



UNIVERSITAS INDONESIA

**KAJIAN SIMULASI DAN EKSPERIMEN SISTEM PENDINGIN
LEMARI *RADIO BASE SYSTEM* (RBS) BERBASIS
TERMOELEKTRIK**

TESIS

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik
(M.T)**

A'RASY FAHRUDDIN

0906496150

FAKULTAS TEKNIK

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

DEPOK

Juni 2011

PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : A Rasy Fahrudin

NPM : 0906496150

Tanda Tangan : 

Tanggal : 15 Juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :
Nama : A'razy Fahrudin
NPM : 0906496150
Departemen : Teknik Mesin
Judul Tesis : Kajian Simulasi Dan Eksperimen Sistem Pendingin Lemari *Radio Base System* (RBS) Berbasis Termoelektrik

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian perayuratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr.-Ing. Nandy Setiadi Djaya Putra

Penguji : Dr. Ir. R. Damarsono A.S., DEA, PE

Dr. Ir. Engkos Achmad Kosasih, MT.

Dr. Ir. Harun Al Rosyid, SE., MT.



Ditetapkan di : Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia
Kampus Baru UI-Depok

Tanggal : 15 Juni 2011

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya lah akhirnya proposal seminar tesis ini dapat saya selesaikan. Penulisan proposal seminar tesis ini dilakukan dalam rangka untuk memenuhi syarat untuk dapat maju ke sidang tesis sebagai syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwasanya tulisan ini masih banyak kekurangan oleh karena itu kritik dan saran yang bersifat konstruktif sangat penulis harapkan dari berbagai pihak.

Dalam kesempatan ini penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang, yang telah banyak membantu:

1. Prof. Dr-Ing Nandy Putra, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan banyak waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan proposal seminar tesis ini.
2. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dan dukungan baik material maupun moral.
3. Sahabat yang telah banyak membantu dalam penyusunan dan penyelesaian tesis ini.

Akhir kata saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu.

Depok, Juni 2011

Penulis,

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : A'asy Fahrudin

NPM : 0906496150

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Tesis

Demikian pengembungan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Nonsekutif (Non Royalty-Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

"Kajian Simulasi Dan Eksperimen Sistem Pendingin Lemari *Radio Base System* (RBS) Berbasis Termoelektrik"

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 15 Juni 2011

Yang menyatakan,



A'asy Fahrudin

ABSTRAK

Nama : A'rasy Fahrudin
Departemen : Teknik Mesin
Judul : Kajian Simulasi Dan Eksperimen Sistem Pendingin Lemari *Radio Base System* (RBS) Berbasis Termoelektrik

BTS (*Base Transceiver Station*) merupakan salahsatu bagian penting dalam jaringan telekomunikasi seluler karena menjadi penghubung antar jaringan dan antara jaringan dengan mobile seluler. BTS membutuhkan sistem pendingin untuk mendapatkan temperatur kerja yang optimal dan menjaga komponen elektronik didalamnya agar tidak cepat rusak. Sistem pendingin konvensional menggunakan *Air Conditioner* (AC) yang masih menggunakan refrigeran R-22 dimana refrigeran jenis ini masih berpotensi merusak ozon. Untuk itu perlu dirancang sebuah pendingin BTS yang lebih ramah lingkungan tidak merusak ozon. Sistem yang dipilih untuk menggantikan sistem pendingin konvensional yaitu sistem pendingin BTS dengan menggunakan *Thermoelectric Cooler* (TEC). Pada penelitian ini dilakukan perancangan perangkat pendingin yang dikhususkan pada pendinginan lemari *Radio Base System* (RBS). RBS memiliki fungsi yang penting dalam sistem BTS dan cukup sensitif terhadap temperatur kerja. Pada penelitian ini akan dibuat prototype lemari RBS dengan pemanas elektrik dan empat buah perangkat pendingin termoelektrik. Masing-masing perangkat terdiri dari 4 dan 6 modul termoelektrik dengan pendingin udara pada sisi panasnya. Dari hasil pengujian didapatkan temperatur kabin dibawah $39,11^{\circ}\text{C}$ untuk mendinginkan beban panas maksimum 1615 W dengan pemakaian daya listrik sebesar 454 W.

Kata kunci: termoelektrik, lemari RBS, *heatpipe*, dan pendingin udara.

ABSTRACT

Name : A'rasy Fahrudin
Department : Mechanical Engineering
Title : Simulation And Experimental Study of Radio Base System (RBS)
Cooling System based on Thermoelectric Cooler

BTS (Base Transceiver Station) is an important part of mobile telecommunications network which works as an internetwork link and network-mobile phone link. BTS requires a cooling system to maintain optimal working temperature of the electronic components so that the lifetime of those components can be lengthened. Air Conditioner (AC) using refrigerant R-22 is a conventional cooling systems which is still a potential damage to ozone layer. Therefore, it is necessary to design a more environmental friendly cooling base stations. Thermoelectric Cooler (TEC) was proposed as an alternative cooling system. This research focused on the cooling of the Radio Base System (RBS) components. RBS is an important function in the BTS system and quite sensitive to the working temperature. The RBS prototype cabinet with electric heating and four cooling devices thermoelectric has been designed and built. Each cooling device consists of 4 and 6 thermoelectric modules with air cooling on the hot side. The experimental results of the cabin temperature is 39.11°C at maximum heat load 1615 W by using electrical power consumption for cooling of 454 W.

Keyword : thermoelectric, RBS, heatpipe, air conditioner

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
ABSTRAK INDONESIA	vi
ABSTRAK INGGRIS	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xvi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>Base Tranceiver Station</i>	4
2.2 Perangkat yang terdapat pada sebuah BTS	5
2.3 Pendingin RBS	7
2.4 Kerusakan Ozon	9
2.5 <i>Thermoelektrik Cooler (TEC)</i>	11
2.6 Prinsip Kerja Pendingin Termoelektrik	12
2.7 Parameter-Parameter Pendinginan Termoelektrik	15
2.8 Modul Sistem Bertingkat	17
2.9 Aplikasi Pendingin Termoelektrik.....	19

2.9.1 Sistem Pendingin Ruangan Termoelektrik.....	19
2.9.2 Lemari Pendingin Termoelektrik.....	21
2.9.3 <i>Vaccine Carrier Box</i>	21
2.9.4 Alat <i>Cryosurgery</i> dengan Menggunakan Modul Termoelektrik Bertingkat	21
2.10 Perpindahan Kalor Pada Sistem Pendingin RBS.....	22
2.10.1 Perpindahan Kalor Konduksi.....	22
2.10.2 Perpindahan Kalor Konveksi.....	23
2.10.3 Bilangan <i>Nusselt</i>	24
2.10.4 Tahanan Kontak Thermal.....	24
2.11 <i>Heatsink</i>	25
2.12 <i>Heat Pipe</i>	26
2.13 Simulasi CFD (<i>Computational Fluid Dyamics</i>).....	29
2.13.1 Tahapan Simulasi CFD	30
2.13.2 Persamaan Perintah Aliran Fluida dan Perpindahan Panas..	31
2.13.3 SolidWork Flow Simulation.....	32
BAB III METODE PENELITIAN	
3.1 Tahapan Penelitian.....	34
3.2 Hasil Survei Yang Telah Dilakukan.....	35
3.3 Kontruksi Lemari Pendingin RBS	36
3.4 Skema Pengujian	36
3.5 Komponen Pengujian	39
3.6 Komponen Perangkat Pendingin	41
3.7 Prosedur Pengujian	47

3.8 Variasi Pengambilan Data	47
------------------------------------	----

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Distribusi Temperatur Pendingin Termoelektrik Tanpa Beban Panas.....	49
4.2 Distribusi Temperatur Pendingin Termoelektrik dengan Beban Panas 100 Watt.....	52
4.3 Variasi Daya Fan Bagian Dalam Dengan Beban Panas 100 Watt	55
4.4 Variasi Daya TEC Dengan Beban Panas 100 Watt	59
4.5 Variasi Beban Panas dengan Pendingin TEC 8 V	63
4.6 Temperatur Pendinginan Lemari RBS untuk Beban Panas 400 Watt dengan Pemasangan <i>Exhaust Fan</i>	64
4.7 Temperatur Pendinginan Lemari RBS untuk Beban Panas 1615 Watt Dengan Pemasangan <i>Exhaust Fan</i>	66
4.8 Temperatur Pendinginan Lemari RBS untuk Beban Panas 400 Watt dengan Pemasangan <i>Heat pipe</i>	68
4.9 Temperatur Pendinginan Lemari RBS untuk Beban Panas 400 Watt Dengan Pemasangan <i>Heat pipe</i> dan Tegangan TEC 12 V	70
4.10 Variasi Penggunaan TEC, <i>Exhaust Fan</i> , dan <i>Heat pipe</i> Untuk Beban Panas 400 Watt	73
4.11 Nilai COP Optimal dan Aktual pada Beberapa Variasi Daya TEC	75
4.11.1 Perhitungan COP Aktual	75
4.11.2 Perhitungan Nilai COP Optimal	76
4.12 Perbandingan Secara Ekonomi dengan Pendingin AC Konvensional	79

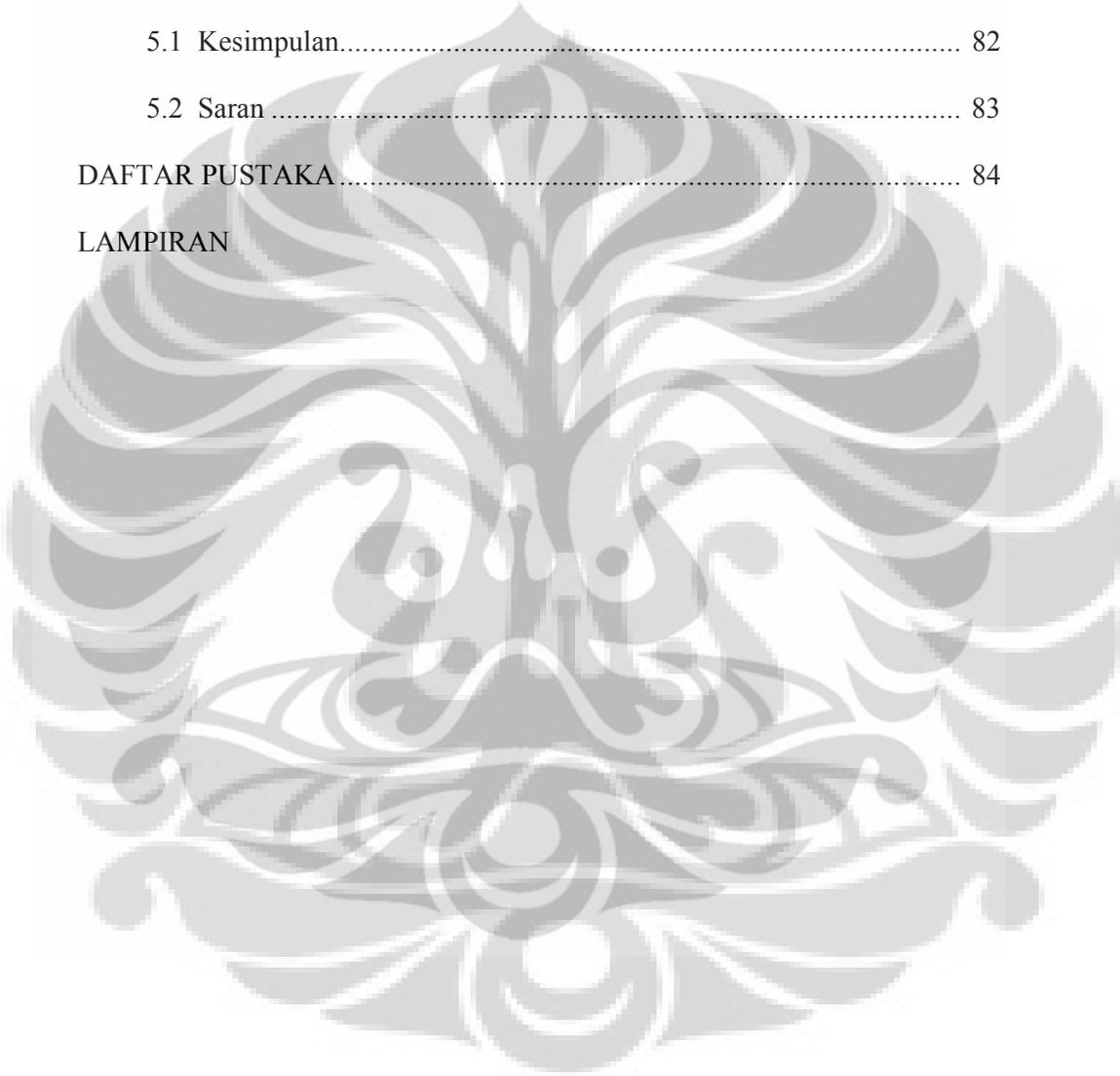
4.12.1 Biaya investasi	79
4.12.2 Biaya operasional.....	79
4.12.3 Biaya perawatan.....	80

BAB V KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan.....	82
5.2 Saran	83

DAFTAR PUSTAKA	84
-----------------------------	-----------

LAMPIRAN



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Antena BTS.....	5
Gambar 2.2 Kotak RBS/BTSE.....	6
Gambar 2.3 Shelter BTS.....	7
Gambar 2.3 Pemacahan Ozon oleh Atom Klor.....	9
Gambar 2.5 Kurva efisiensi beberapa jenis TEC.....	12
Gambar 2.6 Skematik <i>Thermoelectric Cooler</i>	13
Gambar 2.7 Susunan Semikonduktor.....	14
Gambar 2.8 Perubahan Temperatur melewati TEC.....	16
Gambar 2.9 Karakteristik TEC Multistage.....	17
Gambar 2.10 Perbandingan antara Single dan Double Peltier.....	18
Gambar 2.11 Termoelektrik dua tingkat.....	18
Gambar 2.12 Grafik Penurunan Temperatur Ruang Vaksin Antara 3 Variasi Daya Terhadap Waktu.....	19
Gambar 2.13 Skematik <i>Air Conditioner</i> dengan TEC.....	20
Gambar 2.14 Skema Penguian TEC-CCP.....	20
Gambar 2.15 Tahanan Kontak Thermal.....	25
Gambar 2.16 Elemen Volume pada Sirip.....	26
Gambar 2.17 Perbandingan Konduktifitas Thermal Efektif Single Layer <i>Heatpipe, Thermosiphon</i> , dan Batang Tembaga.....	27
Gambar 2.18 Skema Mekanisme Hantaran Panas pada Heat Pipe.....	28
Gambar 2.19 Komponen Fluks Panas.....	32
Gambar 3.1 Diagram alir tahapan riset.....	34

Gambar 3.2 Bagian-bagian lemari RBS	35
Gambar 3.3 Skema instalasi pengujian.....	37
Gambar 3.4 Instalasi Pengujian	38
Gambar 3.5 Tampak dalam Kabin	39
Gambar 3.6 <i>Power supply</i>	39
Gambar 3.7 <i>Regulator</i>	40
Gambar 3.8 Lampu Pijar.....	40
Gambar 3.9 <i>Data Acquisition</i> dan Modul Temperatur.....	41
Gambar 3.10 Modul Peltier.....	42
Gambar 3.11 <i>Heatsink</i> sisi dingin	42
Gambar 3.12 <i>Heatsink</i> sisi panas.....	43
Gambar 3.13 Gasket dengan Susunan TEC.....	44
Gambar 3.14 Cover <i>heatsink</i>	44
Gambar 3.15 Kipas elektrik	45
Gambar 3.16 <i>Heatpipe Cooler Master Hyper 212 Plus</i>	45
Gambar 3.17 <i>Exhaust Fan CKE APK 15-3</i>	46
Gambar 3.18 Perangkat pendingin thermoelektrik (TEC).....	46
Gambar 4.1 Simulasi Distribusi Temperatur TEC 8V Tanpa Beban Panas ...	50
Gambar 4.2 Grafik Distribusi Temperatur Pengujian Tanpa Beban Panas dengan Tegangan TEC 8V dan Tegangan Fan 8V.....	51
Gambar 4.3 Simulasi distribusi temperatur TEC 8V dengan tegangan fan 8V untuk beban panas 100 W	53
Gambar 4.4 Grafik Distribusi Temperatur Pengujian dengan Beban Panas 100 Watt dengan Tegangan TEC 8 V dan Tegangan Fan 8V	54

Gambar 4.5 Simulasi distribusi temperatur TEC 8V dengan tegangan fan 4V untuk beban panas 100 W	56
Gambar 4.6 Simulasi distribusi temperatur TEC 8V dengan tegangan fan 12V untuk beban panas 100 W	57
Gambar 4.7 Grafik Temperatur dengan Variasi Daya Fan Dalam pada Beban Panas 100 Watt dan Tegangan TEC 8V	58
Gambar 4.8 Simulasi distribusi temperatur TEC 6V dengan tegangan fan 8V untuk beban panas 100 W	60
Gambar 4.9 Simulasi distribusi temperatur TEC 10V dengan tegangan fan 8V untuk beban panas 100 W	60
Gambar 4.10 Grafik Temperatur dengan Variasi Daya TEC Dalam pada Beban Panas 100 Watt dan Tegangan fan dalam 8V	61
Gambar 4.11 Grafik Temperatur Rata-Rata Kabin Terhadap Waktu dengan Pendingin TEC 8V Pada Variasi Beban Panas.....	63
Gambar 4.12 Simulasi Distribusi Temperatur dengan Variasi Penggunaan <i>Exhaust fan</i> pada Beban Panas 400 W dan Tegangan TEC 8V.....	64
Gambar 4.13 Grafik Temperatur dengan Variasi Penggunaan <i>Exhaust fan</i> pada Beban Panas 400 Watt dan Tegangan TEC 8V.....	65
Gambar 4.14 Simulasi Distribusi Temperatur dengan Variasi Penggunaan <i>Exhaust fan</i> pada Beban Panas 1615 W dan Tegangan TEC 8V...	66
Gambar 4.15 Grafik Temperatur Pendinginan Lemari RBS untuk Beban Panas 1615 Watt Dengan Pemasangan <i>Exhaust Fan</i>	67
Gambar 4.16 Simulasi Distribusi Temperatur dengan Variasi Penggunaan <i>heatpipe</i> pada Beban Panas 400 Watt dan Tegangan TEC 8V..	68

Gambar 4.17 Grafik Temperatur Pendinginan Lemari RBS untuk Beban Panas 400 Watt dengan Pemasangan <i>Heat pipe</i>	69
Gambar 4.18 Simulasi Distribusi Temperatur dengan Variasi Penggunaan <i>Heat pipe</i> pada Beban Panas 400 Watt dan Tegangan TEC 12V.....	71
Gambar 4.19 Grafik Temperatur Pendinginan Lemari RBS untuk Beban Panas 400 W dengan Pemasangan <i>Heatpipe</i> dan Tegangan TEC 12V.	72
Gambar 4.20 Grafik Temperatur Perbandingan Kombinasi Pendinginan pada Beban Panas 400 Watt	74
Gambar 4.21 Grafik Nilai COP Aktual dan Optimal pada Variasi Tegangan TEC	78

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Konsumsi Daya Dan <i>Heat Generation</i>	8
Tabel 2.2 Syarat Kondisi Operasi di dalam Ruang.....	8
Tabel 2.3 Sifat-sifat Refrigeran.....	10
Tabel 4.1 Variasi Tegangan Beban Panas.....	53
Tabel 4.2 Variasi Tegangan Fan Dalam.....	56
Tabel 4.3 Variasi Tegangan TEC.....	59
Tabel 4.4 Perbandingan Daya TEC 8V dengan TEC 12V.....	70
Tabel 4.5 Perbandingan Daya Fan Luar Dengan dan Tanpa <i>Heat pipe</i>	71
Tabel 4.6 Nilai COP Aktual dan Optimal.....	77
Tabel 4.7 Perbandingan Secara Ekonomi.....	80

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Base transceiver System (BTS) merupakan salahsatu perangkat dalam jaringan telekomunikasi seluler yang sangat penting, karena BTS adalah penghubung antara jaringan suatu operator seluler dengan pelanggannya. Masyarakat sekarang sangat membutuhkan alat telekomunikasi seluler. Setiap harinya hampir semua orang selalu memanfaatkan sarana telpon seluler setiap hari. Dengan telpon seluler setiap orang bisa berkomunikasi dengan mudah tanpa terbatas oleh jarak dan waktu. Dalam sistem BTS sinyal dihubungkan antar antena, tidak menggunakan kabel (nir kabel) sebagai penghubung ke instalasi pusat. Sehingga BTS dapat diletakkan hampir di semua tempat tanpa terkendala ada tidaknya jaringan kabel.

