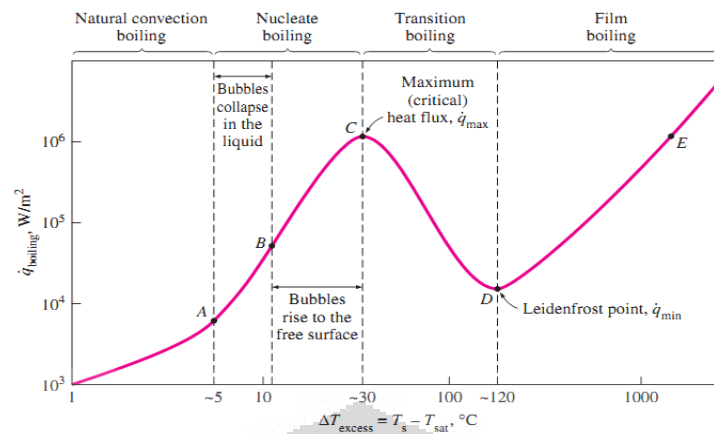
Loop Heat Pipe (pipa kalor melingkar) merupakan perangkat perpindahan panas yang bekerja berdasarkan gaya kapilaritas yang awalnya dikembangkan oleh maydanik dan gerasimov [2] dengan panjang 1.2 m dan kapasitas perpindahan panas sekitar 1 kW. Seperti pipa kalor tradisional, pipa kalor melingkar menggunakan dua fasa fluida kerja yang digunakan untuk mentransfer panas dari evaporator menuju kondenser yang dipisahkan dengan pipa panjang dan fleksibel. Wolf et al [5] menyatakan bahwa pipa kalor melingkar mengkombinasi keuntungan dari pipa kalor tradisional dan *capillary pumped loop* (CPL). Selain itu, pipa kalor melingkar memiliki keuntungan tersendiri seperti efisiensi thermal yang tinggi dalam mentransfer panas, tidak membutuhkan input daya dalam proses pendinginan, tidak ada bagian yang pindah, *reability* yang tinggi, 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 pipa kalor melingkar 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, yaitu 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 [29]. 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[10]. 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 [30]



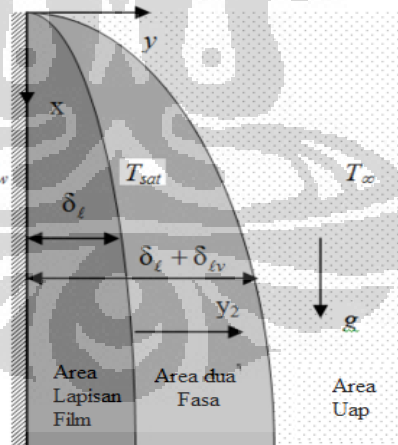
Gambar 2. 3 Pipa Kalor Melingkar [2]

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 vacuum. 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 [31]



Gambar 2. 4 Kurva Didih Nukiyama [31]

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*. [31]



Gambar 2. 5 Film Condensation [31]

Proses vakum pada pipa kalor melingkar merupakan proses pengosongan pipa dari fluida mampu mampat menyebabkan tekanan di dalam pipa kalor melingkar jauh dibawah tekanan atmosphere sehingga titik didih fluida kerja yang disirkulasi di dalam pipa kalor melingkar lebih rendah dibandingkan dengan kadaan atmosferis. Hal ini menyebabkan sirkulasi dari fluida kerja

lebih cepat terjadi dibandingkan kondisi non vakum sehingga pipa kalor dapat bekerja lebih baik dalam mentransfer panas. Tabel 2.1 menunjukkan besar perbedaan tekanan atmosphere dan tekanan vakum [32].

Tabel 2. 1 Tabel Besar Tekanan [32]

	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}	3kPa – 100 mPa
<i>High Vacuum</i>	10^{-9} – 10^{-12}	100 mPa – 100nPa
<i>Perfect Vacuum</i>	0	0 Pa

2.3 STRUKTUR SUMBU KAPILER

Sumbu kapiler merupakan struktur kapilaritas yang berfungsi sebagai saluran balik dari fluida kerja pada daerah kondensor menuju daerah evaporator melalui bagian adiabatik (*Liquid Line*) [33]. 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 [34]:

$$R = \frac{T_{panas} - T_{dingin}}{\dot{Q}} \quad [2.1]$$

Pemilihan struktur kapiler untuk pipa kapiler tergantung dari banyak faktor, salah satunya adalah terkait dengan sifat dasar dari fluida kerja. Dalam ini tujuan utama dari struktur kapiler adalah untuk menghasilkan tekanan kapiler untuk mengalirkan fluida kerja kemali ke daerah kondensor menuju daerah evaporator. Disamping itu pula struktur kapiler harus mampu mendistribusikan cairan yang ada disekitar evaporator ke daerah dimana panas diterima evaporator. Dalam pipa kalor, daya kapilaritas maksimum (ΔP_c) pada sumbu kapiler harus lebih besar atau sama dengan penjumlahan seluruh *pressure drop* untuk memastikan bahwa kedua fasa tersebut dapat mengalir [35]

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 sumbu kapiler, 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[36]. Tetapi dengan menambah ketebalan sumbu kapiler, fluks panas tidak dapat diserap secara maksimal karena hambatan panas dari sumber panas ke dalam pipa kalorkan bertambah.

Konduktivitas fluida kerja pada sumbu kapilerjuga mempengaruhi jumlah total hambatan panas pada evaporator. Fluida kerja berupa air dengan sumbu kapilerberupa *sintered Cu* memiliki Temperatur uap sebesar 60°C dan fluks panas rata-rata $8,2 \text{ W/cm}^2$ [37]. Hal lain yang penting dari sumbu kapiler adalah kecocokan dengan fluida kerja dan daya basahnya. sumbu kapilerjuga harus memungkinkan untuk dapat digunakan pada pipa kalor berulang-ulang dalam jangka waktu yang lama.

2.3.1 **Konduktivitas Termal sumbu kapilerPada pipa kalor**

Konduktivitas ternal (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 [38]

2.3.2 **Struktur sumbu kapilerHomogen**

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 $10.000 \text{ W/m}^2\text{K}$ dari evaporator. 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 pada sumbu kapiler pipa kalor

Konduktivitas termal pada jenis sumbu kapiler yang digunakan dalam pipa kalor melingkar ternyata mempengaruhi hambatan termal dari pipa kalor. Wei-Chiang et al. [39] mengatakan bahwa hambatan termal dari pipa kalor merupakan suatu perbandingan antara perbedaan temperatur ($dT = T_{\text{evaporator}} - T_{\text{kondensor}}$) dengan beban panas yang diterima (Q), persamaannya adalah :

$$R = \frac{dT}{Q} \quad [2.2]$$

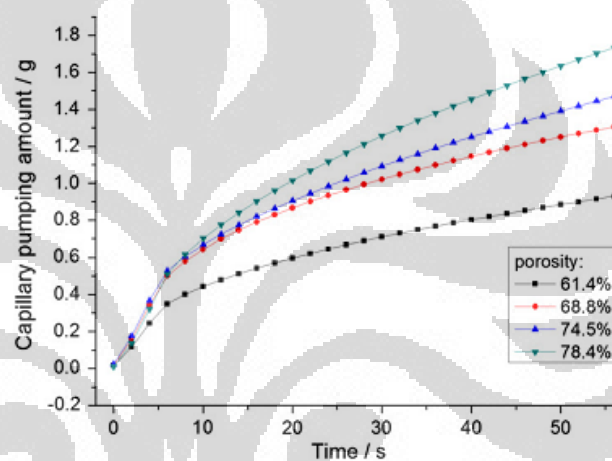
2.3.4 Pengaruh Kapilaritas

Kemampuan untuk menahan perbedaan tekanan antar cairan dengan gas atau uap dalam struktur berongga disebut kapilaritas [28]. Kapilaritas berperan dalam perpindahan kalor 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

Porositas adalah perbandingan ukuran ruang kosong dengan total volume pada material. Dinyatakan dalam nilai 0-1 atau dalam skala presentase 0-100%. Jadi porositas pada struktur sumbu kapiler adalah perbandingan antara volum pori dengan padatan pada struktur sumbu kapiler. Pengaruh porositas sangat mempengaruhi nilai maksimum dari perpindahan panas [40]. Peningkatan 10%

porositas mampu meningkatkan perpindahan panashingga dua kali. Dari percobaannya lainnya, pipa kalor dengan porositas 37,1% dan 51,6% mempunyai pengaruh yang besar terhadap perpindahan panas [41]. Seperti gambar 2.6 Dapat disimpulkan bahwa semakin besar tingkat porositas maka semakin tinggi nilai fluida kerja yang disirkulasi dan semakin baik pula perpindahan panas pada pipa kalor melingkar. Hal ini disebabkan karena seiring peningkatan besar porositas besar permeabilitas dari sumbu kapiler juga meningkat.

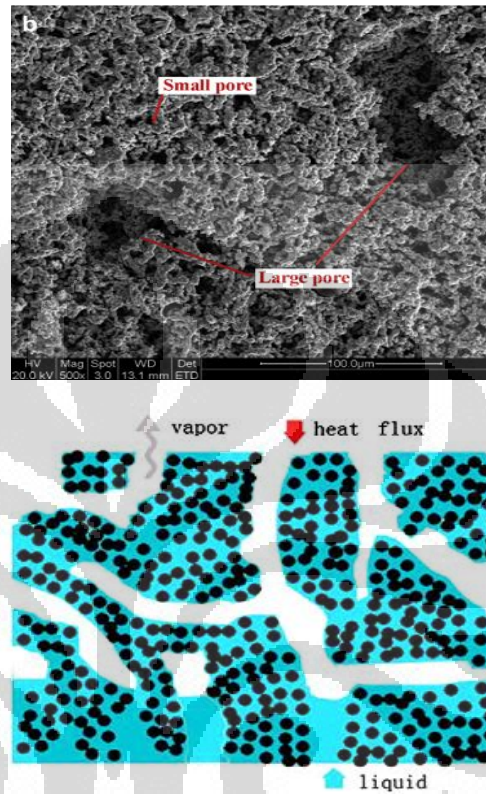


Gambar 2. 6 kurva porositas terhadap kapilaritas

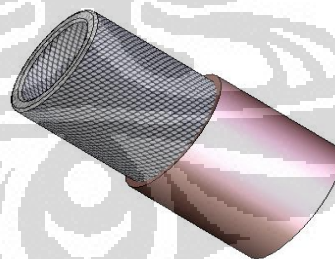
2.3.6 Jenis Struktur Wick (sumbu kapiler)

Jenis stuktur sumbu kapiler pada umumnya terdapat beberapa jenis, sumbu kapiler yang banyak digunakan pada produk-produk pipa kalor komersial diantaranya :*Axial Groove*, *Wire Screen Mesh*, *Sintered Powder Metal*, *copper foam* dan *Fiber-Spiral*. Untuk wick 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 zhiChun Liu [10] dapat menghasilkan performa wick yang lebih baik pemisahan fluida kerja dibandingkan *monoporous*. Gambar 2.7 menunjukkan hasil scan elektronik dari sumbu *biporous* dan zhiChun Liu menyatakan

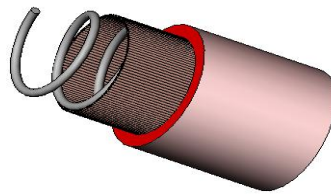
pori dengan ukuran besar dapat mengurangi hambatan aliran dari sumbu kapiler dan meningkatkan transport cairan menuju sumbu dan uap keluar dari sumbu. Pori dengan ukuran kecil menghasilkan gaya kapilaritas yang baik.



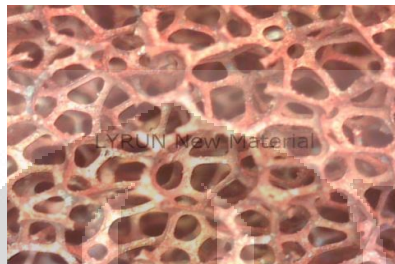
Gambar 2. 7 Sumbu Biporous



Gambar 2. 8 Sumbu Screen Mesh



Gambar 2. 9 Sumbu *Fiber Spiral*



Gambar 2. 10 *Copper Foam*

2.4 FLUIDA KERJA

Pertimbangan pertama dalam mencari fluida kerja yang cocok dalam sebuah pipa kalor adalah rentang temperatur kerja fluida, yang dapat dilihat dari tabel 2.2

Tabel 2. 2 Fluida kerja pada pipa kalor [28]

Fluida	Titik lebur (°C)	Titik didih pada tekanan ATM (°C)	Temperatur operasi (°C)
Helium	-271	-261	-271 s/d -269
Nitrogen	-210	-196	-203 s/d -160
Ammonia	-78	-33	-60 s/d 100
Acetone	-95	57	0 s/d 120
Methanol	-98	64	10 s/d 130
Flutec PP2	-50	76	10 s/d 160
Ethanol	-112	78	0 s/d 130
Air	0	100	30 s/d 200
Toluene	-95	110	50 s/d 200
Mercuri	-39	361	250 s/d 650
Sodium	98	892	600 s/d 1200
Lithium	179	1340	1000 s/d 1800
Perak	960	2212	1800 s/d 2300

Untuk mendapatkan pemilihan fluida kerja yang tepat pada pipa kalor[39], beberapa kriteria diantaranya adalah:

- 1) Kecocokan antara *wick* dan material dinding
- 2) Mempunyai stabilitas termal yang baik
- 3) Mempunyai daya basah (*wettability*) yang baik dengan *wick*
- 4) Tekanan uap tidak terlalu tinggi atau tidak terlalu rendah sesuai dengan rentang temperatur kerja.
- 5) Mempunyai panas laten tinggi
- 6) Mempunyai konduktivitas termal tinggi
- 7) Mempunyai kekentalan rendah saat fasa uap maupun cairan
- 8) Mempunyai tekanan permukaan tinggi

Struktur sumbu kapiler dalam pipa kalor harus mampu mengalirkan cairan untuk mengalir dari kondensator menuju evaporator. Ketebalan lapisan sumbu kapiler mempengaruhi keseimbangan aliran dua fasa dalam pipa kalor karena tekanan kapilaritas dalam sumbu kapiler dibutuhkan untuk memompa cairan dari ujung yang satu ke ujung lainnya [42]. Apabila suatu kondisi melebihi dari batas kemampuan pipa kalormaka sumbu kapiler tidak mampu lagi untuk mengembalikan cairan menuju evaporator, hingga akhirnya evaporator mencapai titik paling kering yang menyebabkan evaporator kelebihan panas pada pipa kalor[43].

2.4.1 Perubahan Fase Aliran Fluida pada pipa kalor melingkar

Secara analisa matematis perpindahan panas dan massa untuk pipa kalor melingkar dapat digambarkan melalui gambar berikut:



Gambar 2. 11 sirkulasi fluida kerja

Dari gambar tersebut kita dapat mengetahui:

1. Perpindahan energi dalam bentuk uap lebih besar dibandingkan dengan dalam bentuk cair karena adanya penambahan panas laten pada saat perubahan fase cair menjadi uap.
2. Dibandingkan dengan cairan volume spesifik dan kecepatan uap relatif lebih besar akibatnya lebih banyak energi yang hilang pada aliran.
3. Uap yang dihasilkan dari perubahan fase cair mengakibatkan meningkatnya tekanan dalam Pipa kalor yang dapat membantu
4. meningkatkan kecepatan aliran uap pada Pipa Kalor.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Pembuatan Sumbu Kapiler

Rancangan pipa kalor melingkar menggunakan dua jenis Sumbu Kapiler yang berbeda, yaitu:

3.1.1 Pembuatan Sumbu Sintered Cu

material penyusun utama dari *sintered wick* adalah powder tembaga (Cu) produksi MHC Industrial CO.,LTD dengan ukuran $63\ \mu\text{m}$ yang dipanaskan di *furnace* hingga 920°C , mendekati temperatur lelehnya, ditahan selama 20 menit dan didinginkan secara alami dengan udara. Untuk memudahkan proses pemisahan antara cetakan pipa tembaga yang telah dipanaskan di *furnace* digunakan perekat Alumina berukuran $10\ \mu\text{m}$ pada cetakan sebelum proses *sintering*.

