



PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

**Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**



**Ferdiansyah Nurudin Iskandar
09 06 49 618 2**

3 Januari 2011

PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :
Nama : Ferdiansyah Nurudin Iskandar
NPM : 0906496182
Program Studi : Konversi Energi, Teknik Mesin
Judul Tesis : PENERAPAN NANO FLUIDA PADA LIQUID
BLOCK YANG DILENGKAPI DENGAN HEAT
PIPE DAN TERMOELEKTRIK SEBAGAI
PENDINGIN CPU

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

PENGUJI

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

Penguji : Prof. Dr. Rer.nat Rosari Saleh ()

Penguji : Dr. Ir. Engkos A. Kosasih M. T. ()

Penguji : Dr. Ir. R. Danardono A. S. DEA ()

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, hidayah dan nikmat-Nya hingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Dalam penelitian ini, Penulis banyak menerima saran, bimbingan, bantuan dan informasi dari berbagai pihak, sehingga Penulis dapat menyelesaikan tesis ini dengan baik. Untuk itu, Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

- (1) Bapak Prof. Dr-Ing Nandy Putra, selaku dosen pembimbing tesis yang telah banyak meluangkan waktu & tenaga dalam memberikan saran serta bimbingan.
- (2) Orang tua penulis yang telah memberikan dukungan, semangat dan doa, sampai penulis dapat menyelesaikan tesis ini.
- (3) Kekasih tersayang Gina Insyira yang telah memberikan perhatian, dukungan, semangat dan doa sehingga tesis ini dapat diselesaikan.
- (4) Rekan-rekan di Laboratorium *Applied Heat Transfer* Universitas Indonesia, yang sama-sama belajar dan berjuang menyelesaikan penelitian tesis dan skripsi.
- (5) Seluruh teman-teman Penulis di kampus yang tidak dapat Penulis sebutkan satu persatu, yang telah banyak membantu baik dalam penelitian maupun penulisan.
- (6) Seluruh karyawan staf Departemen Teknik Mesin FTUI yang telah membantu memberi saran, menyediakan dan meminjamkan peralatan serta sarana dalam pengerjaan alat.

Akhir kata, penulis berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 3 Januari 2011

Penulis

**PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Ferdiansyah Nurudin Iskandar
NPM : 0906496182
Program Studi : Konversi Energi
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Tesis

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 :

**PENERAPAN NANO FLUIDA PADA LIQUID BLOCK YANG
DILENGKAPI DENGAN HEAT PIPE DAN TERMOELEKTRIK
SEBAGAI PENDINGIN CPU**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 3 Januari 2011
Yang menyatakan

(Ferdiansyah Nurudin Iskandar)

ABSTRAK

Nama : Ferdiansyah Nurudin Iskandar
Program Studi : Konversi Energi, Teknik Mesin
Judul : PENERAPAN NANO FLUIDA PADA LIQUID BLOCK
YANG DILENGKAPI DENGAN HEAT PIPE DAN
TERMOELEKTRIK SEBAGAI PENDINGIN CPU

Semakin majunya perkembangan teknologi informasi saat ini menuntut semakin cepatnya kebutuhan mikroprosesor yang memiliki kemampuan komputasi yang sangat tinggi. Pada *Central Processing Unit* (CPU) generasi terakhir ditanamkan sekitar 1,17 miliar transistor yang berarti lebih banyak panas yang dihasilkan. Total disipasi panas untuk CPU berkinerja tinggi adalah sekitar 110 W hingga 140 W dan akan terus naik apabila frekuensi dan tegangan CPU dinaikan. Dengan fluks kalor yang semakin tinggi sistem pendinginan konvensional *Heatsink Fan (HSF)* yang biasa digunakan sudah tidak lagi memadai untuk meredam panas CPU. Pada penelitian ini dilakukan pengujian terhadap performa dari nano fluida sebagai fluida kerja yang digunakan bersamaan dengan *liquid block – heatpipe* dan termoelektrik untuk mendinginkan CPU. Pengaruh konsentrasi dari partikel nano terhadap *base fluid* juga diteliti dan hasilnya dibandingkan dengan sistem pendingin konvensional (HSF) yang sudah ada. Dari hasil pengujian, *Liquid block – heatpipe* mempunyai keunggulan yang lebih signifikan dalam proses penyerapan kalor dari CPU dibandingkan dengan sistem pendinginan konvensional. Sistem *Liquid block – heatpipe* dengan fluida kerja *nano fluids* telah terbukti memberikan hasil yang lebih baik dengan peningkatan pada kinerja termal dibandingkan *base fluid*-nya. Performa yang lebih tinggi didapat dengan menggabungkan *liquid block – heatpipe, nano fluids* dan termoelektrik karna berhasil menurunkan temperatur CPU dibawah ruangan.

Kata Kunci :

Nano Fluida, *Central Processing Unit (CPU)*, termoelektrik, *Heatpipe, Liquid Block*

ABSTRACT

Name : Ferdiansyah Nurudin Iskandar
Study Program : Energy Conversion, Mechanical Engineering
Title : APPLICATION OF NANO FLUIDS FOR LIQUID BLOCK
EQUIPED WITH HEAT PIPE AND THERMOELECTRIC
FOR CPU COOLING

In the past few years, the growth of information technology is increasing rapidly resulting in a high demand for microprocessor that has a very high computing ability. On the last generation of CPU 1,17 billion transistor were planted which means a lot of heat were created. The total heat dissipation resulting from high end CPU is about 110 to 140 W which will rise if CPU voltage and frequency increased. With a higher heat flux, the conventional cooling system such a Heatsink Fan (HSF) commonly used can no longer dissipate heat from CPU. In this research, nano fluids were tested with liquid block – heatpipe and thermoelectric to cool the CPU. The concentration effect of the nano partikel against base fluids also tested and the result will be compare with the existing conventional cooling system. From the test result, liquid block – heatpipe have more significant result compare to existing conventional (HSF) cooling system. Liquid block system with nano fluids has proven to give a better result compare to its base fluids. Higher performance obtained by combining the liquid block – heatpipe, nano fluids and thermoelectric whic is succeeded in reducing CPU below ambient temperature.

Key Word :

Nano Fluids, Central Processing Unit (CPU), Thermoelectric, Heatpipe, Liquid Block

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN THESIS	ii
PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI THESIS	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 TUJUAN PENELITIAN.....	4
1.3 PEMBatasan MASALAH.....	5
1.4 METODOLOGI PENELITIAN.....	5
1.5 SITEMATIKA PENULISAN	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 NANO FLUIDA	9
2.1.1 Konduktivitas Termal Nanofluida	10
2.1.2 Konveksi Natural Nanofluida	11
2.1.3 Pembuatan Nanofluida	12
2.2 PENDINGIN TERMOELEKTRIK	13
2.2.1 Sejarah Peltier (Termoelektrik).....	14
2.2.2 Prinsip Kerja Pendingin Termoelektrik	14
2.2.3 Parameter Penggunaan Elemen Termoelektrik.....	16
2.2.4 Komponen Dasar Sistem Pendingin Termoelektrik	17
2.2.5 Sistem Termoelektrik Bertingkat	18
2.2.6 Aplikasi Termoelektrik Secara Garis Besar.....	19
2.3 HEAT PIPE	20
2.3.1 Sejarah <i>Heat Pipe</i>	20
2.3.2 Prinsip Kerja <i>Heat Pipe</i>	23
2.3.3 Struktur <i>Heat Pipe</i>	24
2.4 PERPINDAHAN KALOR PADA SISTEM PENDINGIN CPU	28
2.4.1 Perpindahan Kalor Konduksi	28
2.4.2 Perpindahan Kalor Konveksi	29
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	31
3.1 TUJUAN PENGUJIAN	31
3.2 KOMPONEN PENGUJIAN	31
3.2.1 <i>Data Acquisition (DAQ)</i>	31
3.2.2 Termokopel	37
3.2.3 <i>Direct Current (DC) Power Supply</i>	38
3.2.4 <i>Differential Pressure Transmitter</i>	39
3.2.5 <i>Flow Indicator</i>	40
3.2.6 Radiator	41
3.2.7 Pompa air dan Reservoir	41
3.2.8 <i>Circulating Thermostatic Bath (CTB)</i>	42

3.2.9	<i>Liquid Block</i>	43
3.2.10	<i>Cold Plate dan Heat Spreader</i>	43
3.2.11	<i>Thermoelectric</i>	45
3.2.12	Nano Fluida	46
3.2.13	<i>Heatsink dan Fan</i>	46
3.2.14	<i>Thermal Paste</i>	47
3.2.15	<i>Personal Computer</i>	48
3.2.16	<i>Thermal Conductivity Meter</i>	49
3.3	SKEMA PENGUJIAN.....	51
3.4	VARIASI PENGAMBILAN DATA	52
BAB IV HASIL DAN ANALISA		54
4.1	ANALISA TEMPERATUR CPU DENGAN BEBAN PENUH DAN TANPA BEBAN	54
4.2	ANALISA PENDINGINAN CPU DENGAN FLUIDA KERJA NANO FLUID PADA BERBAGAI KONSENTRASI	55
4.3	ANALISA TEMPERATUR DARI FLUIDA KERJA TERHADAP TEMPERATUR CPU DI BERBAGAI KONDISI BEBAN	57
4.4	ANALISA PERBANDINGAN ANTARA SISTEM PENDINGINAN KONVENSIONAL (HSF) DENGAN SISTEM <i>LIQUID BLOCK</i> DAN <i>HEATPIPE</i>	58
4.5	ANALISA PENDINGINAN CPU DENGAN SISTEM PENDINGINAN TERMOELEKTRIK (TEC)	59
4.6	ANALISA PERBANDINGAN PENDINGINAN CPU ANTARA SISTEM TERMOELEKTRIK DAN <i>LIQUID BLOCK - HEATPIPE</i>	62
4.7	ANALISA PERUBAHAN TEKANAN TERHADAP TEMPERATUR PADA SISTEM PENDINGINAN <i>LIQUID BLOCK - HEATPIPE</i>	63
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		65
5.1	KESIMPULAN.....	65
5.2	SARAN	65
DAFTAR PUSTAKA		66

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	<i>Trend heat flux</i> dari mikroprosesor	2
Gambar 1.2	Foto SEM dari nano fluida Al_2O_3	3
Gambar 1.3	<i>Thermoelectric</i> sebagai pendingin komponen elektronik.....	4
Gambar 2.1	Gabungan sistem pendinginan udara dan air	8
Gambar 2.2	Mesin Ultrasonic Processor	12
Gambar 2.3	Nanofluida dengan <i>base fluid</i> oli (kiri) dan H_2O (kanan)	13
Gambar 2.4	Skema termoelektrik	15
Gambar 2.5	Arah aliran elektron pada modul termoelektrik	16
Gambar 2.6	Susunan dasar sistem pendingin termoelektrik	17
Gambar 2.7	Beberapa susunan sistem termoelektrik	18
Gambar 2.8	Modul sistem bertingkat	19
Gambar 2.9	<i>Heatpipe</i> yang digunakan di luar angkasa GEOS-B satelit	22
Gambar 2.10	Prinsip kerja <i>heat pipe</i>	23
Gambar 2.11	Struktur <i>heat pipe</i>	24
Gambar 3.1	NI 9203 (kiri) dan Modul NI 9213 (kanan)	32
Gambar 3.2	<i>Chassis cDAQ 9174</i>	32
Gambar 3.3	Pengujian modul NI 9213 dan Termokopelnya	33
Gambar 3.4	<i>Differential pressure transmitter</i> merk <i>dwyer</i> tipe 616.....	34
Gambar 3.5	Manometer miring	34
Gambar 3.6	Posisi tuas <i>blower</i>	35
Gambar 3.7	Posisi pengukuran pada <i>wind tunnel</i>	35
Gambar 3.8	Komponen untuk pengujian modul tekanan	36
Gambar 3.9	Termokopel tipe K.....	37
Gambar 3.10	Posisi termokopel pada CPU	37
Gambar 3.11	<i>Power supply</i> yang digunakan untuk <i>Pressure Transmitter</i>	38
Gambar 3.12	<i>Power supply</i> yang digunakan untuk <i>Thermoelectric</i>	39
Gambar 3.13	<i>Differential Pressure Transmitter</i>	39
Gambar 3.14	<i>Flow Indicator</i>	40
Gambar 3.15	Radiator	41
Gambar 3.16	Pompa dan Reservoir	42
Gambar 3.17	<i>Circulating Thermostatic Bath (CTB)</i>	43
Gambar 3.18	<i>Liquid block</i>	44
Gambar 3.19	<i>Heat spreader</i> dan <i>cold plate</i>	45
Gambar 3.20	<i>Thermoelectric cascade</i> dua tingkat	45
Gambar 3.21	<i>Heatsink Fan (HSF)</i>	47
Gambar 3.22	<i>Dow Corning 340 silicone heat sink compound</i>	47
Gambar 3.23	<i>Personal Computer</i>	48
Gambar 3.24	Pembebanan CPU dengan program <i>Prime 95</i>	49
Gambar 3.25	<i>Thermal Conductivity Meter KD2</i>	50
Gambar 3.26	Skema instalasi pengujian alat	51
Gambar 4.1	Karakteristik temperatur CPU pada kondisi <i>load</i> dan <i>idle</i> dengan fluida kerja H_2O	54
Gambar 4.2	Efek konsentrasi volume dari nano fluida terhadap temperatur CPU untuk kondisi <i>load</i> dan <i>idle</i>	56

Gambar 4.3	Efek dari temperatur nano fluida 1% pada temperatur CPU untuk berbagai kondisi beban CPU	57
Gambar 4.4	Temperatur CPU pada sistem pendinginan konvensional HSF dan sistem liquid block - heatpipe	58
Gambar 4.5	Temperatur CPU pembandingan untuk <i>air cooling</i> dan <i>liquid cooling</i>	59
Gambar 4.6	Temperatur CPU pada sistem pendinginan termoelektrik dan <i>liquid block - heatpipe</i>	61
Gambar 4.7	Temperatur CPU pembandingan untuk sistem pendinginan dengan termoelektrik	62
Gambar 4.8	Perbandingan temperatur CPU pada sistem pendinginan termoelektrik dan sistem <i>liquid block - heatpipe</i>	63
Gambar 4.9	Perbandingan Δ Tekanan antara <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> dari <i>liquid block</i> pada berbagai kondisi pengujian	64



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Jenis-jenis fluida kerja pada <i>heat pipe</i>	27
Tabel 2.2	Karakteristik pengoperasian beberapa <i>heat pipe</i>	27
Tabel 3.1	Spesifikasi Modul DAQ.....	32
Tabel 3.2	Hasil pengujian modul tekanan	36
Tabel 3.3	Spesifikasi partikel nano	46



BAB I

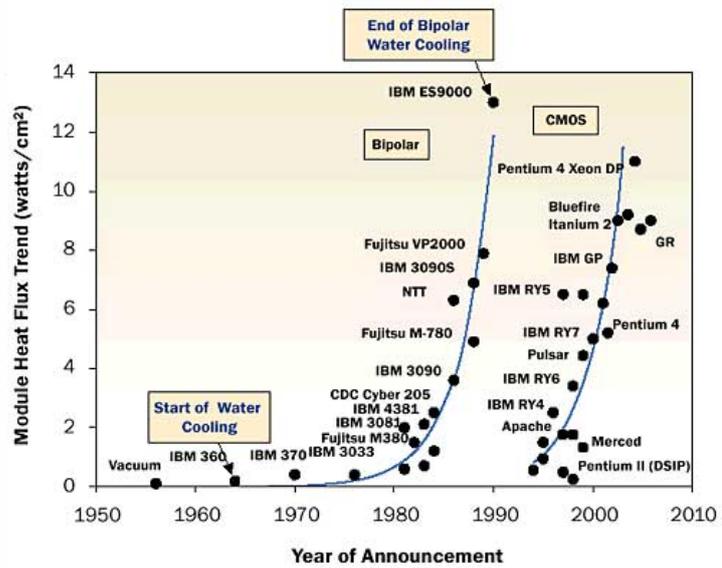
PENDAHULUAN

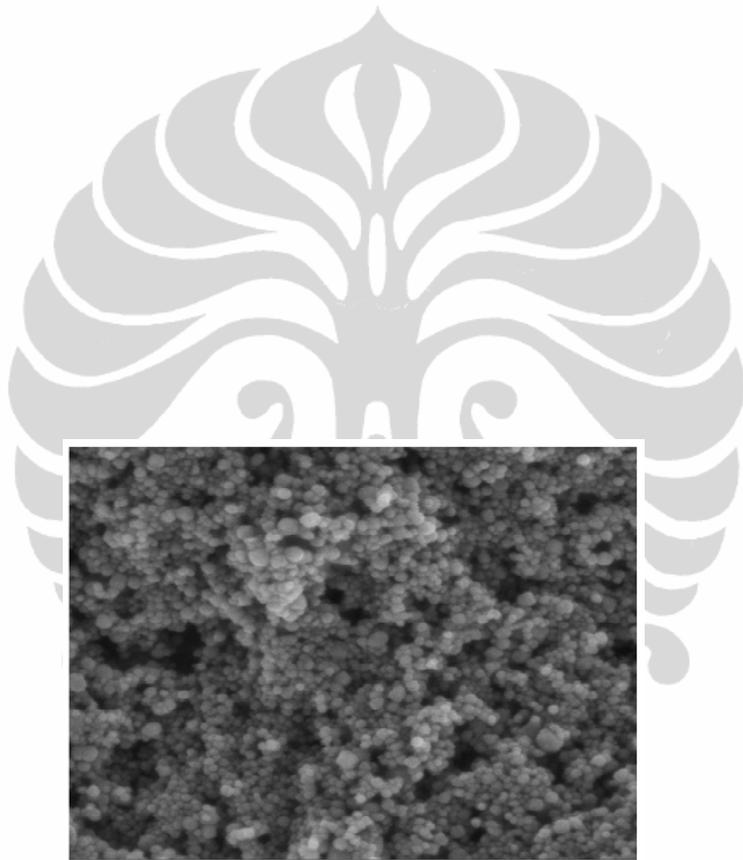
1.1 LATAR BELAKANG

Perkembangan teknologi informasi semakin pesat, terlihat dari berbagai macam *software* yang membutuhkan *personal computer (PC)* yang memiliki prosesor dengan kemampuan komputasi yang sangat tinggi seperti program *computational fluid dynamics (CFD)*, *movie rendering*, simulasi cuaca, simulasi protein pada pembuatan vaksin dan lain sebagainya.