BTS yang digunakan nonstop 24 jam setiap hari tentunya membutuhkan sistem pendingin agar komponen elektronik di dalamnya tidak cepat rusak dan tidak cepat menurun kinerjanya. Seperti sebuah komputer bila temperaturnya sudah meningkat maka kemampuan proses datanya akan menurun. Semua material akan mengalami perubahan struktur atom bila terjadi peningkatan temperatur, hal ini akan mempengaruhi sifat elektrisnya, seperti daya hantar, daya simpan, dsb. Sehingga apabila melewati batas temperatur tertentu perubahan itu akan bersifat permanen yang menyebabkan kemampuannya tidak bisa kembali baik seperti yang baru.[1]

Sistem pendingin yang masih paling banyak digunakan untuk mendinginkan BTS adalah dengan menggunakan *Air Conditioner* (AC) konvensional, karena sistem ini mudah didapat di pasaran. AC konvensional menggunakan sistem refrigerasi kompresi uap dimana sistem ini menggunakan refrigerant R22 yang ternyata berpotensi merusak lapisan ozon apabila limbahnya tidak dikelola dengan baik.[2] Sistem kompresi uap memiliki keunggulan COP yang baik dan murah dari segi operasionalnya. Tapi kerusakan lingkungan, penipisan lapisan ozon dan global warming menjadi alasan

yang menuntut kita para engineer untuk mencari alternatif yang tepat untuk mengganti sistem kompresi uap sebagai wujud kepedulian kita terhadap keadaan bumi.

Salah satu usaha yang telah dilakukan adalah substitusi refrigerant R22 dengan refrigerant R134a yang lebih ramah lingkungan. Namun refrigerant tipe ini ternyata tetap menghasilkan residu yang berperan dalam pembentukan efek rumah kaca. Terobosan lain yang telah berhasil dilakukan adalah dengan ditemukannya pendingin dengan sistem absorpsi. Namun pendingin tipe ini juga memiliki beberapa kekurangan diantaranya sistem instalasi dan desainnya yang tidak hemat ruang.

Berdasarkan beberapa alasan diatas maka dipilih suatu alternatif yaitu menggunakan sistem pendingin menggunakan *Thermoelektrik Cooler* (TEC). Sistem ini lebih ramah lingkungan karena tidak menggunakan refrigeran sehingga tidak memiliki resiko terhadap kerusakan ozon. Sistem ini lebih mudah dalam perawatan dan memiliki umur pakai yang panjang.

Pada penelitian sebelumnya telah diteliti sistem pendingin udara menggunakan TEC dan telah diteliti pula sistem lemari pendingin menggunakan TEC.[3,4] Akan tetapi pada sistem pendingin BTS, beban kalor yang dipindahkan lebih besar sehingga menjadi tantangan baru bagi peneliti untuk merancang dan menganalisa sistem ini agar tetap dapat menjaga temperatur ruang yang memenuhi syarat kerja normal alat, tentunya dengan tetap memperhatikan efisiensi daya listrik yang dibutuhkan.

Di dalam sebuah sistem BTS terdapat beberapa lemari kotak yang berisi perangkat penerima dan pengirim sinyal seluler yang disebut *Radio Base System* (RBS). Kotak RBS ini merupakan perangkat penting yang menghasilkan kalor cukup besar dibandingkan perangkat yang lain. Oleh karena itu, sekiranya perlu dirancang sistem pendingin TEC yang difokuskan pada lemari RBS.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang ada dapat dirumuskan masalah yang timbul yaitu perlunya dirancang sebuah pendingin RBS yang lebih ramah lingkungan tidak merusak ozon. Sistem yang dipilih untuk menggantikan sistem pendingin konvensional yaitu sistem pendingin RBS dengan menggunakan TEC.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah merancang dan menganalisa sebuah sistem pendingin RBS menggunakan TEC yang mampu menjaga temperatur kabin pada temperatur kerja normal. Sistem pendingin yang dirancang diuji unjuk kerjanya dengan menggunakan simulasi CFD dan eksperimen alat.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini meliputi:

1. Perangkat kotak RBS adalah berupa prototipe yang menghasilkan panas menggunakan lampu pijar.
2. Modul termoelektrik, fan, *heatsink*, dan *heat pipe* yang digunakan adalah sesuai yang ada dipasaran.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Base Transceiver Station

Base Transceiver Station (BTS) adalah perangkat dalam suatu jaringan telekomunikasi seluler yang menghubungkan jaringan suatu operator telekomunikasi seluler dengan pelanggannya. BTS memiliki daerah cakupan yang luasannya tergantung dari kuat lemahnya pancaran daya dari sinyal yang dikirimkan ke pelanggan. Selain itu, faktor lingkungan dan interferensi dari BTS operator lain juga cukup berpengaruh pada kemampuan BTS dalam mengcover daerah yang luas.

BTS adalah salah satu bagian dari seluruh rangkaian proses pengiriman sinyal yang terdiri dari tiga komponen utama yakni BBS, SSS dan *intelligent network*. BTS sendiri termasuk dalam komponen BSS (*Base Station Subsystem*). Selain BTS, dalam BSS juga dikenal BSC (*Base Station Controller*), dimana dalam alur sistem, beberapa BTS ditangani oleh satu BSC. Umumnya satu BSC menangani sekitar 200 BTS.

Alur jaringan bisa diilustrasikan sebagai berikut: pertama terpancar sinyal dari ponsel yang diterima oleh antena sectoral, dimana sinyal tersebut dipancarkan lewat udara dalam area cakupan BTS. Kedua sinyal yang diterima antena disampaikan melalui feeder (kabel antena), yang selanjutnya diolah dalam modul-modul BTS. Setelah itu tercipta output data yang diteruskan ke BSC. [5]

Terdapat dua jenis BTS menurut penempatannya yaitu BTS indoor dan outdoor. BTS indoor mempunyai spesifikasi desain yang lebih ramping atau simpel, dan relatif lebih awet karena ditempatkan di dalam ruangan. Namun BTS indoor juga memiliki kelemahan pada penempatan ruangan tersendiri yang harus dilengkapi AC (*Air Conditioner*) sebagai pendingin. Umumnya perangkat BTS ini yang terdapat di dalam shelter.



Gambar 2.1 Antena BTS

Selain itu terdapat BTS outdoor yang mempunyai spesifikasi tidak memerlukan ruangan khusus. Dapat ditempatkan pada dinding (*wall mounted*), terowongan, dan pinggir jalan. Sifatnya yang lebih fleksibel, tapi punya kelemahan desain yang lebih besar dan berat. Perbedaan biasanya hanya pada rack, tapi isi module-nya hampir sama dengan BTS indoor. System pendinginannya cukup menggunakan fan yang dilengkapi filter.[6] Pada sistem pendingin ini diperlukan pembersihan filter secara berkala.

2.2 Perangkat yang terdapat pada sebuah BTS

1. RBS (*Radio Base System*) atau *BTS Equipment*

RBS merupakan perangkat dalam shelter BTS seperti rak-rak besi, atau mirip lemari pendingin. Rak besi ini disebut juga sebagai *BTS equipment* (BTSE). Fungsi dari RBS yaitu untuk memancarkan dan untuk menerima sinyal dari perangkat mobile seluler. Dalam sebuah shelter, untuk GSM bisa terdapat 2 buah sistem yaitu RBS 1800MHz dan 900MHz. Sedangkan untuk CDMA hanya satu yaitu CDMA2000-1X atau CDMA EVDO, bekerja pada frekuensi 800Mhz dan frekuensi 1900Mhz.



Gambar 2.2 Kotak RBS/BTSE

2. Rectifier System

Mengubah tegangan dari PLN 220/380 VAC menjadi Tegangan DC untuk menyuplai perangkat-perangkat dalam BTS.

3. Baterai

Sebagai backup power ke BTS apabila PLN padam. Bisa bertahan sampai 3-4 Jam, tergantung dari Ampere Hour baterai dan design sistemnya.

4. Microwave system

Transmisi sinyal dari BTSE ke antena microwave. Terdiri atas Indoor unit dan Outdoor unit. Indoor unit juga mendapat suplai tegangan DC dari rectifier yang sama. Sedangkan Outdoor Unit menempel pada Antenna Microwave. Indoor Unit dan Outdoor unit terhubung menggunakan *Coaxial Cable*.

5. Antena Sectoral

Berbentuk persegi panjang, terpasang pada tower dengan ketinggian tertentu berfungsi sebagai penghubung antara BTS dan mobile seluler. Dalam satu sistem BTS terdapat 3 antena sektoral yang terhubung ke RBS. Masing-masing antena mencakup radius 120°.

6. Antenna Microwave

Bentuknya seperti genderang rebana yang menerima atau memancarkan gelombang radio dari BTS ke BSC atau dari BTS ke BTS lainnya.

7. Feeder

Bentuknya seperti kabel besar, sebagai media rambatan gelombang radio antara RBS di dalam shelter dan Antenna Sectoral diatas tower.

8. Tower

Sebagai media penempatan/penginstalan antenna dan feeder.

9. Shelter

Berada di samping tower, tempat untuk menyimpan equipment (No.1 – 4).



Gambar 2.3 Shelter BTS

10. Sistem pendingin BTS.

Umumnya berupa fan pada rak-rak RBS yang didukung oleh sistem Air Conditioner yang mendinginkan ruangan shelter.[7]

2.3 Pendingin RBS

Kenaikan permintaan untuk kecepatan tinggi, kapasitas besar, dan perangkat yang kecil untuk *Base Transceiver Station* (BTS) menuntut untuk berkembangnya sistem manajemen thermal yang rumit. Kombinasi panas perangkat yang tinggi dan kondisi lingkungan luar menuntut sistem pendingin yang memungkinkan untuk

berbagai kondisi.[8] Selain itu berbagai upaya dilakukan untuk menciptakan BTS yang ramah lingkungan, karena besarnya daya yang diperlukan untuk operasi dan pendinginan BTS. [9]

Dalam satu BTS terdapat rata-rata terdapat 2-3 RBS. Umumnya sebuah RBS membutuhkan daya listrik secara kontinyu sekitar 2000-3000 watt. Dan satu RBS akan menghasilkan panas maksimum sampai 2200 Watt.

Tabel 2.1 Konsumsi Daya Dan Kalor yang Dibangkitkan [10]

RBS 2202 (fully equipped)	Maximum Power Consumption (VA/W)				Maximum Heat Generation (W)
	System Voltage	Power Supply Voltage			
		+24 V DC	230 V AC	-48 V DC	
Maximum power consumption (theoretically possible at maximum load)	2100	3200	2400	2100	2200
Normal power consumption (operation with peak load and all time slots occupied)		2400	2400	2100	

Sebuah RBS memiliki batas temperatur kerja yang aman yaitu 0-45°C. Memiliki batas temperatur yang tidak sampai merusak yaitu -10 sampai 55°C. Sedangkan untuk kondisi operasi normal memiliki batas temperatur disekitar 5 sampai 40 °C. Menurut hasil survei di lapangan, bila temperatur ruangan mencapai 35 °C sudah terdapat sedikit gangguan.

Tabel 2.2 Syarat Kondisi Operasi di dalam Ruangan[10]

Environmental Parameters	Unit	Value		
		Normal Condition	Safe limit.	Non Destr.
Temperature	°C	15- 40	0 - 145	-10 - 155
Relative Humidity	%	5-85	5 - 90	5 - 90

Karena persyaratan alat diatas, maka sampai saat ini peralatan ini biasanya diletakkan dalam suatu rumah (shelter) tertutup yang dilengkapi pendingin ruangan (AC) untuk mencegah berbagai masalah. Menurut model *Black*, umur pakai sebuah IC (Integrated Circuit) tergantung secara eksponensial pada temperatur. Temperatur yang

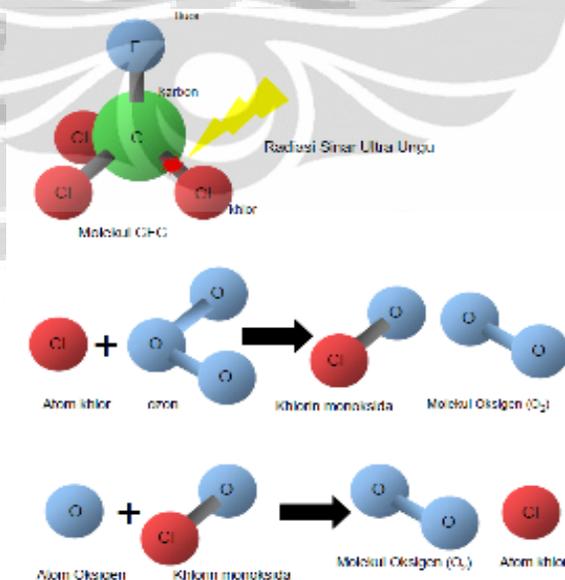
tinggi juga menambah masalah manajemen thermal dengan meningkatnya konsumsi daya total akibat meningkatnya kebocoran *subthreshold*. [11]

Perangkat untuk pendingin peralatan BTS biasanya memerlukan daya listrik dengan kapasitas sekitar 2000 hingga 4000 watt. Seperti sebuah data center persentase daya untuk sistem pendingin bisa mencapai 50% dari total daya, bahkan bisa lebih tinggi bila desain atau operasinya kurang baik. Selain AC dan peralatan telekomunikasi, masih ada beberapa peralatan bantu lain (fan dan lampu) yang memerlukan daya listrik maksimum 500 watt. [12]

Jadi satu BTS biasanya memerlukan daya listrik sebesar 6500 hingga 8500 watt yang mana hampir sepertiga sampai setengahnya dipakai untuk mendinginkan ruangan. Kebutuhan daya listrik ini praktis tak berubah dari waktu ke waktu. Dari ulasan diatas, diketahui konsumsi energi listrik yang cukup besar pada BTS yakni pada sistem pendingin. Terkait hal itu, perlu diteliti solusi untuk sistem pendingin BTS yang efisien.

2.4 Kerusakan Ozon

Di indonesia *Air Conditioner* konvensional masih banyak menggunakan refrigeran R-22 yang masih tergolong refrigeran CFC. Karena CFC memiliki banyak keuntungan di berbagai segi. Akan tetapi CFC memiliki potensi merusak ozon atau ODP. [2] Hal ini dikarenakan CFC dapat melepaskan atom klor (Cl) yang dapat merusak ikatan molekul ozon.



Gambar 2.4 Pemecahan Ozon oleh Atom Klor

Proses perusakan ozon oleh CFC dapat digambarkan seperti gambar diatas. Pertama CFC melepaskan atom Cl akibat terkena radiasi sinar ultraviolet. Kemudian atom Cl ini akan tersebar diudara yang kemudian bersinggungan dengan molekul ozon. Atom Cl kemudian akan mengikat satu atom oksigen dari molekul ozon sehingga akan terbentuk molekul ClO dan O₂. Atom Cl yang mudah terikat dengan atom oksigen akan sangat mudah merusak keseimbangan ikatan molekul ozon.

Tabel 2.3 Sifat-sifat Refrigeran.[2]

Parameter	CFC-12	HCFC-22	HFC-134a	HFC-290/600a (PID)	R290 pengganti R22
Rumus kimia	CCl ₂ F ₂	CHClF ₂	C ₂ H ₂ F ₄	C ₃ H ₈ +C ₃ H ₆	
Berat mol	120,9	86,5	100	51,1	
Titik didih, °C	29,9	40,8	26,1	31,5	42,1
Kalor laten, KJ/kg	165	233	217	405	426
Massa jenis, kg/m ³	1,292	1,170	1,187	0,517	
Sifat mudah terbakar	Tak ada	Tak ada	Ada	Ada	
Kadar racun	Tak ada	Tak ada	Ada	Ada	
Pelumas kompresor	Mineral	Mineral	Sintetik	Mineral	
ODP	1	0,05	0	0	
GWP	9,1	0,84	0,77	-	
Kalor spesifik cair pada 40°C (kJ/kg, K)	0,99	1,27	1,45	2,51	2,80

Penipisan lapisan ozon merupakan salah satu masalah penting yang harus segera ditanggulangi karena setiap penipisan lapisan ozon sebesar 10% akan menyebabkan kenaikan intensitas sinar Ultra Violet (UV) B sebesar 20%. Hasil penelitian para ahli menunjukkan bahwa tingginya intensitas UV-B bisa menimbulkan katarak mata, kanker kulit, penurunan kekebalan tubuh, memusnahkan plankton, dan menghambat pertumbuhan tanaman. [13]

Di samping itu terdapat efek pemanasan global akibat emisi secara langsung maupun tidak langsung dari gas rumah kaca (termasuk CFC dan HCFC) juga menjadi masalah lingkungan yang menjadi perhatian bersama. Pada bulan desember 1995 diadakan Vienna conference yang merupakan kelanjutan dari Montreal Protocol. Pada

konferensi tersebut ditetapkan skenario penghentian pemakaian CFC dan HCFC dan pencarian atas refrigeran-refrigeran alternatif yang ramah lingkungan.[14]

2.5 *Thermoelectric Cooler* (TEC)

Thermoelectric cooler (TEC) merupakan salahsatu alternatif teknologi pendinginan selain sistem kompresi uap yang menggunakan refrigeran. Bila pada pendinginan kompresi uap terjadi mekanisme aliran fluida dan perubahan siklus, lain halnya dengan pendinginan TEC. Pada pendinginan menggunakan TEC arus listrik bisa langsung dikonversi menjadi perbedaan temperatur. Karena tidak menggunakan refrigeran dan aliran fluida, pendinginan TEC lebih ramah lingkungan, desainnya lebih sederhana dan perawatannya lebih mudah dengan umur pakai yang cukup lama.

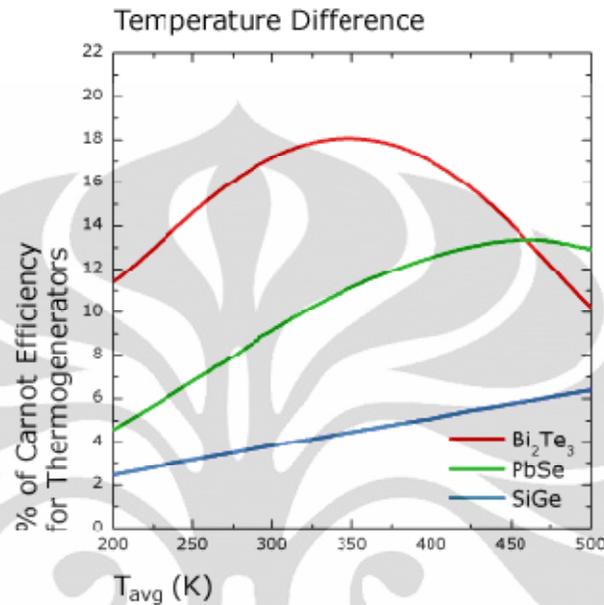
Pada awal tahun 1800-an, terjadi penemuan penting pertama yang berkaitan dengan termoelektrisitas. Tepatnya pada tahun 1821, seorang fisikawan Jerman bernama Thomas Johan Seebeck menemukan fenomena terbentuknya aliran listrik ketika dua material logam yang berbeda dihubungkan dalam suatu rangkaian tertutup dan kedua sambungan (junction) dipertahankan pada temperatur yang berbeda.

Pada tahun 1834, ketika menyelidiki “Efek Seebeck”, Jean Charles Athanase Peltier, menemukan fenomena kebalikan dimana jika arus searah dialirkan pada suatu rangkaian tertutup yang terdiri dari sambungan dua material logam yang berbeda maka pada satu sisi akan terjadi penyerapan kalor dan sisi lainnya akan terjadi pelepasan kalor.

Pada tahun 1854, William Thomson, mengeluarkan penjelasan yang lebih komprehensif dari percobaan Seebeck dan Peltier dan memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai keterkaitan dari dua percobaan sebelumnya, namun pada saat itu fenomena ini masih dianggap sebatas percobaan laboratorium tanpa aplikasi praktis. Perkembangan teknologi dibidang semikonduktor telah mendorong perkembangan material untuk thermoelectric, saat ini kebanyakan thermoelectrik terbuat dari susunan Bismuth Telluride (Bi_2Te_3). [15]

TEC berbahan bismuth telluride (Bi_2Te_3) banyak digunakan karena pada kisaran temperatur dibawah 450 K paling unggul dibandingkan dengan jenis lainnya, seperti

lead selenium (PbSe) dan silicon germanium (SiGe). Keunggulan ini dalam hal efisiensi terhadap efisiensi siklus carnot.[16]



Gambar 2.5 Kurva efisiensi beberapa jenis TEC.[16]

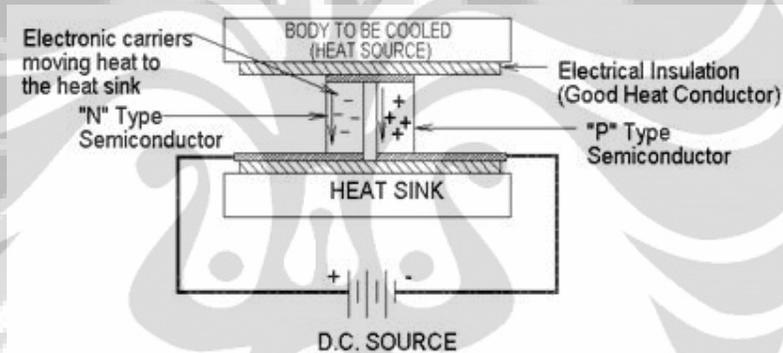
2.6 Prinsip Kerja Pendingin Termoelektrik

Sampai saat ini sistem pendinginan termoelektrik masih sering dibandingkan dengan sistem pendinginan konvensional yang menggunakan prinsip kompresi uap. Pada sistem pendinginan konvensional terdapat empat bagian fundamental yaitu evaporator, kompresor, kondensor, dan katup ekspansi. Evaporator merupakan komponen tempat terjadinya penguapan refrigeran. Refrigeran menguap karena menyerap kalor dari ruangan yang didinginkan. Refrigeran tentunya memiliki temperatur yang lebih rendah agar dapat menyerap kalor dari lingkungan. Oleh sebab itulah dibutuhkan bahan refrigeran yang mudah menguap pada temperatur rendah dan dibantu dengan penggunaan katup ekspansi untuk menurunkan tekanan. Pada tekanan rendah refrigeran akan lebih mudah menyerap kalor. Kompresor merupakan komponen tempat dikompresinya refrigeran yang telah menyerap kalor dari lingkungan dan berbentuk uap. Dengan proses kompresi, refrigeran dipaksa diperlambat gerakan molekulnya, sehingga seakan-akan energi kalor dipaksa terlepas dari refrigeran. Kondensor merupakan komponen dimana refrigeran yang terkompresi melepaskan kalor

ke lingkungan luar sehingga mengalami pengembunan dan berubah fase menjadi cair kembali.