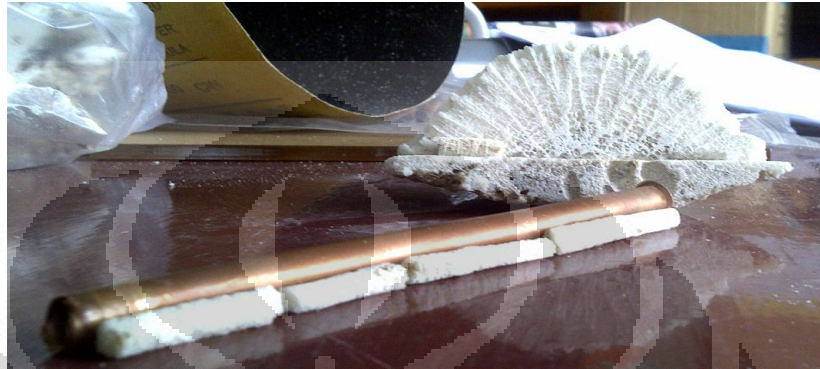


Gambar 3. 1 Bubuk Tembaga dan proses *sintering*

Setelah bubuk Tembaga di-*sintering*, dilakukan uji SEM di Departemen Metalurgi FTUI untuk melihat struktur *porous wick* dari *sintered Cu*

3.1.2 Pembuatan Sumbu Biomaterial

Coolaria dipotong hingga berbentuk kotak dan dilanjutkan dengan proses kikir. Coolaria dikikir menggunakan pisau kikir dan dilanjutkan dengan mengamplasnya hingga berdiameter kurang lebih 6.5 mm dan panjang 5 cm. Coolaria kemudian dimasukkan kedalam salah satu sisi pipa tembaga.



Gambar 3. 2 Coolaria dan Pipa tembaga

Struktur mikro dari Coolaria juga diamati di Departemen Metalurgi FTUI yang nantinya akan dibandingkan dengan kerja *sintered* Cu.

3.1.3 Pembuatan LHP

Elemen penyusun LHP antara lain :

1. Pipa Tembaga



Gambar 3. 3 Pipa Tembaga

Pipa tembaga berdiameter 8 mm dan pipa tembaga berdiameter 24 mm dengan ujung yang mengecil dengan diameter sebesar 10 mm dan panjang 115 mm dipilih untuk menjadi *container* dari fluida kerja. Masing – masing pipa memiliki ketebalan 0.85 mm dan keduanya disusun sehingga memiliki keliling 630 mm.

2. *Elbow* Kuningan

Setiap sudut dari pipa tembaga yang telah dipotong dengan panjang yang ditentukan dihubungkan menggunakan *elbow*. Digunakan empat buah elbow untuk setiap sudut pipa tembaga yang telah melalui proses *pitching* terlebih dahulu untuk memastikan tercipta kondisi sambungan yang sempurna.



Gambar 3. 4 Elbow Kuningan

3. Katup Nepel

Dua buah katup nepel. Satu digunakan untuk memasukan fluida kerja dan yang satunya untuk memastikan tidak ada udara yang terjebak didalam rangkaian pipa kalor melingkar ketika proses vakum.



Gambar 3. 5 Katup Nepel

Proses perangkaian dilanjutkan setelah pipa tembaga dan porous wick siap untuk digunakan. Setelah pipa tembaga dipotong dengan ukuran yang

ditentukan dan tertanam sumbu kapiler di dalam salah satu sisi pipa. Pipa dipitching agar tercipta sambungan sempurna dengan *elbow*. selanjutnya, pipa berdiameter 24 mm yang akan digunakan sebagai evaporator dan kondenser dilas dengan pipa tembaga melalui proses *brazing*. Dua buah katup nepel dilas di evaporator yang telah dibor terlebih dahulu dan pada kondenser yang telah di bor, dua pipa tembaga berdiameter 6 mm dilas, menjadi *double pipe*, sebagai saluran masuk dan keluar air.



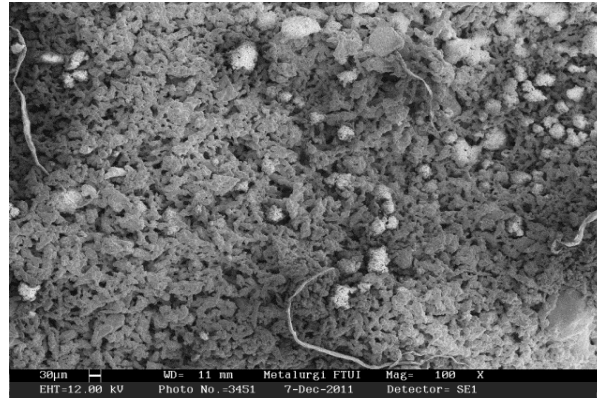
Gambar 3. 6 Proses *Brazing* pada bagian kondensor



Gambar 3. 7 Pipa Kalor Melingkar

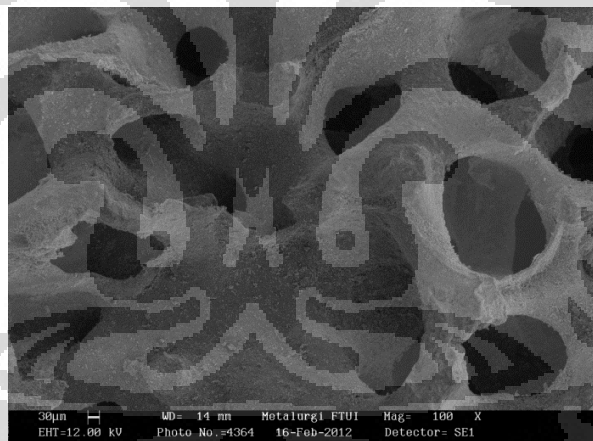
3.2 Karakteristik Sumbu Kapiler

Untuk mengetahui sifat dari sumbu kapiler yang digunakan, dilakukan SEM di Departemen Metalurgi Universitas Indonesia. Hasil SEM menunjukkan sumbu kapiler *sintered-Cu* memiliki pori-pori yang lebih rapat dibandingkan biomaterial untuk perbesaran yang sama. Menurut W liu [7] pori sumbu kapiler dengan ukuran besar dapat mengurangi hambatan aliran sehingga meningkatkan *capillary performance* dari sumbu kapiler



Gambar 3. 8 SEM *Sintered* Cu perbesaran 100 kali

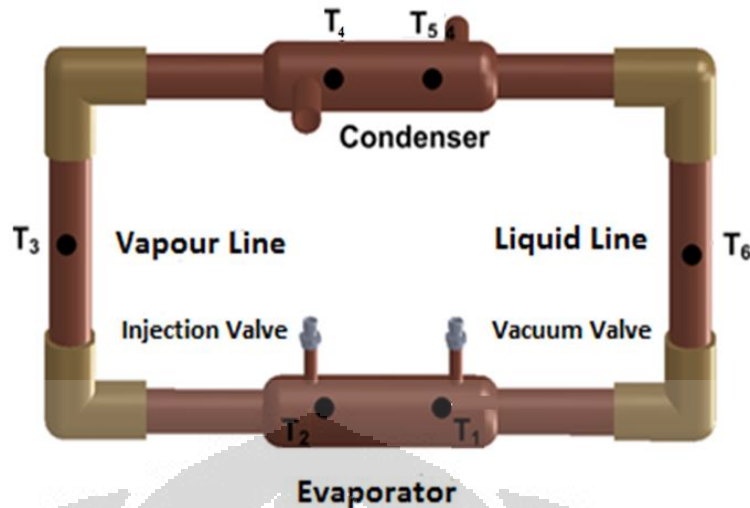
Pengukuran diameter pori berdasarkan hasil SEM dilakukan dengan skala yang diberikan pada hasil SEM. Diameter rata-rata pori untuk sumbu kapiler jenis *sintered* Cu sebesar $7.03\mu\text{m}$ dan untuk sumbu biomaterial sebesar $291\mu\text{m}$. Hasil kontras ini dapat dilihat dari hasil SEM.



Gambar 3. 9 SEM Biomaterial perbesaran 100 kali

3.3 Peletakan Termokopel dan heater

Seperti terlihat pada gambar . LHP terdiri dari 4 bagian yang berbeda, yaitu :



Gambar 3. 10 Skematik LHP

1. *Kondensor*, berfungsi untuk tempat pendinginan dengan *double pipe*.
2. *Evaporator*, sebagai tempat *heater* atau penerima panas yang berisi banyak fluida. Bagian ini memiliki luas penampang yang lebih besar daripada yang lain, yang berfungsi untuk tempatnya air sehingga tidak terjadi *dry out* pada evaporator karena banyaknya kalor yang masuk.
3. *Liquid Line*, pipa tembaga yang didalamnya berisi *full sintering wick* atau biomaterial untuk tempat dilauinya air.
4. *Vapour Line*, seperti *full wick sintering zone* namun bedanya zona ini kosong gunanya untuk tempat dilauinya uap (*vapor line*) dan tidak terdapat *sintered wick* atau biomaterial didalamnya.
5. *Injection valve*, katup yang digunakan untuk memasukan fluida kerja. Fluida kerja dimasukan dengan metode suntik.
6. *Vacuum valve*, katup yang digunakan untuk memvacum LHP.

Pada gambar 3.10 dapat dilihat skema pengujian pipa kalor melingkar, yang dilakukan dengan mengukur temperatur pada 6 buah titik pipa kalor melingkardengan posisi termokopel 4cm, 8cm, 21cm, 31cm, 43cm, 53cm dari titik 0 pada pipa kalor melingkar, 6 buah thermokopel tersebut terletak pada,

1. T1 : Evaporator 1 (4cm)
2. T2 : Evaporator 2 (8cm)
3. T3: Vapour Line (21cm)

4. T4: Condensor 1 (31cm)
5. T5: Condensor 2 (43cm)
6. T6: Liquid Line (53cm)

Lalu *heater* kabel dililitkan pada sisi *evaporator* tepatnya pada titik 1 sampai 2 yang terlihat pada gambar 3.11.



Gambar 3. 11 Pemasangan Pemanas elektrik.

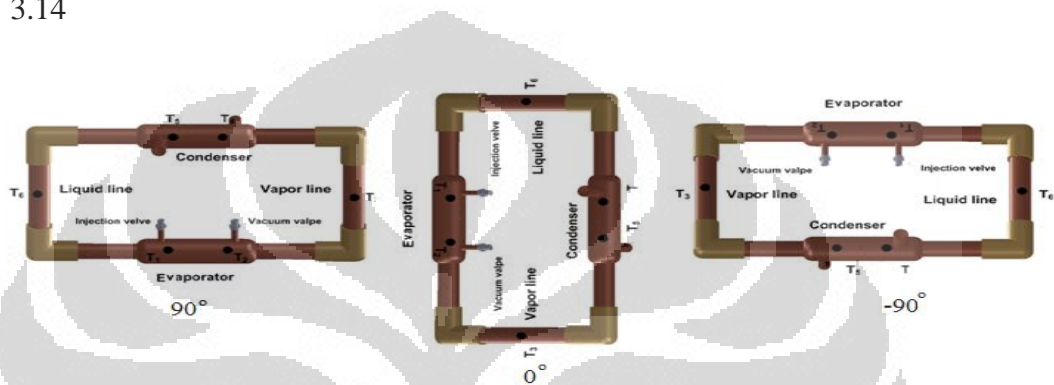
Lalu pada kondensor dengan menggunakan *double pipe* diberikan selang yang terhubung oleh *thermostatic circulating bath* yang temperaturnya dibuat konstan pada 25°C dengan laju aliran masa 1 l/m untuk menghindari kehilangan kalor pada bagian evaporator, adiabatik serta sebagian kondensor, pipa kalor melingkar diisolasi menggunakan *fiberglass wool* dan *polyurethane* box $30 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$ yang terlihat pada gambar 3.12.



Gambar 3. 12 isolasi menggunakan polyurethane box

3.4 Skematik Percobaan

Pengujian heat pipe dilakukan dengan variasi posisi evaporator untuk membuktikan pengaruh gravitasi terhadap pipa kalor melingkar. Dimana posisi 90° Menunjukkan posisi evaporator dibawah kondensor, posisi 0° Menunjukkan evaporator sejajar dengan kondensor, dan posisi -90° Menunjukkan posisi evaporator berada diatas kondensor, seperti pada gambar 3.14



Gambar 3. 13 Orientasi posisi evaporator 90° , 0° dan -90°

Pengujian dilakukan dengan menggunakan tiga jenis pipa kalor melingkar yang berbeda dari jenis penggunaan sumbu-nya yaitu pipa kalor melingkar dengan *sintered powder wick* (Cu) , batu karang, dan tanpa menggunakan wick. Pipa kalor melingkar diuji menggunakan fluida kerja air (aquades), dan nano fluida dari partikel nano Al_2O_3 . Metode pengisian fluida kerja menggunakan metode vakum, yakni fluida kerja dibekukan dengan merendam pipa kalor didalam CTB dan pipa kalor divakum dengan menggunakan pompa vakum sampai tekanan 30 cmHg atau 0.039 atm. Berikut ialah tabel variasi pengujian yang dilakukan pada pipa kalor melingkar.

Tabel 3. 1 Tabel Pengujian LHP

Loop Heat Pipe	Wick	Fluida	Daya	Posisi
Perbedaan Fluida	Sintered Cu	Air	10,20,30 W	90°
	Biomaterial	Air	10,20,30 W	90°

Perbedaan Posisi Evaporator	Tanpa Wick	Air	10,20,30 W	90°
	Sintered Cu	Air	10,20,30 W	90°, 0 , dan -90
	Biomaterial	Air	10,20,30 W	90°, 0 , dan -90
	Tanpa wick	Air	10,20,30 W	90°, 0 , dan -90

Pengisian fluida kerja pada pipa kalor melingkar dilakukan dengan metode suntik ,sebelumnya pipa kalor melingkar diisi dengan menggunakan fluida kerja 60% dari volume total pipa kalor melingkar. Besar pengisian volume fluida kerja menjadi variabel yang dijaga konstan pada setiap pengambilan data untuk memperoleh distribusi temperatur yang seragam di setiap zona pengukuran. Selanjutnya Fluida yang telah disuntikan akan dibekukan dengan bantuan CTB yang di *setting* untuk mendinginkan air radiator hingga bertemperatur -5° C. Selanjutnya pipa kalor didinginkan selama 20 menit hingga fluida yang disuntikan membeku. Lalu dilakukan metode vakum untuk menghisap udara yang terjebak didalam pipa kalor. Dimana disini pipa kalor divakum menggunakan pompa vakum hingga tekanan dalam pipa kalor melingkar mencapai tekanan 30 cmHg atau dalam waktu sekitar 15 menit.



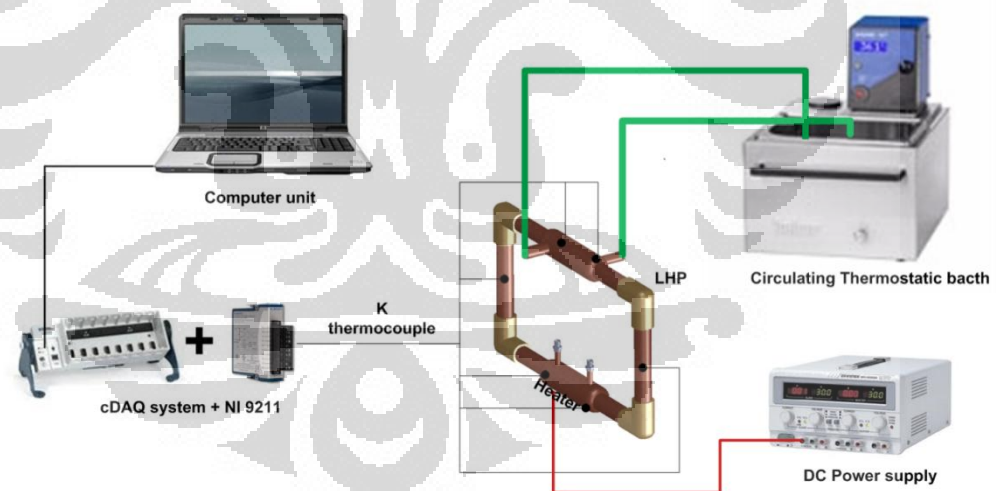
Gambar 3. 14 Proses Vakum

Bagian kondensor dibiarkan bersentuhan secara langsung dengan udara luar pada temperatur ruangan $\pm 30^{\circ}$ C untuk menghubungkan kondenser dengan CTB.

1. Pemasangan termokopel pada titik – titik pengukuran. Dua termokopel dipasang pada sisi evaporator, dua termokopel dipasang pada sisi adiabatik, dan dua termokopel dipasang pada kondensor.

2. *Heater* fleksibel digulung di sisi luar bagian evaporator pipa kalor melingkar, lalu ditutup menggunakan aluminium foil.
3. Meletakkan sisi evaporator, saluran uap, dan saluran air dari pipa kalor melingkar ke dalam polyurethane dan mengisi segala celah dengan fiberglass wool.
4. Pemasangan selang pada sisi kondensor yang dihubungkan ke CTB.
5. Menghubungkan kabel *heater* dengan *power supply*.
6. Ujung termokopel yang lainnya dihubungkan dengan data akuisisi National Instruments NI 9211.
7. Menghidupkan CTB dan ditunggu hingga temperatur 25°C .
8. Menghubungkan Data akuisisi dengan computer.
9. Menghidupkan *power supply* sebesar 10 W, 20 W, dan 30 W.
10. Pengambilan data dilakukan.