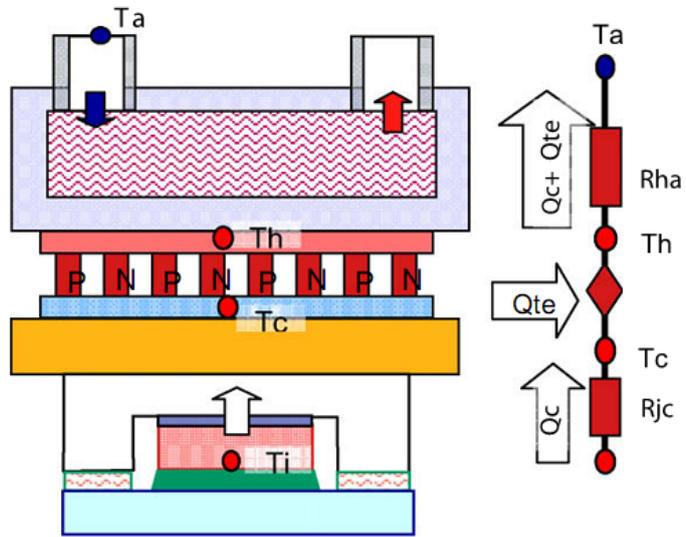
Pada CPU generasi terakhir ditanamkan sekitar 1,17 miliar transistor yang berarti lebih banyak panas yang dihasilkan. Jumlah inti prosesornya pun semakin bertambah mulai *single*, *dual* hingga *hexa core*. Total kalor yang harus didisipasi pada CPU berkinerja tinggi ini adalah sekitar 110 W hingga 140 W dan akan terus meningkat apabila frekuensi dan tegangan CPU dinaikan. Dengan fluks kalor yang semakin tinggi ini *Heatsink Fan (HSF)* yang biasa digunakan sudah tidak lagi memadai untuk meredam panas CPU. Gambar 1.1 menunjukkan tren *heat flux* dari mikroprosesor dari dulu hingga sekarang.

Kemampuan pendinginan berbasis udara seperti HSF mengalami kendala apabila temperatur ambient naik cukup tinggi, maka dikembangkan berbagai alternatif metode pendingin. *Heat transfer* dan *pressure drop* pada *mini* dan *mikro channel* telah secara luas dikaji dan diteliti. Selain itu dengan dikembangkannya teknologi *heatpipe* yang digabungkan dengan HSF proses disipasi panas dapat dilakukan dengan cepat. Beberapa peneliti juga telah mencoba menggabungkan *heatpipe*, *heatsink* dan *waterblock* untuk mendapatkan kinerja pendinginan yang lebih optimal. Gao dan Rowe et. al, [1] mengembangkan sistem pendinginan dengan menggunakan *integrated thermoelectric microcooler (ITM)*, dengan hasil bahwa pembuatan sistem ITM dapat dilakukan dengan teknologi fabrikasi yang





Mag = 200.00 K X 100nm EHT = 3.00 kV
WD = 2 mm



1.3 PEMBATASAN MASALAH

Pembatasan masalah pada penelitian ini meliputi

1. Merancang dan membangun alat untuk pendingin CPU dengan menggunakan *thermoelectric*, *heatpipe* dan nano fluida sebagai fluida kerja.
2. Menguji kinerja pendinginan dengan menggunakan *thermoelectric*, *waterblock* atau *liquid block* yang dilengkapi dengan *heatpipe*, dan nano fluida dengan partikel nano TiO_2 dan Al_2O_3 .

1.4 METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian yang dilakukan 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 Sistem Pendingin
Perancangan sistem pendingin dilakukan dengan menggunakan produk komersil, yaitu untuk komponen : *waterblock*, radiator, pompa dan *thermoelectric* yang disusun sedemikian rupa sehingga pengujian dapat dilakukan.
3. Pengujian Sistem Pendinginan CPU
Pengujian sistem pendinginan dilakukan melalui proses pengambilan data temperatur dan tekanan. Data temperatur diamati dengan menggunakan *thermocouple* dan tekanan dengan menggunakan *differential pressure transmitter* yang sebelumnya telah mengalami proses kalibrasi.
4. Analisa dan Kesimpulan Hasil Pengujian
Setelah data diolah maka dilakukan proses analisa terhadap grafik yang diperoleh. Hasilnya adalah data perubahan temperatur CPU dan perbedaan tekanan. Dari analisa tersebut akan diperoleh kesimpulan terhadap proses pengujian, mengetahui kemampuan pendinginan alat serta perbaikan yang perlu dilakukan

1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

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

BAB I PENDAHULUAN

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

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan teori-teori yang mendasari penelitian ini, yaitu nano fluida, *thermoelektrik* dan *heatpipe* yang kemungkinan bisa diterapkan pada sistem pengujian. Tinjauan pustaka ini diambil dari beberapa buku, jurnal dan situs-situs internet.

BAB III PENGUJIAN SISTEM PENDINGINAN CPU

Bab ini menerangkan tentang bagaimana instalasi pengujian dilakukan, komponen yang digunakan dalam pengujian, prosedur dan metode pengujian untuk mengetahui kemampuan alat.

BAB IV HASIL DAN ANALISA

Bab ini memuat data-data hasil pengujian yang diolah menjadi data berupa grafik dan penjelasan mengenai analisa terhadap kinerja alat.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bagian ini akan diambil beberapa kesimpulan dari seluruh analisa yang telah dilakukan dengan disertai saran terhadap pengembangan desain selanjutnya.

BAB II

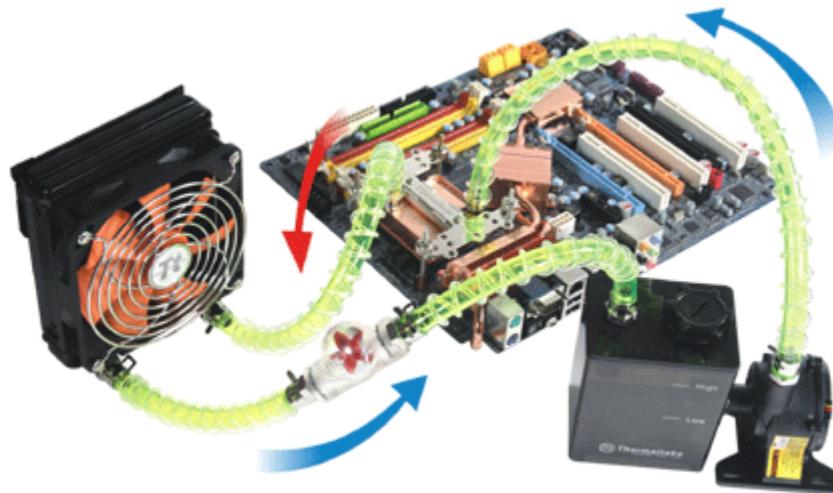
TINJAUAN PUSTAKA

Teknik yang biasa digunakan untuk meningkatkan laju perpindahan kalor dihadapkan pada suatu tantangan dimana meningkatnya kebutuhan untuk mendinginkan komponen-komponen elektronik yang memiliki densitas panas yang tinggi seperti aplikasi pada mikroprosesor, *integrated circuit (IC)* dan juga untuk proses pendinginan pada proses pemesinan. Kendala yang dihadapi adalah kurang baiknya karakteristik panas dari fluida kerja yang digunakan antara lain konduktivitas termal, difusivitas termal, dan juga koefisien perpindahan kalornya.

Secara konvensional pendinginan yang dilakukan untuk komponen-komponen elektronik adalah dengan mengalirkan udara pada permukaan komponen tersebut, dan apabila kalor yang harus diambil dari permukaan cukup besar, biasanya digunakan sirip tambahan sehingga luas perpindahan kalor bertambah besar sehingga kalor yang diserap oleh udara dapat lebih besar juga. Untuk kasus *heat flux* yang besar, air dapat digunakan sebagai alternatif pendinginan karena air mempunyai koefisien perpindahan kalor yang jauh lebih baik dari udara. Gambar 2.1 menunjukkan gabungan sistem pendinginan udara dan air. Namun demikian sistem dengan air ini memiliki kendala khususnya pada sistem reservoir, dimana dibutuhkan cadangan air yang cukup banyak sehingga membutuhkan tambahan tangki sebagai tempat penyimpanan air.

Dalam perkembangan fluida perpindahan kalor yang efisien, konduktivitas termal fluida memegang peran penting. Penelitian-penelitian sebelumnya dan usaha-usaha yang telah dilakukan pada peningkatan perpindahan kalor dihadapkan oleh permasalahan rendahnya nilai konduktivitas termal fluida kerja komersial seperti air, oli dan sebagainya.

Lebih dari 100 tahun lalu para ilmuwan melakukan usaha-usaha yang luar biasa untuk meningkatkan konduktivitas termal fluida dengan memasukan partikel



penyumbatan, abrasi, peningkatan jatuh tekan. Apabila diterapkan di dalam hal praktis tentunya sangatlah tidak menguntungkan. Nanofluida dapat mengatasi permasalahan-permasalahan tersebut.

2.1 NANOFUIDA

Ide untuk meningkatkan sifat-sifat termal fluida dengan mencampurkan partikel solid di dalamnya bukanlah merupakan hal yang baru. Liu et. al, melakukan studi mengenai implikasi hidrodinamik dan perpindahan kalor dari lumpur [14]. Akan tetapi lumpur dengan partikel yang tersuspensi dengan ukuran mikrometer mempunyai permasalahan seperti sifat abrasif dari partikel yang dapat menyebabkan erosi pada komponen, dapat menyebabkan pengotoran dan penyumbatan, serta menyebabkan penurunan tekanan aliran.

Perkembangan nano teknologi dewasa ini telah mengarah pada kelas fluida baru dan agak khusus, disebut nanofluida, yang memiliki potensi besar untuk aplikasi pada perpindahan kalor. Istilah nanofluida berarti dua campuran fase dimana fase yang kontinyu biasanya cairan dan fase yang terdispersi terdiri dari nano partikel padat yang sangat halus, berukuran lebih kecil dari 100 nm. Choi et. al, [7], orang pertama menggunakan istilah nanofluida yang menggunakan fluida cair dengan nano partikel tersuspensi didalamnya. Partikel CuO dan Al₂O₃ berukuran nanometer dicampur dengan fluida cair diantaranya air dan *ethyleneglycol*. Hasil penelitian diperoleh peningkatan termal konduktivitas sebesar 20%. Peningkatan konduktivitas termal sekitar 60% dapat dicapai untuk nanofluida yang terdiri dari air dengan 5% nano partikel CuO. Eastman et. al [8]. Peningkatan *thermal conductivity* sebesar 40% didapat dengan penambahan 0.3% partikel Cu dalam *ethyleneglycol*. Xuan dan Li [15], menjelaskan suatu prosedur untuk mempersiapkan nanofluida dengan menggunakan peralatan *hot wire* untuk mengukur konduktivitas termal nanofluida dengan nano partikel bubuk tembaga yang tersuspensi. Lebih lanjut Das, et. al [5], melakukan pengukuran diffusivitas termal dan konduktivitas termal pada nanofluida dengan nano partikel Al₂O₃ atau CuO sebagai bahan suspensinya sebagai fungsi temperatur. Patel et. al [16], juga melakukan penelitian mengenai pengukuran konduktivitas termal pada

campuran nano partikel Au dengan media air dan toluene. Huanqing Xie et. al [17], melakukan penelitian tentang konduktivitas termal pada *multiwalled carbon nanotubes* (CNTs). Asam nitrit terkonsentrasi digunakan untuk menguraikan kumpulan CNT dalam memproduksi nanofluida CNT.

2.1.1 Konduktivitas Termal Nanofluida

Fluida nano merupakan partikel yang stabil, memiliki konduktivitas panas yang sangat baik. Penyebaran dalam jumlah kecil pada nano tube, dapat merubah konduktivitas termal pada fluida dasar, yakni mengalami peningkatan 2.5 % pada fraksi volume 1% . Konduktivitas termal efektif pada nano fluida meningkat dengan suhu lingkungan atau suhu ruangan. Dengan demikian nano fluida merupakan fluida yang sangat peka terhadap lingkungan.

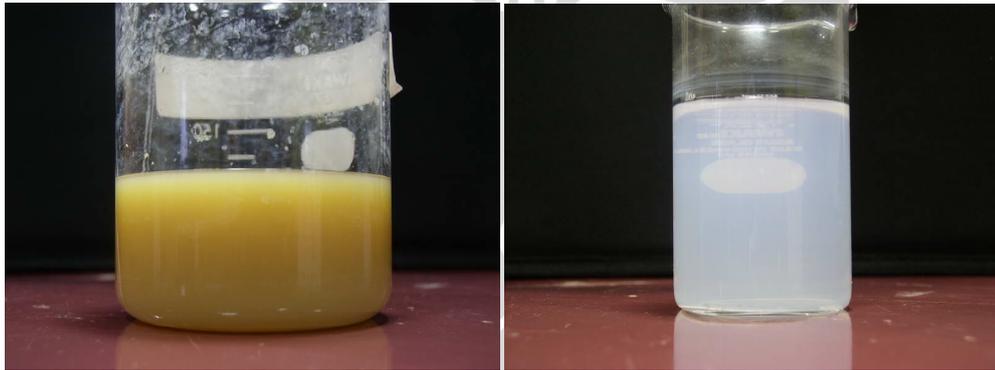
Meskipun perkembangan penelitian tentang konduktivitas termal nanofluida telah banyak dilakukan sebelumnya, namun masih merupakan misteri bagaimana mekanisme terjadinya peningkatan perpindahan kalor pada nanofluida. Bhattacharya et. al [18], menggunakan teknik simulasi dinamika *Brownian* untuk menghitung konduktivitas termal efektif nanofluida. Seok Pil Jang et. al [19], berpendapat bahwa gerak *Brownian* dari nano partikel pada tingkat skala nano dan molekul adalah suatu mekanisme pengatur sifat termal dari nanofluida.

Suatu permodelan yang komprehensif telah diusulkan pula untuk menjelaskan peningkatan yang besar dari konduktivitas termal di dalam nanofluida dan ketergantungannya akan temperatur, dimana teori model konvensional tidak mampu untuk menjelaskannya. Adapun model yang diusulkan tersebut adalah model partikel diam (*stationary particle model*), yang menjelaskan ketergantungan nilai k (*thermal conductivity*) pada konsentrasi volume dan ukuran partikel. Kemudian model yang kedua adalah model partikel bergerak (*moving particle model*) yang menjelaskan bahwa ketergantungan yang kuat akan temperatur pada medium dihubungkan dengan variasi kecepatan nano partikel dengan temperatur.