Pendingin udara konvensional memiliki performa pendinginan yang besar dan penggunaan energi listrik yang besar. Padahal pendinginan seringkali hanya untuk daerah yang sempit tertentu yang memerlukan pendinginan. Sayangnya pendingin konvensional menggunakan kompresi uap sulit untuk didesain ringkas.[17]

Sedangkan pada sistem termoelektrik penyerapan dan pelepasan kalor terjadi akibat perpindahan elektron. Perpindahan elektron menyebabkan penyerapan energi dari lingkungan dan pelepasan energi ke lingkungan. Perpindahan elektron ini digerakkan oleh beda potensial dari arus DC yang diberikan.

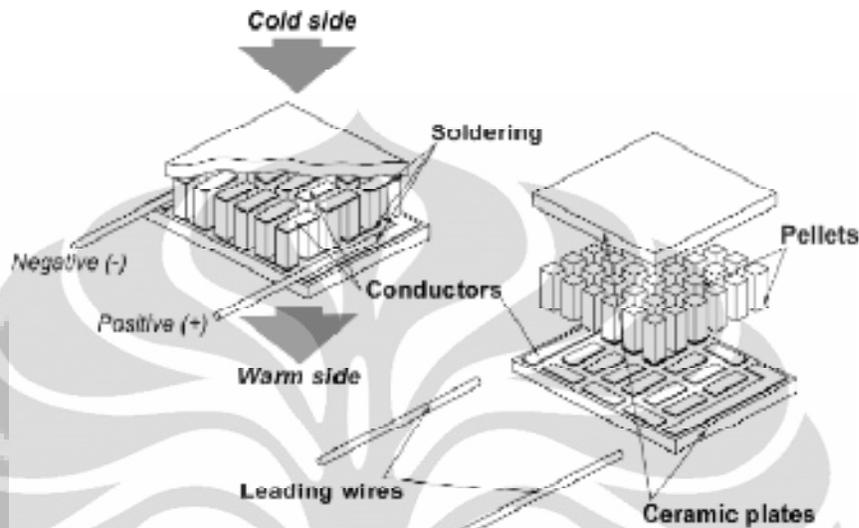


Gambar 2.6 Skematik Thermoelectric Cooler [18]

Modul termoelektrik tersusun dari pasangan-pasangan balok kecil berbahan Bismuth Telluride yang telah dikotori (doped) berupa semikonduktor tipe N dan tipe P. Semikonduktor Tipe-N telah dikotori oleh bahan-bahan yang memberikan elektron tambahan, sehingga terjadi kelebihan jumlah elektron yang menyebabkannya mudah melepas elektron. Sebaliknya pada semikonduktor Tipe-P dikotori bahan-bahan yang mengurangi jumlah elektron, sehingga terdapat lubang-lubang (holes) yang menyebabkannya mudah menerima elektron dari Tipe-N. [18]

Pemberian aliran listrik DC menyebabkan elektron dari semikonduktor tipe N mengalir menuju semikonduktor tipe P. Semikonduktor tipe N yang kelebihan elektron menjadi kelebihan energi kemudian membuang energi tersebut ke lingkungan. Sedangkan semikonduktor tipe P yang dihubungkan dengan kutub positif kekurangan elektron dan kekurangan energi sehingga menyerap energi dari luar. Besar flux kalor (panas yang dipompa melalui termoelektrik) jumlahnya akan berbanding lurus dengan

besar arus DC yang dialirkan. Dengan mengubah masukan arus dari nol ke maksimum, kita dapat mengontrol besarnya perbedaan temperatur dan aliran panas.



Gambar 2.7 Susunan Semikonduktor TEC [18]

Balok-balok ini disusun seri secara kelistrikan dan disusun paralel secara termal. Sebagai penghubungnya digunakan plat tembaga, karena tembaga merupakan konduktor listrik dan termal yang sangat baik. Sebagai pelapis plat tembaga, digunakan isolator keramik untuk mencegah kebocoran arus listrik dan terjadinya konslet pada modul, akan tetapi keramik ini memiliki konduktivitas termal yang tinggi sehingga mudah untuk menghantarkan kalor.

Keuntungan termoelektrik dibanding teknologi pendingin aktif yang lain:

1. biaya yang murah dan jangka waktu service yang lama
2. konsumsi energi yang rendah
3. tidak dibutuhkan skill khusus untuk instalasi dan service
4. ramah lingkungan dan aman
5. daya pendinginan dapat dikontrol dengan sangat baik

Akan tetapi kelebihan diatas ada yang bisa tidak tercapai tergantung pada situasinya. Dengan desain sistem yang bagus, kemampuan pendingin TEC dapat meningkat dua kali lipat.[19]

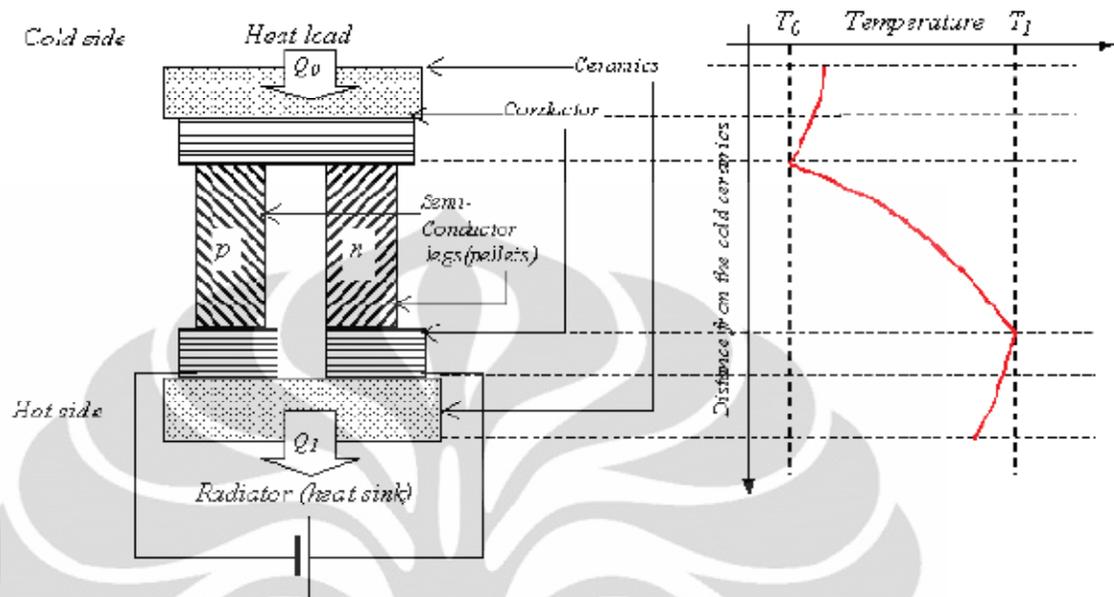
2.7 Parameter-Parameter Pendinginan Termoelektrik

Didalam pendinginan menggunakan termoelektrik terdapat tiga parameter yang perlu diperhatikan yaitu:

1. Beban kalor yang harus dipindahkan (Watt)
2. Temperatur permukaan sisi dingin modul ($^{\circ}\text{C}$)
3. Temperatur permukaan sisi panas modul ($^{\circ}\text{C}$)

Beban kalor adalah jumlah total kalor yang harus dipindahkan oleh modul termoelektrik dari objek yang hendak didinginkan ke lingkungan. Dalam perancangan sistem pendingin termoelektrik, terdapat dua jenis beban kalor yang harus diatasi, yaitu beban kalor aktif dan beban kalor pasif. Beban kalor aktif adalah sejumlah kalor yang harus dipindahkan dari suatu objek yang ingin didinginkan ke lingkungan untuk memperoleh temperatur yang diinginkan pada objek. Sedangkan beban kalor pasif adalah sejumlah kalor yang pindah dari lingkungan ke objek yang sedang didinginkan akibat insulasi yang bocor, instalasi sistem yang kurang baik, terjadinya kondensasi pada modul termoelektrik, dan lain-lainnya. Beban kalor pasif ini sebenarnya tidak diinginkan terjadi, akan tetapi, meskipun kita telah merancang dan membangun sistem pendingin termoelektrik yang baik, tetap akan ada kalor pasif yang terjadi. Sehingga beban kalor pasif ini harus diperhitungkan dalam perancangan.

Menurut letaknya terhadap sisi dingin modul, terdapat dua kondisi beban pendinginan yang mungkin terjadi. Pertama, letak beban pendinginan bersentuhan langsung dengan sisi dingin elemen termoelektrik, maka T_c pada sisi dingin modul sama dengan beban pendinginan. Kedua, letak beban pendinginan tidak bersentuhan langsung dengan sisi dingin modul, dalam kondisi ini T_c pada sisi dingin modul harus lebih dingin dari temperatur yang diinginkan agar dapat dicapai temperatur yang diinginkan.[20]



Gambar 2.8 Perubahan Temperatur melewati TEC [20]

Selain itu terdapat dua faktor penting yang mempengaruhi nilai temperatur sisi panas modul, yaitu:

1. Temperatur ambien lingkungan
2. Efisiensi heat exchanger yang digunakan pada sisi dingin dan sisi panas modul.

Secara umum pencapaian ΔT ($T_h - T_c$) dari modul termoelektrik selalu mendekati konstan. Jika T_h semakin rendah maka T_c semakin dingin, bila T_h semakin tinggi maka T_c tidak terlalu dingin.

Menghitung perpindahan kalor pada Termoelektrik

Secara teoritis besarnya panas yang dipompa sebuah modul termoelektrik dapat dihitung dengan menggunakan rumus [20] sebagai berikut:

$$Q_c = 2N \left(\alpha I T_c - \frac{I^2 \rho}{2G} - k \Delta T G \right) \quad (2.1)$$

Dimana;

Q_c = panas yang dipompa pada sisi dingin (W)

N = jumlah junction pada modul

$G = A/L$ (m)

I = Arus (A)

α = Koefisien Seebeck (Volt/Kelvin)

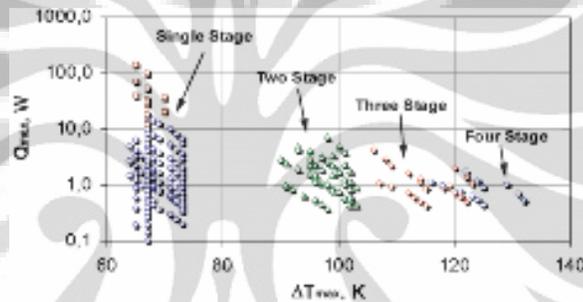
k = Konduktivitas Termal (Watt/cm.K)

ρ = tahanan listrik ($\Omega \cdot \text{cm}$)

Hasil penelitian Chein R., [21] mengungkapkan bahwa kapasitas pendinginan dapat ditingkatkan dengan meningkatnya T_c dan berkurangnya dT .

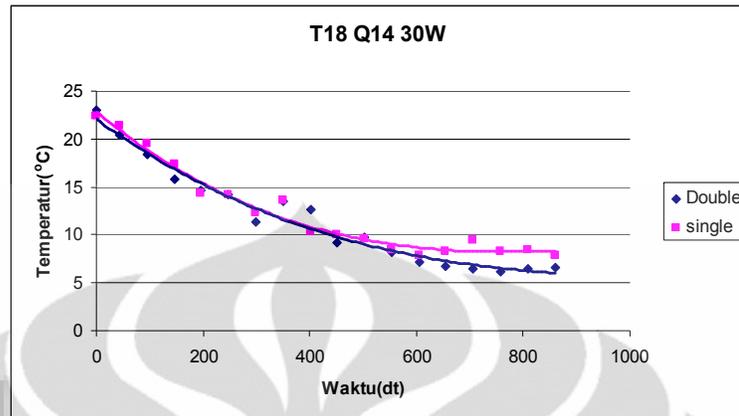
2.8 Modul Sistem Bertingkat

Sistem bertingkat pada modul termoelektrik digunakan hanya jika modul tunggal tidak bisa mencapai perbedaan temperatur yang diinginkan, namun hal yang terpenting adalah dengan penambahan modul maka biaya yang dibutuhkan akan semakin besar pula.



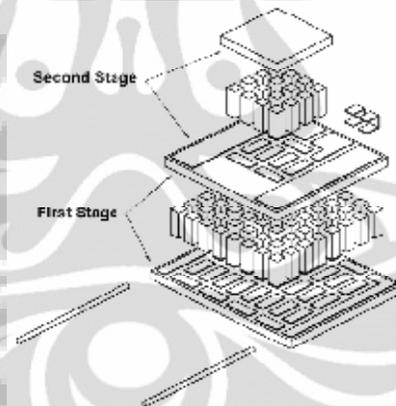
Gambar 2.9 Karakteristik TEC multistage [18]

Kemampuan memompa panas dari beban pada sistem bertingkat dapat ditingkatkan tergantung pada jumlah tingkat modul.[22] Pada pengembangan *Vaccine Carrier Box* dibandingkan antara peltier tunggal dengan ganda, settingan yang digunakan adalah debit air pendingin 14 gr/detik, temperatur air 18°C, dan daya input 30 Watt. Pada gambar 2.10 dapat dilihat, pada awal pendinginan baik peltier tunggal maupun peltier ganda tidak memperlihatkan perbedaan yang berarti. Akan tetapi pada menit berikutnya memperlihatkan perbedaan kemampuan pendinginan, peltier ganda atau bertingkat dua mampu mencapai temperatur yang lebih rendah. Terlihat pula dari gradien temperatur yang terjadi bahwa peltier tunggal sudah hampir mencapai temperatur steady, sedangkan peltier ganda masih dapat mencapai temperatur yang lebih rendah lagi.[23]



Gambar 2.10 Perbandingan antara single dan double peltier [23]

Konstruksi modul bertingkat banyak biasanya berbentuk piramida. Tingkat yang bawah biasanya lebih besar daripada tingkat yang atasnya. Bila tingkat atasnya digunakan untuk pendingin maka bagian bawahnya membutuhkan kapasitas pendinginan yang lebih besar untuk memindahkan panas buangan dari tingkat atasnya.

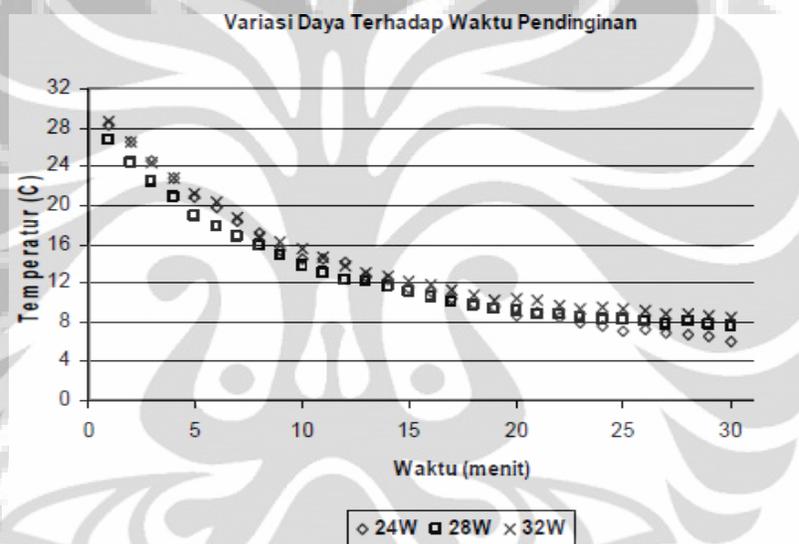


Gambar 2.11 Thermoelektrik dua tingkat [18]

Thermoelektrik heat pump lebih efisien dibanding alat pemanas elektrik, koefisien pemanasannya meningkat lebih dari 1,6 dengan kondisi operasi yang sesuai. Selama heat fluks pada sisi panas $[\eta/(\eta - 1)]$ kali heat fluks pada sisi dingin, aliran pada sisi panas lebih besar pengaruhnya terhadap perpindahan panas TE daripada sisi dingin.[24]

Pada gambar 2.12 terlihat bahwa daya input 24 Watt memberikan waktu pendinginan ruang vaksin yang paling cepat dibanding kedua variasi lainnya. Hal ini disebabkan temperatur sisi panas peltier (T_h) pada daya input 28 Watt dan 32 Watt lebih

tinggi dari 24 Watt. T_h yang meningkat berarti laju perpindahan kalor pada sisi panas meningkat. Kemungkinan yang menyebabkan Q_h meningkat dengan meningkatnya daya input adalah karena adanya *internal heating (joulian effect)* dalam elemen peltier itu sendiri, biasanya ini terjadi bila elemen peltier dioperasikan mendekati daya maksimumnya, atau *heatsink-fan* yang digunakan tidak dapat melepas kalor yang diterima lebih cepat dari Q_h yang dihasilkan peltier. Karena T_h meningkat maka T_c akan menjadi tidak terlalu dingin, ini sesuai dengan karakteristik peltier bahwa beda temperatur antara sisi dingin dan sisi panas (ΔT) selalu tetap.[25]

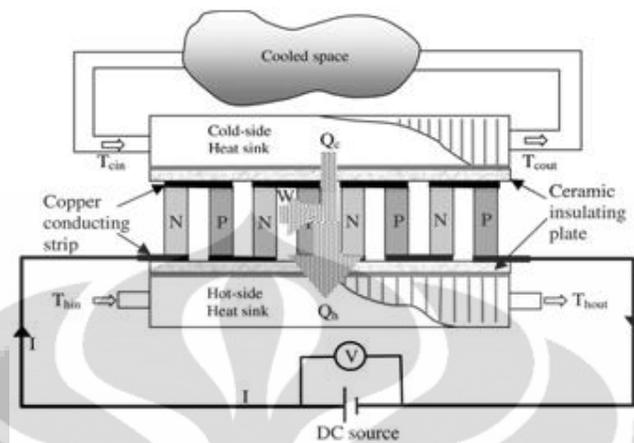


Gambar 2.12 Grafik Penurunan Temperatur Ruang Vaksin Antara 3 Variasi Daya Terhadap Waktu [25]

2.9 Aplikasi Pendingin Termoelektrik

2.9.1 Sistem Pendingin Ruangan Termoelektrik

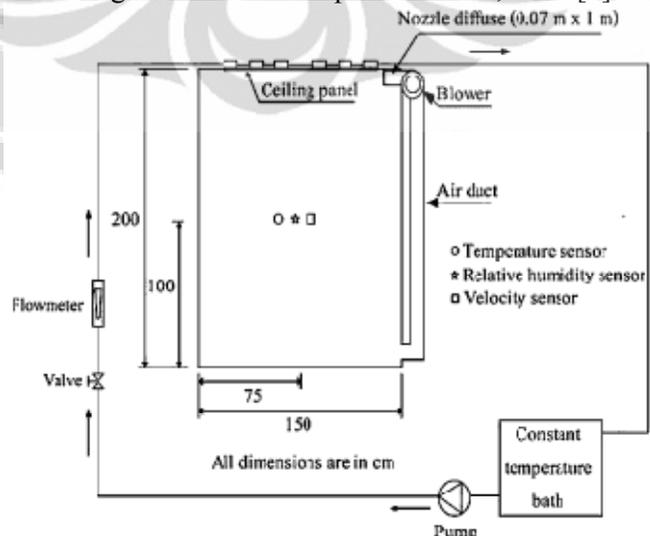
Teknologi termoelektrik juga telah diaplikasikan pada sistem pendingin ruangan (*air conditioner*). Penelitian dilakukan dengan membandingkan unjuk kerja air conditioner dengan sistem kompresi uap dan absorption yang menunjukkan bahwa unjuk kerja paling baik dihasilkan oleh sistem kompresi uap dengan nilai COP yang paling tinggi disusul sistem absorpsi kemudian termoelektrik. Namun sistem termoelektrik memiliki kelebihan lain yaitu sistem ini ramah lingkungan dimana sistem ini tidak menggunakan refrigerant yang dapat merusak lapisan ozon.[3]



Gambar 2.13 Skematik Air Conditioner dengan TEC [3]

Gambar 2.13 menjelaskan skema kerja termoelektrik air conditioner, dimana ruangan didinginkan dengan cara penyerapan kalor yang dilakukan oleh heat sink sisi dingin dan kalor pada sisi panas dilepaskan dengan mengalirkan udara melalui heat sink sisi panas.