Pengujian dilakukan seperti yang terlihat pada gambar 3.13, Peralatan pendukung dibutuhkan agar pengujian dan pengambilan data dapat dilakukan



Gambar 3. 15 skematik pengujian pipa aklor melingkar

peralatan tersebut berupa peralatan listrik seperti *DC power supply*, termokopel yang berfungsi sebagai sensor temperatur, dan data akuisisi. Daya (Q) dari *DC-power supply* divariasikan pada 10 Watt, 20 Watt dan 30 Watt. Data temperatur yang terukur oleh termokopel jenis K pada beberapa posisi tersebut dihubungkan dan diproses menggunakan data *acquisition* NI cDAQ-9172 dan

modul NI 9211 dengan pengolah data berupa *software Labview 8.5*. Dalam melakukan pengujian alat Pipa kalor melingkar digunakan satu unit *circulating thermostatic bath* (CTB) untuk mengatur temperatur fluida kerja yang berfungsi sebagai pendinginan dan menyerap kalor di kondensor dalam pengujian double pipe. Pada CTB terdapat beberapa komponen seperti bak penampung air, *temperature controller*, pompa, pemanas elektrik dan *chiller*.

Tabel 3. 2 Spesifikasi CTB

Operating temperature range	-20 to 200 C
Temperature adjustment	digital
Temperature indication	digital
Heating power	1 kW
Cooling power	0,2 kW
Refrigeration machine	refrigerant
Refrigerant	R290
Pressure pump	0.2 bar
Bath volume	295x193 mm
Width bath opening WxD	150 mm
Bath depth	265 mm
Height of bath opening	350x560x420 mm
Overall dimensions WxDxH	28 kg

Untuk sumber tenaga bagi pemanas elektrik kabel yang membutuhkan arus listrik DC digunakan satu unit *power supply* DC dengan tegangan maksimum 30 Volt DC dan arus maksimum 20 Amp.

Tabel 3. 3 Spesifikasi *power supply*

Brand	BK Precision
Model	9123A
Input Voltage	220 VAC - 240 V AC \pm 10 % 50 Hz
Output Voltage	0 - 30 V
Output Current	0 - 20 V

Dimensi	260 x 160 x 340 mm
----------------	--------------------



Gambar 3. 16 *power supply*

Dalam pengambilan data digunakan data akuisisi untuk membaca termokopel tipe K yang digunakan. Data akuisis yang digunakan pada pengujian ini adalah NI 9213 dengan enam belas *channel* termokopel produksi *National Instruments*.

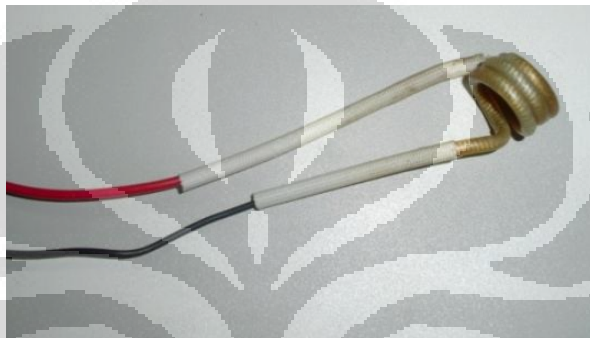


Gambar 3. 17 Data akuisisi NI 9213 dan Chasis NI cDAQ-9172

Data akuisisi ini menggunakan *software* sebagai *interface* yang dioperasikan dengan menggunakan sistem operasi windows seven dengan menggunakan *software* Lab View untuk pengambilan data.

Modul NI 9213 dipasang pada salah satu port yang terdapat pada sasis cDAQ 9172, dari sasis ini akan dihubungkan ke komputer melalui kabel USB (*universal serial bus*) yang selanjutnya dengan bantuan *software* Lab View akan menampilkan hasil pembacaan temperatur dari termokopel. Pada pengujian ini termokopel yang digunakan adalah termokopel tipe K, dengan material pembentuk Kromel (Nikel – Kromium) dan Alumel (Nikel – Aluminium), Karena

output dari termokopel berupa tegangan (mV), maka untuk membaca data masukan digunakan data akuisisi. *Heater* (pemanas elektrik) digunakan untuk menghasilkan beban panas pada area evaporator benda uji. Pemanas yang digunakan adalah fleksibel *heater* yang bentuknya menyerupai kabel dimana hal ini digunakan untuk menyesuaikan bentuk evaporator yang berbentuk silinder, sehingga panas yang diterima oleh benda uji dapat optimum. Hasil uji menunjukkan bahwa *heater* dengan panjang 1 meter dan besar daya 10 W dapat menghasilkan panas hingga 120°C .



Gambar 3. 18 pemanas elektrik

Untuk mengisolasi kalor yang dilepas pipa kalorsaat pengujian digunakan *polyurethane*. Material dengan konduktivitas rendah ($0,12 \text{ W/m-K}$) dibentuk menjadi balok dengan dimensi $30\text{cm} \times 20\text{cm} \times 15\text{cm}$. Kalor dari pipa kalorsaat pengujian sebisa mungkin diisolasi agar tidak lepas ke lingkungan.



Gambar 3. 19 Material *polyurethane*

Pada celah-celah sambungan *polyurethane* digunakan *glasswool* untuk memperkecil kehilangan panas. Penggunaan isolator *polyurethane* yang kaku

mengakibatkan banyaknya celah. Celah ini dapat memungkinkan banyak panas yang keluar dan mengurangi keakurasian data yang diperoleh.



Gambar 3. 20 *Glasswool*

Pompa vakum digunakan untuk membuang udara yang terjebak yang ada di dalam pipa kalor sehingga kondisi tekanan didalam pipa kalor dibawah tekanan atmosfer (30 cmhg) atau disebut vakum.



Gambar 3. 21 Pompa Vakum

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Distribusi temperatur pada pipa kalor melingkar.

Pengujian performa pipa kalor melingkar melalui enam titik pengukuran yang telah dibahas pada bab 3, disertakan pada perbedaan temperatur pada evaporator dan kondensor pada kondisi vakum dan tidak vakum, perbedaan orientasi evaporator dan juga disertakan dengan hambatan termal pipa kalor melingkar pada evaporator terhadap kondensor dan saluran air. Pengambilan data dilakukan rata-rata selama 100-120 menit sampai temperatur di seluruh titik pengukuran mencapai kondisi tunak. Data diambil sebanyak 1 data perdetik. Data kemudian diolah dan dianalisa menggunakan program *Microsoft Excel* dan *Origin Lab*.

4.1.1 Perbedaan penggunaan sumbu kapiler

Dari pengujian kinerja pipa kalor melingkar dengan fluida air terhadap perbedaan tipe sumbu kapiler, melalui pengukuran pada beberapa titik di daerah evaporator, adiabatik, dan kondensor didapatkan rata-rata temperatur pada titik-titik tersebut seperti tabel berikut:

Tabel 4. 1 Temperatur pada beberapa titik pipa kalor melingkar dengan kalor masukan 10 Watt dalam keadaan vakum.

Daya	Temperatur (C)	Sintered Cu	Biomaterial	Tanpa wick
10 W	T1	49.42	46.57	55.19
	T2	52.08	47.29	58.86
	T3	32.29	28.09	34.23
	T4	26.27	23.72	27.24
	T5	25.04	22.53	26.02
	T6	31.35	26.31	32.58
$\Delta T (T_e - T_c)$	(C)	24.73	23.8	30.39
Hambatan termal	(C/W)	2.47	2.38	3.04

Tabel 4. 2 Temperatur pada beberapa titik pipa kalor melingkar dengan kalor masukan 10 Watt dalam keadaan non vakum.

Daya	Temperatur (C)	Sintered Cu	Biomaterial
10 W	T1	56.57	52.13
	T2	59.2	53.47
	T3	35.23	35.46
	T4	26.3	26.08
	T5	25.7	25.55
	T6	35	31.61
$\Delta T (T_e - T_c)$	(C)	30.27	26.44
Hambatan termal	(C/W)	3.027	2.644

Tabel 4. 3 Temperatur pada beberapa titik pipa kalor melingkar dengan kalor masukan 20 Watt dalam keadaan vakum.

Daya	Temperatur (C)	Sintered Cu	Biomaterial	Tanpa wick
20 W	T1	73.91	70.19	89.39
	T2	75.24	72.03	95.94
	T3	42.31	39.58	46.43
	T4	28.49	27.91	32.08
	T5	28.33	25.88	29.27
	T6	37.16	31.54	45.84
$\Delta T (T_e - T_c)$	(C)	46.12	44.23	60.5
Hambatan termal	(C/W)	2.30	2.22	3.01

Tabel 4. 4 Temperatur pada beberapa titik pipa kalor melingkar dengan kalor masukan 20 Watt dalam keadaan non vakum

Daya	Temperatur (C)	Sintered Cu	Biomaterial
20 W	T1	88.84	84.41
	T2	90.41	86.3
	T3	49.32	45.38
	T4	30.45	30.53
	T5	29.12	29.73
	T6	45.33	35.31
$\Delta T (T_e - T_c)$	(C)	58.37	52.22
Hambatan termal	(C/W)	2.96	2.61

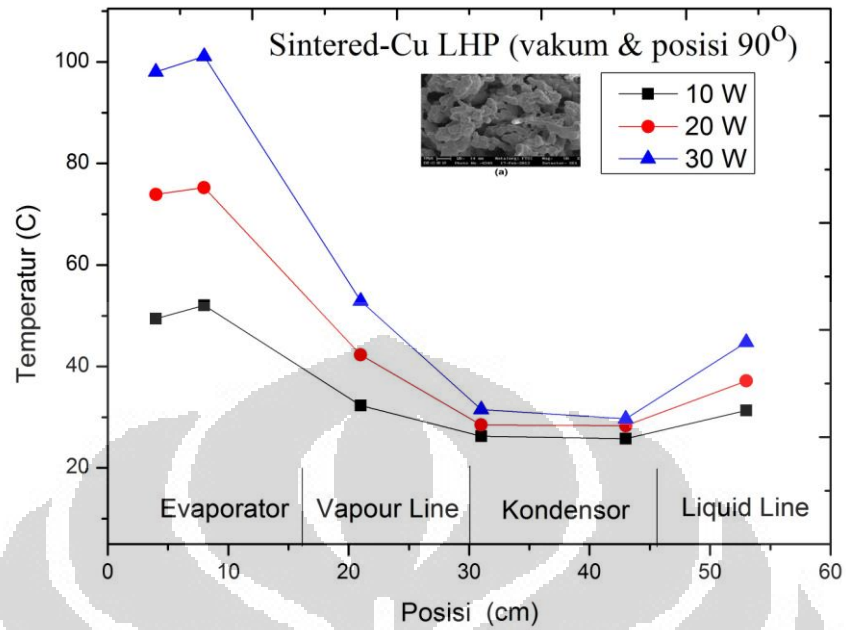
Tabel 4. 5 Temperatur pada beberapa titik pipa kalor melingkar dengan kalor masukan 30 Watt dalam keadaan vakum

Daya	Temperatur (C)	Sintered Cu	Biomaterial	Tanpa <i>wick</i>
30 W	T1	98.03	94.34	104.5
	T2	101.11	97.43	114.05
	T3	52.89	48.95	78.78
	T4	31.48	29.74	37.24
	T5	29.68	28.99	37.25
	T6	44.79	37.53	54.18
$\Delta T (T_e - T_c)$	(C)	68,99	66.51	72.1
Hambatan termal	(C/W)	2.28	2.2	2.40

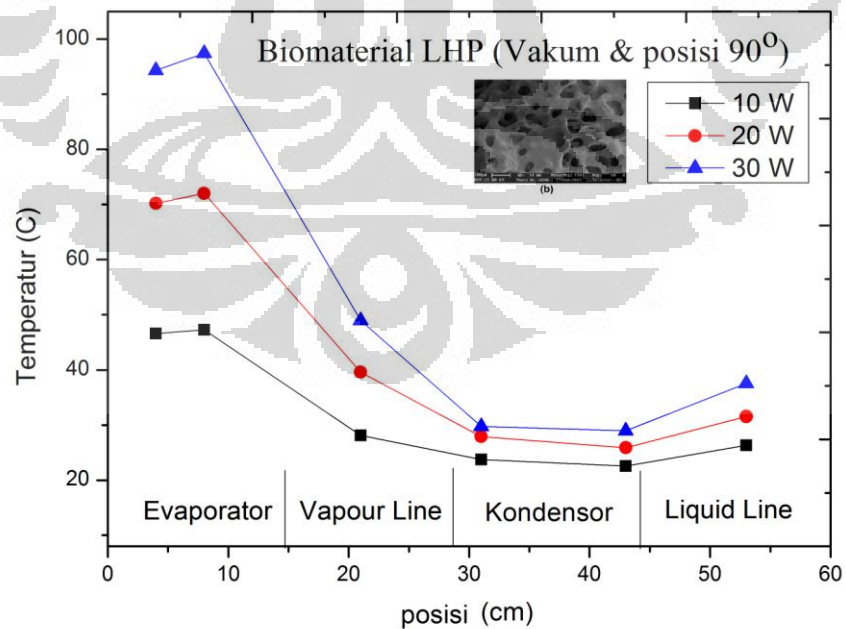
Tabel 4. 6 Temperatur pada beberapa titik pipa kalor melingkar dengan kalor masukan 30 Watt dalam keadaan non vakum

Daya	Temperatur (C)	Sintered Cu	Biomaterial
30 W	T1	102.44	101.02
	T2	109.9	104.78
	T3	54.36	60.03
	T4	32.38	32.41
	T5	28.62	29.38
	T6	56.2	70.71
$\Delta T (T_e - T_c)$	(C)	74.7	72.005
Hambatan termal	(C/W)	2.49	2.4

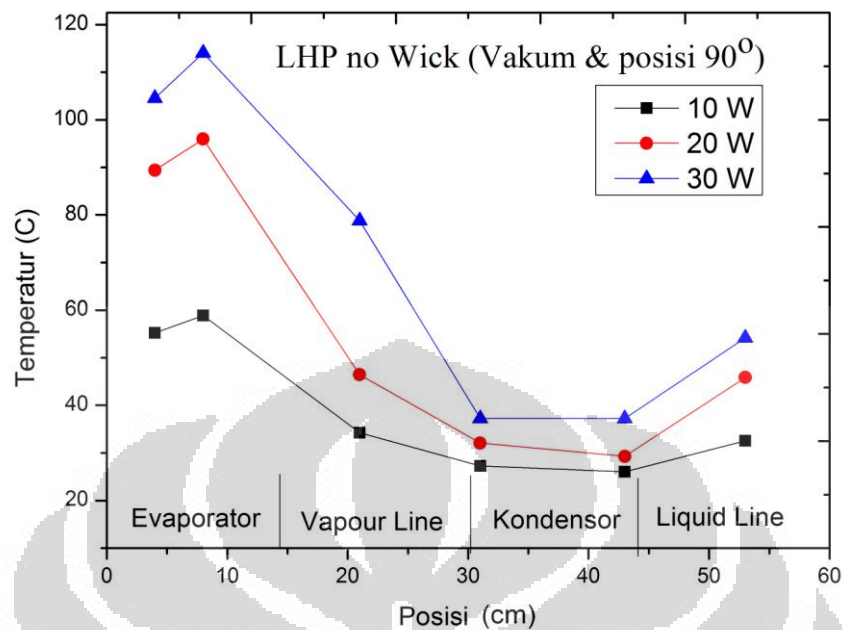
Dari data pada tabel diatas dan juga pada Gambar 4.1, 4.2 dan 4.3, menunjukkan distribusi temperatur pada pipa kalor melingkar dengan menggunakan biomaterial dan *Sintered-Cu* sebagai sumbu kapiler dan juga tanpa sumbu kapiler dengan daya masukan (Q) 10 Watt, 20 Watt dan 30 Watt. Pembebanan atau pemberian kalor (Q) pada evaporator berpengaruh terhadap distribusi temperatur pada pipa kalor melingkar. Penambahan pembebanan menyebabkan temperatur evaporator meningkat pada pipa kalor melingkar untuk seluruh jenis sumbu kapiler. Kenaikan temperatur sangat signifikan pada termokopel yang berada di bagian evaporator dimana terdapat pemanas yang mendapat pembebanan.