2.1.2 Konveksi Natural Nanofluida

Kebanyakan literatur yang ada membahas mengenai pengukuran konduktivitas termal nanofluida, Sedangkan untuk penelitian tentang perpindahan kalor konveksi ternyata masih sedikit dan sampai sekarang terus berlanjut. Nandy et. al, [20], meneliti tentang konveksi bebas pada nanofluida di dalam silinder horisontal yang dipanaskan pada satu ujung dan ujung lainnya didinginkan. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa fluida ini berbeda karakter dari *slurry* pada umumnya. Sementara Xuan dan Qiang Li [21], juga melakukan percobaan untuk menyelidiki perpindahan kalor konveksi dan karakteristik aliran dari nanofluida di dalam tabung. Peningkatan koefisien perpindahan kalor konveksi nanofluida seiring dengan laju aliran dan juga fraksi volume nano partikel sementara nilai koefisien perpindahan kalornya lebih besar dari pada fluida dasarnya (air) pada laju aliran yang sama. Kemudian Louis Gosselin et. al, [22], mengkombinasikan disipasi energi dan perpindahan kalor untuk mengoptimalkan aliran pada nanofluida. Penelitian dilakukan pada aliran lapisan turbulen dan laminar, dan sasarannya adalah untuk memaksimalkan perpindahan kalor yang lepas dari sebuah pelat panas dengan nanofluida. Nandy et. al, melakukan eksperimen tentang perpindahan kalor konveksi paksa pada nanofluida dengan nano partikel Al_2O_3 . Pengukuran koefisien perpindahan kalor ini dilakukan dengan menggunakan alat penukar kalor pipa ganda dalam susunan tipe aliran berlawanan. Hasil pengukuran menunjukkan peningkatan nilai koefisien konveksi, untuk nanofluida konsentrasi 1% sebesar 6 - 10% dan konsentrasi 4% sebesar 7 - 17% [23]. Hal ini juga pernah diprediksikan oleh Nandy et. al, [24] dan diperkuat dengan penelitian lanjutannya yang menunjukkan peningkatan koefisien perpindahan kalor sebesar 6% - 8% pada konsentrasi 1% - 4% dalam range temperatur $40^{\circ}C - 60^{\circ}C$. Nandy et. al, [25], meneliti lebih lanjut perpindahan kalor kondensasi film pada kondenser silinder vertikal dengan nanofluida $Al_2O_3 - air$. Hasil yang didapat yaitu untuk nanofluida konsentrasi 1% terjadi peningkatan koefisiennya sebesar 12% - 19% dan untuk konsentrasi 4% sebesar 23% - 33%





temperatur ambientnya [27]. Termoelektrik ini juga diuji coba pada metode peninginan *cryosurgery* dengan perolehan temperatur sampai dengan -90°C , untuk mendapatkan temperatur yang sangat rendah pada pendinginan *cryosurgery* ini termoelektrik yang digunakan adalah dari jenis *cascade* atau bertingkat [28]. Termoelektrik dapat digunakan pula sebagai pembangkit tenaga listrik, dengan memanfaatkan efek sebeck, perbedaan temperatur diantara kedua permukaan termoelektrik dapat memicu gerakan eletron sehingga tegangan listrik dapat dihasilkan [29]. Efek sebeck adalah kebalikan dari efek peltier pada termoelektrik. Aplikasi nyata dari generator termolektrik dilakukan oleh Nandy Putra et. al [30], dengan memanfaatkan panas buang motor bakar untuk menghasilkan hidrogen.

Termoelektrik memiliki potensi pendinginan yang sangat baik dan kemampuan pompa kalor yang tinggi sehingga cocok digunakan untuk aplikasi pendinginan CPU.

2.2.1 Sejarah Peltier (Termoelektrik)

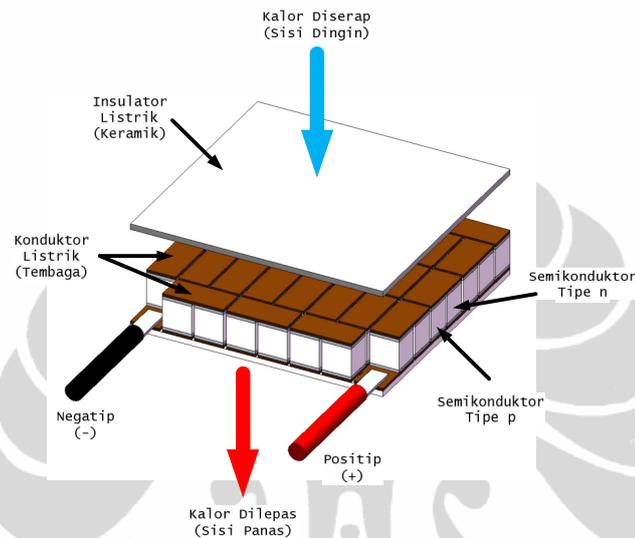
Efek peltier pertama kali ditemukan oleh Jean Charles Athanase Peltier pada tahun 1834 dengan memberikan tegangan pada dua sambungan logam yang berbeda, yang ternyata menghasilkan perbedaan temperatur. Sedangkan termoelektrik sebagai sebuah sistem pertama kali diteliti pada tahun 1950. Teknologi ini digunakan pada sistim pengkondisian ruangan (AC) dan sistem pendingin.

Penggunaan peltier semakin berkembang bersamaan dengan perkembangan teknologi material semikonduktor menghasilkan alat yang dinamakan pendingin termoelektrik (*thermoelectric cooler*). Teknologi ini berkembang dengan pesat baik pada bidang aplikasi pendinginan maupun pemanasan.

2.2.2 Prinsip Kerja Pendingin Termoelektrik

Prinsip kerja pendingin termoelektrik berdasarkan efek peltier, ketika arus DC dialirkan ke elemen peltier yang terdiri dari beberapa pasang sel

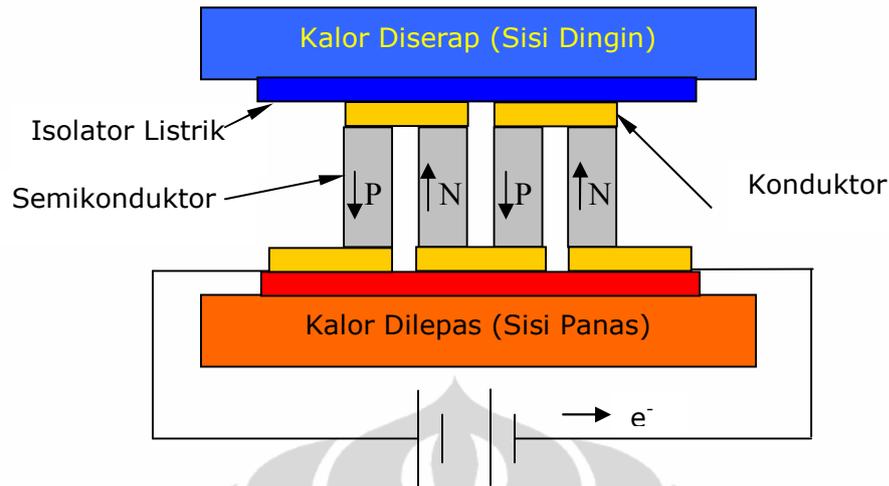
semikonduktor tipe p (semikonduktor yang mempunyai tingkat energi yang lebih rendah) dan tipe n (semikonduktor dengan tingkat energi yang lebih tinggi), akan mengakibatkan salah satu sisi elemen peltier menjadi dingin (kalor diserap) dan sisi lainnya menjadi panas (kalor dilepaskan), seperti pada gambar 2.4, sisi elemen peltier yang menjadi sisi panas maupun dingin tergantung dari arah aliran arus listrik.



Gambar 2.4 Skema termoelektrik

Hal yang menyebabkan sisi dingin elemen peltier menjadi dingin adalah mengalirnya elektron dari tingkat energi yang lebih rendah pada semikonduktor tipe-p, ke tingkat energi yang lebih tinggi yaitu semikonduktor tipe-n. Agar elektron tipe p yang mempunyai tingkat energi yang lebih rendah dapat mengalir maka elektron menyerap kalor yang mengakibatkan sisi tersebut menjadi dingin. Sedangkan pelepasan kalor ke lingkungan terjadi pada sambungan sisi panas, dimana elektron mengalir dari tingkat energi yang lebih tinggi (semikonduktor tipe-n) ke tingkat energi yang lebih rendah (semikonduktor tipe-p), untuk dapat mengalir ke semikonduktor tipe p, kelebihan energi pada tipe n dibuang ke lingkungan sisi tersebut menjadi panas.

Pada gambar 2.5, Elektron mengalir dari semikonduktor pada tipe p yang kekurangan energi, menyerap kalor pada bagian yang didinginkan kemudian mengalir ke semikonduktor tipe n. Semikonduktor tipe n yang kelebihan energi membuang energi tersebut ke lingkungan dan mengalir ke semikonduktor tipe p dan seterusnya.



Gambar 2.5 Arah aliran elektron pada modul termoelektrik

2.2.3 Parameter Penggunaan Elemen Termoelektrik

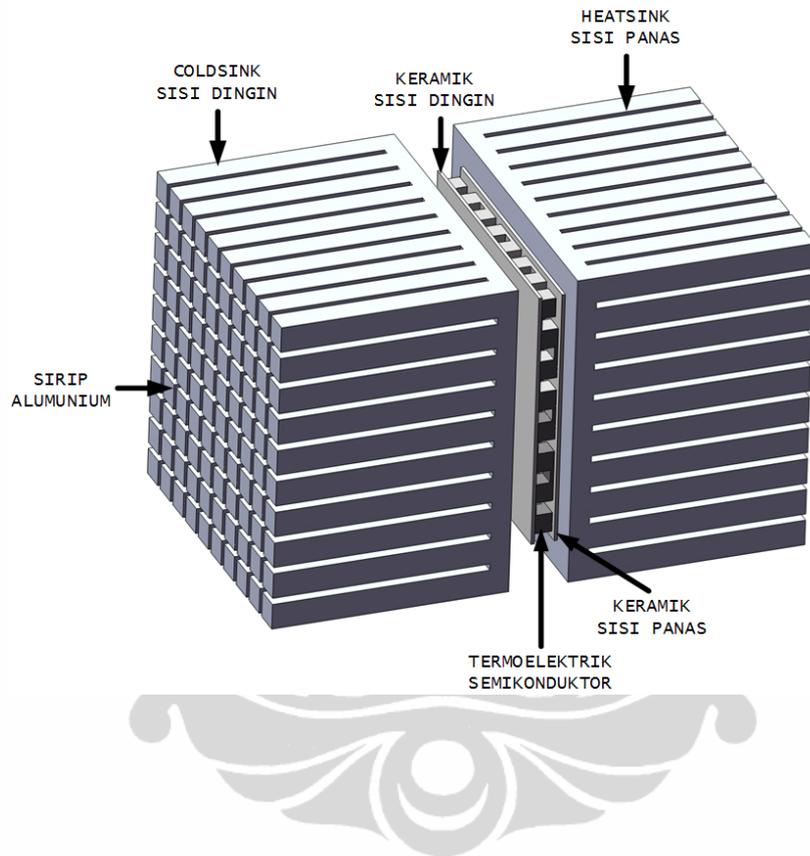
Didalam penggunaan elemen termoelektrik terdapat tiga parameter penting yang perlu diperhatikan yaitu:

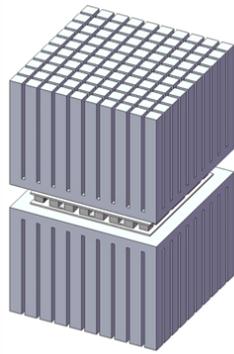
- Temperatur Permukaan Sisi Panas Peltier/hot side (T_h)
- Temperatur Permukaan Sisi Dingin Peltier/Cold Side (T_c)
- Beban kalor yang dapat ditransfer dari sisi dingin (Q_c)

Terdapat dua faktor penting yang mempengaruhi nilai temperatur sisi panas modul, yaitu:

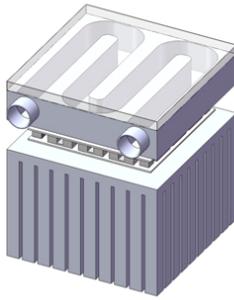
- Temperatur ambien lingkungan
- Efisiensi sistem pendingin yang digunakan pada sisi panas modul.

Perbedaan temperatur (ΔT) sistem adalah perbedaan temperatur antara beban pendinginan dan lingkungan, sedangkan ΔT elemen adalah perbedaan temperatur antara sisi dingin elemen peltier dan sisi panas elemen peltier. Secara umum pencapaian ΔT ($T_{\text{panas}} - T_{\text{dingin}}$) dari modul termoelektrik selalu mendekati konstan. Jika T_{panas} semakin rendah maka T_{dingin} semakin dingin, bila T_{panas} semakin tinggi maka T_{dingin} tidak terlalu dingin

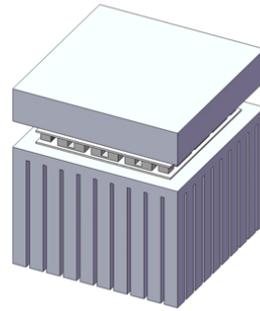




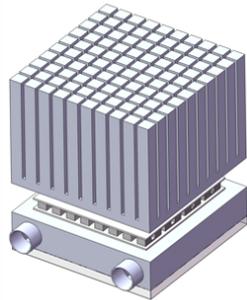
Udara → Udara



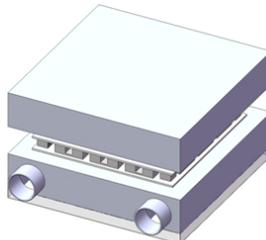
Cairan → Udara



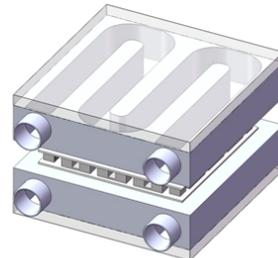
Padat → Udara



Udara → Cairan

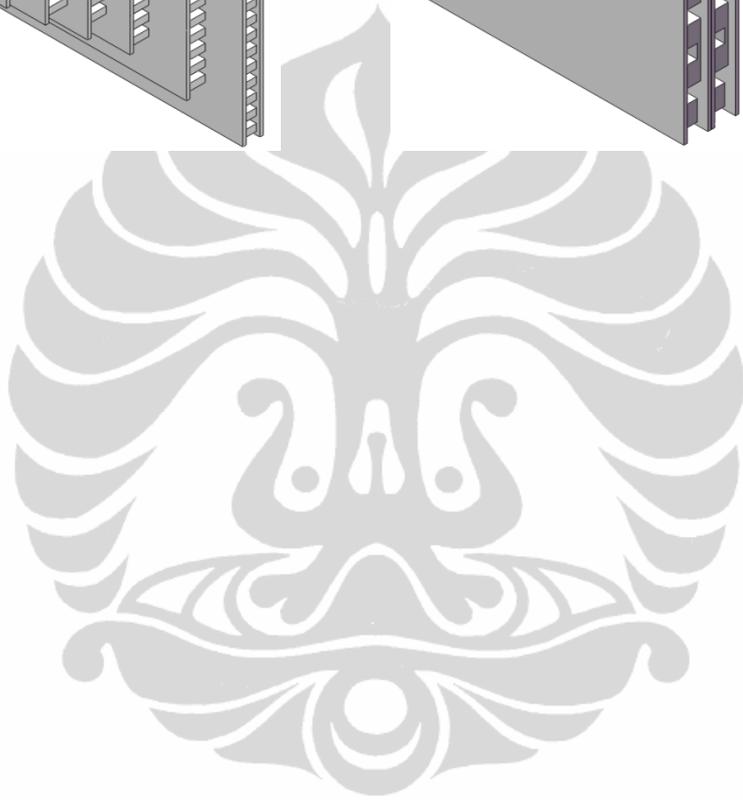
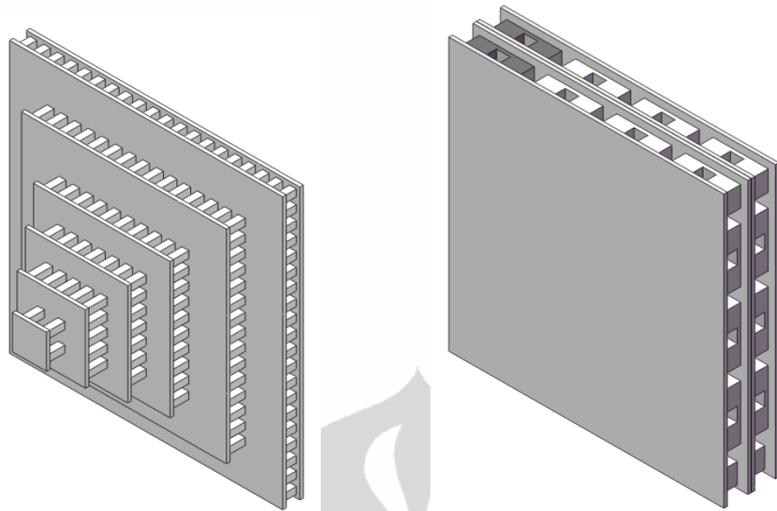


Padat → Cairan



Cairan → Cairan





memanfaatkan panas dari sisa panas buang yang dihasilkan dari industri maupun pemanfaatan sisa panas dari pembakaran bahan bakar [30].

2.3 HEAT PIPE

Heat pipe adalah sebuah alat yang memiliki nilai konduktivitas termal tinggi, yang digunakan sebagai pemindah kalor dimana kuantitas kalor yang dipindahkan relatif besar dengan hanya nilai perbedaan temperatur yang kecil antara permukaan panas dan dingin. *Heat pipe* dapat digunakan pada situasi dimana sumber panas dan pelepas panas diharuskan terpisah, untuk membantu konduksi atau menyebarkan panas pada bidang. Tidak seperti pendingin termoelektrik, *heat pipe* tidak mengkonsumsi energi ataupun menghasilkan panas sendiri.