Pada penelitian lain, dilakukan pengujian performa pendinginan dan kenyamanan thermal dari sebuah Thermoelektrik *Ceiling Cooling Panel* (TE-CCP) pada ruang berdimensi $1,5 \times 1,5 \times 2 \text{ m}^3$. Digunakan 36 modul TEC yang menempel pada panel ceiling aluminium sebagai sisi pendingin ruang. Sedangkan sisi panas didinginkan menggunakan heat exchanger tembaga dengan pendingin air yang bersikulasi. Dengan menggunakan arus 1 A, dihasilkan kapasitas pendinginan 201,6 W, COP 0,82, dengan rata-rata temperatur ruangan 27°C dan kecepatan udara 0,8 m/s.[4]



Gambar 2.14 Skema pengujian TE-CCP [4]

Pada TE-CCP digunakan pendingin air pada sisi panas. Perhatian berpindah pada pendingin cair karena keterbatasan pendingin udara. Pendingin cair dapat beroperasi dengan atau tanpa perubahan fase. Pendinginan dengan aliran dua fase lebih efektif dalam mereduksi temperatur peralatan elektronik dibanding fase tunggal.[26] Akan tetapi cara ini memerlukan desain yang lebih rumit, selain itu terdapat bahaya kebocoran yang dapat merusak peralatan elektronik.

2.9.2 Lemari Pendingin Termoelektrik

Lemari pendingin termoelektrik adalah lemari pendingin yang menggunakan sistem pendingin termoelektrik sebagai sistem utama untuk menghasilkan efek pendinginan. Sistem ini tidak seperti lemari pendingin sistem kompresi uap dan sistem absorpsi karena tidak menggunakan refrigerant. Pada penelitian sebelumnya dihasilkan bahwa lemari pendingin kompresi uap paling hemat energi, lebih murah akan tetapi paling berisik. Lemari pendingin absorpsi paling senyap akan tetapi paling boros energi dan lebih mahal. Lemari pendingin TEC paling murah, sedikit berisik tetapi lebih hemat energi bila dibanding lemari pendingin absorpsi.[27]. Min, G. membandingkan COP dari conventional compressor-type refrigerator (CCR) dengan Thermoelectric refrigerator (TER). CCR memiliki COP masing-masing sekitar 0,8 sedangkan TER memiliki COP disekitar 0,3-0,5.[28]

2.9.3 *Vaccine Carrier Box*

Vaccine Carrier Box dengan pendingin termoelektrik telah dikembangkan untuk mengatasi masalah pengiriman vaksin agar tidak rusak saat dalam perjalanan. Hasil pengujian menunjukkan temperatur ruang vaksin pada awalnya berada pada suhu 30 °C kemudian dengan cepat turun dan kurang dari 10 menit dapat mencapai 0 °C. Setelah pengoperasian lebih dari 1 jam, temperatur ruang vaksin mencapai temperatur terendah yakni -10°C. Pencapaian temperatur ruang vaksin sampai -10 °C ini lebih dari cukup untuk menjaga vaksin pada temperatur yang diijinkan yaitu pada rentang 2°C - 8°C.[25]

2.9.4 Alat *Cryosurgery* Dengan Menggunakan Modul Temoelektrik Bertingkat

Kanker leher rahim merupakan satu dari sekian banyak jenis kanker yang sering menyerang organ reproduksi wanita. Pada masa lalu, kanker leher rahim atau sering juga disebut kanker *cervix* memiliki angka kematian yang cukup tinggi dikarenakan belum ditemukannya metode diagnose awal dan metode pengobatan yang sesuai. Salah

satu metode medis yang kini sering digunakan adalah *cryosurgery* atau sering disebut juga *cryotherapy*. Metode *cryosurgery* memanfaatkan temperatur dingin hingga mencapai $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ untuk membunuh sel kanker.

Telah dirancang alat *cryosurgery* dengan menggunakan modul termoelektrik bertingkat. Digunakan *water block* yang dilengkapi *heatpipe* untuk menjaga temperatur sisi panas (T_h) modul termoelektrik bertingkat tidak terlalu tinggi. Fluida pendingin dialirkan melalui *Circulating Thermostatic Bath* (CTB) sebelum ke *water block*. Temperatur terendah yang dicapai untuk masing- masing pengujian adalah adalah $-54.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan temperatur CTB $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-51.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan temperatur CTB $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $-50.41\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan temperatur CTB $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. [22]

2.10 Perpindahan Kalor Pada Sistem Pendingin RBS

Perpindahan kalor yang terjadi pada sistem pendingin RBS yang diperhitungkan adalah perpindahan secara konduksi dan secara konveksi. Bila diurutkan dari ruang yang didinginkan menuju lingkungan maka kalor yang berpindah akan melalui beberapa tahap sebagai berikut:

1. panas dari ruangan terserap ke permukaan heatsink secara konveksi paksa menggunakan fan
2. panas berpindah dari heatsink ke sisi dingin TEC/peltier secara konduksi
3. panas dipompa oleh TEC ke sisi panas TEC
4. panas berpindah dari sisi panas TEC ke heatsink secara konduksi
5. panas berpindah dari heatsink ke lingkungan secara konveksi paksa menggunakan fan.

2.10.1 Perpindahan Kalor Konduksi

Perpindahan kalor yang terjadi secara konduksi berarti perpindahan kalor 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 [29], yaitu :

$$\dot{Q}_{\text{cond, wall}} = kA \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

Nilai minus, (-) dalam persamaan diatas menunjukkan bahwa kalor selalu berpindah ke arah temperatur yang lebih rendah. Hasil integrasi dan penataan ulang didapatkan rumus perpindahan kalor melalui dinding yaitu:

$$Q_{\text{cond,wall}} = kA \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (2.3)$$

dimana :

- Q = energi kalor (W)
- k = konduktivitas thermal (W/m.K)
- A = luas permukaan (m²)
- L = tebal penampang permukaan (m)
- T₂ = Temperatur yang lebih tinggi (K)
- T₁ = Temperatur yang lebih rendah (K)

Dari rumusan diatas dapat diketahui bahwa perpindahan kalor dipengaruhi oleh jenis material, ketebalan, dan luas permukaan bahan. Hal ini dapat menjadi pertimbangan dalam merencanakan *heatsink* untuk sisi dingin dan sisi panas.

2.10.2 Perpindahan Kalor Konveksi

Konveksi adalah perpindahan kalor yang terjadi akibat adanya pergerakan molekul pada suatu zat, gerakan inilah yang menyebabkan adanya transfer. Konveksi sendiri dapat dibagi menjadi 2, yaitu konveksi bebas atau konveksi alamiah dan konveksi paksa. Konveksi bebas atau konveksi alamiah terjadi apabila pergerakan fluida dikarenakan 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 [29], yaitu :

$$Q_{\text{conv}} = hA_s (T_s - T_\infty) \quad (2.4)$$

dimana :

- Q = energi kalor (W)
- h = koefisien perpindahan kalor konveksi (W/m².K)
- A = luas area permukaan (m²)
- T_s = temperatur permukaan (K)
- T_w = temperatur ambient (K)

2.10.3 Bilangan Nusselt

Bilangan nusselt merupakan bilangan yang menunjukkan peningkatan perpindahan kalor melalui lapisan fluida sebagai hasil konveksi relatif terhadap konduksi. Sehingga dapat dikatakan bahwa semakin besar bilangan nusselt maka semakin besar perpindahan kalor yang terjadi secara konveksi dibanding konduksinya.

$$Nu = C \cdot Re_L^m \cdot Pr^n \quad (2.5)$$

Dimana:

Nu = bilangan nusselt

Re = bilangan Reynold

Pr = bilangan Prandtl

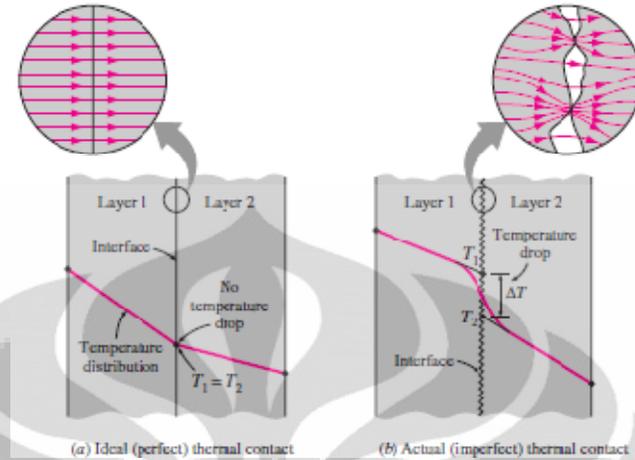
Semakin besar kecepatan dan semakin acak atau turbulen suatu aliran maka bilangan Reynold-nya akan semakin besar. Sehingga dapat dianggap untuk fluida yang sama dimana viskositas dan prandtl-nya sama, maka semakin besar kecepatan dan tingkat turbulensi aliran maka bilangan nusselt-nya semakin besar dan perpindahan kalor konveksinya akan semakin besar.[30,31] Hal berlaku pula pada sistem konveksi paksa misalnya pada penggunaan fan pendingin, dimana semakin besar kecepatan aliran semakin besar bilangan Reynold-nya sehingga semakin besar perpindahan kalor konveksinya.

2.10.4 Tahanan Kontak Termal

Pada pemasangan modul termoelektrik dengan heatsink 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.
- b. Konduksi melalui gas yang terkurung pada ruang – ruang lowong yang terbentuk karena persinggungan (air gap).

Semakin banyak air gap maka tahanan perpindahan kalor akan semakin besar karena udara memiliki konduktifitas termal yang rendah sehingga menjadi semacam insulator.[29]

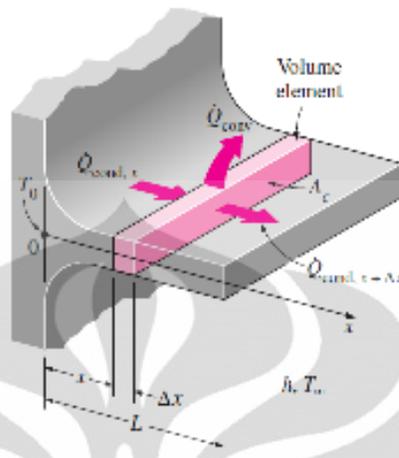


Gambar 2.15 tahanan kontak thermal [29]

2.11 Heatsink

Heatsink umumnya digunakan untuk meningkatkan transfer panas dengan cara memperluas permukaan konveksi. Semakin besar luas permukaan semakin besar perpindahan panas konveksi karena bidang sentuh yang semakin besar. Akan tetapi besarnya perpindahan panas konveksi juga dipengaruhi oleh besarnya koefisien konveksi (h). Pada penggunaan *heatsink* nilai h terbesar terdapat pada ujung sirip dan nilai terkecil terdapat pada dasar sirip, karena pada dasar sirip ruang aliran dikelilingi oleh permukaan solid sehingga membatasi gerakan fluida. Oleh karena itu, perlu dipertimbangkan jumlah sirip yang digunakan agar tidak menurunkan nilai h .

Selain itu panjang sirip juga berpengaruh pada koefisien perpindahan kalor menyeluruh. Semakin panjang sirip maka semakin besar luas permukaan konveksinya. Akan tetapi sirip yang terlalu panjang akan memperbesar hambatan konduksi sehingga panas tidak bisa berpindah dengan baik sampai ke ujung sirip. Yang menyebabkan penurunan koefisien perpindahan kalor menyeluruh.



Gambar 2.16 Elemen Volume pada Sirip [29]

Pada kondisi stedi, keseimbangan energi pada elemen volume dapat ditunjukkan dengan persamaan berikut [29]:

$$\dot{Q}_{\text{cond}, x} = \dot{Q}_{\text{cond}, x + \Delta x} + \dot{Q}_{\text{conv}} \quad (2.6)$$

dengan

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h(p \Delta x)(T - T_{\infty}) \quad (2.7)$$

dimana p = perimeter

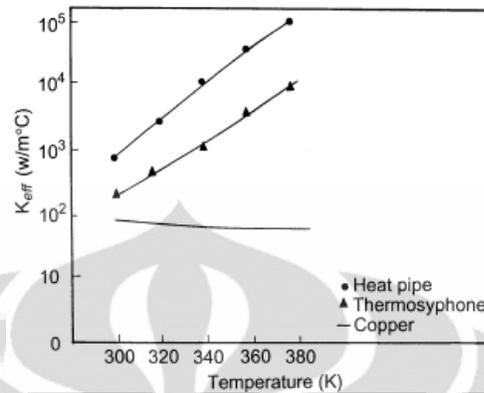
$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -kA_c \frac{dT}{dx} \quad (2.8)$$

sehingga

$$\frac{d}{dx} \left(kA_c \frac{dT}{dx} \right) - hp(T - T_{\infty}) = 0 \quad (2.9)$$

2.12 Heat Pipe

Heat pipe merupakan salahsatu alat pemindah kalor yang efektif dengan dimensi yang ringkas. *Heat pipe* seringkali digabung dengan *heatsink* dan fan saat diaplikasikan sebagai pendingin pada prosesor komputer. *Heat pipe* terdiri dari tiga komponen utama yaitu: pipa luar, wick, dan fluida kerja.



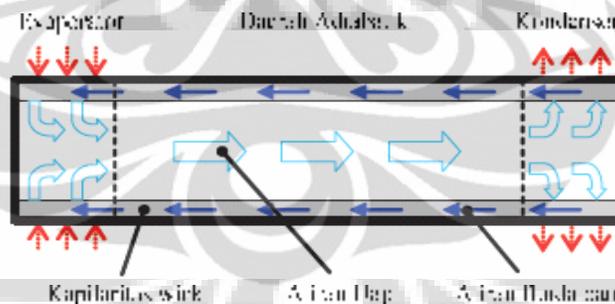
Gambar 2.17 Perbandingan konduktifitas thermal efektif single layer heat pipe, thermosiphon, dan batang tembaga.[32]

Konsep *heat pipe* pertama kali ditemukan oleh R.S Gougler [33,34] dari General motor Corporation, Ohio, USA. Dipatenkan pada tanggal 21 Desember 1942 dan publikasikan oleh US Patent no 2350348 pada 6 Juni 1944. *Heat pipe* digambarkan sebagai aplikasi yang menerapkan sistem refrigerasi karena memang prinsip kerja dari fluida kerja pada sebuah heat pipe sama dengan yang terdapat pada sistem refrigerasi secara umum. Menurut Gougler tujuan dari penemuan ini adalah untuk mengatasi permasalahan pada penyerapan panas dengan cara penguapan fluida cair pada titik tertentu dimana transfer panas terjadi tanpa menggunakan energi tambahan untuk mensirkulasikan fluida kerja. *Heat pipe* seperti yang disebutkan oleh Gougler [35] didalam patennya tidak dapat dikembangkan tanpa tahapan-tahapan patent tersebut, karena *heat pipe* yang dikembangkan saat itu hanya sesuai dengan teknologi yang ada pada waktu itu. Disamping itu, *heat pipe* diterapkan hanya untuk mencari solusi pada pemecahan masalah khususnya permasalahan termal pada *General Motor Corporation*. Kemudian Grover [36] mengajukan patent atas nama USA *Atomic Energy Commision* pada tahun 1963, dengan nama "*heat pipe*". Hal ini bertujuan untuk menjelaskan perangkat dasar dari *heat pipe* yang dipatenkan oleh Gougler. Grover mengatakan bagaimanapun juga bahwa suatu eksperimental yang dilakukan terhadap *heat pipe* dengan menggabungkan *wire mesh wick* dan *sodium* sebagai fluida kerja, hal ini harus tetap mencakup analisa secara teoritis. Dalam hal ini *litium* dan *silver* juga digunakan sebagai fluida kerja dari *heat pipe*.

Pada tahun 1967 dan 1968 Feldman, Eastman, & Katzoff mengembangkan aplikasi *heat pipe* untuk alat-alat komersial seperti pada AC, Pendingin Motor bakar dan pendingin elektronik [37-39]. Publikasinya pada tahun 1969 memperkenalkan konsep *heat pipe* rotasi yang digunakan pada pendingin dan turbin cryogenic.

Dimulai pada tahun 1980-an SonyTM mulai menggunakan *heat pipe* sebagai sistem pendinginan untuk beberapa produk komersial pada komponen elektronik seperti pendingin *tuner & audio amplifier* [40]. Hingga pada tahun 1990-an penggunaan *heat pipe* menyebar ke komponen-komponen elektronik yang memerlukan penyerapan fluk panas tinggi seperti *microprocessor* pada CPU, hingga mengakibatkan meningkatnya jumlah patent mengenai *heat pipe* hingga tiga kali lipat.

Prinsip kerja *heat pipe* secara garis besar adalah sebagai berikut: pada bagian evaporator fluida menyerap kalor dari luar sehingga terjadi perubahan fase dari cair menjadi uap. Perbedaan tekanan antara evaporator dan kondensor menyebabkan uap mengalir dari evaporator ke kondensor. Sampai di bagian kondensor uap melepaskan kalor ke lingkungan sehingga berubah fase menjadi cair kembali. Kemudian *wick* mengembalikan cairan tersebut menuju evaporator menggunakan prinsip daya kapilaritas hingga siklus terbentuk terus menerus dengan sendirinya.



Gambar 2.18 Skema Mekanisme Hantaran Panas pada Heat Pipe [41]

Terdapat tiga komponen dasar *heatpipe* yaitu :

1. Container (tabung)

Container biasanya berbentuk tabung tertutup yang merupakan bagian terluar *heatpipe* yang menjadi wadah fluida dan wick, sehingga memungkinkan untuk terjadinya siklus. Container dapat mempertahankan perbedaan tekanan terhadap tekanan lingkungan dan memiliki konduktivitas termal yang baik untuk

memindahkan dan menyerap kalor dari dan ke fluida kerja. Bagian ini biasanya terbuat dari tembaga, aluminum, ataupun stainless steel.

2. Wick (struktur kapilaritas)

Fungsi dari bagian ini adalah seperti pompa pada untuk mengalirkan fluida kerja yang telah terkondensasi dengan tekanan yang rendah agar dapat kembali lagi ke evaporator. Bagian ini berkerja berdasarkan tekanan kapilaritas dari fluida kerja sehingga tidak memerlukan daya untuk mengalirkan fluida kerja.

3. Fluida kerja

Fluida kerja didalam *heat pipe* berfungsi sebagai pembawa kalor dari evaporator ke kondensor. Kalor lebih cepat mengalir karena terbawa oleh fluida yang mengalir. 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 diserap dan semakin efisien *heat pipe* tersebut.

2.13 Simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*)

CFD (*Computational Fluid Dynamics*) adalah analisis sistem yang meliputi aliran fluida, perpindahan panas, dan fenomena yang berkaitan seperti reaksi kimia berupa simulasi yang berbasis komputer. Teknik ini sangat bermanfaat dan berguna luas dalam aplikasi industri maupun nonindustri.

Pada tahun 1960an industri pesawat terbang telah menggunakan teknik CFD untuk desain, penelitian, dan manufaktur badan pesawat dan mesin jet. Setelah itu metode ini diaplikasikan untuk mendesain mesin pembakaran dalam dan ruang bakar turbin gas. Selanjutnya digunakan untuk memprediksi gaya drag pada kendaraan bermotor dan aliran udara dalam kabin mobil. Kemajuan CFD menjadi menjadi bagian vital dalam desain produk industri dan proses. [42]

Ada beberapa keuntungan CFD dibanding pendekatan secara eksperimen untuk desain sistem fluida diantaranya adalah:

1. Mengurangi beban waktu dan biaya desain baru

2. Kemampuan untuk mempelajari sistem yang sulit dikontrol dengan eksperimen (misalnya: sistem yang sangat besar)
3. Kemampuan untuk mempelajari sistem yang berbahaya dan diluar batas kemampuan normal (studi keamanan dan skenario kecelakaan)
4. Secara praktek levelnya tidak terbatas dengan hasil yang detail.

2.13.1 Tahapan Simulasi CFD

Kode CFD merupakan struktur algoritma numerik yang dapat menyelesaikan masalah aliran fluida. Untuk memberi kemudahan akses dalam menyelesaikan masalah, semua CFD komersial memberikan tampilan gambar yang mudah untuk memasukkan parameter masalah dan untuk menguji hasilnya. Semua kode terdiri dari tiga elemen utama, yaitu: *pre-processor*, *solver*, dan *post-processor*.

1. *Pre-processor*

Pada proses awal ini terdiri dari input masalah aliran ke program CFD oleh operator, diantaranya yaitu:

- Mendefinisikan daerah geometri atau domain komputasi
- Membuat grid, membagi domain menjadi *cell-cell* kecil
- Memilih fenomena fisika dan kimia yang perlu dimodelkan
- Mendefinisikan sifat fluida
- Membuat spesifikasi yang cocok untuk kondisi batas.

Solusi untuk masalah aliran (kecepatan, tekanan, temperatur, dsb.) didefinisikan pada titik didalam masing-masing *cell*. Akurasi solusi CFD dibangun melalui jumlah *cell* didalam grid. Umumnya semakin besar jumlah *cell* semakin baik akurasi hasilnya. Antara akurasi hasil dan biaya yang diperlukan untuk *hardware* komputer dan lama kalkulasi bergantung pada rapat tidaknya grid. Grid yang optimal seringkali tidak seragam, lebih rapat pada daerah dimana terjadi banyak variasi dan lebih renggang pada daerah yang terdapat sedikit perubahan. Pada beberapa *software* sudah dilengkapi dengan sistem perapatan grid otomatis, salah satunya yaitu SolidWork Flow Simulation.