Gambar 4.1 Distribusi temperatur pipa kalor melingkar, sumbu kapiler *sintered*-Cu dengan masukan daya $Q=10, 20, 30$ Watt



Gambar 4.2 Distribusi temperatur pipa kalor melingkar, sumbu kapiler tipe Biomaterial dengan masukan daya $Q=10, 20, 30$ Watt



Gambar 4. 3 Distribusi temperatur pipa kalor melingkar, tanpa sumbu kapiler dengan masukan daya $Q=10, 20, 30$ Watt

Distribusi temperatur pada pipa kalor melingkar dengan menggunakan *sintered-Cu* dan biomaterial sebagai sumbu kapiler dan tanpa sumbu kapiler dengan daya masukan (Q) 10Watt , 20 Watt dan 30 Watt. Menunjukkan profil temperatur yang menurun dari daerah evaporator ke daerah *liquid line* dan kondensor dan mengalami kenaikan ketika memasuki *liquid line*, hal ini disebabkan terjadinya konduksi dari evaporator. Pipa kalor melingkar menurun dari posisi evaporator sampai pada daerah kondensor dan naik pada bagian *liquid line*, karena adanya proses konduksi seperti yang terlihat pada grafik diatas. Temperatur pipa kalor melingkar dengan sumbu kapiler biomaterial memiliki temperatur lebih rendah dibandingkan pada bagian evaporator dibandingkan dengan *sintered-Cu*. Terlihat perbedaan temperatur terbesar pada kondisi daya masukan sebesar 30 W pada evaporator sebesar 6.47° C antara pipa kalor melingkar dengan sumbu kapiler *sintered-Cu* dan tanpa sumbu kapiler. dan sebesar 8.16° C antara pipa kalor melingkar dengan sumbu kapiler biomaterial dan tanpa sumbu kapiler pada kondisi vakum. Hasil ini menunjukkan bahwa biomaterial dengan porositas lebih besar menghasilkan *capillary pumping rate* yang lebih besar sehingga fluida kerja tersirkulasi dengan baik dalam mentransfer panas dari

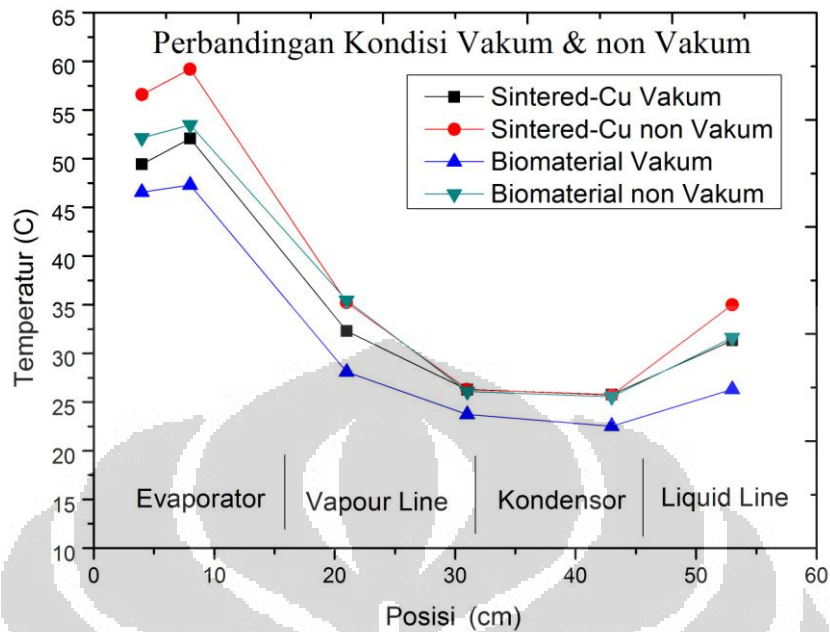
evaporator ke kondensor. Permeabilitas yang baik juga dihasilkan dengan nilai porositas yang besar [16]. Selain itu, W.Liu menyatakan [10] semakin besar pori dari sumbu kapiler, semakin kecil hambatan aliran yang dihasilkan dan akan meningkatkan transfer fluida kerja didalam pipa kalor melingkar. Pernyataan ini sesuai dengan hasil pengukuran diameter pori yang dilakukan dari hasil SEM sumbu kapiler, dimana diameter rata-rata pori untuk sumbu kapiler *sintered-Cu* sebesar 7.03 μm dan sumbu biomaterial sebesar 291 μm .

4.1.2 Perbedaan Kondisi vakum dan non-vakum

Pengambilan data dilakukan dengan dua macam kondisi yaitu keadaan vakum dan non-vakum. Proses vakum telah seperti yang telah dijelaskan di bab 3 bertujuan untuk mengeluarkan oksigen yang terperangkap di dalam pipa kalor melingkar. Sehingga pipa kalor melingkar hanya berisi air dengan persentase 60% dari volum total pipa kalor melingkar. Dari hasil pengambilan data, terlihat pada gambar 4.4 dan tabel 4.4 bahwa kondisi vakum menunjukkan penurunan temperature pada sisi evaporator dan titik pengukuran lainnya untuk setiap jenis sumbu kapiler yang digunakan.

Tabel 4. 7 Distribusi temperatur pipa kalor melingkar dengan kondisi vakum dan non vakum
Q=10Watt

Daya	Temperatur	Sintered Cu (vacuum)	Sintered-Cu (non-vacuum)	Biomaterial (vacuum)	Biomaterial (non-vacuum)
10 W	T1	49.42	56.57	46.57	52.13
	T2	52.08	59.2	47.29	53.47
	T3	32.29	35.23	28.09	35.46
	T4	26.27	26.3	23.72	26.08
	T5	25.77	25.7	22.53	25.55
	T6	31.35	35	26.31	31.61
$\Delta T(T_e - T_c)$ ($^{\circ}\text{C}$)		24.70	30.27	23.80	26.44
Hambatan termal ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)		2.47	3.027	2.38	2.64



Gambar 4. 4 Distribusi temperatur pipa kalor melingkar sintered Cu dengan daya masukan $Q=10\text{Watt}$

Pipa kalor melingkar di vakum hingga bertekanan 30 cmhg, dibawah tekanan atmosfer sehingga Fluida di dalam pipa kalor melingkar mendidih pada temperatur dibawah 100°C , lebih cepat dari keadaan non-vakum. Oleh karena itu, sirkulasi dari fluida kerja lebih cepat berjalan pada kondisi vakum dibandingkan kondisi non-vakum. Sirkulasi fluida kerja dimulai ketika gaya kapilaritas yang dihasilkan sumbu kapiler lebih besar daripada total penurunan tekanan sistem [10]

4.1.3 Perbedaan posisi evaporator

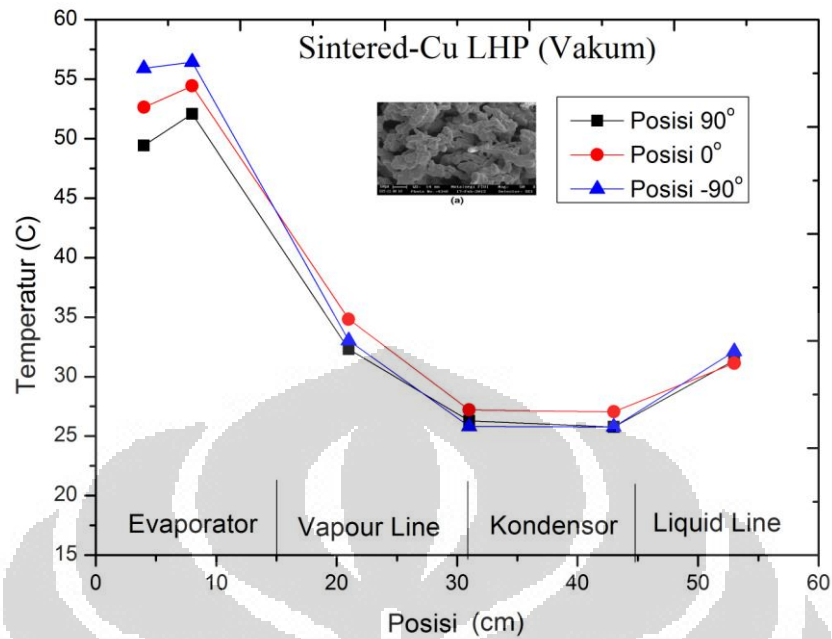
Dari pengujian kinerja pipa kalor melingkar terhadap pengaruh gravitas dengan menggunakan fluida air dan tipe kondensor *double pipe*, melalui pengukuran pada beberapa titik di daerah evaporator, adiabatik, dan kondensor didapatkan rata-rata temperatur pada titik-titik tersebut seperti tabel berikut.

Tabel 4. 8 Temperatur pada beberapa titik pipa kalor melingkar dengan kalor masukan 10 Watt

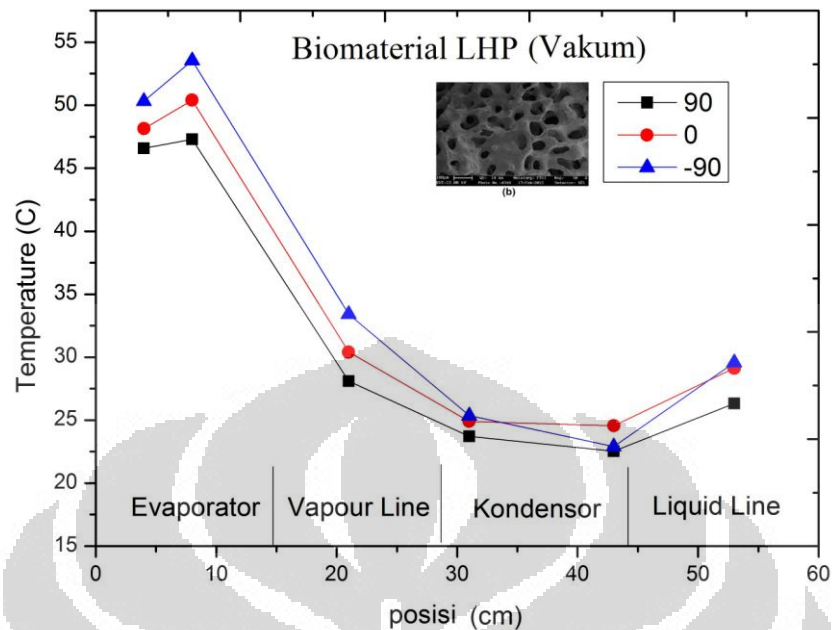
Daya	Temperatur	Posisi 90	Posisi 0	Posisi -90
10 W (Sintered-Cu)	T1	49.42	52.79	55.91
	T2	52.08	54.14	56.45
	T3	32.29	34.40	33.03
	T4	26.27	27.2	25.81
	T5	25.77	27.04	25.78
	T6	31.35	31.13	32.11
$\Delta T (T_e - T_c)$	($^{\circ}C$)	24.70	24.915	27.885
Hambatan termal	($^{\circ}C/W$)	2.47	2.4915	2.7885

Tabel 4. 9 Temperatur pada beberapa titik pipa kalor melingkar dengan kalor masukan 10 Watt

Daya	Temperature	Posisi 90	Posisi 0	Posisi -90
10 W (Biomaterial)	T1	46.57	48.14	50.31
	T2	47.29	50.39	53.54
	T3	28.09	30.4	33.41
	T4	23.72	24.91	25.35
	T5	22.53	24.56	22.89
	T6	26.31	29.13	29.57
$\Delta T (T_e - T_c)$		23.80	24.73	26.605
Hambatan termal		2.38	2.473	2.660



Gambar 4.5 Temperatur pada beberapa titik pipa kalor melingkar dengan kalor masukan 10 Watt. Pengaruh gravitasi sangat berpengaruh pada performa pipa kalor melingkar [43]. Seperti telah disebutkan di bab 3, posisi 90° diibaratkan dengan posisi dimana kondensor berada di atas evaporator secara vertikal, posisi 0° adalah posisi dimana kondensor berada sejajar dengan evaporator secara horizontal, dan posisi -90° ialah posisi dimana kondensor berada dibawah evaporator secara vertikal.

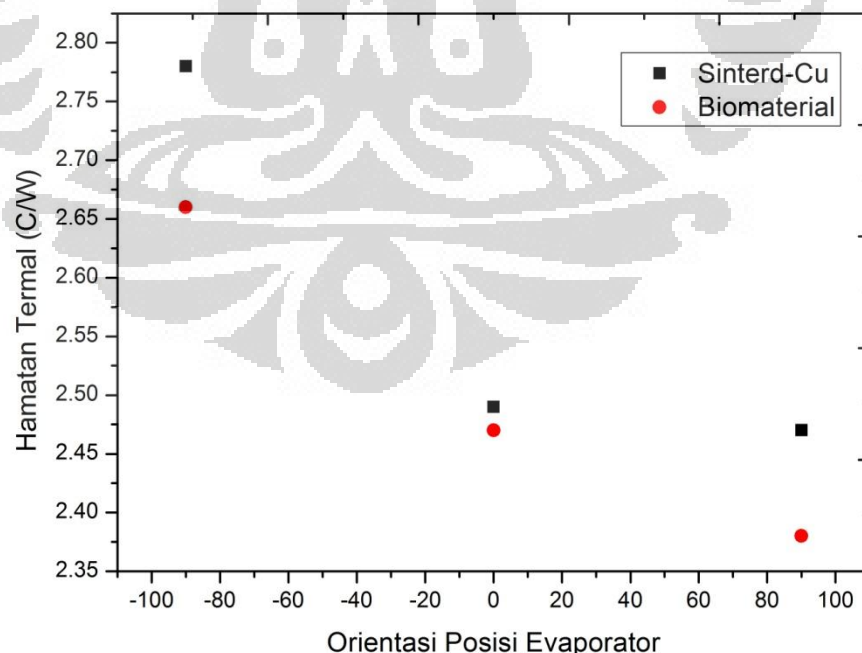


Gambar 4. 6 Temperatur pada beberapa titik pipa kalor melingkar dengan kalor masukan 10 W

Dari data pada tabel 4.4 dan 4.5 diatas dan pada gambar 4.5 dan 4.6 menunjukkan distribusi temperatur pada pipa kalor melingkar dengan variasi sudut atau pengaruh terhadap gravitasi pada daya (Q) 10 Watt. Seperti yang terlihat pada grafik tersebut, temperatur pipa kalor melingkar pada bagian evaporator, dengan kondensor sudut 90° memiliki temperatur lebih rendah dibandingkan dengan sudut 0° dan -90° . Ini membuktikan bahwa gravitasi masih sangat berpengaruh pada performa pipa kalor melingkar, pada posisi 90° fluida sepenuhnya berada di evaporator yang menerima panas sehingga panas yang diterima langsung dapat direduksikan dengan baik dan fluida yang menguap akan naik menuju kondensor melalui jalur uap yaitu pada daerah kosong tanpa sumbu kapiler, lalu pada kondensor, uap terkondensasi menjadi fluida dan akan menuju ke jalur *liquid* atau pada daerah *full wick sintering* karena adanya kapilaritas.

Namun pada kondisi 0° fluida terdapat diseluruh bagian jadi panas tidak dapat tereduksi dengan baik karena pada evaporator hanya terdapat sebagian fluida yang berfungsi sebagai penerima panas, lalu juga pada jalur uap atau daerah

kosong dan pada sisi kondensor juga terdapat fluida yang dapat menghalangi laju uap menuju kondensor sehingga perbedaan temperatur rata-rata bagian evaporator posisi 0° terhadap posisi 90° sebesar 3.1°C untuk sumbu biomaterial dan 3.21°C untuk sumbu *sintered* Cu. Lalu pada kondisi -90° fluida terdapat di daerah kondensor yang fungsinya mengkondensasi uap namun pada kondisi ini diisi oleh air dan pada daerah evaporator yang berfungsi menerima kalor dengan penghantar fluida namun hanya sedikit fluida ataupun tidak ada fluida yang terdapat di sisi evaporator yang mampu menyerap panas sehingga skema pipa kalor melingkar pun tidak terjadi sehingga perbedaan temperatur rata-rata bagian evaporator terhadap posisi 90° sebesar 6.25°C untuk sumbu biomaterial dan 6.5°C untuk sumbu *sintered* Cu. Hal ini mengindikasikan bahwa pengaruh gravitasi sangat mempengaruhi performa pipa kalor melingkar dalam mereduksi temperatur saat evaporator bekerja seperti yang dikatakan oleh Ji Li, Daming Wang [43]. Data dari tabel juga menunjukkan seiring perubahan posisi, hambatan thermal dari pipa penukar kalor pun semakin membesar seiring perubahan posisi. Posisi 90° menunjukkan nilai terbaik dibandingkan sudut orientasi lainnya.