2.3.1 Sejarah *Heat pipe*

Perkembangan *heat pipe* dimulai oleh Angier March Perkins yang mengawali konsep tentang fluida kerja dengan satu fase (hermetic tube boiler - memperoleh paten pada tahun 1839). Jacob Perkins (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 kondenser, sehingga air yang berada di dalam tube beroperasi pada dua fasa. Disain awal ini mengandalkan gravitasi untuk mengembalikan air ke evaporator (sekarang disebut Thermosyphon) [34].

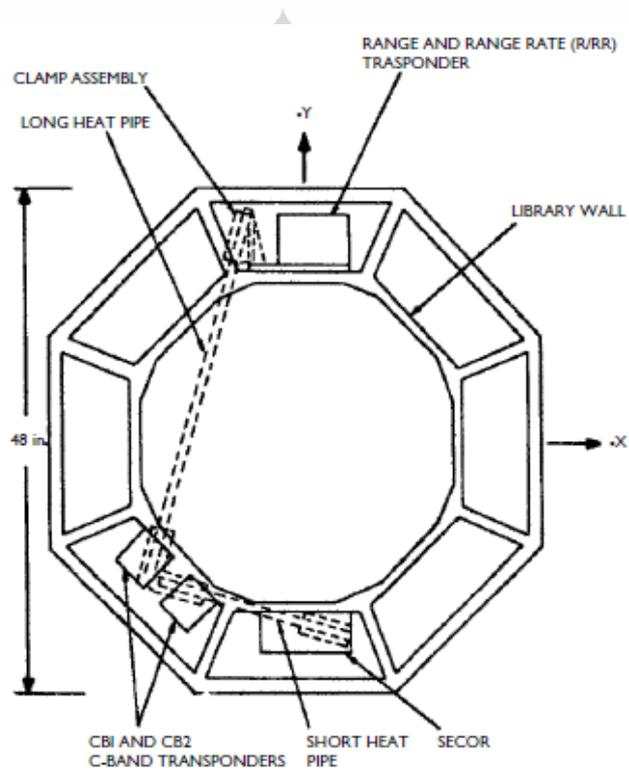
Perkins Tube merupakan lompatan penting bagi perkembangan *heat pipe* dewasa ini. Konsep dari moderen *heat pipe* adalah penggunaan wick structure untuk memindahkan fluida kerja ke bagian kondenser dengan melawan efek dari gravitasi. Konsep ini diletakan oleh R.S. Gaugler dari General Motors Corporation, dia melukiskan bahwa *heat pipe* dapat diaplikasikan dalam sistem refrigerasi karena memang prinsip kerja dari fluida kerja pada sebuah *heat pipe* sama dengan yang terdapat pada sistem refrigerasi secara umum.

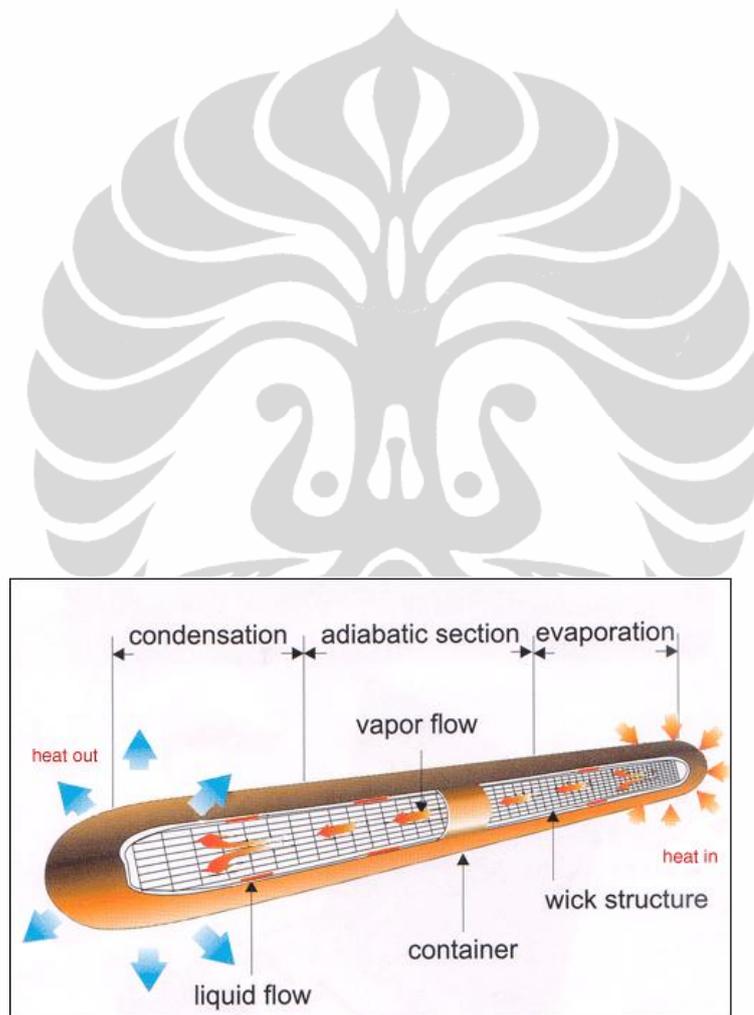
Kemudian *heat pipe* didemonstrasikan pertama oleh *George Grover* di *Los Alamos National Laboratory* pada tahun 1963 dan diumumkan pada jurnal fisika tahun 1964.

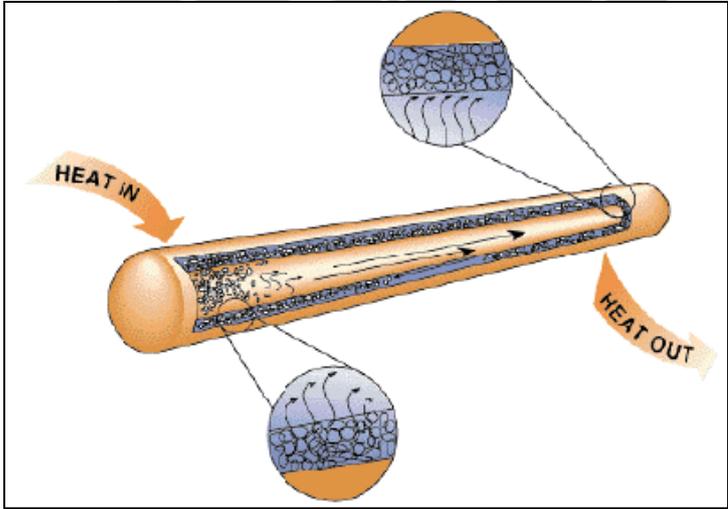
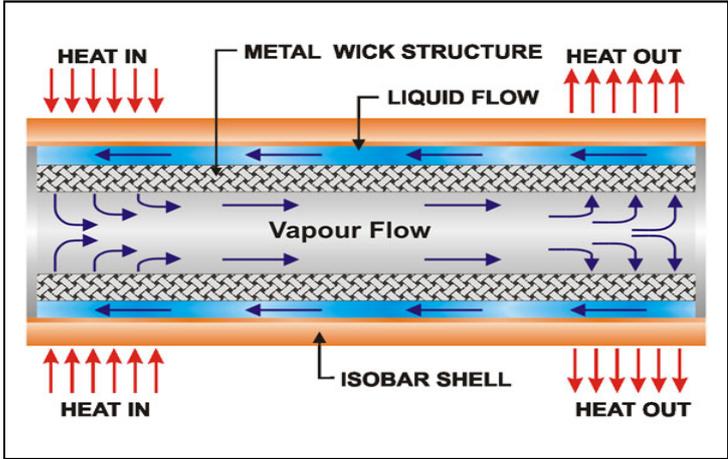
Seiring penelitian Grover di *Los Alamos National Laboratory*, pada saat yang sama Bainton di Laboratorium Energi Atom Inggris melakukan percobaan yang sama mengenai *heat pipe* [35]. Percobaan dilakukan untuk penggunaan pada *converter diode nuclear thermionic*, yang berkerjasama dengan *Nuclear Research Centre*, Ispra, Italy. Pekerjaan di Ispra tersebut menjadi pusat pengembangan *heat pipe* terbesar diluar Amerika [36,37]. Ispra sangat aktif mengembangkan *heat pipe* dengan mengkaji aplikasi teori *heat pipe* Cheung [38] mampu menerbitkan 80 paper tentang pengembangan *heat pipe*.

Kemudian RCA sebagai perusahaan di Amerika Serikat yang pertama melakukan penelitian dan pengembangan *heat pipe* untuk aplikasi komersial tepatnya pada tahun 1964 dan 1966 [39,40]. Perusahaan tersebut mengembangkan material *heat pipe* menggunakan kaca, tembaga, nikel, stainless steel, molybdenum dan TZM molybdenum sebagai material dinding *heat pipe*. Fluda juga termasuk yang divariasikan seperti air, caesium, sodium, lithium dan bismuth dengan temperatur yang mampu dipindahkan oleh *heat pipe* sampai 1650°C. Tidak semua penelitian *heat pipe* pada waktu tersebut di fokuskan untuk temperatur operasi yang tinggi. Deverall dan Kemme [41] mengembangkan *heat pipe* untuk aplikasi satellite dengan air sebagai fluida kerja, dan penelitian pertama untuk *heat pipe* dengan variasi konduktansi yang digunakan untuk aplikasi satelit juga [42].

Selama tahun 1964 juga NASA memainkan peran besar dalam pengembangan *heat pipe* 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 energy yang rendah. Hal lain yang luar biasa dari *heat pipe* ini adalah sistem yang tidak dipengaruhi oleh lingkungan dengan gravitasi nol [43]. Teori pipa panas yang berkembang dengan baik dan banyak dihasilkan oleh Cotter [44] yang berkerja di Los Alamos Scientific Laboratory.







2. Wick struktur (kapilaritas)

Pada bagian dalam dari dinding casing terdapat komponen dengan struktur berongga. Bagian ini yang disebut struktur kapilaritas atau wick. Tujuan utama dari bagian ini adalah seperti pompa pada untuk mengalirkan fluida kerja yang telah terkondensasi di bagian kondenser agar dapat kembali lagi ke evaporator untuk menyerap kalor dari sumber panas. Bagian ini berkerja berdasarkan tekanan kapilaritas dari fluida kerja sehingga tidak memerlukan daya untuk mengalirkan fluida kerja.

Struktur *wick* dalam *heat pipe* harus mampu mengalirkan cairan untuk mengalir dari kondenser menuju evaporator. Ketebalan lapisan *wick* mempengaruhi keseimbangan aliran dua fase dalam *heat pipe* karena tekanan kapilaritas dalam *wick* dibutuhkan untuk memompa cairan disuatu ujung ke ujung lainnya [51]. Dalam *heat pipe*, daya kapilaritas maksimum (ΔP_c) pada *wick* harus lebih besar atau sama dengan penjumlahan seluruh *drop pressure* untuk memastikan bahwa kedua fase tersebut dapat mengalir [52].

- *Drop pressure* cairan yang dibutuhkan untuk berpindah dari kondenser menuju evaporator melalui *wick* (ΔP_l);
- *Drop pressure* dari uap yang dibutuhkan untuk menggerakkan fluida uap dari evaporator menuju kondenser (ΔP_v);
- Tekanan hidrostatis akibat gravitasi (ΔP_g).

Dan tekanan-terkanan tersebut dapat dirumuskan secara matematik :

$$\Delta P_c \geq \Delta P_l + \Delta P_v + \Delta P_g$$

Persamaan diatas mengacu pada batas kapilaritas *wick* dan pembatasan yang jelas pada panas yang mampu dialirkan oleh *heat pipe* tergantung fluida yang di gunakan untuk rentang panas tertentu seperti pada tabel 2.1. Apabila suatu kondisi melebihi dari batas kemampuan *heat pipe* maka *wick* tidak mampu lagi untuk mengambalikan cairan menuju

evaporator, hingga akhirnya evaporator mencapai titik paling kering yang menyebabkan evaporator kelebihan panas pada *heat pipe*.

3. Fluida kerja

Komponen terakhir adalah fluida kerja yang membawa kalor dari sumber panas untuk kemudian dilepas ke lingkungan. Kebanyakan produsen menggunakan air, metanol atau alkohol untuk fluida kerja. Fluida kerja ini beroperasi daerah liquid yang mendekati titik didihnya. Sehingga semakin tinggi nilai kalor laten dari fluida kerja tersebut maka akan semakin banyak kalor yang mampu diserapnya, dan semakin efisien *heat pipe* tersebut. Masalah utama banyak dari fluida kerja yang digunakan mudah terbakar dan beracun

Pertimbangan utama dalam mencari fluida kerja yang cocok dalam sebuah *heat pipe* adalah rentang temperatur kerja fluida, yang dapat dilihat dari table 2.2. Untuk mendapatkan pemilihan fluida kerja yang tepat pada *heat pipe*, 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 panas tinggi.
- 7) Mempunyai kekentalan yang rendah saat fase uap maupun cairan.
- 8) Mempunyai tekanan permukaan yang tinggi.

Tabel 2.1 Jenis-jenis fluida kerja pada *Heat pipe*

Medium	Melting Point (°C)	Boiling @ Atmosfer Pressure (°C)	Useful Range (°C)
Helium	- 271	- 261	-271 to -269
Nitrogen	- 210	- 196	-203 to -160
Ammonia	- 78	- 33	-60 to 100
Acetone	- 95	57	0 to 120
Methanol	- 98	64	10 to 130
Flutec PP2	- 50	76	10 to 160
Ethanol	- 112	78	0 to 130
Water	0	100	30 to 200
Toluene	- 95	110	50 to 200
Mercury	- 39	361	250 to 650
Sodium	98	892	600 to 1200
Lithium	179	1340	1000 to 1800
Silver	960	2212	1800 to 2300

Tabel 2.2 Karakteristik pengoperasian beberapa *heat pipe*

Temperature Range (°C)	<i>Heat pipe</i> Working Fluid	<i>Heat pipe</i> Vessel Material	Measured axial ⁽⁸⁾ heat flux (kW/cm ²)	Measured surface ⁽⁸⁾ heat flux (W/cm ²)
-200 to -80	Liquid Nitrogen	Stainless Steel	0.067 @ 63°C	1.01 @ 63°C
-70 to +60	Liquid Ammonia	Nickel, Aluminum, Stainless Steel	0.295	2.95
-45 to +120	Methanol	Copper, Nickel, Stainless Steel	0.45 @ 100°C	75.5 @ 100°C
+5 to +230	Water	Copper, Nickel	0.67 @ 200°C	146 @ 170°C
+190 to +550	Mercury* +0.02% Magnesium 0.001%	Stainless Steel	25.1 @ 360°C*	181 @ 750°C
+400 to +800	Potassium*	Nickel, Stainless Steel	5.6 @ 750°C	181 @ 750°C
+500 to +900	Sodium*	Nickel, Stainless Steel	9.3 @ 850°C	224 @ 760°C
+900 to +1,500	Lithium*	Niobium +1% Zirconium	2.0 @ 1250°C 2	207 @ 1250°C
1,500 to +2,000	Silver*	Tantalum +5% Tungsten	4.1	413

⁽⁸⁾Varies with temperature

^(x)Using threaded artery wick

* Tested at Los Alamos Scientific Laboratory

* Measured value based on reaching the sonic limit of mercury in the *heat pipe*
(Sumber : Reference of "Heat Transfer", 5th Edition, JP Holman, McGraw-Hill)

2.4 PERPINDAHAN KALOR PADA SISTEM PENDINGIN CPU

Perpindahan kalor yang terjadi pada sistem pendingin CPU adalah dengan cara konduksi dan konveksi. Konduksi terjadi mulai dari CPU, sisi dingin peltier, sisi panas peltier, dasar dari *liquid block* dan *heatpipe*. Sedangkan konveksi terjadi pada fluida dan *liquid block*

2.4.1 Perpindahan Kalor Konduksi

Perpindahan kalor yang terjadi secara konduksi berarti perpindahan kalor/panas tanpa diikuti oleh perpindahan dari molekul benda tersebut. Konduksi juga dapat dikatakan sebagai transfer energi dari sebuah benda yang memiliki energi yang cukup besar menuju ke benda yang memiliki energi yang rendah.

Persamaan yang digunakan untuk perpindahan kalor konduksi dikenal dengan Hukum Fourier :

$$q = -k.A \frac{T_0 - T_1}{\Delta x}$$

Jika suatu benda padat disusun berlapis dari material yang berbeda, maka untuk mengetahui nilai perpindahan kalor yang terjadi dapat digunakan pendekatan sistem resistansi listrik. Besarnya tahanan termal yang terjadi adalah perbandingan selisih suhu diantara kedua permukaan ($T_0 - T_1$) dengan laju aliran kalor q (J/s).