2. *Solver*

Metode numerik yang mendasari *solver* terdiri dari step-step berikut:

- Pendekatan variabel aliran yang tidak diketahui dengan dengan fungsi sederhana.
- Diskretisasi dengan pendekatan substitusi pada persamaan aliran perintah dan manipulasi matematis.
- Solusi persamaan aljabar

3. *Post-processor*

Proses ini merupakan proses menampilkan hasil. Tampilan ini meliputi diantaranya:

- Geometri domain dan tampilan grid
- Plot vektor
- Plot garis dan kontur berwarna
- Plot permukaan 2D dan 3D, dsb.

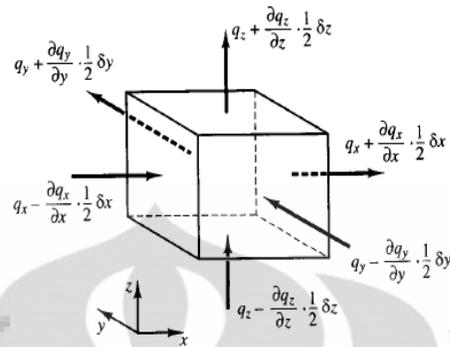
Dengan tampilan hasil simulasi ini akan memudahkan dalam analisa distribusi temperatur, tekanan, dan kecepatan.

2.13.2 Persamaan Perintah Aliran Fluida dan Perpindahan Panas

Persamaan perintah aliran fluida merupakan pernyataan matematis Hukum Kekekalan Fisika:

- Kekekalan massa fluida
- Rata-rata perubahan momentum sama dengan jumlah gaya pada partikel fluida (Hukum Newton kedua).
- Rata-rata perubahan energi sama dengan jumlah rata-rata pertambahan panas dan rata-rata kerja pada partikel fluida (Hukum pertama termodinamika)

Fluida dinyatakan sebagai *continuum*. Partikel fluida dianggap sebagai bentuk yang memiliki sifat makro seperti tekanan, kecepatan, dan temperatur, dimana sifat makro ini tidak dipengaruhi oleh individu molekul. Dalam teknik CFD, setiap elemen dinyatakan sebagai sebuah kubus kecil yang diperhitungkan densitas, kecepatan, dan energi yang bekerja pada keenam sisinya. Pada konduksi panas misalnya, fluks energi dinyatakan dalam vektor \mathbf{q} yang memiliki tiga komponen yaitu q_x , q_y , dan q_z untuk sisi masuk dan sisi keluar.



Gambar 2.19 Komponen Fluks Panas [42]

2.13.3 SolidWork Flow Simulation

SolidWork merupakan salah satu software komersial untuk menggambar CAD 3D yang dibangun oleh Dassault Systemes SolidWork Corporation, Massachusetts, USA.[43] SolidWork memiliki aplikasi CFD yang dinamakan Solidwork Flow Simulation. Aplikasi ini memiliki kemampuan yang luas untuk mempelajari fenomena aliran fluida dan perpindahan panas termasuk diantaranya:

1. Aliran fluida eksternal dan internal
2. Aliran fluida stedi dan tidak stedi
3. Aliran mampu mampat dan tak mampu mampat
4. Aliran gas subsonic, transonic, dan supersonic
5. Konveksi bebas, paksa, dan campur
6. Aliran laminar dan turbulen
7. Berbagai jenis fluida dan berbagai macam komponen solid
8. Dsb.

Seperti pada teknik CFD pada umumnya, Flow Simulation menggunakan persamaan dasar hukum kekekalan massa, keseimbangan momentum, dan keseimbangan momentum pada sistem koordinat Cartesian yang dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H \quad (2.12)$$

Dimana:

u = kecepatan fluida

ρ = densitas fluida

S_i = gaya eksternal distribusi massa per unit massa untuk hambatan media berpori

H = entalpi

Q_H = sumber panas atau penyerapan panas per unit volume

τ = tegangan geser viskos newtonian

τ^R = tegangan geser viskos Reynold

ε = disipasi turbulen

Sedangkan untuk konduksi panas pada media solid digunakan persamaan berikut:

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_H \quad (2.13)$$

Dimana:

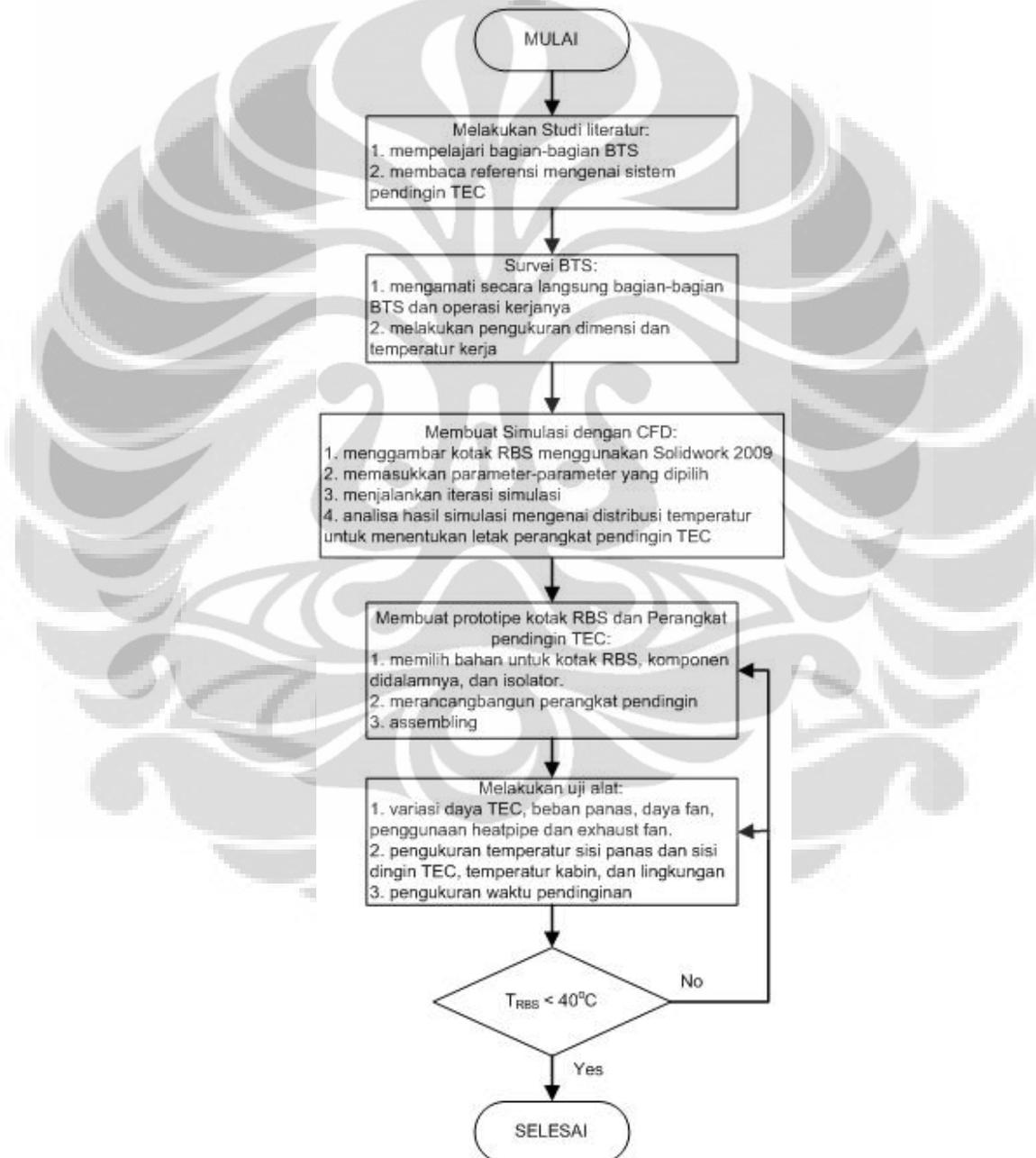
e = internal energi spesifik

λ = konduktifitas termal

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Berikut ini adalah diagram alir tahapan riset yang dilakukan,



Gambar 3.1 Diagram alir tahapan riset

3.2 Hasil Survei Yang Telah Dilakukan

Dari hasil survei yang telah dilakukan didapatkan beberapa data sebagai berikut:

1. Dimensi shelter BTS

Shelter berbentuk kotak/persegi dengan dimensi panjang x lebar x tinggi adalah sebesar: 3,85 m x 2,3 m x 2,6 m.

2. Temperatur ruang BTS

Temperatur dalam ruang BTS adalah 30°C.

3. Peralatan yang terdapat dalam BTS

Beberapa peralatan yang ada di dalam BTS diantaranya adalah: 3 unit kotak RBS, satu unit perangkat transmisi, satu unit kotak batere untuk transmisi, 2 unit kotak batere untuk RBS, kabel-kabel penghubung, dan 4 buah lampu tl.

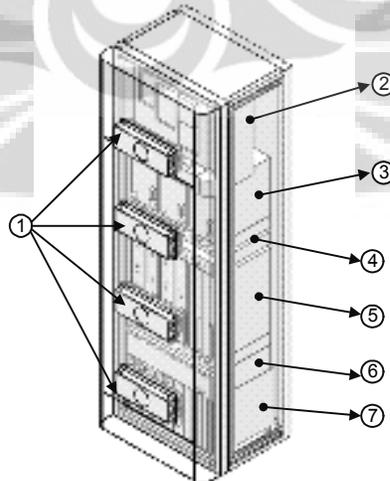
4. Sistem pendingin BTS

Satu unit *exhaust fan*, panel indikator temperatur ruang (yang menghidupkan *exhaust fan* secara otomatis bila temperatur melewati batas yang ditentukan), 2 unit AC konvensional dengan daya masing-masing 2 kW.

5. Dimensi kotak RBS

Dari hasil survei diketahui bahwa peralatan yang membutuhkan pendinginan yang intensif adalah perangkat transmisi dan perangkat RBS. Dalam penelitian ini dikhususkan untuk meneliti sistem pendingin RBS, dimana dalam satu BTS terdapat 3 unit RBS.

6. Temperatur komponen-komponen dalam lemari RBS



Gambar 3.2 Bagian-bagian lemari RBS

Bagian-bagian lemari RBS:

1) Perangkat TEC

Berfungsi mendinginkan ruang dalam lemari RBS

2) ACCU (*AC Connection Unit*) ; T = 33°C

Berfungsi mendistribusikan dan memutus sumber tegangan listrik AC.

3) CDU (*Combining and Distribution Unit*) ; T = 31,5°C

Berfungsi interface antara transceiver dan sistem antena.

4) CXU (*Configuration Switch Unit*) ; T = 36°C

Berfungsi sebagai penghubung antara CDU dan dTRX dalam jalur receiver.

5) dTRU (*double Transceiver Unit*) ; T = 39°C

Berfungsi sebagai proses transmisi dan penerima gelombang radio.

6) IDM (*Internal Distribution Module*) ; T = 31°C

Berfungsi sebagai panel pendistribusi daya DC internal ke unit-unit.

7) DXU (*Distribution Switch Unit*) ; T = 31°C

Berfungsi sebagai pusat kontrol untuk RBS, mendukung hubungan ke BSC.

3.3 Kontruksi Lemari Pendingin RBS

Spesifikasi Tuntutan Rancangan

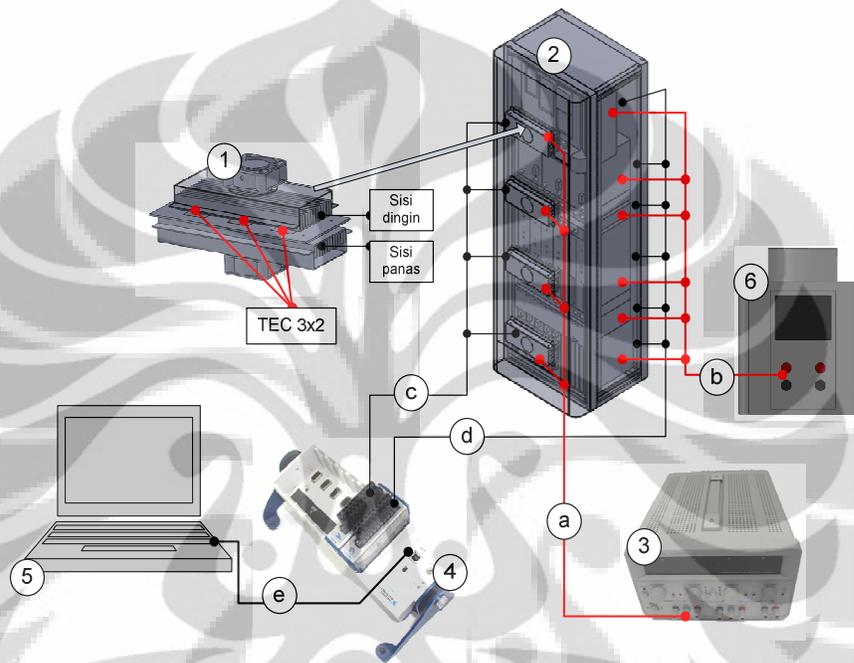
Dalam mendesain sistem pendingin termoelektrik ini, tuntutan spesifikasi harus diperhatikan untuk memastikan sistem pendingin yang dibuat akan memenuhi tuntutan spesifikasi. Berdasarkan analisa awal dan data-data yang diperoleh, maka beberapa tuntutan yang harus dipenuhi adalah :

1. mampu mendinginkan ruang dalam lemari RBS pada range 10 °C – 30°C
2. penggunaan daya listrik yang kecil
3. kontruksi perangkat pendingin yang sederhana dan mudah diperbaiki
4. peletakan perangkat pendingin pada pintu depan agar pemasangan lebih mudah
5. menggunakan bahan baku yang mudah didapat dipasaran.

3.4 Skema Pengujian

Instalasi pengujian direncanakan seperti skema pada gambar 3.3. Prototype lemari RBS dibuat dengan ukuran sebenarnya dan diberi pemanas lampu pijar sebagai

sumber panas yang mendapat daya dari *regulator*. Sistem pendingin menggunakan empat buah perangkat TEC yang dipasang pada pintu depan. Setiap perangkat TEC masing-masing terpasang 4 dan 6 modul TEC yang juga mendapat daya dari *power supply*.



Gambar 3.3 Skema instalasi pengujian

Keterangan gambar skema pengujian:

Peralatan:

- | | |
|------------------------|----------------------------------|
| 1. Perangkat TEC | 4. <i>Data acquisition</i> (DAQ) |
| 2. Lemari RBS | 5. komputer |
| 3. <i>Power supply</i> | 6. <i>Regulator</i> |

Sambungan:

- | | |
|--|---|
| a. Kabel power TEC | d. <i>Thermocouple</i> temperatur ruang dalam RBS |
| b. Kabel power pemanas | e. Kabel USB penghubung DAQ ke CPU |
| c. <i>Thermocouple</i> temperatur sisi dingin dan sisi panas perangkat pendingin | |

Temperatur diukur menggunakan *thermocouple* yang terhubung ke *Data acquisition* (DAQ). Kemudian sinyal dari DAQ diterima oleh komputer untuk kemudian diolah menjadi data temperatur yang dapat disimpan dalam bentuk file. Berikut merupakan posisi peletakan termokopel dalam pengujian performa lemari RBS:

a. pada perangkat pendingin

Untuk mengukur temperatur baik temperatur sisi dingin maupun sisi panas elemen termoelektrik, maka termokopel diletakkan pada permukaan heatsink sisi panas maupun sisi dingin. Sehingga jumlah totalnya sebanyak 8 buah, yaitu 4 sisi panas dan 4 sisi dingin.

b. di dalam kabin RBS

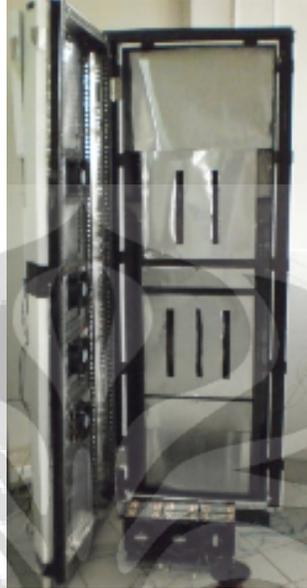
Peletakan termokopel untuk mengukur temperatur kabin secara mengambang untuk memastikan temperatur yang terukur adalah temperatur udara kabin lemari RBS. Termokopel di dalam kabin berjumlah enam buah yaitu diletakkan mengambang tepat di belakang masing-masing kotak alat yang menghasilkan panas.

c. temperatur Lingkungan

Pengambilan data temperatur lingkungan dilakukan untuk mengetahui performa pendingin lemari RBS pada temperatur lingkungan tertentu.



Gambar 3.4 Instalasi pengujian



Gambar 3.5 Tampak dalam kabin

3.5 Komponen Pengujian

Pada pengujian pendingin RBS beberapa persiapan yang dibutuhkan dalam pengujian adalah :

1. *Power Supply*

Power supply berfungsi untuk menghasilkan daya listrik. *Powers supply* ini mampu mengubah tegangan *Alternating current* (AC) 220 V menjadi tegangan *Directional Curent* (DC) dengan besarnya tegangan yang dapat di atur.



Gambar 3.6 power supply

2. Regulator

Regulator digunakan untuk memvariasikan tegangan arus AC sebagai sumber daya listrik lampu pemanas. Baik input maupun output regulator berupa arus AC.



Gambar 3.7 Regulator

3. Pemanas

Pemanas berupa lampu pijar digunakan untuk menghasilkan beban panas pada kotak-kotak simulasi alat. Lampu pijar menghasilkan panas yang besarnya sama dengan daya yang diberikan. Lampu pijar menghasilkan panas berupa gelombang inframerah sehingga panas yang dihasilkan bisa merata.



Gambar 3.8 Lampu pijar

4. *Data Acquisition*

Data Acquisition (DAQ) adalah alat yang mampu merubah kondisi fisik sehingga merubahnya menjadi sinyal numerik yang mampu di manipulasikan oleh komputer. DAQ yang digunakan adalah NI cDAQ-9172 National InstrumentTM dan modul yang digunakan sebagai pengolah data temperatur jenis modul NI9122 National InstrumentTM dengan ± 80 mV analog input.



Gambar 3.9 Data Acquisition dan modul temperatur

5. *Thermocouple*

Thermocouple adalah sensor pengukuran temperatur yang berupa sambungan antara dua logam yang berbeda yang menghasilkan tegangan yang besarnya dipengaruhi oleh perbedaan temperatur. *Thermocouple* yang digunakan pada pengujian ini adalah jenis K, terbuat dari chromel dan alumel dimana pada jenis ini jangkauan temperatur yang mampu diukur antara -200°C sampai 1200°C .

Untuk keakuratan data yang didapat, termokopel harus diletakkan pada posisi yang tepat, karena pemasangan termokopel pada tempat yang tidak tepat akan mengakibatkan data yang tidak tepat akan menghasilkan data pengujian yang tidak akurat.

6. *Styrofoam*

Material dengan konduktivitas rendah ($0,029 \text{ W/m-K}$) digunakan untuk mengisolasi lemari RBS agar lebih cepat dingin. Kalor masuk dari lingkungan diminimalisir sekecil mungkin sehingga beban panas pasif lebih sedikit.

7. *Software dan PC.*

Untuk mengolah sinyal-sinyal digital dari DAQ sehingga hasil dapat di tampilkan dalam bentuk grafik maupun tabel pengujian maka dipergunakan PC dengan *software* LAB View 8.5TM.

3.6 Komponen Perangkat Pendingin

Perangkat pendingin ini terdiri dari beberapa komponen yang memiliki fungsi yang berlainan namun saling mendukung. Perangkat pendingin diberi nama perangkat

pendingin 1 untuk perangkat pendingin yang diletakkan paling atas dan urut kebawah sampai perangkat pendingin 4. Berikut ini penjelasan tiap komponen yang digunakan pada perangkat pendingin tersebut :

1. Thermoelektrik *Cooler* (TEC)

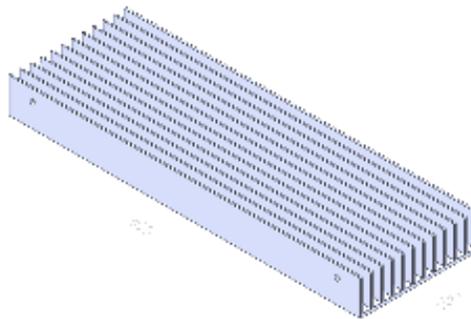
Perangkat pendingin termoelektrik ini menggunakan modul termoelektrik yang berfungsi sebagai pompa kalor solid (*solid-state heat pump*). Masing-masing perangkat pendingin berisi 4 modul untuk perangkat pendingin 4 dan 6 modul untuk perangkat pendingin lainnya. Tiap 2 buah modul TEC dihubungkan secara seri, kemudian tiap pasangan TEC yang dihubungkan seri tersebut dihubungkan secara paralel.