Gambar 4. 7 perubahan hambatan thermal terhadap posisi pipa kalor melingkar

4.2 Hambatan Thermal

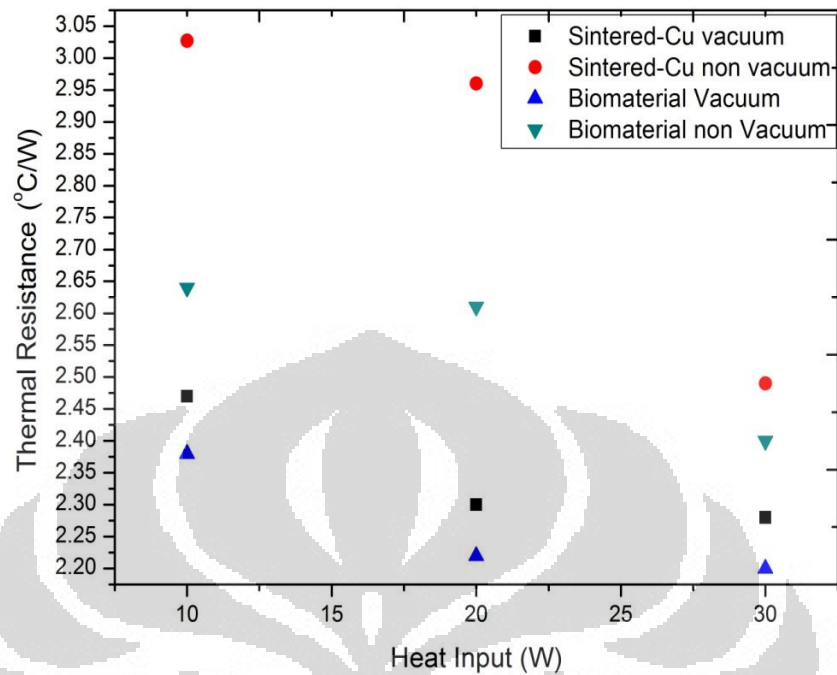
Hambatan termal pada pipa kalor melingkar dihitung berdasarkan kondisi temperatur pada bagian evaporator dengan temperatur pada daerah kondensor terhadap pembebanan yang diberikan pada pipa kalor melingkar.

$$R = \Delta T(T_e - T_c) / Q \text{ } ^\circ\text{C/Watt}$$

Gambar 4.8 tabel 4.10 memperlihatkan bahwa hambatan termal pada pipa kalor melingkar dengan sumbu kapiler *Sintered-Cu* lebih besar dibandingkan dengan sumbu kapiler biomaterial dan juga kondisi vakum menghasilkan hambatan thermal yang lebih kecil nilainya dibandingkan keadaan tanpa vakum. Hambatan termal yang lebih kecil menyebabkan reduksi panas pada bagian evaporator menjadi lebih besar. Karena hambatan termal pipa kalor melingkar dengan sumbu biomaterial lebih kecil dibandingkan sumbu *sintered-Cu* mengakibatkan reduksi panas pada bagian evaporator yang dilakukan oleh sumbu biomaterial lebih bagus dibandingkan dengan sumbu sintered.

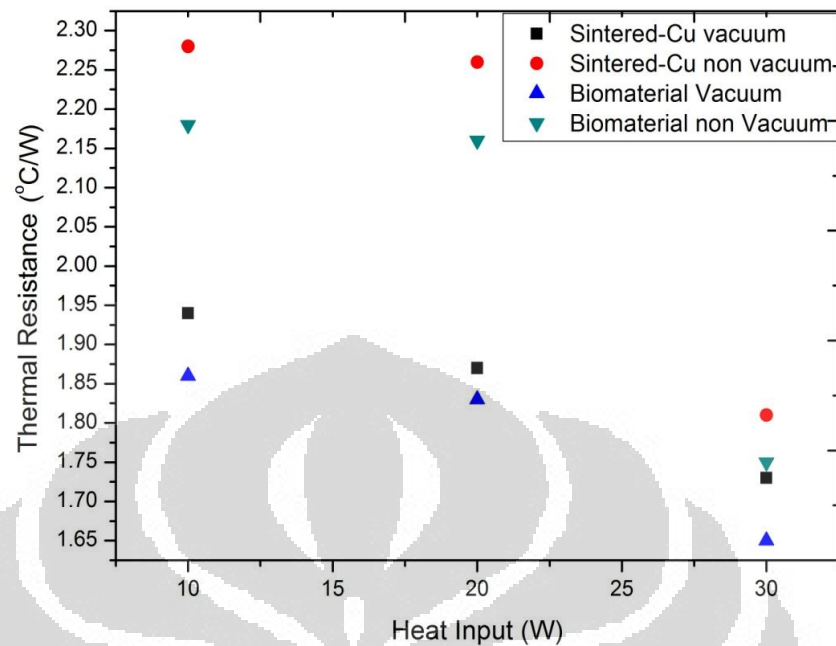
Tabel 4. 10 Hambatan thermal antara evaporator dan kondensor

Daya (W)	Sintered-Cu (Vacuum)	Sintered Cu (C/W)	Biomaterial (Vacuum)	Biomaterial (C/W)
10	2.47	3.027	2.38	2.64
20	2.3	2.96	2.22	2.61
30	2.28	2.49	2.2	2.40



Gambar 4. 8 Hambatan Thermal pipa kalor melingkar antara evaporator dan kondensor dengan kalor masukan 10,20 dan 30 Watt

Lalu seperti kita lihat pada gambar 4.7 perbedaan hambatan termal terhadap Daya masukan mengalami penurunan seiring kenaikan daya masukan dari pemanas.. Selanjutnya, Hambatan termal pada pipa kalor melingkar dihitung berdasarkan selisih kondisi temperatur pada bagian evaporator dengan temperatur pada bagian jalu air (*Liquid Line*) terhadap pembebanan yang diberikan pada pipa kalor melingkar. Gambar 4.8 dan tabel 4.7 menunjukkan hasil perhitungan hambatan thermal



Gambar 4. 9 Hambatan Thermal pipa kalor melingkar dengan kalor masukan 10,20 dan 30 Watt

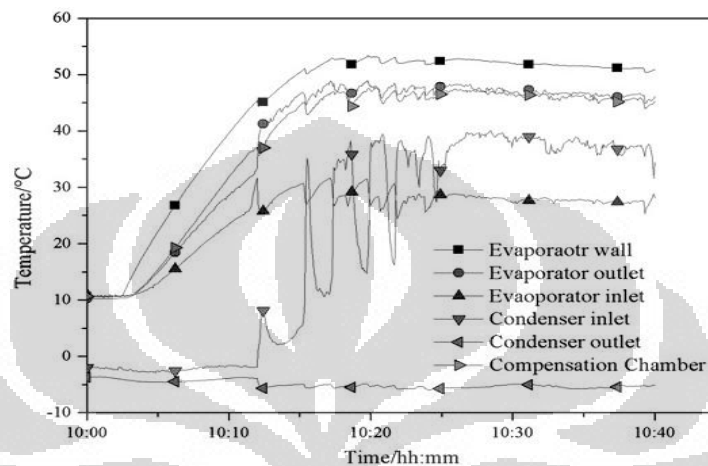
Tabel 4. 11 Hambatan thermal antara evaporator dan saluran air

Daya (W)	Sintered-Cu (Vacuum)	Sintered Cu (C/W)	Biomaterial (Vacuum)	Biomaterial (C/W)
10	1.94	2.28	1.86	2.18
20	1.87	2.26	1.83	2.16
30	1.73	1.81	1.65	1.75

Terlihat bahwa semakin besar daya masukan semakin besar pula nilai hambatan thermal yang dihasilkan Dan juga kondisi *vacuum* memberikan hasil yang lebih baik pada perhitungan hambatan thermal dibandingkan dengan kondisi tanpa *vacuum*. Hal ini sesuai dengan perumusan dari kerja pipa penukar kalor.

ZhiChun Liu [7] dalam penelitiannya yang berjudul “*operational characteristics of flat type loop heat pipe with biporous wick*” dengan pipa kalor melingkar dengan tembaga sebagai material penyusun saluran air dan uap, perak

sebagai material evaporator dengan jenis kondenser *double pipe* dengan fluida kerja campuran air dan *ethylene glycol* yang beroperasi pada temperatur -10°C , dan menggunakan sumbu *biporous* dengan material penyusun utama nikel. Hasil penelitian zhichun liu pada pipa kalor melingkar dengan daya masukan 20 W ditunjukkan pada gambar 4.10



Gambar 4. 10 Distribusi temperatur pada penelitian ZhiChun Liu [7]

Distribusi temperatur pada evaporator pipa kalor melingkar terlihat mencapai nilai terbesar sekitar 55°C . Hal ini menunjukkan hasil lebih baik dibandingkan pipa kalor melingkar dengan sumbu *sintered-Cu* dan biomaterial dengan kondensor menggunakan fluida kerja air. Temperatur pada sumbu *sintered-Cu* dengan daya masukan 20 W adalah sebesar 75.24°C dan pada sumbu biomaterial 72.03°C . Terdapat perbedaan temperatur evaporator sebesar 20.24°C dan 17.01°C . Hal ini disebabkan karena zhichun liu dalam penelitiannya menggunakan kondensor dengan fluida kerja yang bertemperatur lebih rendah dan juga sumbu *biporous* yang dinyatakan memiliki porositas lebih baik dibandingkan sumbu *monoporous*.

BAB V

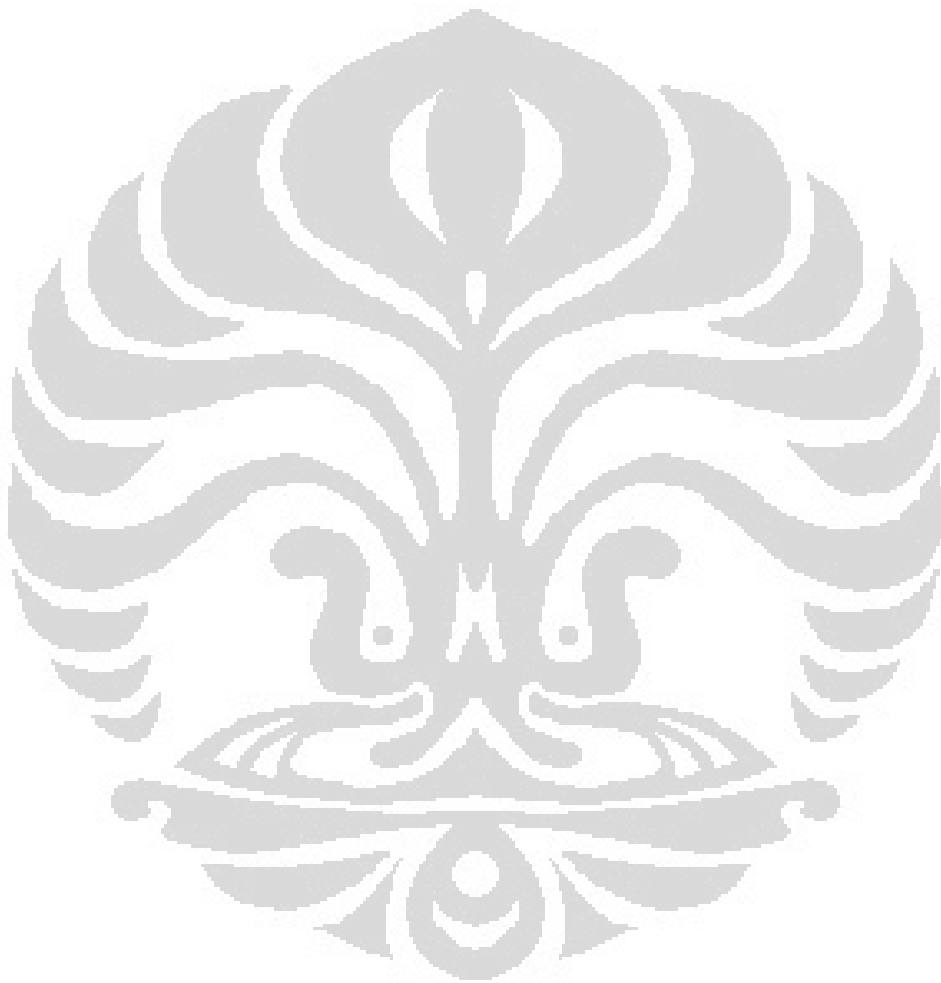
KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

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

1. Perbedaan penggunaan jenis sumbu kapiler sangat berpengaruh terhadap performa pipa kalor melingkar. Sumbu biomaterial terlihat mampu mereduksi panas lebih baik dibandingkan *sintered*-Cu. Terdapat perbedaan temperatur evaporator sebesar 6.47°C antara pipa kalor melingkardengan sumbu kapiler *sintered*-Cu dan tanpa sumbu kapiler dan sebesar 8.16°C antara pipa kalor melingkardengan sumbu kapiler biomaterial dan tanpa sumbu kapiler pada kondisi vakum.
2. Kondisi vacuum merupakan kondisi yang lebih baik bagi pipa kalor melingkar dalam mereduksi temperatur evaporator. Terdapat perbedaan sebesar 7.12°C pada sumbu *sintered* Cu antara kondisi vakum dan non vakum dan 6.22°C pada sumbu biomaterial antara kondisi vakum dan non vakum.
3. Posisi evaporator berada dibawah kondenser menunjukkan hasil terbaik dibandingkan posisi evaporator sejajar dengan kondenser dan juga posisi evaporator berada diatas kondenser. Perbedaan temperatur sebesar 6.49°C pada pipa sumbu *sintered* Cu antara posisi 90 dan -90 serta 3.74°C pada pipa sumbu biomaterial antara posisi 90 dan -90
4. Hambatan termal pada daerah evaporator hingga kondensor memiliki nilai terendah sebesar 2.2°C/W terjadi pada pipa kalor melingkar dengan sumbu material biomaterial dengan daya masukan 30 Watt. Sama halnya dengan hambatan termal pada daerah evaporator hingga *liquid line* memiliki nilai terendah sebesar 1.65°C/w pada pipa kalor melingkar sumbu material biomaterial dengan daya masukan 30 Watt

Dapat ditarik kesimpulan bahwa kinerja pipa kalor melingkar sangat dipengaruhi jenis sumbu kapilern, orientasi evaporator, dan juga kondisi ruang di dalam pipa kalor melingkar.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Heat Pipe, USSR Inventors Certificate 449213, 1974.
- [2] Yu.F. Gerasimov, Yu.F. Maydanik, G.T. Shchogolev, et al., Low-temperature heat pipes with separate channels for vapor and liquid, *Eng.-Phys. J.* 28 (6) (1975) 957–960 (in Russian).
- [3] P.D. Dunn, D.A. Reay, *Heat Pipes*, Pergamon Press, Oxford, 1976
- [4] D. A. Wolf, D. M. Ernst, A. L. Phillips. Loop heat pipes and their performance and potential. SAE Paper No. 941575
- [5] Z.Y. Wang, X.D. Zhao, Analytical study of the heat transfer limits of a novel loop heat pipe system, *Int. J. Energy Res.* (2010). doi:10.1002/er.1697.
- [6] ZhiChun Liu, *Operational characteristics of flat type loop heat pipe with biporous wick*, School of Energy and Power Engineering, 2012.
- [7] R. Singh, A. Akbarzadeh, M. Mochizuki, Operational characteristics of a mini-ature loop heat pipe with flat evaporator, *Int. J. Therm. Sci.* 47 (11) (2008)
- [8] Y.F. Maidanik, S.V. Vershinin, M.A. Chernysheva, Development and Tests of Miniature Loop Heat Pipe with a Flat Evaporator (2000) SAE Paper No. 2000-01-2491.
- [9] S.Becker, Steady State operation of a cooper-water LHP with a flat oval evaporator. 2010
- [10] W.Liu, Experimental investigation of loop heat pipe with flat evaporator using biporous wick. University of science and technology, china. 2012
- [10] G.P.Celata ,M.Cumo ,M.Furrer,Experimental tests of a stainless steel loop heat pipe with flat evaporator , *ExpTherm. Fluid Sci.* 34 (2010).
- [11] Z.C Liu, investifation of impact of different working fluids on the operational characteristic of miniature loop heat pipe. 2011.
- [12] J.L. Wang, I. Catton, Biporous heat pipes for high power electronic device cooling, in: *Proceedings of the 17th Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (2001)*, pp. 211 e 218 San Jose, CA [11]
- [12] C.C. Yeh, C.N. Chen, Y.M. Chen, Heat transfer analysis of a loop heat pipe with biporous wicks, *Int. J. Heat Mass Transfer* 52 (2009) 4426 e4434.
- [13] Zhicun Liu, Development of biporous wicks for flat-plate loop heat pipe. School of energy and power engineering. China 2011.
- [14] Lin Cheng, Experimental study on capillary pumping performance of porous wicks for loop heat pipe. Institute of Thermal Science and Technology. 2010
- [15] C.C Yeh A study of loop heat pipe with biporous wicks, heat mass transfers. 2008