Untuk mencari nilai tahanan termal dari suatu material padatan digunakan persamaan :

$$R_T = \frac{T_0 - T_1}{q} = \frac{l}{kA}$$

Dimana :

q = Energi kalor (W)

k = Konduktivitas thermal (W/m.K)

A = Luas permukaan (m^2)

Δx = Tebal penampang permukaan (m)

T_0 = Temperatur yang lebih tinggi (K)

T_1 = Temperatur yang lebih rendah (K)

Nilai minus, (-) dalam persamaan diatas menunjukkan bahwa kalor selalu berpindah ke arah temperatur yang lebih rendah.

2.4.2 Perpindahan Kalor Konveksi

Konveksi adalah perpindahan kalor yang terjadi akibat adanya pergerakan molekul pada suatu zat, gerakan inilah yang menyebabkan adanya transfer kalor. Konveksi sendiri dapat dibagi menjadi dua, yaitu konveksi bebas atau konveksi alamiah dan konveksi paksa. Konveksi bebas atau konveksi alamiah terjadi apabila pergerakan fluida dikarenakan gaya apung (*bouyancy force*) akibat perbedaan densitas fluida tersebut. Perbedaan kerapatan itu sendiri bisa terjadi karena adanya perbedaan temperatur akibat proses pemanasan. Sedangkan pada konveksi paksa pergerakan fluida terjadi akibat oleh gaya luar seperti dari kipas (*Fan*) atau pompa. Pada perpindahan kalor konveksi berlaku hukum pendinginan Newton, yaitu :

$$q = h.A(T_s - T_\infty)$$

Dimana :

q = Energi kalor (W)

h = Koefisien perpindahan kalor konveksi (W/m².K)

A = Luas area permukaan (m²)

T_s = Temperatur permukaan (K)

T_∞ = Temperatur *ambient* (K)

2.4.3 Tahanan Kontak Termal

Pada pemasangan modul termoelektrik dengan *Heat Pipe* akan terjadi bidang kontak antara keduanya yang akan menyebabkan penurunan temperatur secara tiba-tiba pada persinggungan keduanya. Hal ini terjadi karena adanya tahanan kontak termal (*thermal contact resistance*), dimana nilai kekasaran permukaan bidang kontak akan mempengaruhi laju perpindahan kalor. Ada dua unsur pokok yang menentukan perpindahan kalor pada sambungan, yaitu :

- a. Konduksi antara zat padat dengan zat padat pada titik- titik persinggungan (*contact spot*).
- b. Konduksi melalui gas yang terkurung pada ruang – ruang lowong yang terbentuk karena persinggungan (*air gap*).

Kedua faktor ini diperkirakan memberikan pengaruh utama terhadap aliran kalor. Penurunan temperatur karena adanya hambatan kontak sangat berpengaruh terhadap laju kalor. Karena konduktivitas gas sangat kecil dibandingkan dengan zat padat, maka jika terdapat ruang kosong pada permukaan kontak dapat menyebabkan turunnya daya hantar kalor permukaan.

Adapun besarnya nilai tahanan kontak adalah :

$$R_{t,c} = \frac{(T_A - T_B)}{q_x}$$

Dimana :

- $R_{t,c}$ = Tahanan termal (°C / W)
 T_A = Temperatur material A (°C)
 T_B = Temperatur material B (°C)
 q_x = Heat flux (W/m²)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 TUJUAN PENGUJIAN

Tujuan dari pengujian yang dilakukan adalah untuk mengetahui *performance* atau unjuk kerja dari sistem pendinginan CPU dengan mengkombinasikan sistem pendinginan baik dengan HSF maupun *liquid cooling*, jenis fluida kerja pada berbagai konsentrasi dan sistem pendinginan dengan menggunakan *thermoelectric*

3.2 KOMPONEN PENGUJIAN

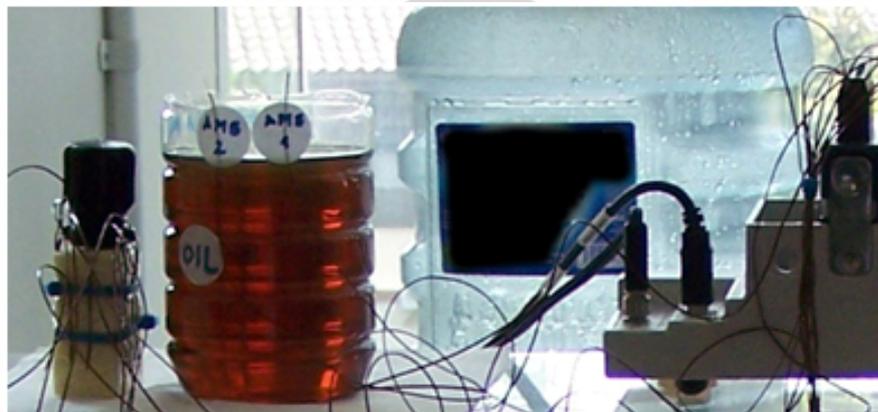
Peralatan yang digunakan dalam pengujian antara lain adalah; *data acquisition (DAQ)* dan software LabView 8.5, termokopel, *thermal paste*, *differential pressure transmitter*, *thermal conductivity meter KD2*, *power supply*, *flow indicator*, radiator, pompa air dan reservoir, *circulating thermostatic bath (CTB)*, *waterblock* atau *liquid block*, *thermoelectric*, *cold plate* dan *heat spreader*, fluida kerja berupa nano fluida dengan partikel TiO dan Al₂O₃, *Heatsink* dan *Fan (HSF)*, serta satu set sistem komputer. Komponen-komponen pengujian tersebut dirangkai dan disusun sedemikian rupa sehingga pengujian dan pengambilan data dapat dilakukan.

3.2.1 Data Acquisition (DAQ)

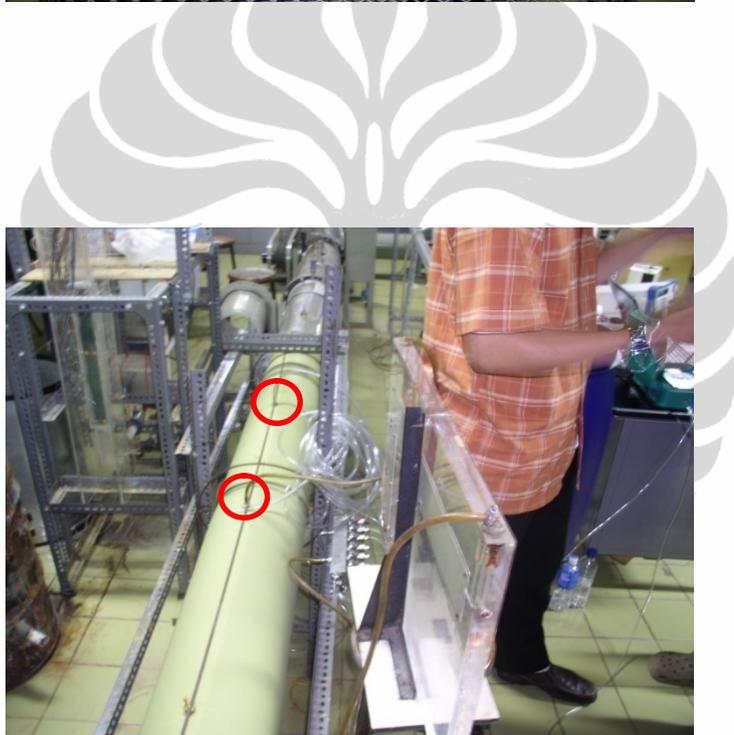
Pengambilan data dilakukan dengan bantuan DAQ beserta software LabView 8.5. Modul yang digunakan adalah dua buah yaitu NI 9203 untuk pembacaan tekanan dan NI 9213 untuk pembacaan temperatur



Modul	NI 9203	NI 9213
Channel	8 analog	16 analog
Resolution	16 bit	24 bit
Range	± 20 mA	± 78.125 mV
Percent Error	± 0.02 %	± 0.02 %
Power	12 – 30 VDC	12 – 30 VDC
Calibrated	N/A	Yes (1 Year)

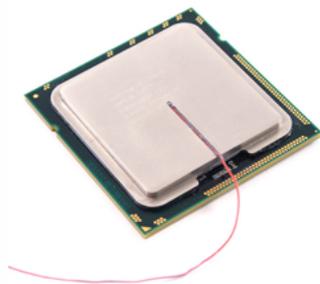
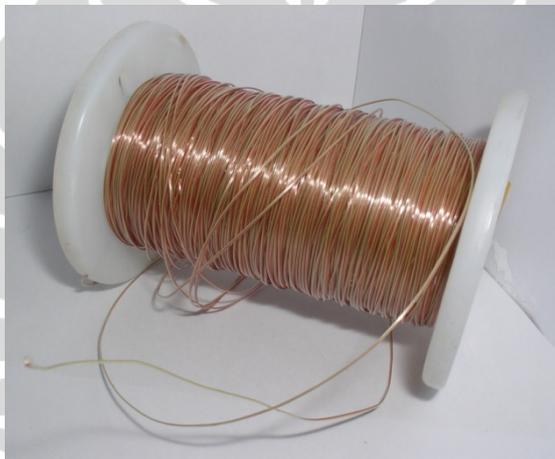








Manometer	Dwyer 616	NI 9213
0 psi	0 psi	0 psi
1 psi	0,96 psi	1,02 psi
2 psi	2,11 psi	2,01 psi
3 psi	2,98 psi	3,02 psi
4 psi	4,02 psi	3,99 psi
5 psi	4,96 psi	5,02 psi





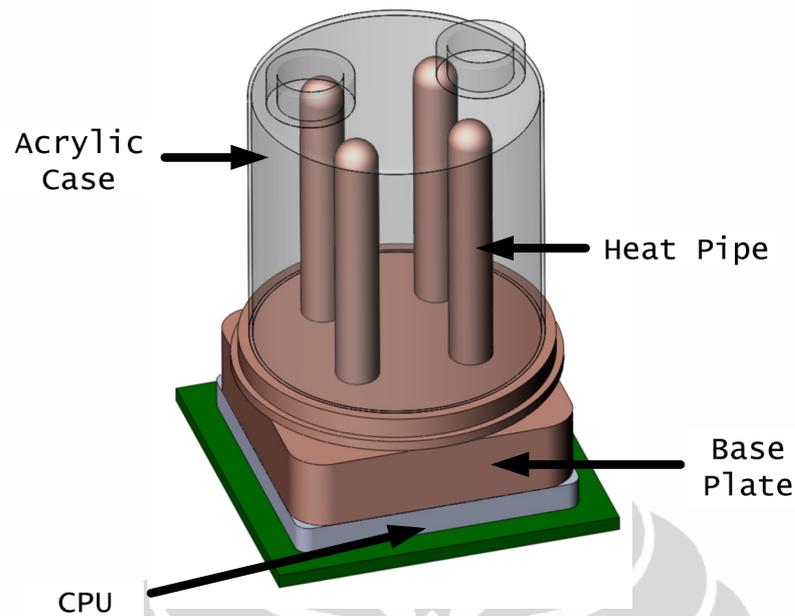












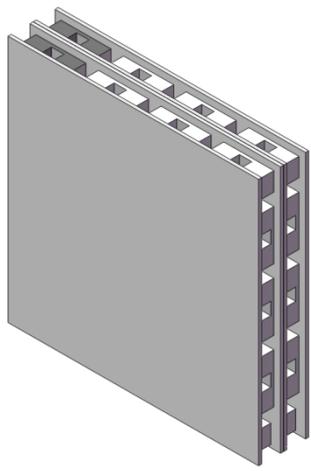
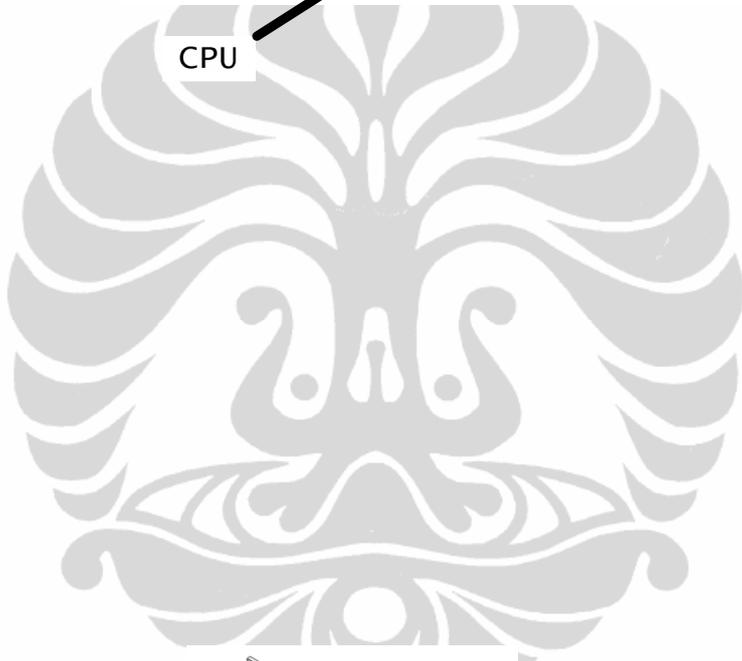
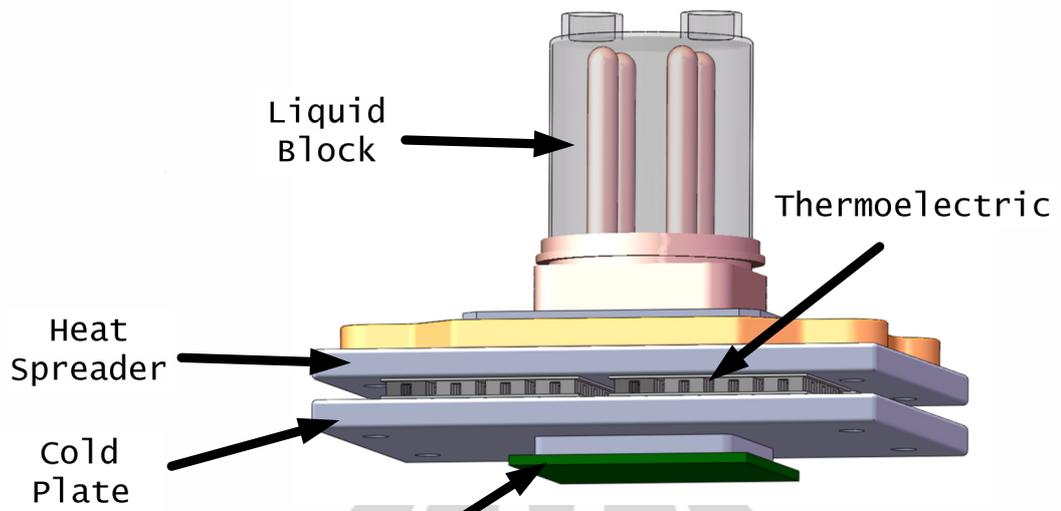
Gambar 3.18 *Liquid block*

Spesifikasi dari *Liquid Block* :

<i>Liquid volume</i>	: Aprox 116.975 cm ³
<i>Heatpipe diameter</i>	: 6 mm
<i>Heat pipe height</i>	: 55 mm
<i>Heat pipe material</i>	: copper
<i>Base plate material</i>	: copper
<i>Dimension</i>	: 82 (w) x 106 (l) x 70 (w) mm
<i>Weight</i>	: 557 gr

3.2.10 *Cold Plate dan Heat Spreader*

Cold plate dan *heat spreader* digunakan pada sistem pendinginan *thermoelectric*. *Cold plate* diletakan pada sisi dingin dan *heat spreader* diletakan pada sisi panas dari peltier. Keduanya digunakan sebagai alat bantu agar proses pelepasan dan penyerapan kalor berlangsung optimal mengingat perbedaan luas penampang dari *thermoelectric*, peltier dan CPU yang tidak sama. Selain itu keterbatasan *heat pumping capacity* (Q) dari peltier dapat diatasi. Bahan yang digunakan adalah aluminium.