Gambar 3.10 modul TEC

2. *Heat sink* (sisi dingin)

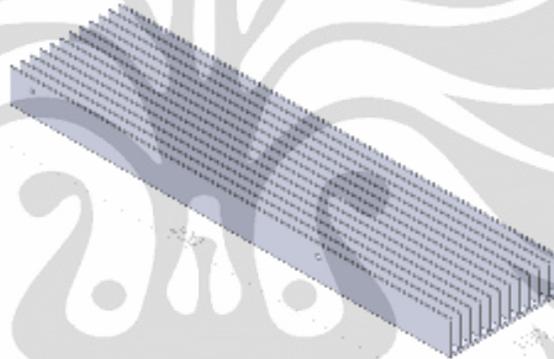
Heat sink pada sisi dingin berfungsi sebagai penyerap panas di dalam kabin. Heat sink ini memiliki ukuran 100 mm x 300 mm dan berbahan alumunium. Dengan menggunakan heat sink ini didapatkan luas permukaan yang lebih luas untuk mendapatkan laju perpindahan panas yang lebih besar.



Gambar 3.11 Heatsink sisi dingin

3. Heat sink (sisi panas)

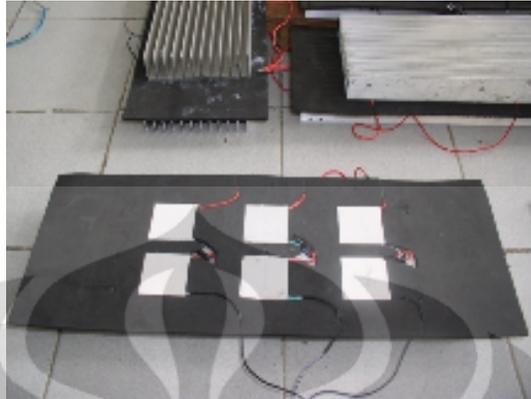
Heat sink pada sisi panas berfungsi sebagai pelepas panas dari sistem termoelektrik. *Heat sink* ini memiliki ukuran 100 mm x 400 mm dan berbahan aluminium. Heatsink ini sangat mempengaruhi kinerja dari sistem termoelektrik. Semakin baik heatsink melepaskan kalor maka semakin baik kinerja dari sistem termoelektrik tersebut. Pada pengujian dipilih heatsink sisi panas lebih besar dari sisi dingin. Ini berdasarkan teori yang mengungkapkan bahwa aliran kalor yang melewati sisi panas lebih besar daripada aliran kalor yang melewati sisi dingin. Oleh karena itu, dibutuhkan luas yang lebih besar pada sisi panas.



Gambar 3.12 Heatsink sisi panas

4. Gasket

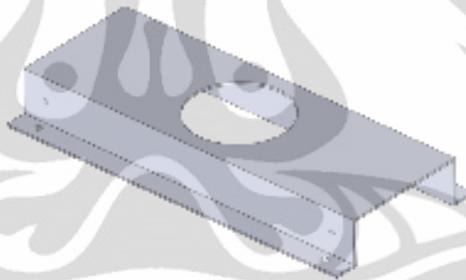
Gasket berfungsi sebagai separator antara heat sink sisi panas dengan heat sink sisi dingin selain itu gasket juga berfungsi sebagai pengisi rongga antara termoelektrik dengan termoelektrik lainnya sehingga udara tidak memasuki rongga- rongga tersebut. Adanya udara didalam rongga tersebut dapat mengurangi kinerja sistem karena dapat menyebabkan pertukaran panas antara heat sink dan udara tersebut menjadi beban pendinginan sistem. Gasket ini terbuat dari material karet dan memiliki konduktivitas termal yang kecil sehingga sangat kecil mengalirkan kalor.



Gambar 3.13 Gasket dengan susunan TEC

5. Cover (lapisan pelindung)

Cover berfungsi sebagai pelindung permukaan heatsink sisi dingin terhadap radiasi panas dari kotak alat dan sebagai pengarah aliran udara pendingin. Cover ini terbuat dari material aluminium.



Gambar 3.14 cover heatsink

6. Fan elektrik

Perangkat pendingin termoelektrik ini menggunakan dua buah fan elektrik pada sisi panas sistem dan sebuah fan pada sisi dingin. Fan elektrik ini berfungsi sebagai pembuat aliran udara pada sisi panas dan sisi dingin. Berikut ini spesifikasi fan elektrik :

Merk : Guo Heng
 Model : GH12038M12S
 Flow rate : 90 CFM
 Input power : 4,2 W
 Diameter : 12 cm

Terdapat perbedaan antara penggunaan fan elektrik pada sisi panas dan sisi dingin. Pada sisi dingin, fan berkerja dengan arah aliran udaranya menjauhi sistem sedangkan fan elektrik pada sisi panas berkerja dengan arah aliran mendekati sistem.



Gambar 3.15 Kipas elektrik

7. Heat pipe

Pada variasi penggunaan *heat pipe*, digunakan 6 buah *heatsink-heat pipe* yang dilengkapi fan untuk mendinginkan keenam sisi panas modul TEC pada perangkat pendingin 3. Berikut ini spesifikasi fan elektriknya:

Merk : Cooler master
 Model : Hyper 212 Plus
 Flow rate : 70 CFM
 Input power : 4,2 W
 Diameter : 12 cm



Gambar 3.16 Heat pipe Cooler Master Hyper 212 plus

8. Exhaust fan

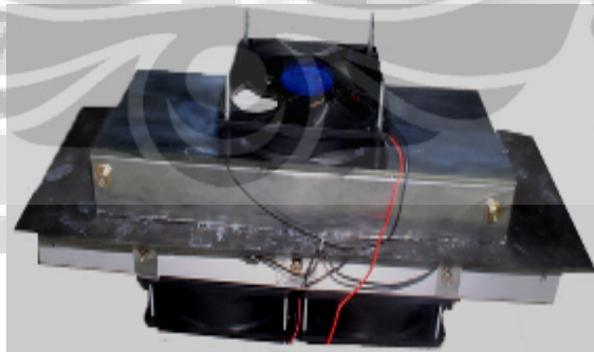
Pada variasi penggunaan *exhaust fan* digunakan 2 buah exhaust fan untuk membuang panas dalam kabin ke lingkungan luar. Berikut ini spesifikasi *exhaust fan* yang digunakan :

Merk : CKE
Model : APK 15-3
Flow rate : 4,5 m³/min
Input power : 25 W
Diameter : 15 cm



Gambar 3.17 Exhaust fan CKE APK 15-3

Berikut ini adalah gambar perangkat pendingin TEC secara keseluruhan.



Gambar 3.18 Perangkat pendingin thermoelektrik (TEC)

3.7 Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mendapatkan data kinerja perangkat pendingin RBS untuk mengetahui unjuk performa kerja sistem pendingin tersebut. Prosedur pengujiannya adalah sebagai berikut:

1. Termokopel diletakan pada tiap-tiap sisi termoelektrik, kabin, dan luar kabin sebagai sensor temperatur.
2. Seluruh termokopel tersebut dihubungkan ke modul National Instrument yang digunakan sebagai data akuisisi.
3. Proses pengujian performa lemari pendingin termoelektrik dilakukan di dalam ruangan EC 312 dengan temperatur ambient $28^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$.
4. National Instrument data aquisisi dihubungkan dengan komputer.
5. Melakukan set-up terhadap software labview dan pengujian setiap sensor untuk memastikan bahwa sensor tersebut bekerja secara normal.
6. Pantau temperatur semua sensor lalu tunggu hingga temperatur semua sensor mendekati temperatur lingkungan ($+1 - 1^{\circ}\text{C}$)
7. Hubungkan kabel power sistem pendingin termoelektrik dan pemanas dengan *power supply* sebagai sumber daya yang digunakan.
8. Selanjutnya *power supply* dihidupkan sehingga sistem berkerja dan labview dijalankan untuk menyimpan data temperatur.

3.8 Variasi Pengambilan Data

Pengujian performa serta pengambilan data dilakukan di laboratorium Applied Heat Transfer Engineering Center FT UI. Pengambilan data tersebut meliputi :

- a) Pengambilan data dengan variasi beban pendinginan

Beban pendinginan berupa panas komponen didalam kotak RBS yang berasal dari lampu pijar. Beban pendinginan divariasikan dengan memvariasikan daya lampu pijar. Daya lampu pijar setiap kotak alat besarnya diatur berbeda-beda untuk menghasilkan temperatur yang mendekati kondisi yang sebenarnya. Variasi daya beban panas diambil berdasarkan variasi tegangan pada regulator yaitu 55 V, 110V, dan 220 V.

b) Pengambilan data dengan variasi daya TEC

Semakin besar daya listrik yang diberikan ke TEC maka semakin besar panas yang dipindahkan. Hal ini harus diimbangi oleh pendinginan sisi panas yang lebih besar agar tidak terjadi penumpukan kalor. Akan tetapi pada tingkat daya tertentu performa TEC akan menurun dan kurang efisien sehingga perlu diteliti lebih lanjut. Variasi daya TEC yang diambil berdasarkan variasi tegangan TEC yaitu 6 V, 8 V, dan 10 V.

c) Pengambilan data dengan variasi daya fan dalam

Daya fan semakin besar maka debit udara yang dihembuskan akan semakin besar. Pada sisi dingin, makin besar daya fan udara yang didinginkan akan semakin banyak dalam waktu yang sama. Variasi daya fan didasarkan pada variasi tegangan fan yaitu 4 V, 8 V, dan 12 V.

d) Pengambilan data dengan variasi penggunaan *heat pipe* dan *exhaust fan*.

Berdasarkan penelitian sebelumnya, penggunaan *heat pipe* dapat meningkat laju aliran kalor pada sistem pendingin termoelektrik. Untuk meningkatkan COP dari thermoelectric, salah satu caranya yaitu dengan memaksimalkan penyerapan kalor pada sisi panas. Ini dibuktikan oleh D. Astrain [44] yang menggunakan tambahan thermosyphon untuk menambah COP *thermoelectric refrigerator* hingga 32%. Demikian halnya penggunaan *heatpipe* yang memberikan efek pendinginan yang besar.[45] Sedangkan penggunaan *exhaust fan* yaitu untuk mengatasi panas yang besar pada beban panas maksimal.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian pendingin lemari RBS telah dilakukan dengan beberapa variasi. Pengujian dilakukan pada temperatur ambient 28 ± 1 °C. Data hasil pengujian kemudian diolah dan ditampilkan dalam bentuk grafik dan tabel untuk mempermudah dan memperjelas analisa hasil. Dalam buku ini akan ditampilkan grafik beserta analisisnya.

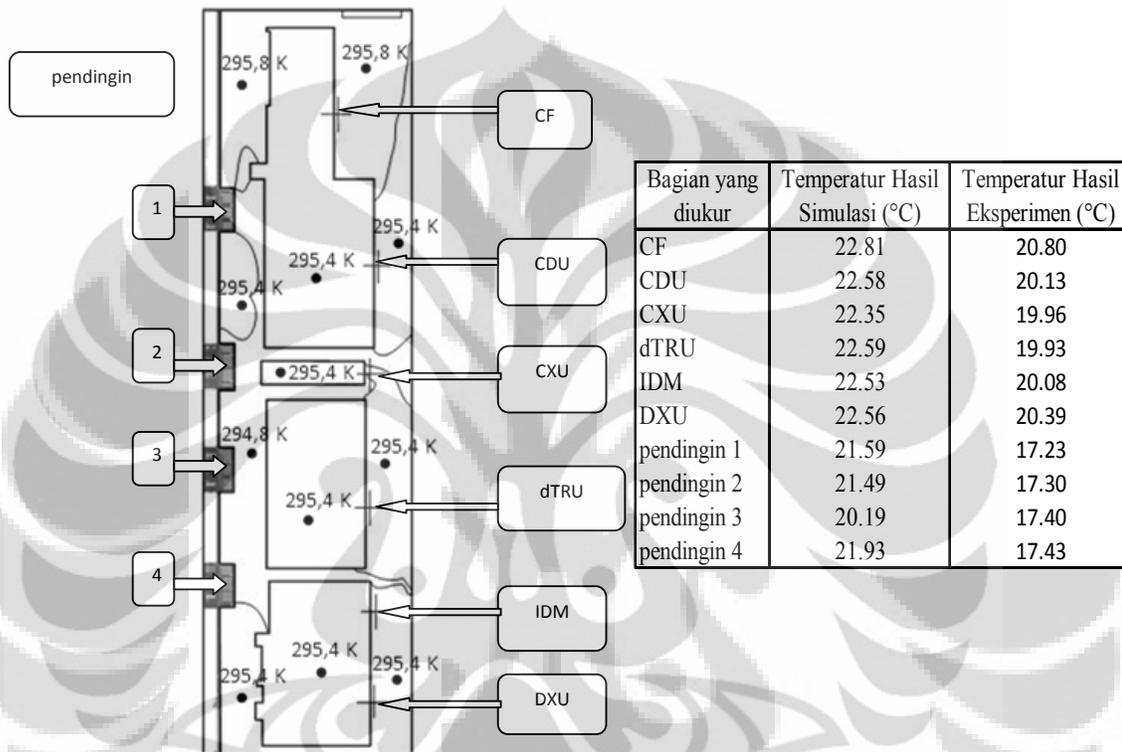
4.1 Distribusi Temperatur Pendingin Termoelektrik Tanpa Beban Panas

Dalam pengujian telah dilakukan pengukuran temperatur kabin pada beberapa posisi untuk mengetahui distribusi temperatur yang terjadi di dalam kabin. Setiap kotak alat menghasilkan panas yang tidak seragam besar kecilnya dan mempengaruhi temperatur keseluruhan lemari RBS. Dengan mengetahui besarnya temperatur pada daerah kotak-kotak utama, diharapkan dapat diketahui besar dan lokasi pendinginan yang harus dilakukan. Selain itu dapat diperkirakan apakah temperatur kabin pada bagian-bagian utama memadai untuk syarat operasi normal, dimana syarat tersebut yaitu temperatur udara maksimal 40°C.[10]

Pengujian dilakukan dengan kondisi tanpa beban panas. Masing-masing modul TEC diberi tegangan sebesar 8 V dan membutuhkan daya untuk keseluruhan TEC sebesar 356,8 Watt. Fan pendingin sisi panas masing-masing diberi tegangan 12 V sehingga daya keseluruhan untuk fan luar sebesar 34,32 Watt. Fan pada sisi dingin masing-masing diberi tegangan 12 V sehingga daya keseluruhan untuk fan dalam sebesar 13,2 Watt. Dan daya total pendingin adalah 404.32 W.

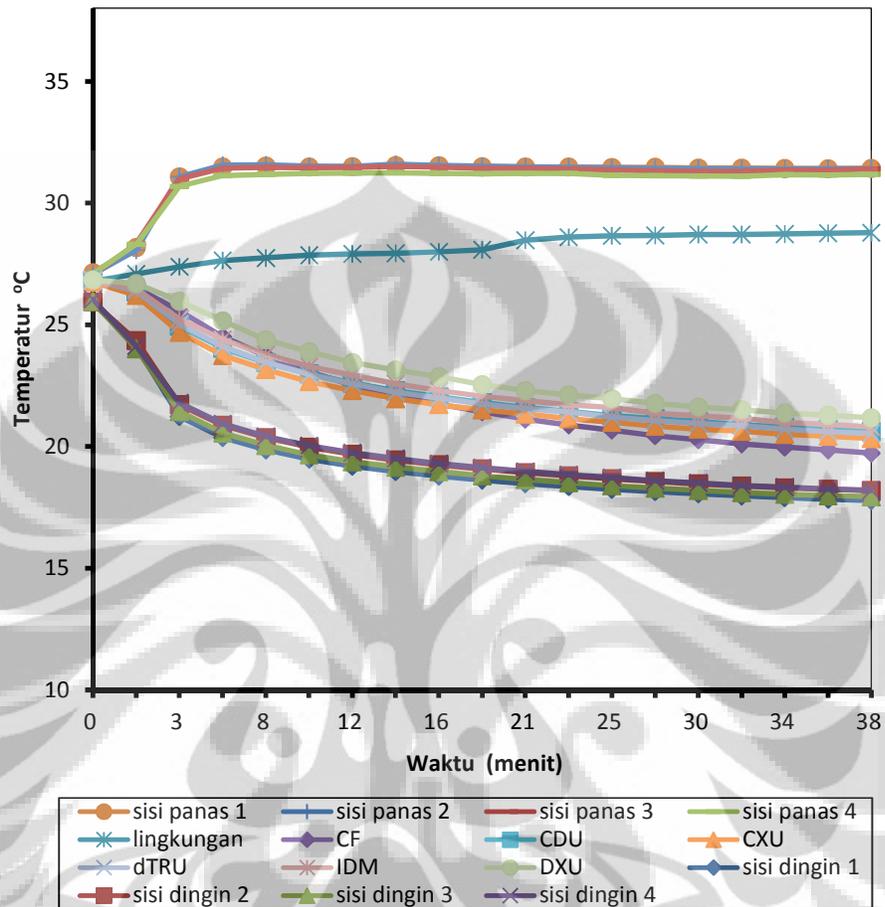
Pengujian juga dilakukan dengan simulasi CFD. Dengan menggunakan simulasi CFD akan didapatkan distribusi temperatur di dalam kabin dalam bentuk tampilan warna sesuai temperatur tiap lokasi, sehingga dapat diperkirakan lokasi mana yang masih panas. Hasil simulasi merupakan hasil perhitungan secara numerik berdasarkan data-data yang telah dimasukkan, sehingga dapat dikatakan bahwa hasil simulasi merupakan hasil teoritis karena tidak terdapat losses pada alat. Pada simulasi, TEC

dianggap sebagai sebuah part dengan sumber panas negatif atau menyerap panas. Besarnya penyerapan kalor TEC sebesar daya input TEC dikalikan efisiensi TEC sebesar 0,5.[28] Berikut ini ditampilkan tabel perbandingan temperatur hasil simulasi CFD dengan hasil eksperimen pada tiap-tiap titik yang diukur.



Gambar 4.1 Simulasi distribusi temperatur TEC 8V tanpa beban panas

Gambar 4.1 menampilkan hasil simulasi CFD untuk pendingin TEC tegangan 8V tanpa beban panas sekaligus tabel perbandingan hasil simulasi dengan hasil eksperimen pada setiap titik pengukuran. Dari gambar 4.1 kita dapat melihat temperatur kabin hasil simulasi menunjukkan nilai pada kisaran 20,19°C hingga 22,81°C. Berarti berdasarkan simulasi terjadi penurunan temperatur kabin sekitar 5°C - 8°C dari temperatur lingkungan. Temperatur kabin bagian atas sedikit lebih tinggi dibanding temperatur kabin bagian bawah. Ini karena pemasangan perangkat pendingin dipusatkan pada bagian dTRU yang letaknya sedikit dibawah. Bila dibandingkan dengan hasil eksperimen terlihat bahwa temperatur rata-rata kabin hasil simulasi sedikit lebih tinggi sekitar 2°C – 2,5°C.



Gambar 4.2 Grafik Distribusi Temperatur Pengujian Tanpa Beban Panas dengan Tegangan TEC 8V dan Tegangan Fan 8V

Gambar 4.2 merupakan hasil eksperimen, kita dapat melihat perubahan temperatur yang terjadi pada proses pendinginan ruangan di dalam kabin kotak RBS tanpa diberi beban panas. Terdapat empat kelompok temperatur, yaitu: temperatur sisi panas TEC, temperatur lingkungan, temperatur kotak-kotak dalam kabin, dan temperatur sisi dingin TEC. Pada pengujian tanpa beban ini, masing-masing kelompok temperatur memiliki perubahan yang seragam. Sedangkan temperatur lingkungan dijaga konstan dikisaran 27°C-28°C.

Dari grafik gambar 4.2 terlihat terjadinya penurunan temperatur sisi dingin yang cukup cepat pada 5 menit awal, kemudian penurunan temperatur terus terjadi semakin

lambat hingga konstan tidak terjadi lagi penurunan yang signifikan pada kisaran waktu 35 menit mencapai temperatur 18°C.

Temperatur keenam kotak alat juga mengalami penurunan hingga mendekati temperatur sisi dingin TEC mencapai kisaran 20°C. Penurunan temperatur kotak alat berlangsung lambat dan seragam. Sedangkan sisi panas TEC mengalami peningkatan temperatur yang cukup cepat pada 6 menit pertama mencapai 32°C. Kemudian temperatur sisi panas sudah terlihat konstan tidak ada perubahan yang signifikan. Dapat dikatakan sisi panas TEC lebih cepat mencapai konstan daripada sisi dingin TEC.

Dari grafik gambar 4.2 terlihat sedikit perbedaan pada temperatur masing-masing kotak alat. Temperatur kotak DXU terlihat paling tinggi dibanding kotak lain disusul kotak IDM, kotak CDU, kotak dTRU, kotak CXU, dan kemudian yang paling rendah adalah kotak CF. Kotak yang berada pada posisi bawah cenderung sedikit lebih tinggi daripada kotak-kotak di posisi atas. Akan tetapi perbedaan temperatur ini juga dipengaruhi oleh letak perangkat pendingin.