- [16] Lin Cheng, Experimental study on capillary pumping performance of porous wicks for loop heat pipe. 2010
- [17] Nandy putra. Slide Kuliah Alat penukar kalor.2011
- [18] Cheung,H.*A critical review of heat pipe theory and applications*. USAEC Report UCRL-50453. Lawrence Radiation Laboratory, University of California, 1968
- [19] Leefer, B.I. *Nuclear thermionic energy converter*. Proceedings of 20th Annual Power Sources Conference, Atlantic City, NJ, 24–26 May 1966, pp 172–175, 1966. ;
Judge, J.F. *RCA test thermal energy pipe*. Missiles Rockets, Vol. 18, pp 36–38, 1966
- [20] Deverall, J.E. and Kemme, J.E. *Satellite heat pipe*. USAEC Report LA-3278, Contract W-7405-eng-36. Los Alamos Scientific Laboratory, University of California, September 1970
- [21] Wyatt, T. *A controllable heat pipe experiment for the SE-4 satellite*. JHU Tech. Memo APL-SDO-1134. John Hopkins University, Appl. Physics Lab., March 1965, AD695 433
- [22] Swanson T.D. and Birur, G.C. *NASA thermal control technologies for robotics spacecraft*. Appl. Therm. Eng. Vol. 23, pp 1055-1065, 2003.
- [23] Cotter, T.P. *Theory of heat pipes*. USAEC Report LA-3246, Contract W7405-3ng-36. Los Alamos Scientific Laboratory, University of California, 1965
- [24] Deverall, J.E. and Kemme, J.E. *Satellite heat pipe*. USAEC Report LA-3278, Contract W-7405-eng-36. Los Alamos Scientific Laboratory, University of California, September 1970
- [25] Anand, D.K. *Heat pipe application to a gravity gradient satellite*. Proceedings of ASME Annual Aviation and Space Conference, Beverley Hills, California, 16–19 June 1968, pp 634–658
- [26] Feldman, K.T. and Whiting, G.H. *The heat pipe and its potentialities*. Eng. Dig., Vol. 28 No. 3, pp 86–86, 1967 ; Eastman, G.Y. *The heat pipe*. Sci. Am., Vol. 218, No. 5, pp 38–46, 1968 ;
Feldman, K.T. and Whiting, G.H. *Applications of the heat pipe*. Mech. Eng., Vol. 90, pp 48–53, 1968
- [27] Arthur, P. Fraas., *Heat Exchanger Design, 2nd Edition*, John Wiley & Sons, New York, 1989
- [28] Wits, W., R. Legtenberg, J.H Mannak., *Selecting Capillary Structures for Heat Pipe in Multilayer Printed Circuit Boards*, European Thermal-Science, The Netherlands, 2008.
- [29] M.A. Chernysheva, S.V. Vershinin, Yu. F. Maydanik. *Operating temperature and distribution of a working fluid in LHP*. International Journal of Heat and Mass Transfer 50, pp.2704–2713, 2007
- [30] Randeep Singh, Aliakbar Akbarzadeh, Masataka Mochizuki. *Operational characteristics of the miniature loop heat pipe with non-condensable gases*. International Journal of Heat and Mass Transfer 53, pp.3471–3482, 2010

- [31] Heat Transfer _Yunus A. Cengel_ 2nd Edition
- [32] wikipedia. Vacuum theory.
- [33] Jaiandran Sri and Munusamy L., *Heat pipe In Electronic Pakaging*, 2006
- [34] Cotter, T.P., *Theory of Heat Pipes*, LA-3246-MS, 26 March, 1965
- [35] P. Dunn, D.A. Reay, *HeatPipes*, 2nd ed., Pergamon Press, Oxford, England, 1978
- [36] D. Reay, P. Kew, *Heat pipe teory, desain and applications*, 5th edition, Elsevier, 2006
- [37] P. Dunn, D.A. Reay, *Heat Pipes*, 2nd edn., Pergamon Press, Oxford, England, 1978
- [38] Fabian Korn. *Heat Pipes and its Applications*. Sweden: Dep. Of Energy Science, Faculty of Engineering, Lund University. Heat and Mass Transport (2008) MVK 160
- [39] Brautsch, A. and Kew P.A. *The Effect of Surface Conditions on Boiling Heat Transfer From Mesh Wicks*, Proceedings of 12th International Heat Transfer Conference, Elsevier SAS, Grenoble, (2002)
- [40] Chang . C. S., Jwo . P. S., Fan . S. H. Pai., *Process Optimization and Material Properties for Nanofluid Manufacturing*, International Journal Manufacturing Technology, London, Vol 34, pp.300-306, 2007
- [41] D. Reay, P. Kew, *Heat pipe teory, desain and applications*, 5th edition, Elsevier, 2006
- [42] S.W. Chi, *Heat Pipe Theory and Practice*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1976.
- [43] G.P. Petersen, *An Introduction to Heat Pipes*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1994.
- [44] [Ji Li, Daming Wang, G.P. Peterson, *Experimental studies on a high performance compact loop heat pipe with a square flat evaporator*, China and United States.

Data Pengujian *Loop Heat Pipe* dengan sumbu biomaterial, posisi 90, vacuum dan daya Heater Elektrik 10 Watt

Evaporator 2	Vapour Line	Liquid Line	Evaporator	Tout kondenser	Tin kondenser
47.33587	28.12516	26.324492	46.569334	22.492209	23.75419
47.342	28.11185	26.324983	46.578413	22.419185	23.7503
47.33664	28.175619	26.331038	46.594767	22.501089	23.72704
47.3217	28.166633	26.340926	46.600632	22.484889	23.74018
47.32007	28.196028	26.365073	46.582266	22.461961	23.74984
47.30732	28.173633	26.327666	46.580369	22.595258	23.73798
47.30131	28.158544	26.320844	46.568013	22.597428	23.74407
47.3012	28.081618	26.271431	46.556138	22.399891	23.65135
47.30514	28.062399	26.28835	46.567776	22.439988	23.65261
47.28238	27.97186	26.271384	46.56469	22.556353	23.61182
47.28917	28.014182	26.272767	46.585052	22.600043	23.67556
47.28179	28.130647	26.31179	46.579936	22.730958	23.72483
47.2787	28.119455	26.309564	46.587026	22.626792	23.77017
47.2735	28.138084	26.294359	46.572546	22.666781	23.79188
47.26748	28.158871	26.306888	46.56743	22.540659	23.77026
47.26211	28.084416	26.310173	46.549841	22.549735	23.73684
47.26392	28.046697	26.296581	46.557081	22.462813	23.67518
47.26125	27.973826	26.321042	46.559158	22.457306	23.68515
47.26292	28.099726	26.31422	46.549517	22.523975	23.68408
47.26069	27.995566	26.299275	46.551356	22.579484	23.71968
47.29276	28.0992407	26.3101423	46.5710671	22.53434	23.71765

Data Pengujian *Loop Heat Pipe* dengan sumbu biomaterial, posisi 90, vacuum dan daya Heater Elektrik 20 Watt

evaporator 2	Vapour Line	Liquid Line	evap 1	Tout kondenser	Tin kondenser
72.99748	35.648823	31.561656	70.066858	25.04386	27.88183
72.99437	35.642905	31.528666	70.092841	25.05913	27.88277
72.99011	35.641986	31.524075	70.134468	25.87403	27.89038
72.0985	35.688227	31.518458	70.18494	25.8055	27.86904
72.09924	35.757157	31.531037	70.196997	25.81287	27.86025
72.00663	35.67711	31.488958	70.199783	25.83123	27.82574
72.01367	35.630857	31.519322	70.223162	25.0028	27.87383
72.09948	35.846101	31.55019	70.234276	25.97569	27.90928
72.00379	35.709147	31.566051	70.218427	25.00069	27.87587
72.01022	36.106109	31.589375	70.214566	25.89133	27.93233
72.01634	35.92676	31.557592	70.219345	25.90481	27.88697
72.01376	35.858368	31.539124	70.227276	25.9271	27.96619
72.02898	36.243242	31.589562	70.239816	25.77619	27.99111
72.02593	36.422936	31.58117	70.247738	25.79986	27.97966
72.03076	36.408233	31.574194	70.233093	25.77849	27.9362
72.02869	36.669661	31.553966	70.240201	25.83529	27.95529
72.03832	36.25437	31.551453	70.215365	25.84015	27.91608
72.04874	36.104536	31.51421	70.196013	25.97708	27.93466
72.03906	36.15584	31.481604	70.189022	25.72467	27.89239
72.03901	36.183861	31.546885	70.20128	25.81475	27.92233
72.03116	35.97881145	31.5433774	70.1987734	25.88377	27.90911

Data Pengujian *Loop Heat Pipe* dengan sumbu biomaterial, posisi 90, vacuum dan daya Heater Elektrik 30 Watt

Evaporator 2	Vapour Line	Liquid Line	Evap 1	Tout kondenser	Tin kondenser
97.36713	48.15727	37.45908	96.36601	28.92876	29.75872
97.36014	48.17085	37.52289	96.35228	28.02856	29.76077
97.41465	48.35789	37.61686	96.36042	28.1915	29.8173
97.49639	48.42162	37.59731	96.35395	28.38237	29.85768
97.54676	48.78188	37.52455	96.3285	28.39272	29.8521
97.43371	48.77251	37.46793	96.34619	28.285	29.82437
97.33968	49.18084	37.42032	96.3433	28.12562	29.78154
97.31783	49.17923	37.44288	96.33699	28.97565	29.65474
97.38201	48.79583	37.38136	96.33703	28.02399	29.66447
97.44761	48.60599	37.41339	96.33916	28.9721	29.68025
97.4921	48.67741	37.49812	96.34111	28.98635	29.73896
97.47468	49.06443	37.61338	96.34013	28.78567	29.758
97.44274	48.70203	37.69273	96.33003	28.98791	29.74834
97.49211	49.28344	37.65793	96.33235	28.92721	29.71361
97.54295	49.31382	37.62236	96.34021	28.95169	29.72766
97.43559	48.81672	37.58405	96.32828	28.81371	29.75991
97.40869	48.66048	37.61767	96.33828	28.85034	29.68627
97.4347	49.58708	37.55375	96.33189	28.83337	29.67672
97.51421	49.21475	37.56748	96.33307	28.70885	29.66687
97.45217	48.44619	37.51786	96.33675	28.76463	29.67455
97.43979	48.95951	37.53859	94.3408	28.9958	29.74014

Data Pengujian *Loop Heat Pipe* dengan sumbu biomaterial, posisi 0, vacuum dan daya Heater Elektrik 10 Watt

tin	tout	vap line	liq line	evap 1	evap 2
24.83961	24.44044	30.45639	29.109893	48.11615	50.79793
24.89754	24.5299	30.36787	29.127324	48.15919	50.79984
24.85912	24.55504	30.46364	29.124506	48.11855	50.79852
24.89754	24.5299	30.36787	29.127324	48.15919	50.79984
24.90429	24.66967	30.46337	29.125382	48.12868	50.80615
24.89754	24.5299	30.36787	29.127324	48.15919	50.79984
24.94948	24.73956	30.46496	29.127432	48.1273	50.7856
24.89754	24.5299	30.36787	29.127324	48.15919	50.79984
25.02101	24.78387	30.4714	29.145602	48.13365	50.796
24.89754	24.5299	30.36787	29.127324	48.15919	50.79984
24.97211	24.80418	30.44892	29.160542	48.12981	50.76352
24.89754	24.5299	30.36787	29.127324	48.15919	50.79984
24.93377	24.5741	30.39929	29.162095	48.1171	50.77317
24.89754	24.5299	30.36787	29.127324	48.15919	50.79984
24.95584	24.49603	30.39188	29.167763	48.12494	50.77129
24.89754	24.5299	30.36787	29.127324	48.15919	50.79984
24.95874	24.50378	30.39637	29.169278	48.12349	50.75834
24.89754	24.5299	30.36787	29.127324	48.15919	50.79984
24.94646	24.51411	30.40963	29.160721	48.12773	50.75851

24.89754	24.5299	30.36787	29.127324	48.15919	50.79984
24.91579	24.56899	30.40223	29.136323	48.14196	50.79037

Data Pengujian *Loop Heat Pipe* dengan sumbu biomaterial, posisi -90, vacuum dan daya Heater Elektrik 10 Watt

tout	tin	vap line	liq line	evap 1	evap 2
22.291102	25.346852	33.488064	29.538635	50.30709	53.57911
22.677285	25.352268	33.454081	29.543111	50.30765	53.61165
22.33571	25.357212	33.396288	29.529891	50.29986	53.56851
23.235771	25.361221	33.381045	29.575914	50.29047	53.55261
22.466477	25.355508	33.361186	29.561267	50.28984	53.47385
22.842748	25.355475	33.375342	29.57111	50.28078	53.43576
23.23369	25.346232	33.376695	29.521021	50.29836	53.43011
23.123202	25.37062	33.386025	29.532682	50.30666	53.46091
22.873054	25.364038	33.412445	29.443669	50.31082	53.22589
23.967136	25.347339	33.434087	29.496859	50.29899	53.23593
22.723569	25.359473	33.435145	29.561082	50.3235	53.28697
22.627947	25.360004	33.431553	29.619715	50.3423	53.51179
24.888208	25.364222	33.408051	29.57454	50.33131	53.93133
23.161096	25.367626	33.410285	29.577241	50.32336	53.70275
22.75413	25.351455	33.436341	29.602244	50.32762	53.69417
22.689989	25.348339	33.393203	29.641168	50.30381	53.61614
22.543688	25.354814	33.439446	29.678619	50.31556	53.61954
22.488998	25.347073	33.423297	29.63761	50.32085	53.62121

22.430363	25.352462	33.435739	29.627591	50.31845	53.63075
22.484817	25.35789	33.433116	29.654354	50.32241	53.63313
22.891949	25.35600615	33.4155717	29.574416	50.31098	53.5411

Data Pengujian *Loop Heat Pipe* dengan sumbu sintered, posisi 90, vacuum dan daya Heater Elektrik 10 Watt

liq line	evap 2	kond in	evap 1	vap line	kon out
31.30161	52.087444	26.193319	49.650359	32.777614	25.0367
31.02741	52.087007	26.209718	49.646185	32.812648	25.04017
31.05311	52.080367	26.191952	49.652541	32.223726	25.04018
31.0645	52.087617	26.190225	49.633757	32.225579	25.03199
31.00803	52.084417	26.202009	49.635627	32.240501	25.03281
31.00145	52.081667	26.202258	49.633757	32.241997	25.03917
31.10213	52.088453	26.209	49.640723	32.254942	25.0443
31.07241	52.083478	26.208019	49.636589	32.24451	25.03703
31.32551	52.087745	26.205187	49.638392	32.247227	25.04641
31.35116	52.081592	26.199412	49.631846	32.23096	25.048
31.20821	52.082259	26.186121	49.627617	32.23453	25.04117
31.1469	52.081135	26.190722	49.615745	32.240707	25.03554
31.16909	52.081091	26.187765	49.616897	32.239911	25.04246
31.05086	52.080837	26.193651	49.613684	32.248792	25.04673
31.03775	52.080837	26.194728	49.60188	32.233088	25.04188
31.31881	52.085401	26.201	49.619133	32.216299	25.04384
31.3141	52.086417	26.206347	49.622087	32.212332	25.04578

31.139	5208082	26.216045	49.618916	32.223753	25.04739
31.12033	52.086329	26.225218	49.630206	32.236794	25.05297
31.93446	52.08788	26.215921	49.617737	32.21667	25.05032
31.35734	52.08113965	26.27143085	49.4291839	32.290129	25.04224

Data Pengujian *Loop Heat Pipe* dengan sumbu sintered Cu, posisi 90, vacuum dan daya Heater Elektrik 20 Watt

liq line	evap 2	kond in	evap 1	vap line	kon out
37.00696	75.219736	28.464192	73.892527	42.26576	28.32479
37.03999	75.227792	28.465344	73.906676	42.28358	28.33922
37.13664	75.226335	28.478369	73.898092	42.28741	28.32676
37.18043	75.228043	28.474932	73.901887	42.30104	28.32925
37.22584	75.232367	28.483708	73.897529	42.28435	28.33282
37.25846	75.22875	28.474587	73.91337	42.28527	28.32298
37.28663	75.224092	28.467618	73.90297	42.2688	28.3187
37.33184	75.230312	28.432964	73.91893	42.26611	28.32047
37.313	75.227749	28.429418	73.917233	42.26491	28.32823
37.35863	75.233682	28.42963	73.918308	42.25057	28.3218
37.3751	75.235851	28.463987	73.916657	42.26591	28.33104
37.36597	75.230599	28.472192	73.91105	42.28325	28.32669
37.2377	75.239234	28.513771	73.923868	42.28481	28.33687
36.99747	75.236179	28.550258	73.910034	42.29499	28.33066
36.95681	75.243604	28.560984	73.904089	42.32582	28.33044
36.96722	75.250094	28.558902	73.920666	42.37503	28.3368

36.9925	75.251994	28.544362	73.898935	42.38992	28.32961
37.04456	75.244225	28.499375	73.890635	42.36531	28.3327
37.05778	75.262657	28.502283	73.919692	42.39674	28.33328
37.16043	75.264091	28.512556	73.913829	42.37657	28.32686
37.1647	75.2368693	28.4889716	73.9088489	42.30581	28.329

Data Pengujian *Loop Heat Pipe* dengan sumbu Sintered Cu, posisi 90, vacuum dan daya Heater Elektrik 30 Watt

liq line	Evap 2	kond in	evap 1	vap line	kon out
44.80546	101.1199	31.39374	98.0179	52.71712	29.63065
44.78377	101.1205	31.36034	98.0245	52.76914	29.62842
44.71041	101.1237	31.35348	98.033	52.80518	29.62119
44.72629	101.1239	31.34984	98.0372	52.87131	29.63529
44.67205	101.1103	31.38418	98.0341	52.90031	29.62109
44.69166	101.1114	31.4375	98.0411	52.91892	29.61171
44.77086	101.1161	31.46908	98.0476	52.92988	29.61858
44.8602	101.1095	31.50804	98.0457	52.93455	29.61742
44.89997	101.1096	31.52175	98.047	52.96986	29.60982
44.92539	101.1056	31.52294	98.0486	52.97542	29.61727
44.90996	101.0991	31.53974	98.0472	52.95955	29.61653
44.88359	101.1174	31.57378	98.0419	52.9916	29.6117
44.79425	101.1243	31.58765	98.0291	52.99256	29.60623
44.7862	101.1213	31.58578	98.0222	52.95604	29.6022
44.82132	101.1233	31.57652	98.0389	52.95064	29.5992