Spesifikasi dari *Thermoelectric* :

<i>Brand</i>	: <i>Laird Technologies</i>
<i>Model</i>	: <i>MS2, 192, 14, 20, 11, 18 L</i>
<i>Qooling Capacity</i>	: <i>38 Watt max</i>
<i>Voltage / Ampere</i>	: <i>13 V / 6 A Max</i>
<i>Dimension</i>	: <i>40 x 40 x 8,1 mm</i>

3.2.12 Nano Fluida

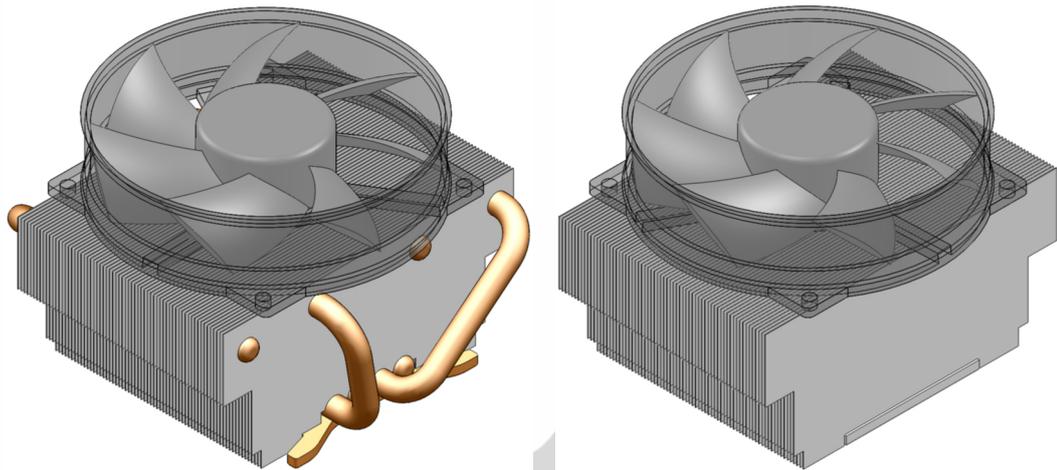
Sebagai fluida kerja digunakan nano fluida dengan *base fluid* aquades. Partikel yang digunakan adalah TiO_2 (*titanium oxyde*) dan Al_2O_3 (*aluminium oxyde*) untuk konsentrasi 0,5% dan 1% (% *volume*). Proses pencampuran dilakukan dengan bantuan *ultrasonic processor* dan diproses selama 60 menit agar terdispersi sempurna. Akibat keterbatasan dari *ultrasonic processor* yang digunakan, proses pencampuran dilakukan per 100 mL.

Tabel 3.3 Spesifikasi partikel nano

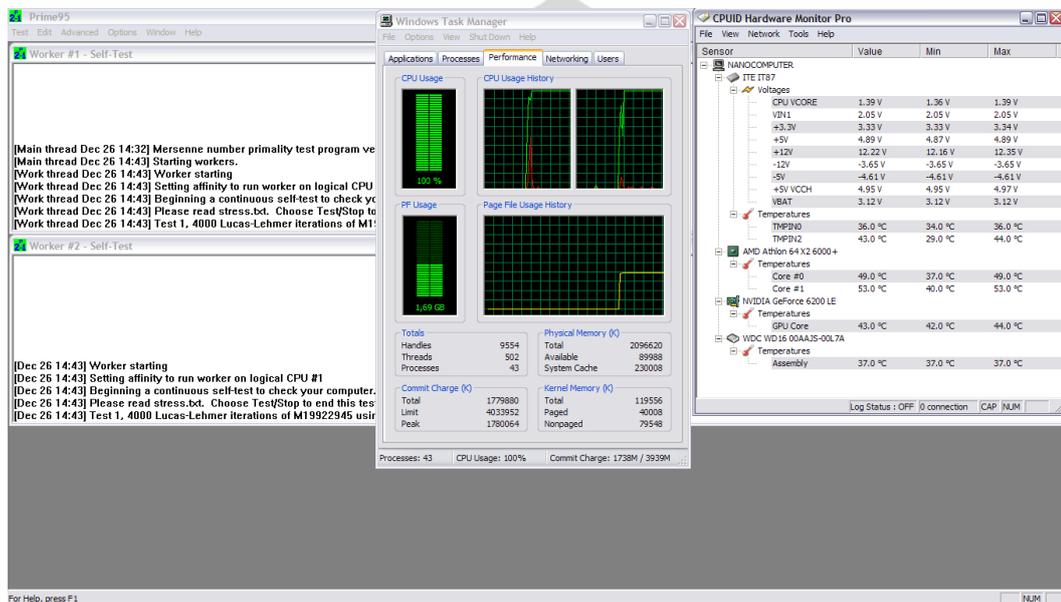
<i>Nano Partikel</i>	Al_2O_3	TiO_2
<i>Brand</i>	<i>Degussa Aeroxide</i>	<i>Degussa Aeroxide</i>
<i>Specific surface area</i>	$100 \pm 15 \text{ m}^2/\text{g}$	$50 \pm \text{ m}^2/\text{g}$
<i>Density</i>	50 g/l	130 g/l
<i>Size</i>	13 nm	21 nm
<i>Purity</i>	99.8%	99.8%

3.2.13 Heatsink dan Fan (HSF)

Sebagai pembanding untuk sistem pendinginan konvensional maka digunakan HSF. Terdapat dua jenis HSF, dengan *heatipe* dan tanpa *heatpipe*. HSF yang digunakan adalah HSF standar untuk CPU AMD (*Advanced Micro Devices*).



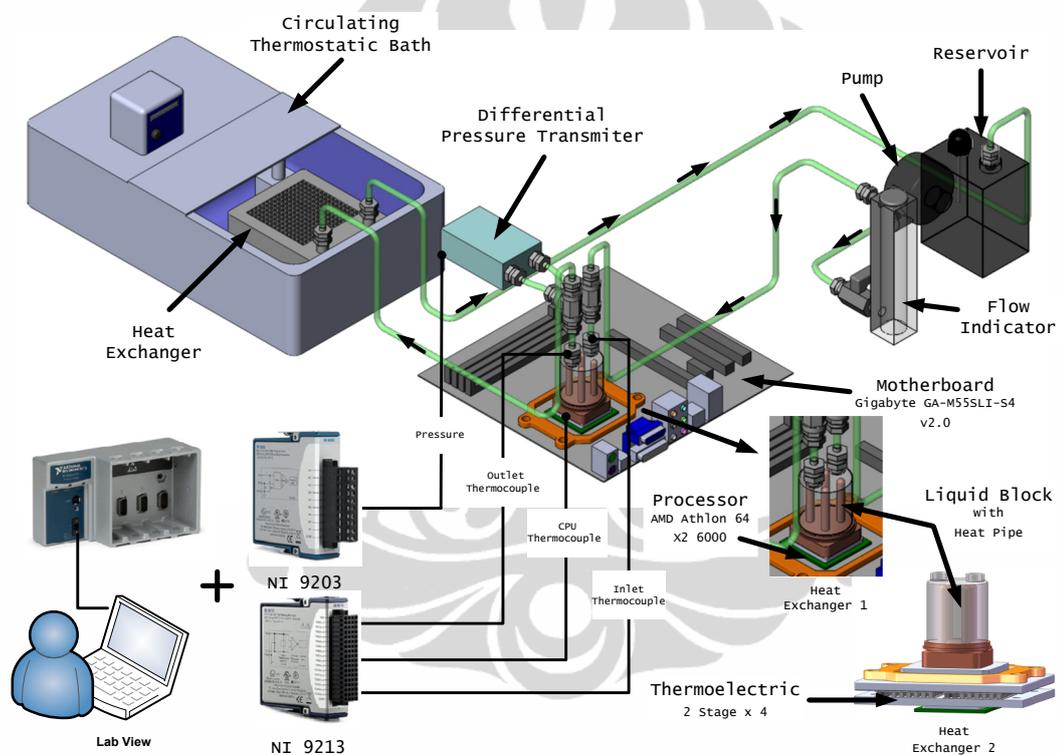






3.3 SKEMA PENGUJIAN

Skema pengujian dari sistem pendingin CPU ditunjukkan pada gambar 3.26. Komponen pengujian terdiri dari *Personal Computer* dan sistem pendingin. Sistem pendingin terdiri dari siklus tertutup dari aliran fluida (aquades dan nano fluid). Agar data dapat diperoleh maka digunakan *data acquisition* dari *national instrument* lengkap dengan sensor termokpel dan *pressure transmitter*. Sistem perpipaan yang digunakan dirancang sedemikian rupa agar mempermudah proses perbaikan dan penggantian komponen.



Gambar 3.26 Skema instalasi pengujian alat

Proses kerja dari sistem ini adalah sebagai berikut :

1. Fluida kerja didinginkan oleh radiator yang terendam didalam *thermostatic bath*.
2. Setelah temperatur yang diinginkan tercapai, fluida kerja dipompa menuju reservoir.
3. Pompa mengalirkan fluida kerja menuju *liquid block* melalui *flow indicator*. Pada *flow indicator* terdapat *valve* untuk mengatur besarnya debit aliran.

4. Aliran fluida kemudian masuk kedalam *liquid block*. Proses perpindahan kalor terjadi didalam *liquid block*. Perpindahan kalor ini dibantu oleh sistem *heatpipe* yang ada didalamnya sementara *differential pressure transmitter* terus menerus memonitor perubahan tekanan. Perubahan temperatur dari CPU diamati melalui termokopel yang terpasang tepat dibawah *liquid block*.
5. Fluida kemudian mengalir menuju radiator dan didinginkan dengan bantuan *thermostatic bath*.

Pengujian dilakukan selama rentang waktu 40 menit, dimana 10 menit pertama CPU diatur pada kondisi *idle*, kemudian kondisi *full load* pada 30 menit berikutnya dan kembali pada posisi *idle* untuk 10 menit terakhir. Pengaturan kondisi *load* dan *idle* dari CPU dibantu dengan menggunakan software *prime 95*.

Berikut adalah parameter yang berlaku dalam pengujian :

1. Pada pengujian HSF temperatur ruangan berada pada $30 \pm 1^{\circ}\text{C}$.
2. Debit aliran pada pengujian baik dengan menggunakan aquades maupun nano fluida diatur tetap yaitu 1 liter per menit.
3. Variasi temperatur TSB adalah 25°C , 30°C dan 35°C .
4. Tegangan input untuk *differential pressure transducer* adalah 20 Volt.
5. Tegangan input untuk *thermoelectric* adalah 12 Volt.

3.4 VARIASI PENGAMBILAN DATA

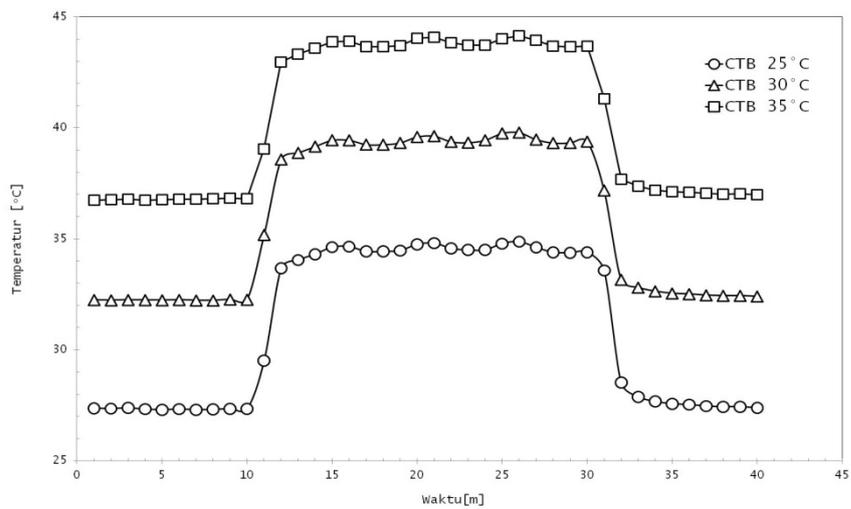
Pengujian dan pengambilan data dilakukan dilaboratorium *Applied Heat Transfer Research Group* di gedung lantai 3 *engineering centre* fakultas teknik. Pengambilan data tersebut meliputi :

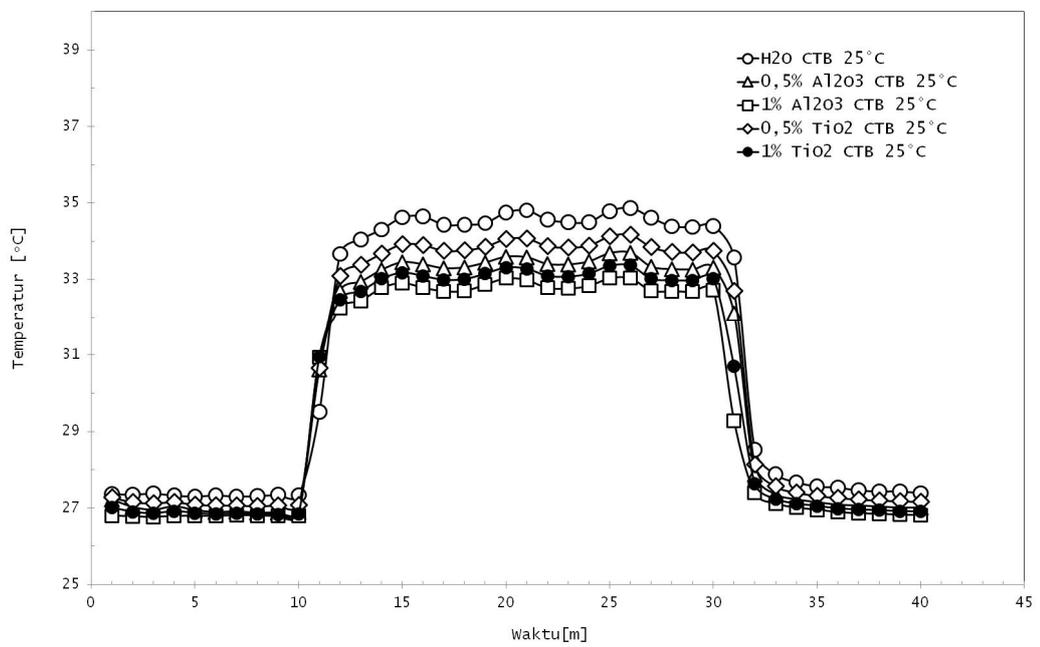
1. Menggunakan HSF yang tidak dilengkapi *heat pipe*.
2. Menggunakan HSF yang dilengkapi *heat pipe*.
3. Menggunakan *liquid block* dengan fluida kerja aquades.
4. Menggunakan *liquid block* dengan fluida kerja nano fluida Al_2O_3 0,5 %
5. Menggunakan *liquid block* dengan fluida kerja nano fluida Al_2O_3 1 %
6. Menggunakan *liquid block* dengan fluida kerja nano fluida TiO_2 0,5 %
7. Menggunakan *liquid block* dengan fluida kerja nano fluida TiO_2 1 %

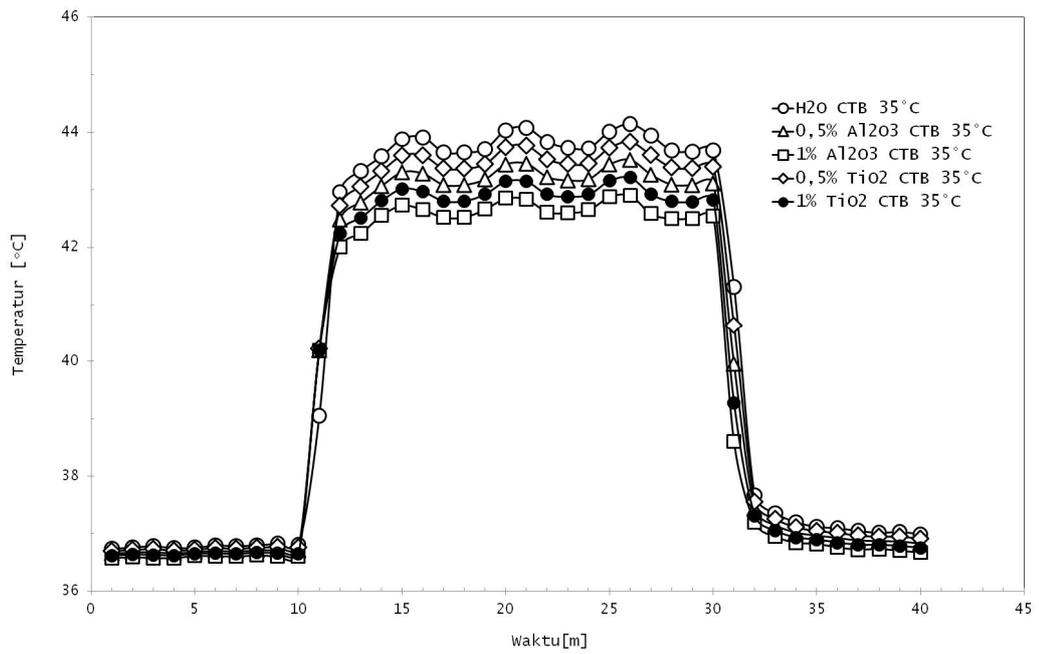
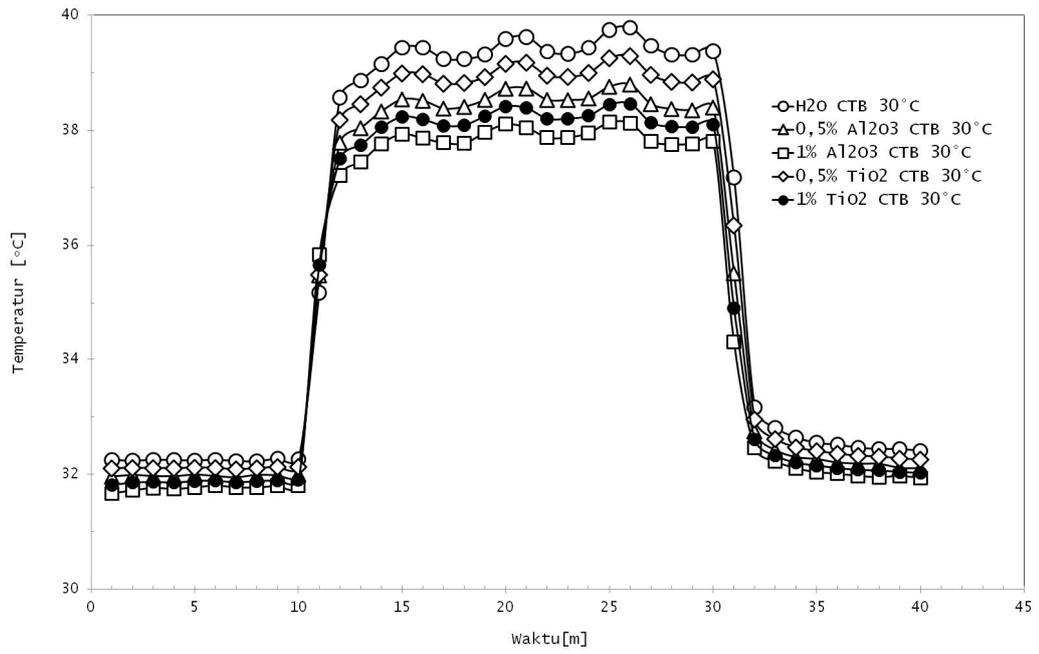
8. Menggunakan *liquid block* dengan fluida kerja nano fluida Al_2O_3 0,5 % dan sistem pendinginan *thermoelectric*.
9. Menggunakan *liquid block* dengan fluida kerja nano fluida Al_2O_3 1 % dan sistem pendinginan *thermoelectric*.
10. Menggunakan *liquid block* dengan fluida kerja nano fluida TiO_2 0,5 % dan sistem pendinginan *thermoelectric*.