4.2 Distribusi Temperatur Pendingin Thermoelektrik dengan Beban Panas 100 Watt

Pengujian selanjutnya dilakukan dengan memberi beban panas sebesar 100 Watt. Untuk perangkat pendingin masih menggunakan pengaturan seperti pada pengujian sebelumnya yaitu dengan tegangan TEC keseluruhan sebesar 8V, tegangan fan luar 12V dan 8V untuk tegangan fan dalam.

Pemanas yang digunakan adalah lampu pijar. Berdasarkan *ASHRAE Handbook*, lampu pijar menghasilkan beban panas sebesar daya atau besar watt yang dimiliki lampu.

$$q_{el} = W \cdot F_{ul} \cdot F_{sa} \quad (4.1)$$

dimana, q_{el} = *heat gain* (Watt)

W = *total light wattage* (Watt)

F_{ul} = *lighting use factor*

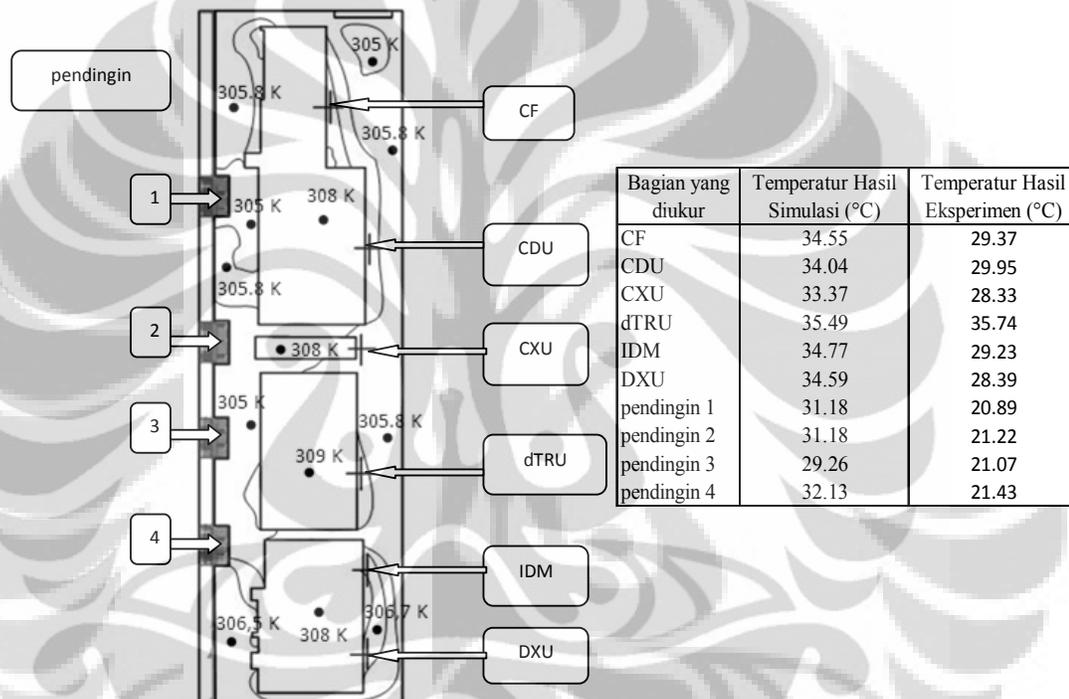
F_{sa} = *lighting special allowance*

Bila lampu terus menyala maka nilai $F_{ul} = 1$, untuk lampu pijar nilai $F_{sa} = 1$.

Variasi daya beban panas dilakukan berdasarkan variasi tegangan lampu seperti ditunjukkan pada tabel 4.1.

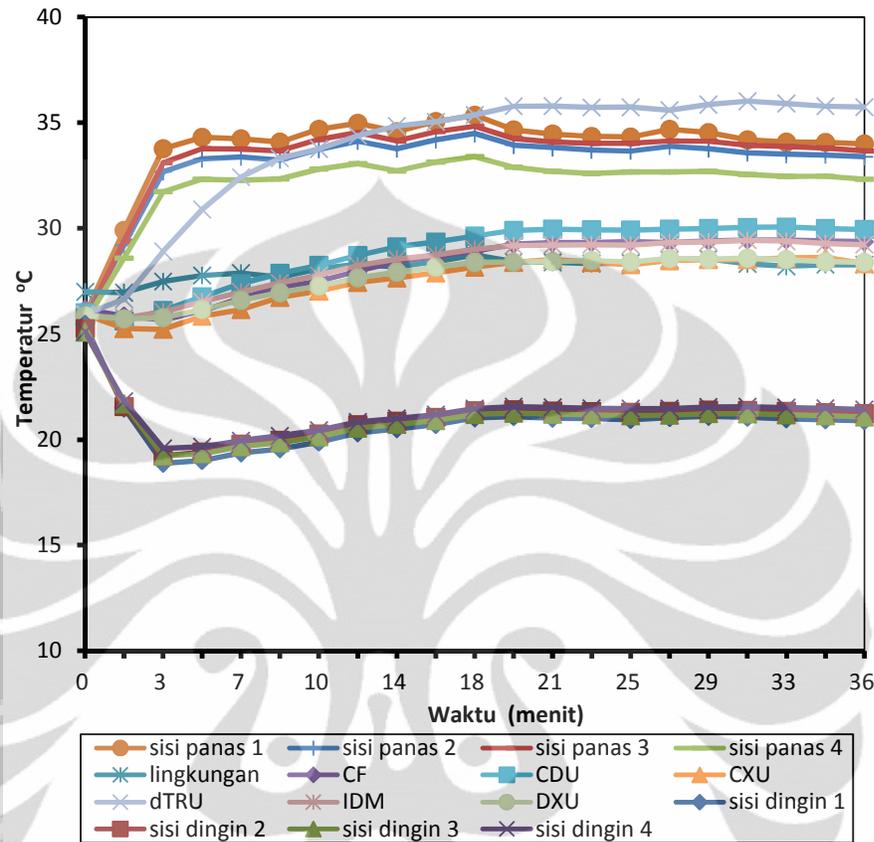
Tabel 4.1 Variasi Tegangan Beban Panas

Voltase (Volt)	Resistansi (Ohm)	Arus (Ampere)	Daya (Watt)
55	29.968	1.835	100.941
110	29.968	3.671	403.764
220	29.968	7.341	1615.056



Gambar 4.3 Simulasi distribusi temperatur TEC 8V dengan tegangan fan 8V untuk beban panas 100 W

Dari gambar 4.3 dapat terlihat peningkatan temperatur pada kotak-kotak alat. Kotak dTRU menghasilkan temperatur tertinggi mencapai 35,49°C. Hasil simulasi menunjukkan temperatur kabin disetiap bagian cukup merata. Ini menunjukkan bahwa peletakan perangkat pendingin cukup baik untuk mendinginkan seluruh bagian kabin. Akan tetapi pada hasil eksperimen temperatur kabin cenderung tidak seragam. Hal ini bisa disebabkan oleh kecepatan sirkulasi udara dalam kabin yang lebih kecil maupun pengaruh udara lingkungan terutama dari bagian bawah kabin.



Gambar 4.4 Grafik Distribusi Temperatur Pengujian dengan Beban Panas 100 Watt dengan Tegangan TEC 8 V dan Tegangan Fan 8 V

Dari grafik 4.4 dapat kita lihat pada 3 menit awal terjadi peningkatan temperatur yang cukup cepat hingga mencapai kisaran 33°C sampai 35°C. Kemudian temperatur cenderung konstan tidak terjadi perubahan yang signifikan. Bila dibandingkan dengan kondisi tanpa beban, temperatur sisi panas pada beban panas 100 Watt ini mengalami peningkatan sekitar 1°C sampai 3°C. Peningkatan temperatur ini menunjukkan terjadinya aliran panas dari kabin ke sisi panas melalui perangkat pendingin. Semakin tinggi temperatur kabin maka semakin tinggi pula temperatur sisi panas.

Temperatur masing-masing sisi panas pada beban 100 Watt menjadi tidak seragam seperti pada kondisi tanpa beban. Temperatur tertinggi terjadi pada sisi panas 1 yaitu perangkat pendingin yang paling atas diikuti sisi panas 3 kemudian sisi panas 2 dan yang terendah yaitu sisi panas 4 yang berada di posisi paling bawah. Sisi panas 1 memiliki temperatur paling tinggi karena perangkat 1 berada di depan kotak CDU yang

menghasilkan panas yang cukup tinggi ditambah lagi oleh gerakan panas dari bawah ke arah atas.

Temperatur tertinggi kedua untuk sisi panas yaitu pada perangkat 3. Sisi panas perangkat 3 memiliki temperatur yang lebih tinggi dari sisi panas 2 karena perangkat 3 berada di depan kotak dTRU yang menghasilkan panas paling besar. Temperatur sisi panas 3 lebih rendah dari sisi panas 1 karena perangkat pendingin 3 tidak mendapat tambahan panas yang besar dari arah bawah, selain itu juga sedikit dipengaruhi oleh panjang kabel fan pendingin yang lebih pendek untuk sisi panas 3.

Sedangkan temperatur kabin untuk masing-masing posisi pada kotak CF hingga kotak DXU juga mengalami ketidakseragaman, tidak seperti kondisi tanpa beban. Kecenderungan temperatur kabin pada masing-masing posisi juga tidak menurun tapi sebaliknya malah sedikit meningkat dari kondisi awal, berada dikisaran 28 sampai 30°C kecuali untuk temperatur posisi kotak dTRU yang mencapai 36°C. Peningkatan temperatur kabin untuk beberapa waktu sebelum konstan menunjukkan bahwa kecepatan pemanasan lebih besar dari kecepatan pendinginan, sehingga sempat terjadi penumpukan sebelum akhirnya panas dapat mengalir ke lingkungan.

Temperatur kabin pada posisi kotak dTRU yaitu di belakang dTRU mencapai 36°C. Hal ini disebabkan besarnya panas yang dihasilkan dTRU. Akan tetapi kondisi ini masih masuk dalam batas aman yaitu dibawah 40°C.

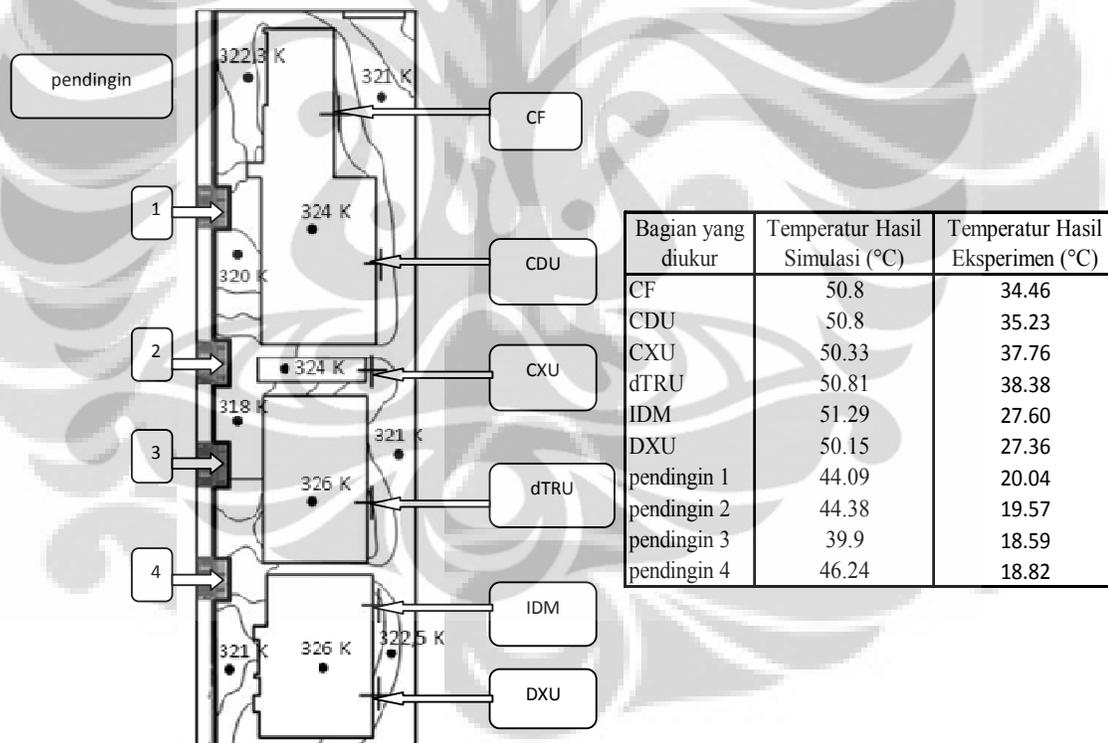
4.3 Variasi Daya Fan Bagian Dalam Dengan Beban Panas 100 Watt

Daya fan divariasikan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap temperatur kabin. Fan yang divariasikan dayanya adalah keempat fan dalam kabin. Daya divariasikan berdasarkan tegangan arus DC. Variasi yang dipilih yaitu tegangan 4 V, 8 V, dan 12 V.

Tabel 4.2 Variasi Tegangan Fan Dalam

Voltase (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Watt)	RPM	Flow Rate (CFM)
4	0.26	1.04	427	10
8	0.65	5.20	830	35
12	1.10	13.20	2275	90

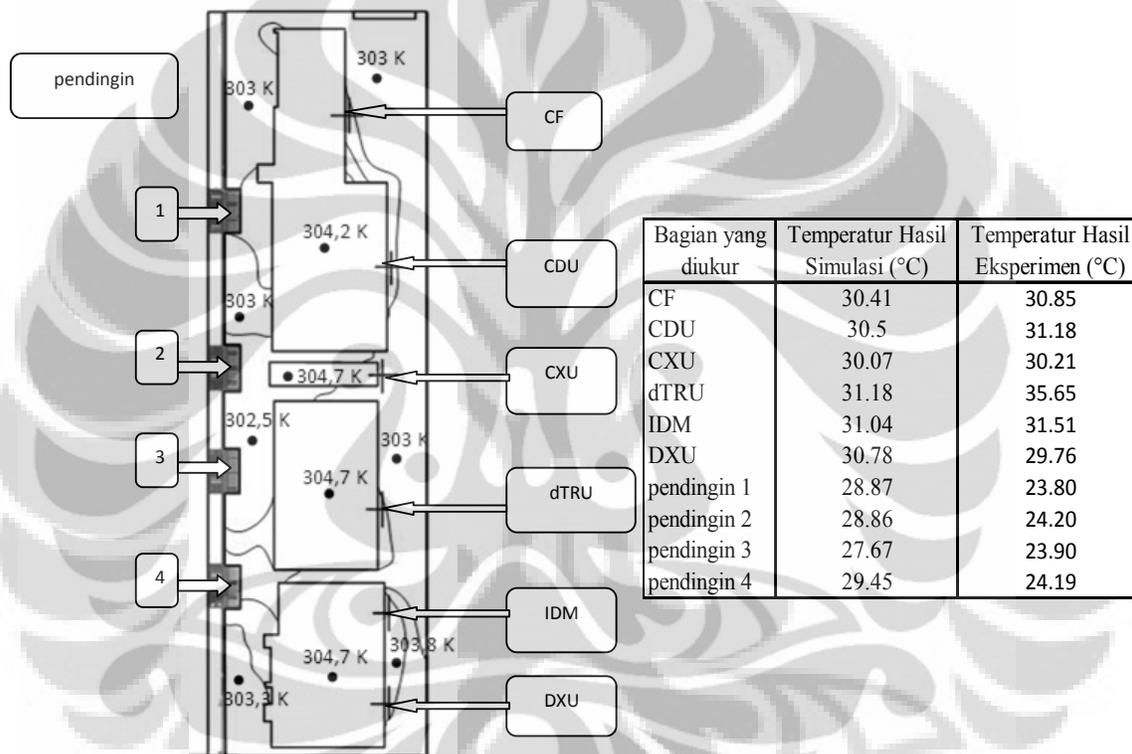
Dengan variasi ini dapat terlihat perbedaan yang cukup besar pada putaran fan. Perbedaan ini memberikan efek berupa perbedaan temperatur kabin yang cukup signifikan. Berikut ini adalah grafik untuk variasi daya fan dalam pada beban panas 100 Watt.



Gambar 4.5 Simulasi distribusi temperatur TEC 8V dengan tegangan fan 4V untuk beban panas 100 W

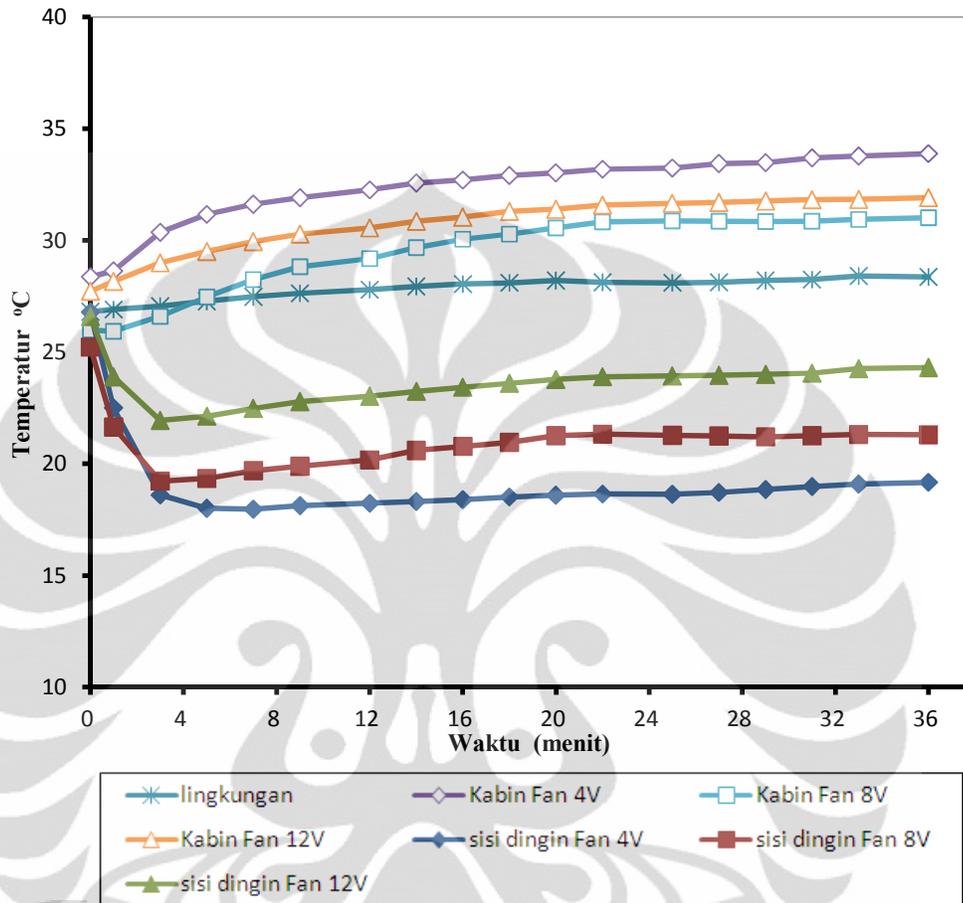
Dari gambar 4.5 terlihat bahwa temperatur udara kabin dari hasil simulasi mencapai 50,15°C hingga 51,29°C. Ini menunjukkan bahwa temperatur kabin meningkat hingga 15,8°C bila dibanding dengan temperatur kabin hasil simulasi bila

menggunakan tegangan fan dalam 8V (gambar 4.3). Dari gambar 4.5 terlihat bahwa temperatur kabin hasil simulasi terpaut jauh dengan temperatur kabin hasil eksperimen. Hal ini bisa disebabkan oleh pengaruh udara lingkungan. Pada eksperimen kemungkinan kebocoran akan semakin besar bila perbedaan temperatur kabin dengan temperatur lingkungan semakin besar. Sedangkan pada simulasi tidak terdapat kebocoran, sehingga panas dalam kabin terkungkung dan tertumpuk di dalam kabin.



Gambar 4.6 Simulasi distribusi temperatur TEC 8V dengan tegangan fan 12V untuk beban panas 100 W

Dari gambar 4.6 terlihat bahwa temperatur kabin hasil simulasi mencapai 30,41 °C hingga 31,18 °C, mengalami penurunan hingga 4,31 °C bila dibandingkan dengan hasil simulasi pada tegangan fan dalam 8V (gambar 4.3)



Gambar 4.7 Grafik Temperatur dengan Variasi Daya Fan Dalam pada Beban Panas 100 Watt dan Tegangan TEC 8 V

Sisi panas untuk masing-masing variasi hanya sedikit berbeda. Tetapi temperatur sisi panas untuk tegangan fan 12 V cenderung paling tinggi diikuti sisi panas tegangan fan 8 V dan yang paling rendah adalah sisi panas tegangan fan 4 V. Hal ini menunjukkan bahwa aliran panas paling besar terjadi pada perangkat pendingin dengan tegangan fan dalam 12 V.

Untuk temperatur sisi dingin dapat kita lihat bahwa temperatur sisi dingin paling rendah yaitu pada variasi tegangan fan dalam 4 V, diikuti tegangan fan 8 V, dan yang paling tinggi yaitu temperatur sisi dingin pada variasi tegangan fan dalam 12 V. Hal ini menunjukkan bahwa aliran panas dari kabin ke sisi dingin paling besar terjadi pada variasi tegangan fan 12 V. Semakin besar putaran fan, semakin besar debit udara,

semakin banyak kalor yang dibawa dan dihantarkan dari kabin ke sisi dingin perangkat pendingin.