44.83221	101.1119	31.53184	98.0198	52.93049	29.59052
44.86533	101.1116	31.4912	98.0429	52.89248	29.59555
44.90137	101.1048	31.44903	98.0444	52.75157	29.59332
44.80494	101.1165	31.51877	98.0434	52.79635	29.60019
44.55249	101.1318	31.57383	98.0418	52.94518	29.59741
44.79989	101.1156	31.48645	98.0374	52.89791	29.61121

Data Pengujian *Loop Heat Pipe* dengan sumbu Sintered Cu, posisi 0, vacuum dan daya Heater Elektrik 10 Watt

tin	tout	Vap line	liq line	evap 1	evap 2
27.83961	27.44044	34.45639	31.109893	54.11615	52.79793
27.89754	27.5299	34.36787	31.127324	54.15919	52.79984
27.85912	27.55504	34.46364	31.124506	54.11855	52.79852
27.89754	27.5299	34.36787	31.127324	54.15919	52.79984
27.90429	24.66967	34.46337	31.125382	54.12868	52.80615
27.89754	27.5299	34.36787	31.127324	54.15919	52.79984
27.94948	27.73956	34.46496	31.127432	54.1273	52.7856
27.89754	27.5299	34.36787	31.127324	54.15919	52.79984
27.02101	27.78387	34.4714	31.145602	54.13365	52.796
27.89754	27.5299	34.36787	31.127324	54.15919	52.79984
27.97211	27.80418	34.44892	31.160542	54.12981	52.76352
27.89754	27.5299	34.36787	31.127324	54.15919	52.79984
27.93377	27.5741	34.39929	31.162095	54.1171	52.77317
27.89754	27.5299	34.36787	31.127324	54.15919	52.79984

27.95584	27.49603	34.39188	31.167763	54.12494	52.77129
27.89754	27.5299	34.36787	31.127324	54.15919	52.79984
27.95874	27.50378	34.39637	31.169278	54.12349	52.75834
27.89754	27.5299	34.36787	31.127324	54.15919	52.79984
27.94646	27.51411	34.40963	31.160721	54.12773	52.75851
27.89754	27.5299	34.36787	31.127324	54.15919	52.79984
27.91579	27.56899	34.40223	31.136323	54.14196	52.79037

Data Pengujian *Loop Heat Pipe* dengan sumbu Sintered Cu, posisi -90, vacuum dan daya Heater Elektrik 10 Watt

tout	tin	vap line	liq line	evap 1	evap 2
25.291102	25.346852	33.488064	32.538635	56.30709	55.57911
25.677285	25.352268	33.454081	32.543111	56.30765	55.61165
25.33571	25.357212	33.396288	32.529891	56.29986	55.56851
25.235771	25.361221	33.381045	32.575914	56.29047	55.55261
25.466477	25.355508	33.361186	32.561267	56.28984	55.47385
25.842748	25.355475	33.375342	32.57111	56.28078	55.43576
25.23369	25.346232	33.376695	32.521021	56.29836	55.43011
25.123202	25.37062	33.386025	32.532682	56.30666	55.46091
25.873054	25.364038	33.412445	32.443669	56.31082	55.22589
25.967136	25.347339	33.434087	32.496859	56.29899	55.23593
25.723569	25.359473	33.435145	32.561082	56.3235	55.28697
25.627947	25.360004	33.431553	32.619715	56.3423	55.51179
25.888208	25.364222	33.408051	32.57454	56.33131	55.93133
25.161096	25.367626	33.410285	32.577241	56.32336	55.70275
25.75413	25.351455	33.436341	32.602244	56.32762	55.69417

25.689989	25.348339	33.393203	32.641168	56.30381	55.61614
25.543688	25.354814	33.439446	32.678619	56.31556	55.61954
25.488998	25.347073	33.423297	32.63761	56.32085	55.62121
25.430363	25.352462	33.435739	32.627591	56.31845	55.63075
25.484817	25.35789	33.433116	32.654354	56.32241	55.63313
25.891949	25.35600615	33.4155717	32.574416	56.31098	53.5411

Data Pengujian *Loop Heat Pipe* dengan sumbu Sintered Cu, posisi 90, NON vacuum dan daya *Heater* Elektrik 10 Watt

Tin	Tout	Liquid L	vapour L	evap 2	evap 1
26.38149	25.72246	34.73125	35.20562	59.01986	56.51018
26.36851	25.76622	34.99612	35.19644	59.25072	56.67187
26.28603	25.73367	34.89182	35.26036	59.06715	56.49705
26.36851	25.76622	34.99612	35.19644	59.25072	56.67187
26.23105	25.75219	34.99359	35.29517	59.08946	56.49579
26.36851	25.76622	34.99612	35.19644	59.25072	56.67187
26.21979	25.80523	35.07771	35.30685	59.14091	56.50144
26.36851	25.76622	34.99612	35.19644	59.25072	56.67187
26.20702	25.79085	35.11874	35.30356	59.16731	56.50315
26.36851	25.76622	34.99612	35.19644	59.25072	56.67187
26.19863	25.82163	35.15451	35.31373	59.1836	56.51204
26.36851	25.76622	34.99612	35.19644	59.25072	56.67187
26.19799	25.81961	35.15388	35.31996	59.19848	56.49388

26.36851	25.76622	34.99612	35.19644	59.25072	56.67187
26.18907	25.81092	35.02439	35.33167	59.18731	56.46202
26.36851	25.76622	34.99612	35.19644	59.25072	56.67187
26.18301	25.79011	34.88151	35.32498	59.17647	56.4406
26.36851	25.76622	34.99612	35.19644	59.25072	56.67187
26.37429	25.74154	34.59269	35.12744	59.13275	56.38872
26.36851	25.76622	34.99612	35.19644	59.25072	56.67187
26.30767	25.77252	34.97907	35.23769	59.19352	56.57618

Data Pengujian *Loop Heat Pipe* dengan sumbu Sintered Cu, posisi 90, NON vacuum dan daya Heater Elektrik 20 Watt

Tin	Tout	Liquid L	vapour L	evap 2	evap 1
30.63119	29.11319	45.49396	48.56506	90.65563	88.84442
30.81451	29.11401	45.46873	48.47824	90.39502	88.87461
30.71314	29.1011	45.07963	48.68381	90.44468	88.88739
30.45068	29.06778	44.89757	48.9132	90.62928	88.89374
30.2807	29.03181	44.91654	49.04962	90.82838	88.89143
30.10985	29.05507	44.98723	49.26351	90.95878	88.869
30.15933	29.1376	45.3486	49.40188	90.02791	88.84242
30.33721	29.22221	45.6424	49.43097	90.08356	88.85062
30.63119	29.22161	45.79984	49.43852	90.08252	88.86709
30.2807	29.24912	45.88644	49.45109	90.20518	88.86048
30.10985	29.21762	45.90208	49.48302	90.23174	88.85041
30.33721	29.19157	45.80946	49.49475	90.23957	88.85329

30.63119	29.16044	45.5812	49.40057	90.24851	88.86356
30.33721	29.15869	45.09689	49.29363	90.25602	88.78713
30.2449	29.11062	45.11822	49.98225	90.09418	88.80355
30.53558	29.10629	45.27477	49.77065	90.83547	88.8303
30.66982	29.1086	45.52205	49.59745	90.60574	88.86261
30.81109	29.10344	45.3553	49.64332	90.35167	88.87778
30.5706	29.06977	44.86985	49.94186	90.53006	88.77608
30.35604	29.01285	44.73681	49.13125	90.62622	88.78545
30.4506	29.12767	45.33938	49.32073	90.4165	88.84857

Data Pengujian *Loop Heat Pipe* dengan sumbu Sintered Cu, posisi 90, NON vacuum dan daya Heater Elektrik 30 Watt

Tin	Tout	Liquid L	vapour L	evap 2	evap 1
32.02365	28.68057	56.22807	54.16528	110.0564	102.4389
32.22255	28.61525	56.16354	54.27868	109.872	102.4524
32.28212	28.58452	56.24811	54.40229	110.0478	102.4577
32.59267	28.61707	56.17565	54.368	109.9728	102.4298
31.95663	28.62828	56.25314	54.71123	110.0397	102.4569
32.59267	28.61707	56.17565	54.368	109.9728	102.4298
31.36968	28.71845	56.23589	54.79439	110.0475	102.463
32.59267	28.61707	56.17565	54.368	109.9728	102.4298
32.77747	28.77459	56.24539	54.32029	110.057	102.4698
32.59267	28.61707	56.17565	54.368	109.9728	102.4298
32.64352	28.73092	56.231	54.48402	110.0797	102.4694

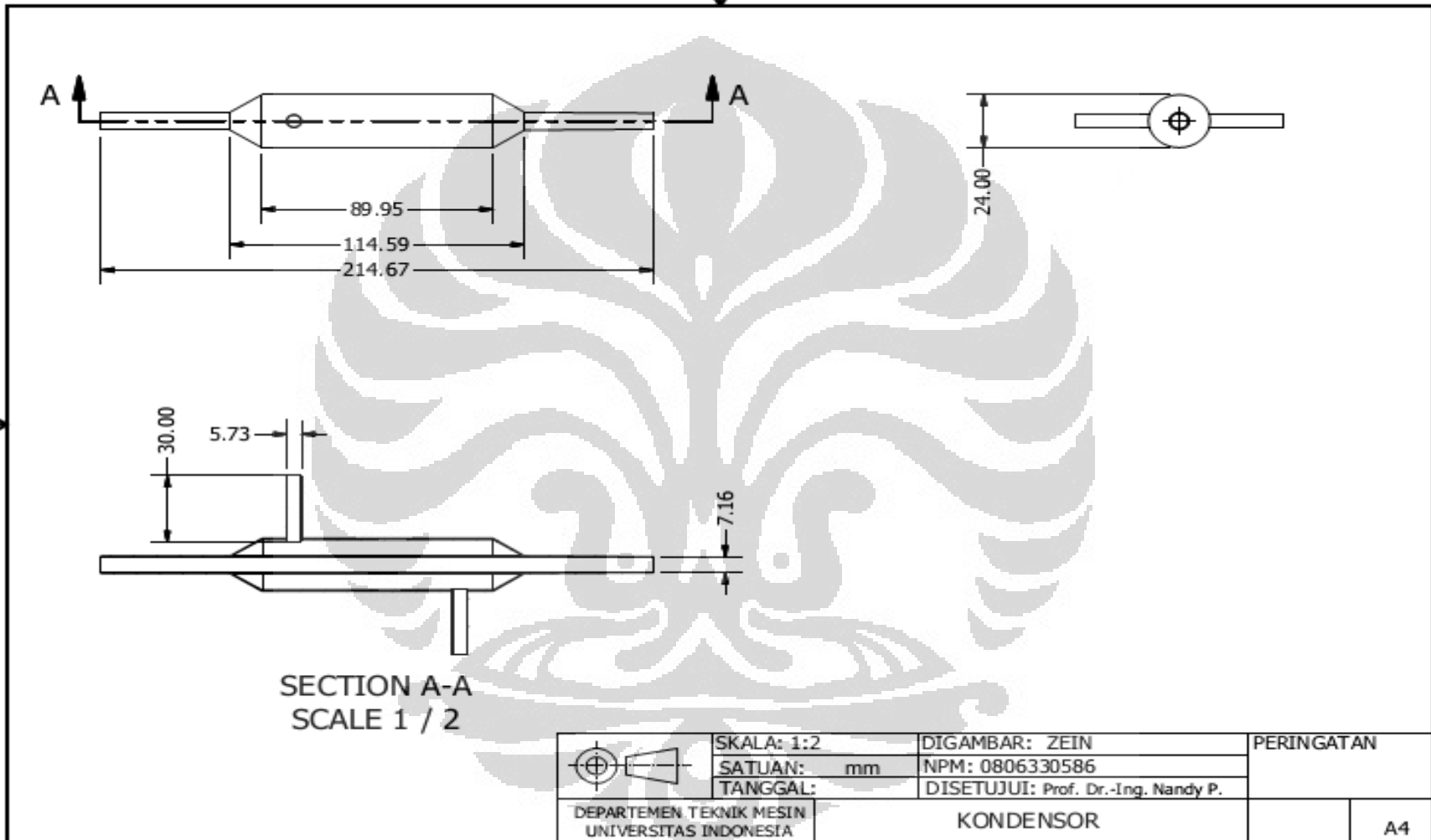
32.59267	28.61707	56.17565	54.368	109.9728	102.4298
32.51726	28.77107	56.19271	54.20039	110.0717	102.4551
32.59267	28.61707	56.17565	54.368	109.9728	102.4298
32.75618	28.54588	56.1966	54.60571	110.0747	102.4356
32.59267	28.61707	56.17565	54.368	109.9728	102.4298
32.31073	28.38954	56.21999	54.50781	109.9158	102.4448
32.59267	28.61707	56.17565	54.368	109.9728	102.4298
31.48817	28.51106	56.22978	54.91439	109.9589	102.4715
32.59267	28.61707	56.17565	54.368	109.9728	102.4298
32.3841	28.62519	56.20126	54.38482	109.9988	102.4442

Data Pengujian *Loop Heat Pipe* dengan tanpa sumbu, posisi 90, vacuum dan daya Heater Elektrik 10 Watt

evap 1	Tin	liq line	evap 2	vap line	tout
55.164701	27.225958	33.089758	58.837819	34.572707	26.546953
55.187872	27.231021	32.998878	58.841411	34.482411	26.5177
55.196358	27.242926	32.776964	58.848983	34.308364	26.339116
55.189532	27.245609	32.549264	58.848009	34.330693	25.983983
55.179385	27.23868	32.318592	58.842371	34.279453	25.835312
55.182447	27.252862	32.353092	58.861821	34.00701	25.890997
55.187296	27.264728	32.309238	58.869356	34.070258	25.896886
55.176746	27.266363	32.150733	58.867359	33.856433	25.588739
55.177811	27.265841	32.13555	58.882793	34.341873	25.1974

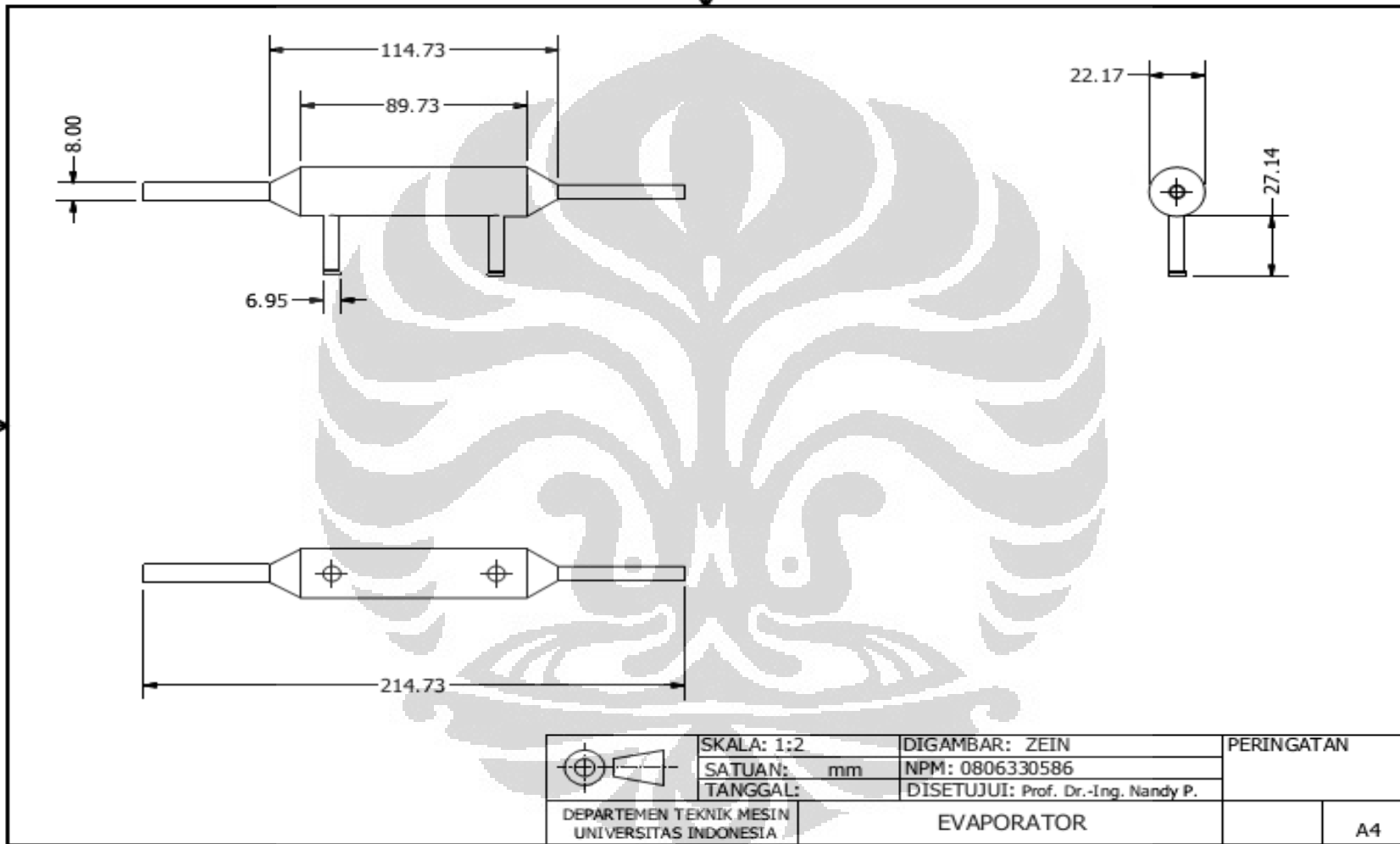
55.173099	27.259409	32.248966	58.877865	34.267577	25.232004
55.175711	27.256327	32.366391	58.87935	33.837538	25.597129
55.161433	27.238958	32.424464	58.872509	34.407307	25.725648
55.157518	27.222062	32.316485	58.874664	34.195491	26.001197
55.174112	27.218555	32.702344	58.875509	34.555983	26.19815
55.183411	27.217019	32.913754	58.852902	34.572516	26.247991
55.197319	27.21905	32.738787	58.862743	34.237088	26.415428
55.207942	27.23153	32.883084	58.861669	34.337513	26.478592
55.227125	27.22952	32.966251	58.873182	34.182777	26.437192
55.214115	27.24383	32.7987	58.872322	33.984314	26.293487
55.223177	27.245966	32.565651	58.889901	33.835705	26.081122
55.1868555	27.2408107	32.5803473	58.8646269	34.23315055	26.0252513