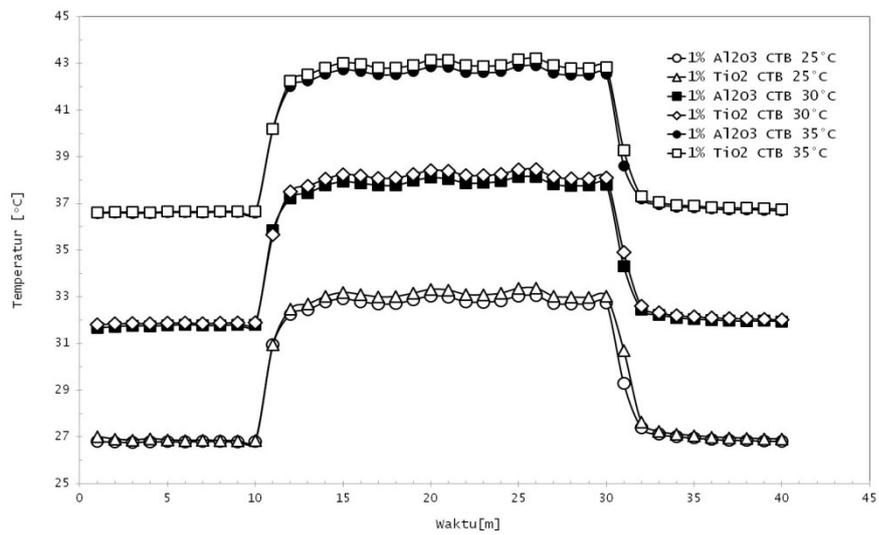
Menggunakan *liquid block* dengan fluida kerja nano fluida TiO_2 1 % dan sistem pendinginan *thermoelectric*.

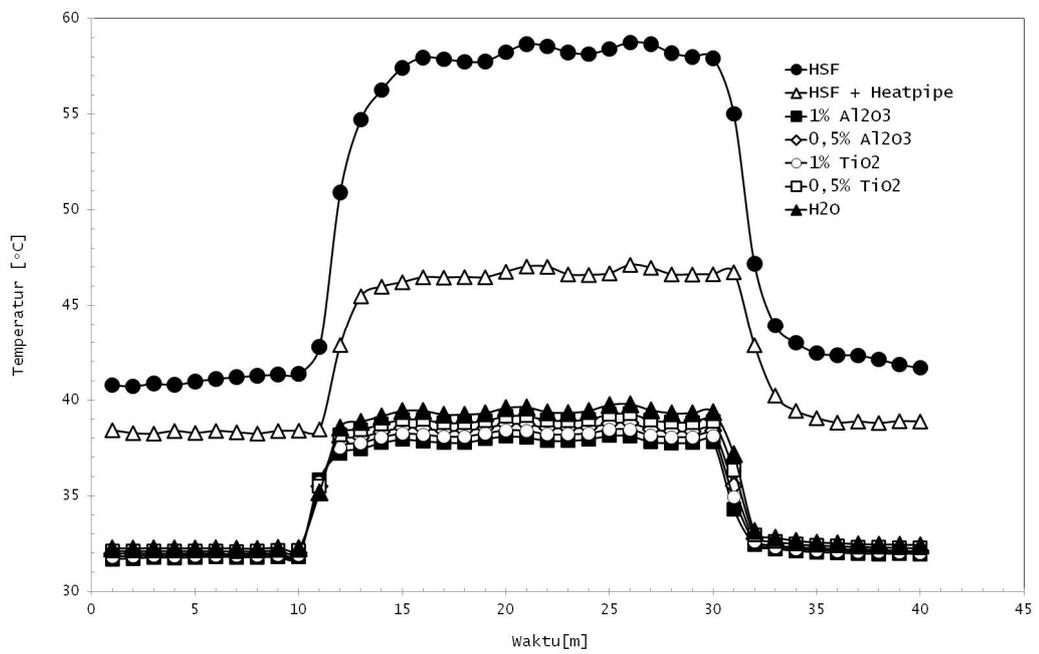


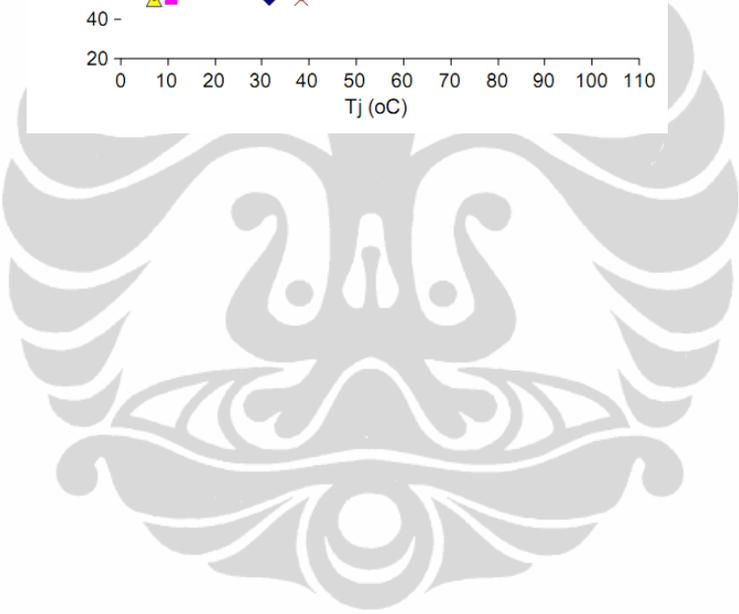
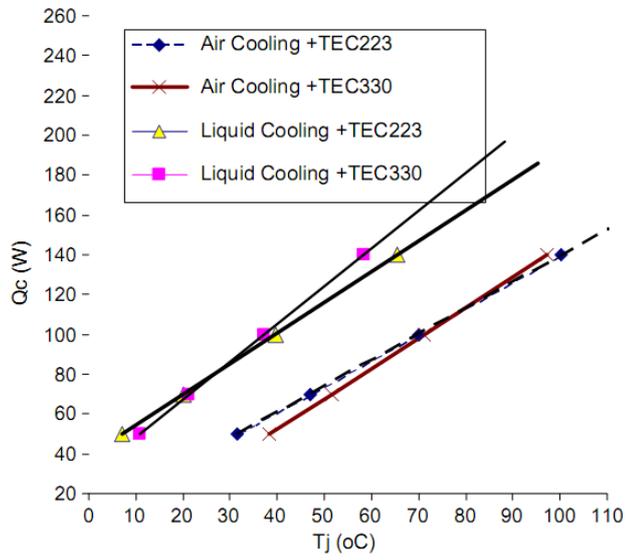


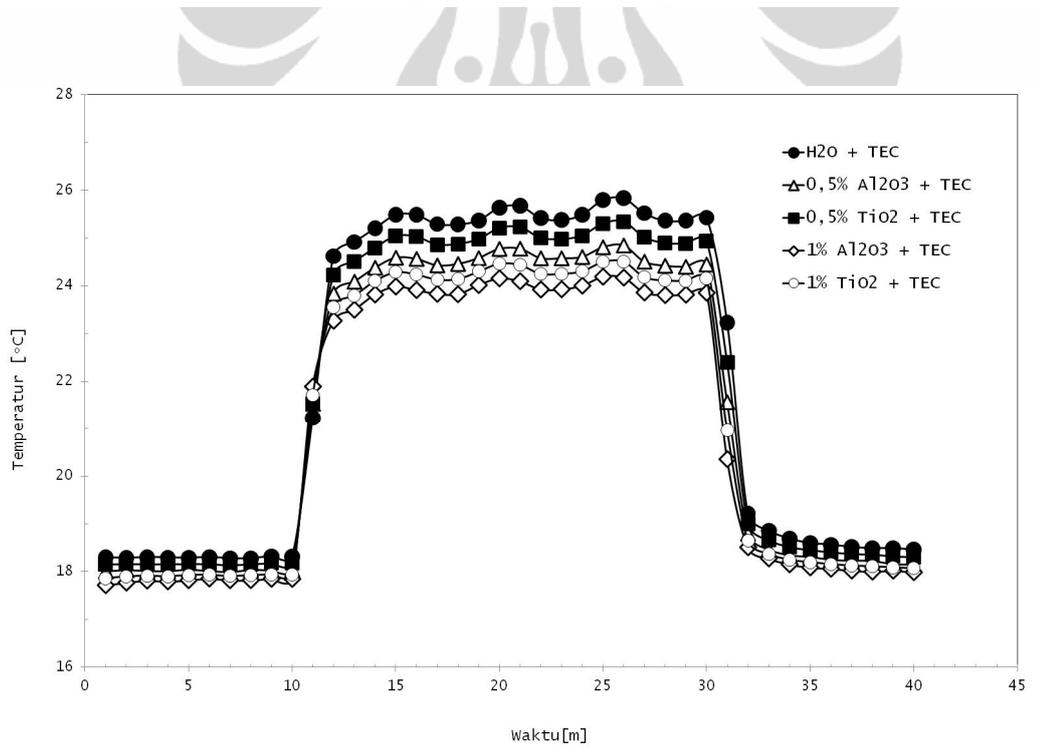
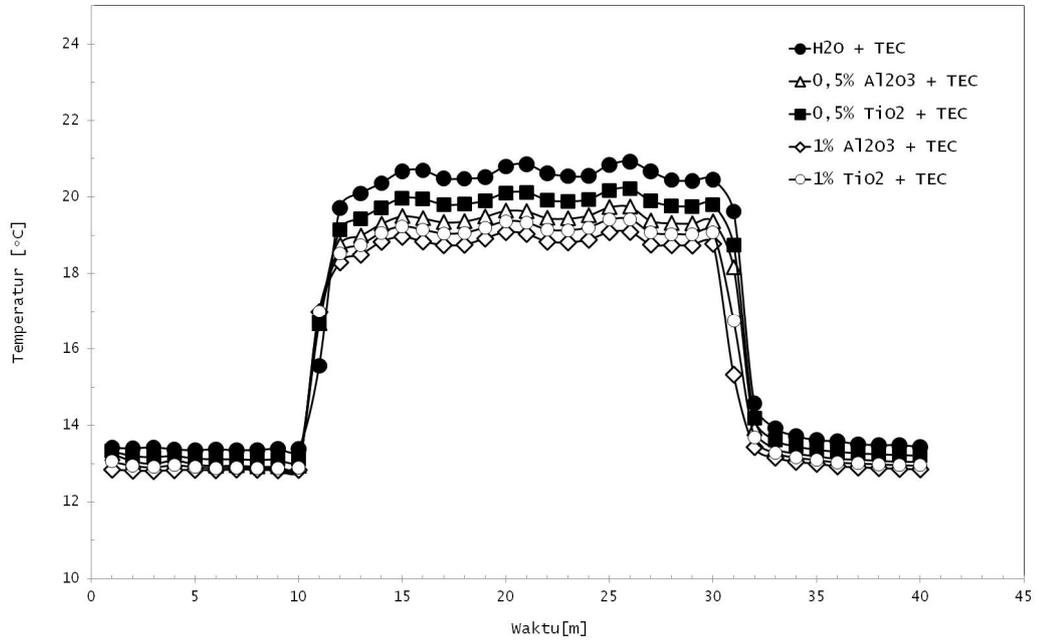