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



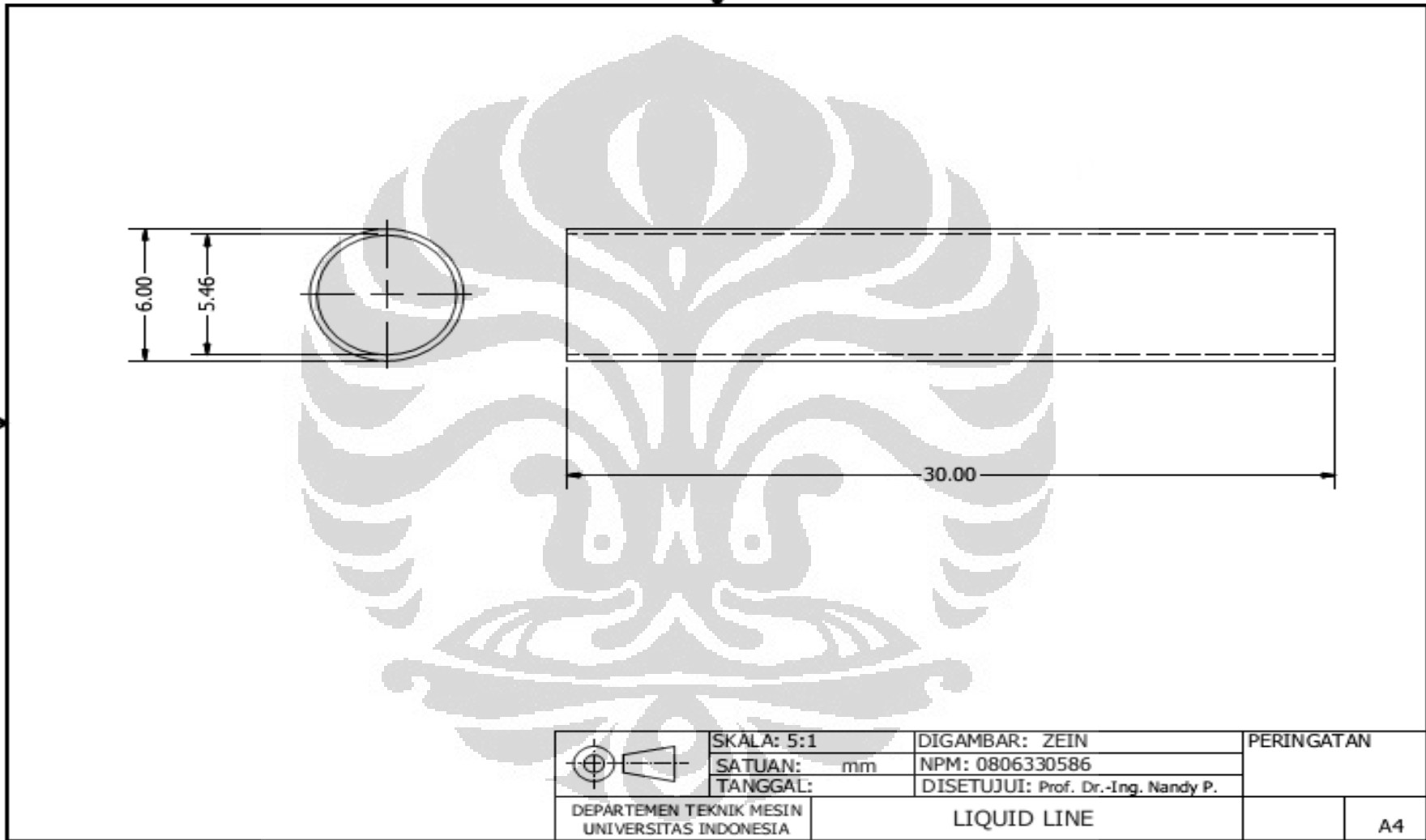
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

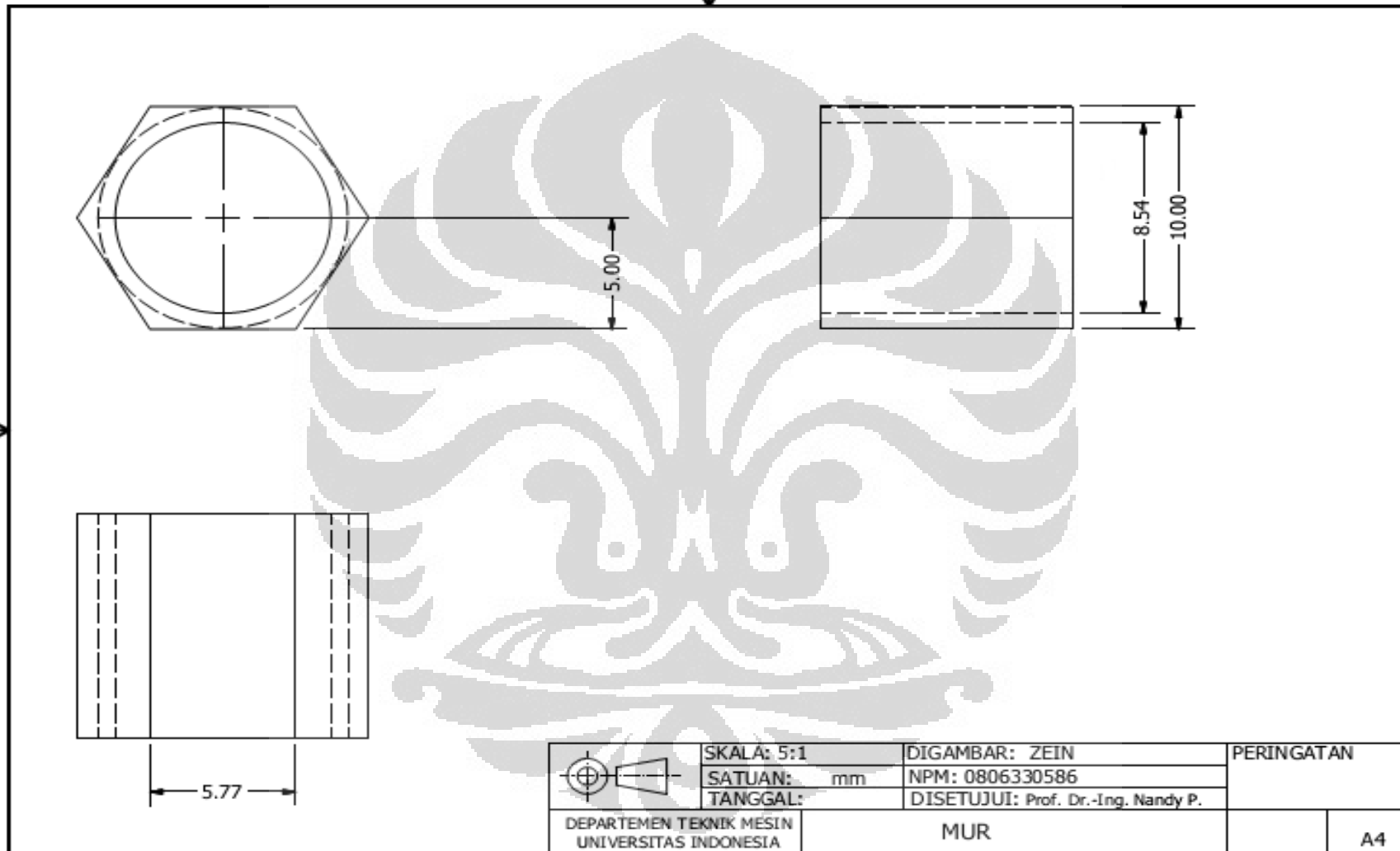
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT


PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

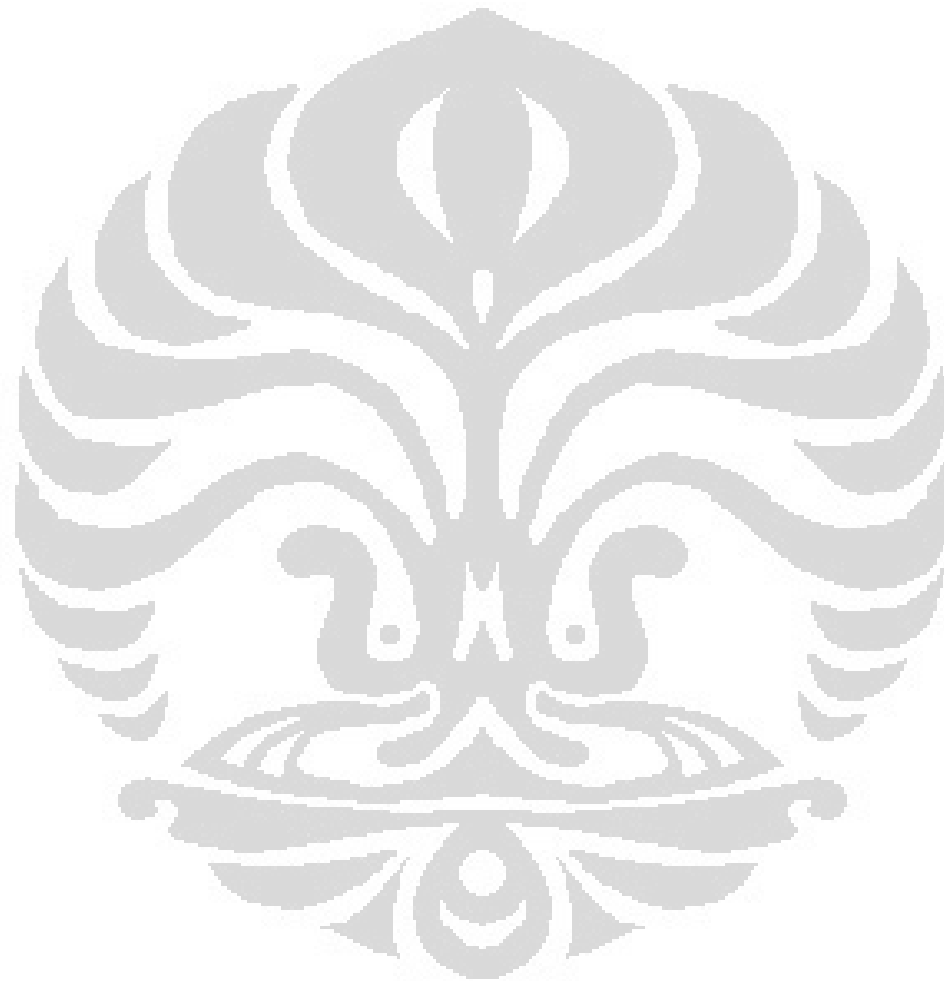
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

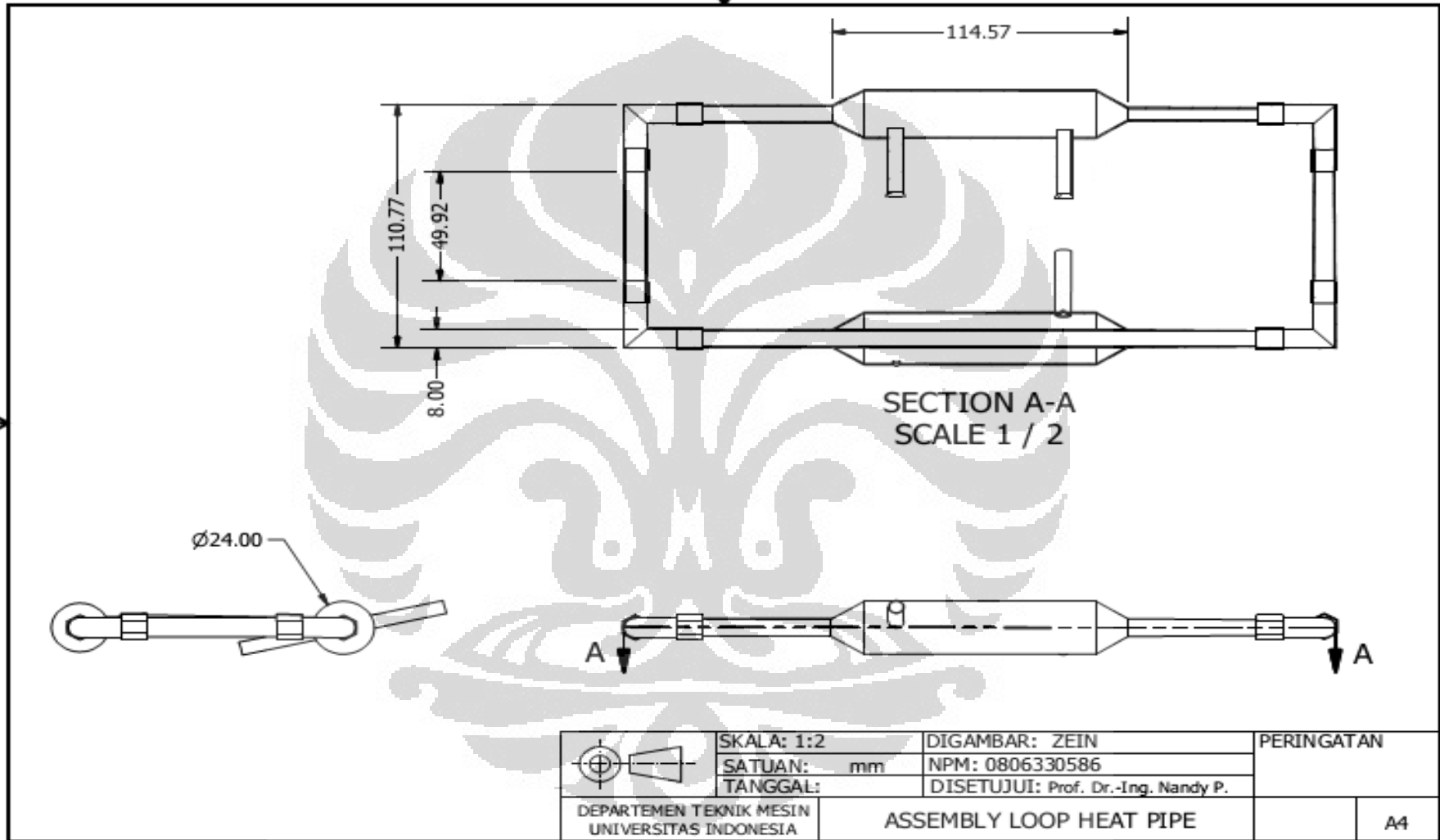


	SKALA: 5:1	DIGAMBAR: ZEIN	PERINGATAN
	SATUAN: mm	NPM: 0806330586	
	TANGGAL:	DISETUJUI: Prof. Dr.-Ing. Nandy P.	
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN UNIVERSITAS INDONESIA		MUR	A4

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