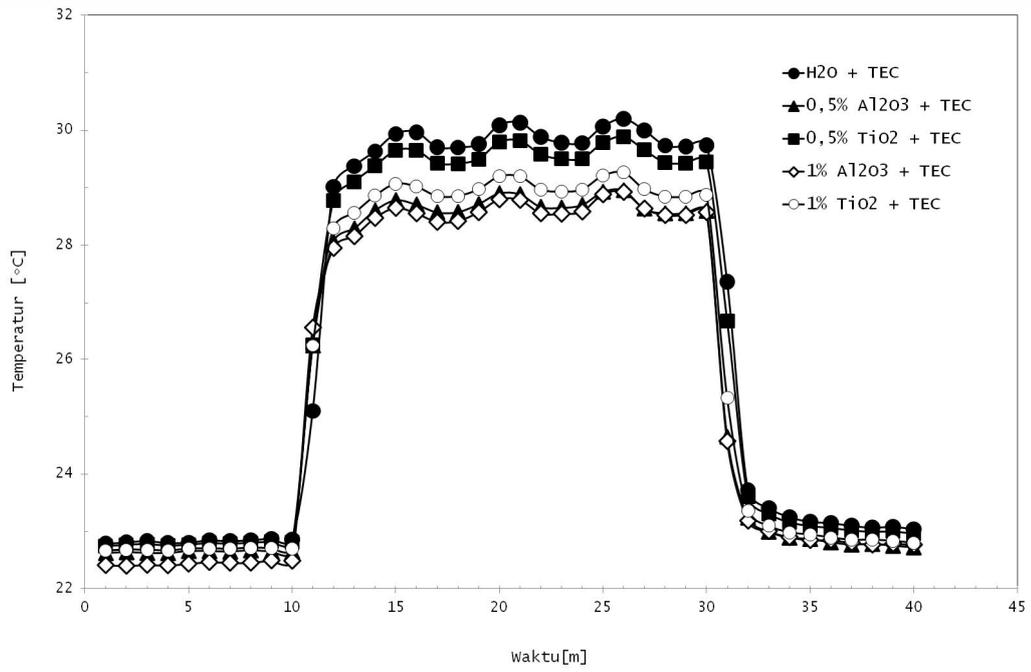


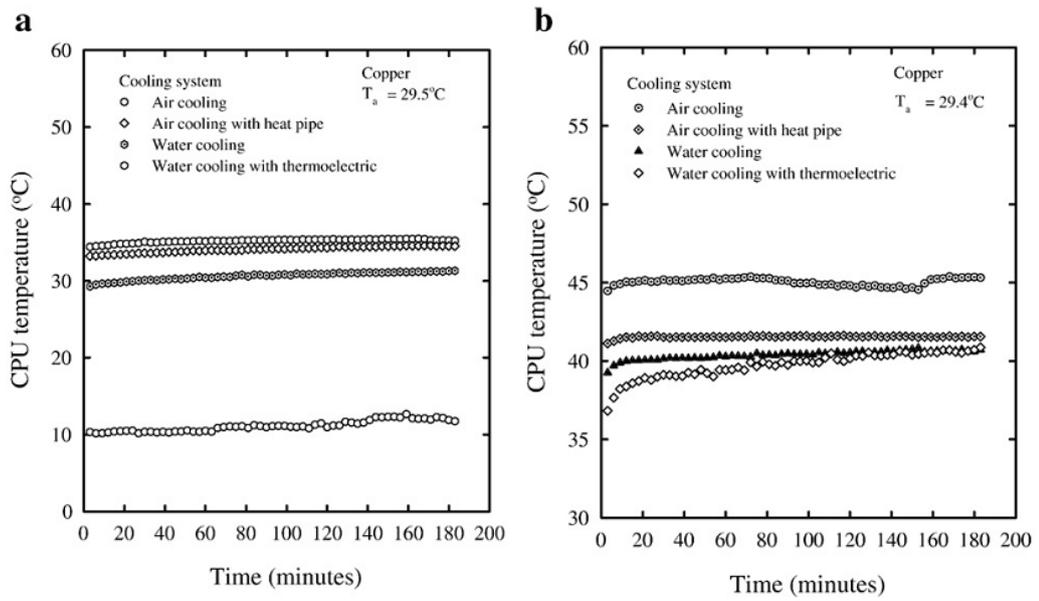


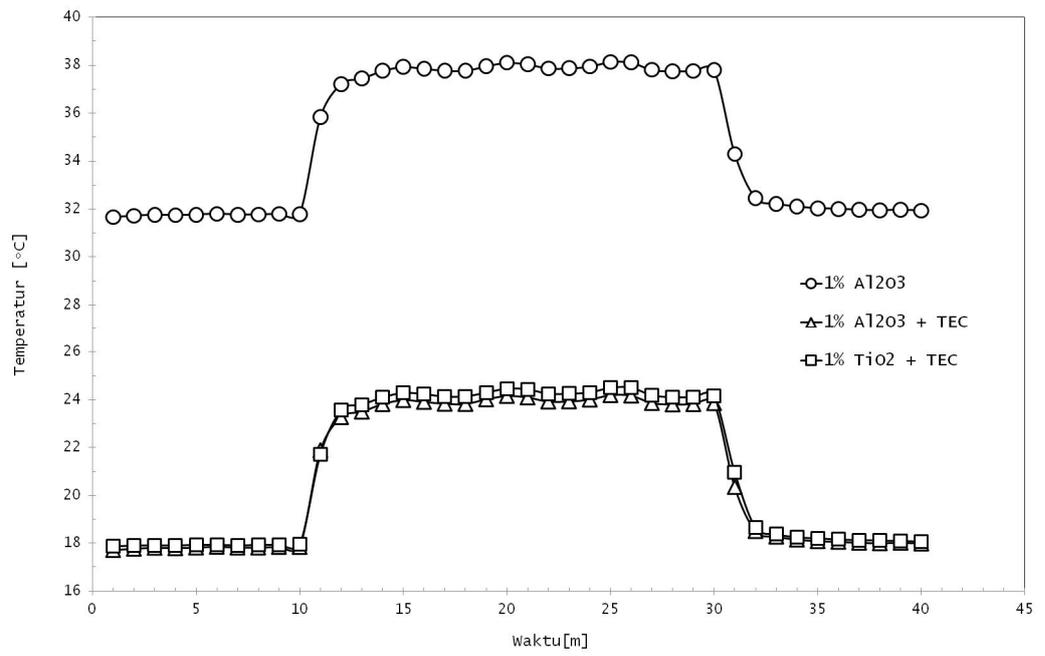


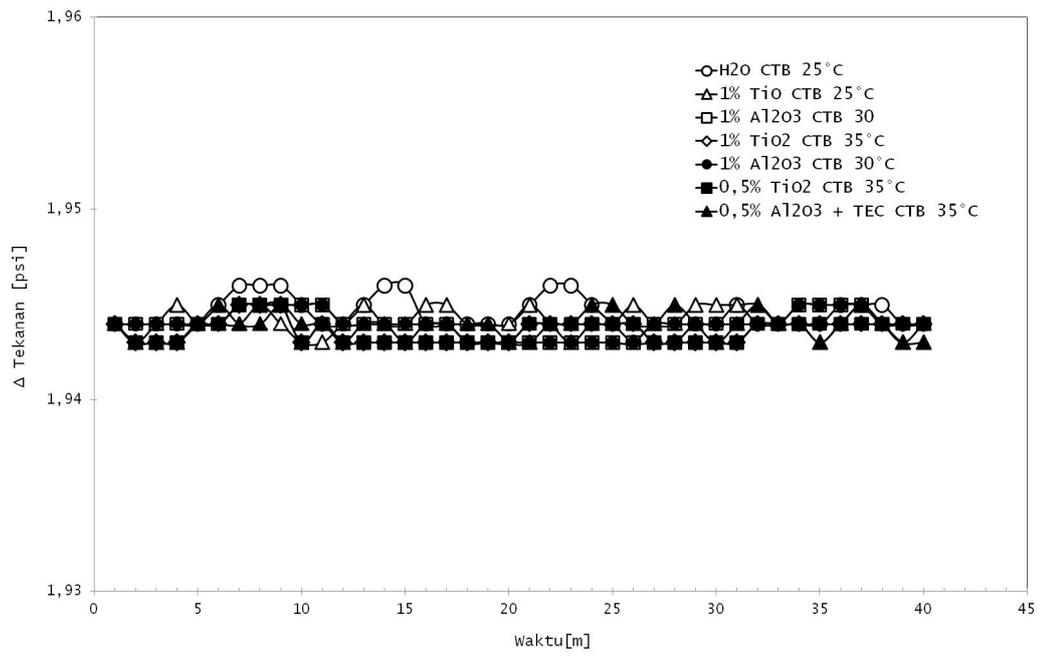












BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Sistem pendinginan berbasis *liquid block*, *heatpipe* dan nano fluida telah terbukti memiliki kinerja pendinginan yang lebih baik dari sistem pendinginan konvensional (HSF). Dari hasil pengujian sistem pendinginan berbasis *liquid block – heatpipe* unggul sekitar 20°C dari HSF dan 12°C dari HSF – *Heatpipe*. Nano fluida terbaik pada setiap variasi pengujian adalah Al₂O₃ (*aluminium oxyde*) dengan konsentrasi 1%. Terlepas dari sisi efisiensi daya sistem pendinginan termoelektrik memiliki performa yang paling unggul, dengan sistem ini CPU dapat didinginkan hingga 7°C dibawah temperatur ruangan sehingga sistem pendinginan termoelektrik sangat cocok digunakan pada ruangan yang memiliki temperatur ambient yang tinggi. Perbedaan tekanan yang terjadi antara *inlet* dan *outlet* dari *liquid block* ternyata tidak terlalu signifikan. Dari hasil pengujian perbedaan yang terjadi tidak melebihi dari 0,01 psi. Hal ini akibat dari temperatur dan debit aliran yang rendah, yaitu 30°C ± 5 dan 1 LPM. Tingginya performa *liquid block – heatpipe* dengan fluida kerja nano fluid telah membuktikan potensinya sebagai fluida kerja masa depan.

5.2 SARAN

Agar penggunaan sistem pendingin termoelektrik lebih efisien, perlu digunakan kontrol temperatur yang berfungsi untuk mengatur tegangan sesuai dengan beban CPU.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Gao, D.M. Rowe, Cooling performance of integrated thermoelectric microcooler, *Solid-State Electronics* 43 (1999) 923–929.
- [2] Delia, D., Gilgert, T., Graham, N., Hwang, U., Ing, P., Kan, J., Kemink, R., Maling, G., Martin, R., Moran, K., Reyes, J., Schmidt, R., and Steinbrecher, R., “System Cooling Design for the Water-Cooled IBM Enterprise System/9000 Processors,” *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 36, No. 4, July 1992, pp.791-803. M.N. Pantzali, A.A. Mouza, S.V. Paras, Investigating the efficacy of nanofluids as coolants in plate heat exchanger (PHE), *International Journal of Chemical Engineering Sciences* 64 (2009) 3290-3300.
- [3] M.N. Pantzali, A.G. Kanaris, K.D. Antoniadis, A.A. Mouza, S.V. Paras, Effect of nano fluids on the performance of miniature plate heat exchanger with modulated surface, *International Journal of Heat and Fluids Flow*, vol 30 (2009) 691 – 699.
- [4] M.N. Pantzali, A.A. Mouza and S.V. Paras, Investigating the efficacy of nanofluids as coolants in plate heat exchangers (PHE), *Journal of Chemical Engineering Science* 64 (2009) 3290 – 3300.
- [5] Sarit K. Das, Nandy Putra, Wilfried Roetzel, *Pool Boiling Characteristic of Nanofluids*, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, vol 46, (2003) 851-862.
- [6] Putra Nandy., *Heat Transfer in Dispersed Media*, Shacker Verlag Aachen. 2002
- [7] Choi, U.S., *Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles, Development and Applications of Non-Newtonian Flows*, D.A. Siginer and H.P. Wang, eds., FED-vol. 231/MD-Vol. 66, ASME, New York, (1995), pp. 99-105.
- [8] Eastman, J.A., Choi, U.S., Li, S., Thompson, L.J., Lee, S., *Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids*. In: Komarneni, S., Parker, J.C., Wollenberger, H.J. (Eds.), *Nanophase and anocomposite Materials II*. MRS, Pittsburg, PA, 1997, pp. 3-11.
- [9] H.Y. Zhang, Y.C. Mui, M. Tarin., Analysis of thermoelectric cooler performance for high power electronic packages, *International Journal of Applied Thermal Engineering* 30 (2010) 561-568.

- [10] Yu-Wei Chang, Chih-Chung Chang, Ming-Tsun Ke, Sih-Li Chen, Thermoelectric air-cooling module for electronic devices, *International Journal of Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 2731-2737.
- [11] Yu-Wei Chang, Chiao-Hung Cheng, Jung-Chang Wang, Sih-Li Chen, Heat pipe for cooling of electronic equipment, *Journal of Energy Conversion and Management* 49 (2008) 3398-3404.
- [12] Leonid Vasiliev, David Lossouarn, Cyril Romestant, Alain Alexandre, Yves Bertin, Yauheni Piatsiushyk, Vladimir Romanenkov, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52 (2009) 301-308.
- [13] D. J. Jeffrey, Conduction through a random suspension of spheres, *Proceedings of the royal society of london, Series A, Mathematical and Physical Science* (1973) 355 – 367.
- [14] Yu Zhi-ying, Jin Liu, Zhang Qing-shu, Consideration of hydrodynamic characteristics, sediments & environmental problems of muddy coast in the construction of lianyungang Harbour, *Chinese journal of oceanology and limnology*, vol 12 – 2, 97-105
- [15] Y. Xuan, Q. Li, *Heat Transfer Enhancement of Nanofluids*, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 21, (2000) pp.58-64.
- [16] H.E. Patel, SK Das, T Sudararajan, *Thermal conductivity of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids : manifestation of anomalous enhancement and chemical effect*, *Appl. Phys. Letter.*, 83, no.14 (2003).
- [17] Huanqing Xie, H Lee, W Youn, M Choi, *Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities*, *Journal of Applied Physics*, vol 94 no 8, (2003).
- [18] P Bhattacharya, SK Saha, A Yadav, PE Phelan, *Brownian dynamica simulation to determine the effective thermal conductivity of nanofluids*, *Journal of Applied Physics*, vol 95 no 11, (2004).
- [19] S. P. Jang, Choi, *Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids*, *Applied Physics Letters*, vol 84, no 21, (2004)
- [20] Nandy Putra, W. Roetzel, Sarit K.Das, *Natural Convection of Nano-Fluids*, *Journal Heat and Mass Transfer*, Vol.39, Numbers 8-9, (2003), pp. 775-784.
- [21] Yimin Xuan and Qiang Li, *Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids*, *Journal of Heat Transfer ASME*, vol 125 (2003) pp 151-155.
- [22] Louis Gosselin, Alexandre K da Silva, *Combined heat transfer and power dissipation optimization of nanofluids flow*, *Applied Physics Letters*, vol.85 no.18. (2004)
- [23] Nandy Putra, R Ferky, RA Koestoer, *Peningkatan Koefisien Perpindahan kalor Konveksi dari Nanofluida Al₂O₃-Air*, *Jurnal Teknologi*, Edisi No 2. Tahun XVIII, Juni 2004.

- [24] Putra Nandy, *Menentukan koefisien perpindahan kalor konveksi dengan korelasi Dittus Boelter*, Seminar Nasional Perkembangan Riset dan Teknologi di Bidang Industri Universitas Gajah Mada Yogyakarta 13 Mei 2003.
- [25] Nandy Putra, Noviar., S.Fred, H Wijaya, RA Koestoer, *Mengukur koefisien Perpindahan Kalor Kondensasi Film pada Kondenser Silinder Vertikal dengan Fluida Pendingin Nanofluida Al_2O_3 – Air*, Jurnal Teknologi, Edisi No 1. Tahun XIX, Maret 2005.
- [26] S.B. Riffat, Guoquan Qiu (2004). “Comparative investigation of thermoelectric air-conditioners versus vapour compression and absorption air conditioners”. *Journal of Applied Thermal Engineering*, 24 (2004) 1979-1993.
- [27] Nandy Putra, Ferdiansyah N. Iskandar, Performance Of Thermoelectric Module and Heat Pipe On A Vaccine Carrier Box, 7th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 19-21 July 2010, Antalya, Turkey.
- [28] Nandy Putra, Ardiyansyah, William Sukyono, David Johansen, Ferdiansyah N. Iskandar, The characterization of cascade thermoelectric cooler in cryosurgery device, *Cryogenics* 50 (2010) pp 759-764.
- [29] Nandy Putra, Aplikasi Riset Termoelektrik sebagai mesin pendingin dan Pembangkit Listrik, Seminar Nasional Teknik Elektro (SNTE 2010), Jakarta, 12 November 2010, ISBN : 978-602-97832-0-9.
- [30] Nandy Putra, Ferdiansyah N. Iskandar, Ricky FG, Agizna A., Pemanfaatan Panas Buang Motor Bakar untuk Produksi Hidrogen Berbasis Pembangkit Termoelektrik, Seminar Nasional Kluster Riset Teknik Mesin, 2009, Surakarta, Universitas Negeri Sebelas Maret. 13-14 Oktober 2009.
- [31] S.B. Riffat, S.A. Omer, Xiali Ma (2001). ”A novel thermoelectric refrigeration system employing heat pipes and a phase change material: an experience investigation”. *Journal of Renewable Energy*, 23 (2001) 313-323.
- [32] Nandy Putra, Haryo Tedjo, RA Koestoer, Pemanfaatan Elemen Peltier Bertingkat dua pada aplikasi Kotak Vaksin, *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin IV, 21-22 November 2005, ISBN 979-97158-0-6, Universitas Udayana, Bali, Indonesia.*
- [33] Nandy Putra, Uji Unjuk Kerja Kotak Vaksin berbasis Elemen Peltier Ganda, Seminar Nasional Perkembangan Riset dan Teknologi di Bidang Industri Universitas Gajah Mada Yogyakarta, 27 Juni 2006. ISBN 979-99266-1-0
- [34] Incopera, Frank P., Dewitt, David P., “*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*”, New York, Fifth Edition: John Wiley and Sons, 2002
- [35] Bainton, K.F. *Experimental heat pipes. AERE-M1610, Harwell, Berks. Atomic Energy Establishment, Appl. Phys. Div., 1965.*

- [36] Grover, G.M., Bohdansky, J. and Busse, C.A. *The use of a new heat removal system in space thermionic power supplies*. EUR 2229e, Ispra, Italy, Euratom Joint Nuclear Research Centre, 1965.
- [37] Busse, C.A., Caron, R. and Cappelletti, C. *Prototypes of heat pipe thermionic converters for space reactors*. IEE 1st Conference on Thermionic Electrical Power Generation, London, 1965.
- [38] Cheung, H. *A critical review of heat pipe theory and applications*. USAEC Report UCRL-50453. Lawrence Radiation Laboratory, University of California, 1968.
- [39] 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.
- [40] Judge, J.F. *RCA test thermal energy pipe*. Missiles Rockets, Vol. 18, pp 36–38, 1966.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] Swanson T.D. and Birur, G.C. *NASA thermal control technologies for robotic spacecraft*. Appl. Therm. Eng. Vol. 23, pp 1055-1065, 2003.
- [44] Cotter, T.P. *Theory of heat pipes*. USAEC Report LA-3246, Contract W7405-3ng-36. Los Alamos Scientific Laboratory, University of California, 1965.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] Feldman, K.T. and Whiting, G.H. *The heat pipe and its potentialities*. Eng. Dig., Vol. 28 No. 3, pp 86–86, 1967.
- [48] Eastman, G.Y. *The heat pipe*. Sci. Am., Vol. 218, No. 5, pp 38–46, 1968.
- [49] Feldman, K.T. and Whiting, G.H. *Applications of the heat pipe*. Mech. Eng., Vol. 90, pp 48–53, 1968.
- [50] Osakabe, T. et al. *Application of heat pipe to audio amplifier, in advances in Heat Pipe Technology*. Proceedings of IV International Heat Pipe Conference. Pergamon Press, Oxford, 1981.
- [51] S.W. Chi, *Heat Pipe Theory and Practice*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1976.

- [52] P. Dunn, D.A. Reay, *Heat Pipes*, 2nd ed., Pergamon Press, Oxford, England, 1978.
- [53] Paisarn Naphon, Songkran Wiriyasart, Liquid cooling in the mini-rectangular fin heat sink with and without thermoelectric for CPU, *Journal International communications in heat and mass transfer* 36 (2009) 166-177.