Untuk temperatur kabin dapat kita lihat bahwa temperatur kabin paling tinggi adalah pada variasi tegangan fan 4 V, diikuti tegangan fan 12 V, dan temperatur kabin yang paling rendah yaitu pada variasi tegangan fan 8 V. Hal ini menunjukkan bahwa variasi tegangan fan 8 V paling efektif untuk mencapai temperatur kabin yang rendah secara umum untuk beban panas 100 Watt. Akan tetapi hal ini berlaku untuk temperatur rata-rata kabin, karena pada data aktualnya temperatur kabin khusus pada posisi kotak dTRU untuk variasi tegangan fan dalam 8 V mencapai maksimal 36°C, meskipun temperatur ini masih berada pada batas aman operasional. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun aliran panas dari kabin ke lingkungan pada variasi tegangan fan 8 V lebih kecil dari tegangan fan 12 V, temperatur rata-rata kabin bisa lebih rendah karena panas dari kotak dTRU tidak menyebar ke bagian-bagian lain.

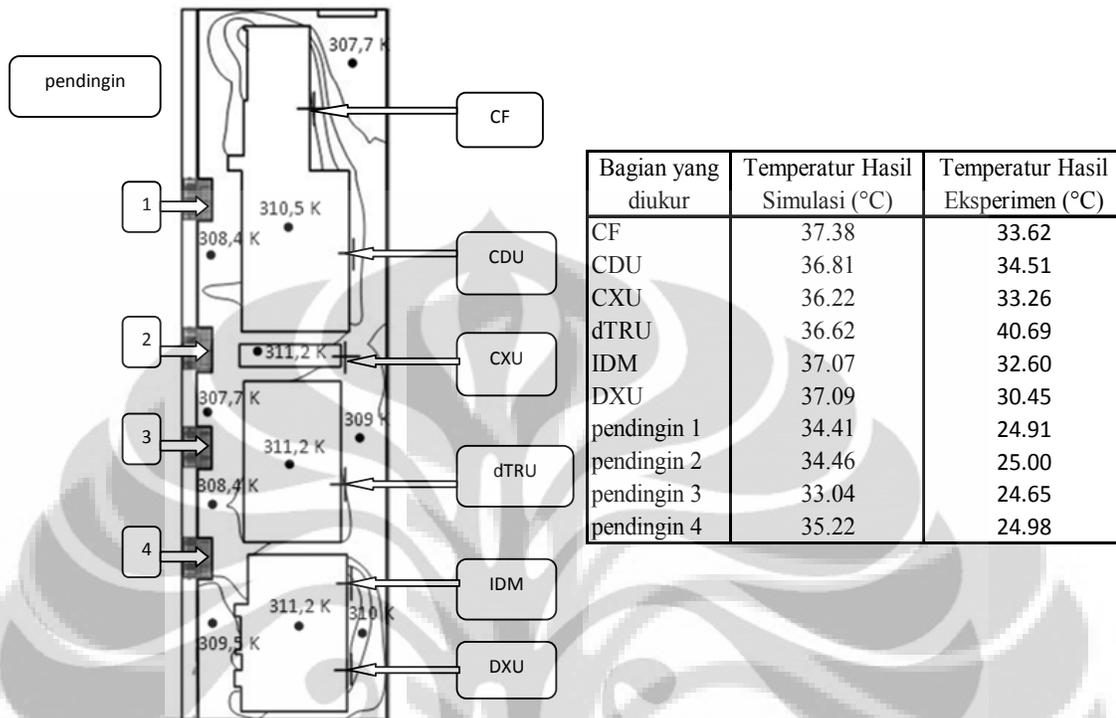
4.4 Variasi Daya TEC Dengan Beban Panas 100 Watt

Pada beban panas 100 Watt dilakukan variasi daya TEC dengan memvariasikan tegangan pada powersupply. Variasi tegangan TEC yang diambil yaitu 12 V, 16 V, dan 20 V. Variasi tegangan ini adalah tegangan untuk sepasang TEC yang dipasang seri, sehingga untuk sebuah TEC maka variasi tegangannya menjadi 6V, 8V, dan 10V.

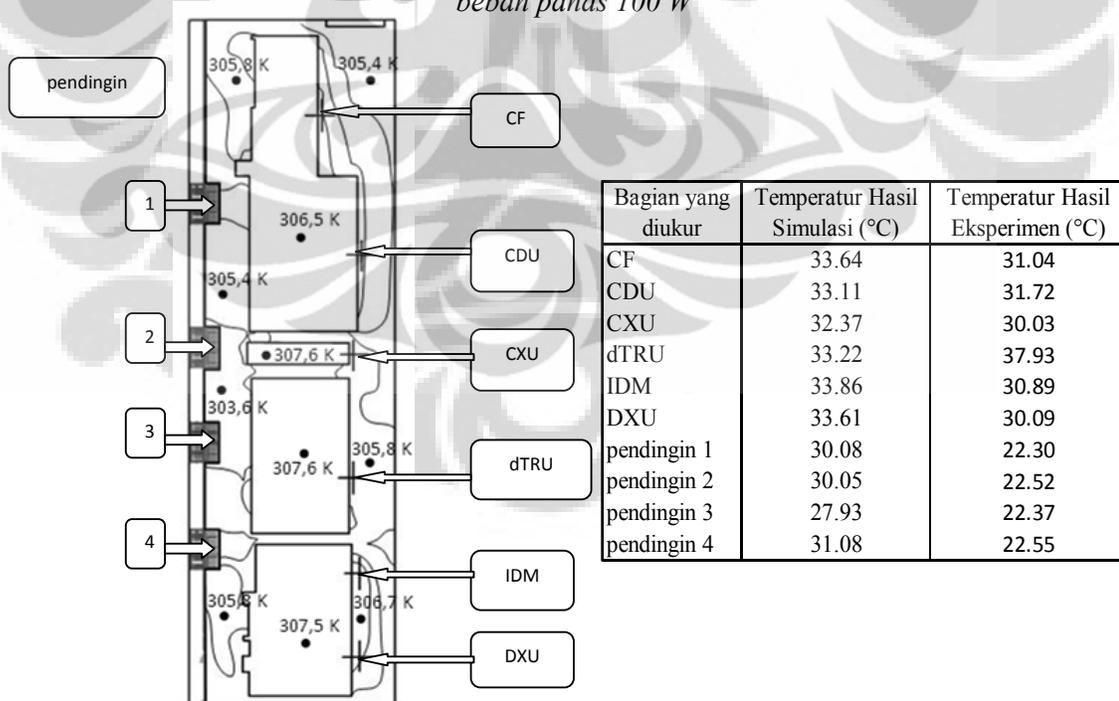
Tabel 4.3 Variasi Tegangan TEC

Voltase (Volt)	Arus Perangkat Atas (A)	Arus Perangkat Bawah (A)	Daya (Watt)
12	8.6	7.8	196.8
16	11.8	10.5	356.8
20	14.6	12.6	544.0

Dengan tegangan yang semakin besar diharapkan pendinginan oleh TEC akan semakin besar pula. Karena semakin besar tegangan maka akan semakin besar arus yang dialirkan pada alat dengan besar hambatan yang tetap. Akan tetapi semakin besar tegangan maka daya yang dibutuhkan juga akan semakin besar sehingga efisiensi akan berkurang.



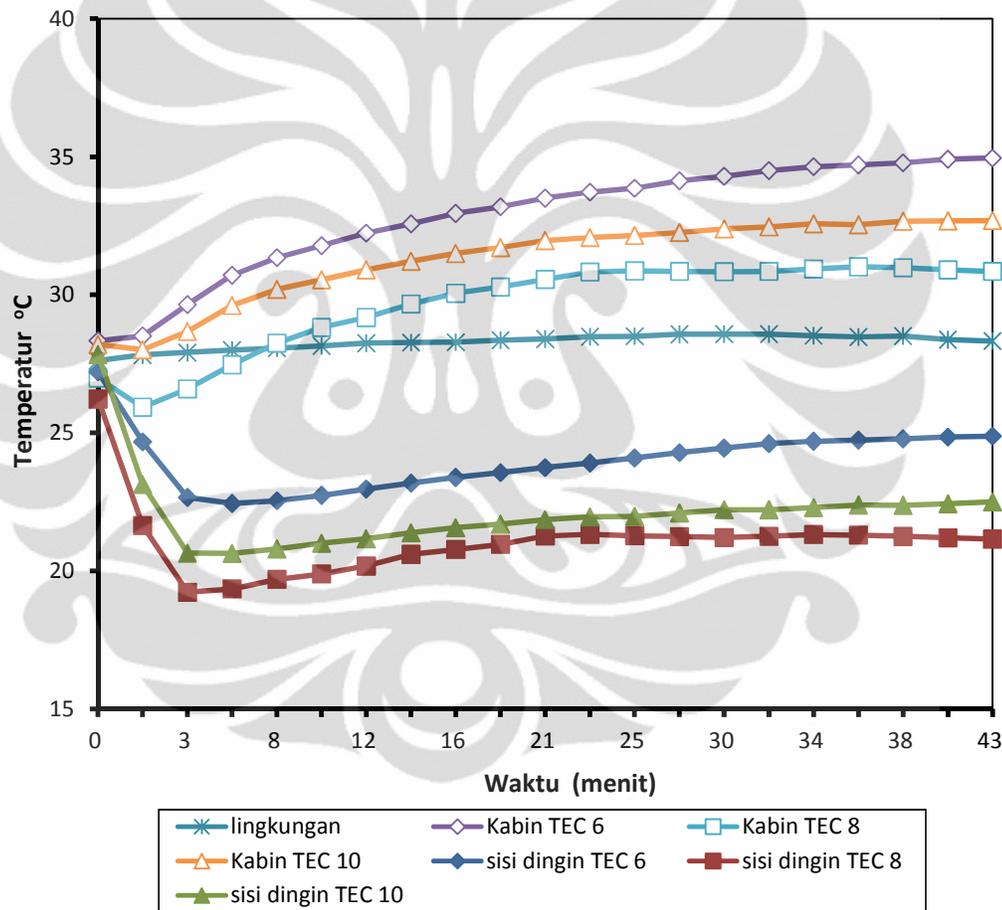
Gambar 4.8 Simulasi distribusi temperatur TEC 6V dengan tegangan fan 8V untuk beban panas 100 W



Gambar 4.9 Simulasi distribusi temperatur TEC 10V dengan tegangan fan 8V untuk beban panas 100 W

Dari gambar 4.8 terlihat bahwa temperatur udara kabin dari hasil simulasi mencapai $36,22^{\circ}\text{C}$ hingga $37,38^{\circ}\text{C}$. Ini menunjukkan bahwa temperatur kabin meningkat hingga $1,89^{\circ}\text{C}$ bila dibanding dengan temperatur kabin hasil simulasi bila menggunakan tegangan fan dalam 8V (gambar 4.3).

Dari gambar 4.9 terlihat bahwa temperatur kabin hasil simulasi mencapai $32,37^{\circ}\text{C}$ hingga $33,86^{\circ}\text{C}$, mengalami penurunan hingga $1,63^{\circ}\text{C}$ bila dibandingkan dengan hasil simulasi pada tegangan fan dalam 8V (gambar 4.3)



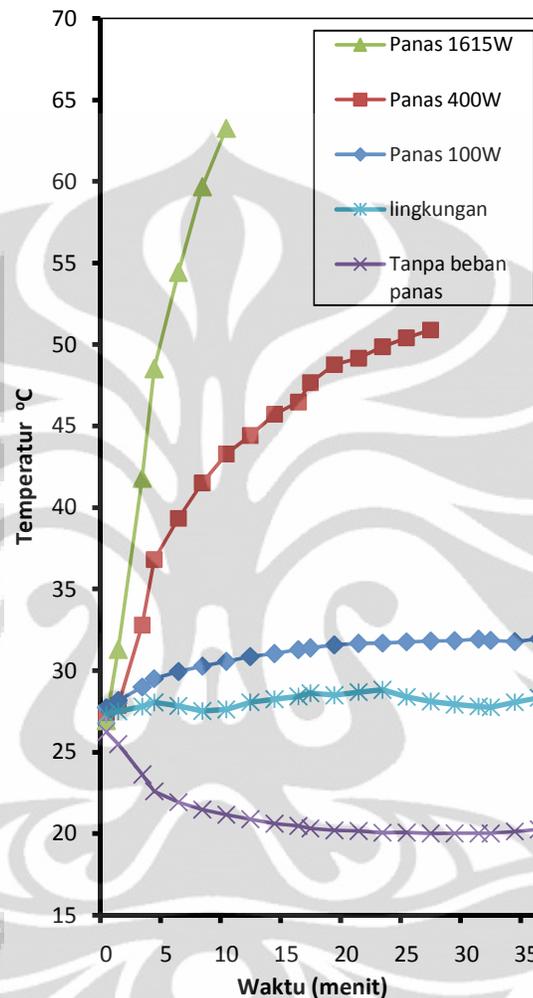
Gambar 4.10 Grafik Temperatur dengan Variasi Daya TEC Dalam pada Beban Panas 100 Watt dan Tegangan fan dalam 8 V

Temperatur sisi panas TEC tertinggi yaitu pada tegangan 10 V yang mencapai 36°C hingga 37°C , diikuti temperatur sisi panas TEC 8 V yang mencapai 33°C hingga 34°C , dan yang paling rendah yaitu temperatur sisi panas TEC 6 V pada kisaran 33°C . Hal ini menunjukkan terjadinya penumpukan kalor pada sisi panas TEC 10 V . Semakin

besar tegangan TEC semakin besar arus pada TEC semakin besar kalor yang dialirkan TEC dari sisi dingin ke sisi panas. Akan tetapi TEC sendiri merupakan sebuah alat yang memiliki efisiensi, sehingga tidak semua daya listrik yang diberikan digunakan untuk mengangkut kalor. Sebagian daya yang diberikan ke TEC dirubah menjadi panas tambahan pada sisi panas. Bila pendinginan pada sisi panas kurang memadai maka akan terjadi penumpukan panas pada sisi panas.

Dari gambar 4.10 terlihat bahwa temperatur kabin paling rendah yaitu pada tegangan TEC 8 V yang mencapai 30°C, diikuti oleh temperatur kabin tegangan TEC 10V yang mencapai 31°C hingga 32°C, dan yang paling panas yaitu temperatur kabin tegangan TEC 6V yang mencapai kisaran 34°C. Hal ini menunjukkan bahwa pendinginan paling besar terjadi pada tegangan TEC 8 V. Idealnya tegangan TEC 10 V memiliki pendinginan yang lebih besar, akan tetapi penumpukan kalor pada sisi panas menyebabkan TEC 10 V tidak bisa mengalirkan panas dengan baik. Sedangkan TEC 6V memiliki pendinginan yang paling rendah karena semakin kecil arus listrik TEC maka semakin kecil kalor yang diangkut dari sisi dingin ke sisi panas.

4.5 Variasi Beban Panas dengan Pendingin TEC 8 V



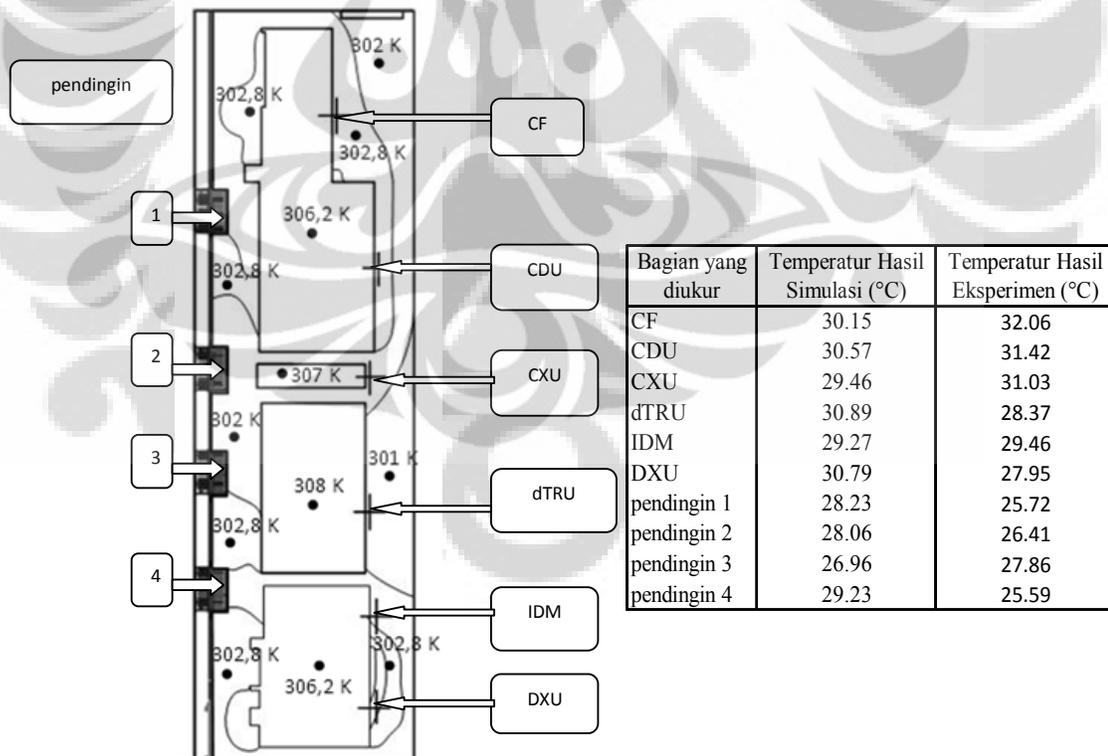
Gambar 4.11 Grafik Temperatur Rata-Rata Kabin Terhadap Waktu dengan Pendingin TEC 8V Pada Variasi Beban Panas

Dari grafik 4.11 dapat dilihat bahwa dengan pendingin TEC 8V dapat mendinginkan kabin hingga 20°C pada kondisi tanpa beban, dapat menjaga temperatur kabin hingga 32°C pada beban panas 100W. Akan tetapi pada beban panas 400W dan 1615W pendingin TEC 8V sudah tidak mampu menjaga temperatur kabin dibawah 45°C, hal ini berarti sudah melampaui batas fungsi yang aman. Oleh karena itu, diperlukan kombinasi dengan pendingin tambahan berupa ventilasi dan *exhaust fan* untuk beban panas tinggi agar RBS dapat bekerja pada kondisi normal yaitu pada temperatur dibawah 40°C.

4.6 Temperatur Pendinginan Lemari RBS untuk Beban Panas 400 Watt dengan Pemasangan Exhaust Fan

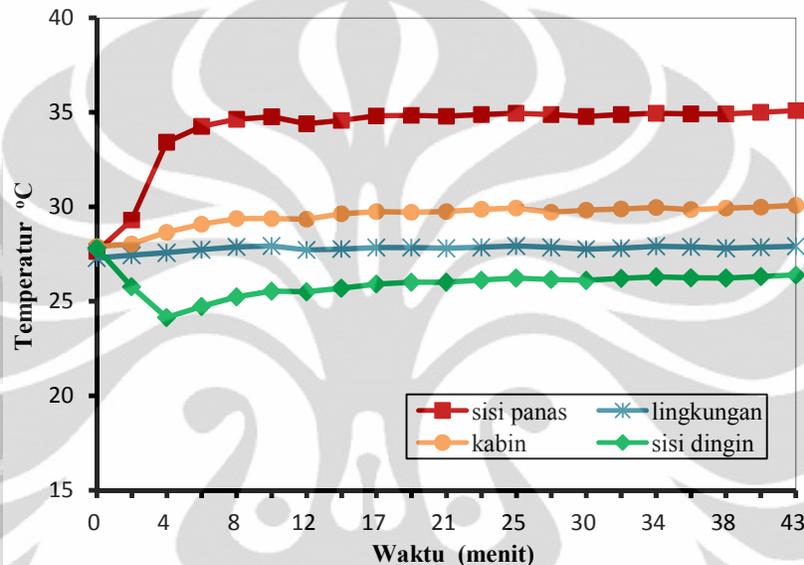
Untuk mengatasi beban panas yang cukup besar yaitu 400 W maka pendingin TEC dikombinasikan dengan exhaust fan. Akan tetapi untuk meminimalkan pendinginan TEC terbuang ke lingkungan maka penempatan exhaust fan diletakkan pada bagian belakang sedangkan perangkat pendingin TEC diletakkan di bagian depan kotak-kotak simulasi alat. Pada pengujian berikut digunakan tegangan TEC 8 V dan tegangan fan 12 V untuk fan luar dan fan dalam.

Penggunaan perangkat TEC kurang efektif pada beban panas yang cukup tinggi, terutama bila sisi panas TEC tidak dapat didinginkan dengan maksimal. Oleh karena itu, untuk mengatasinya diperlukan pendinginan langsung dengan udara lingkungan. Akan tetapi penggunaan udara lingkungan sebagai pendingin secara langsung perlu diminimalkan karena udara lingkungan banyak mengandung debu yang bisa menumpuk bila digunakan secara terus menerus 24 jam non-stop dengan debit yang besar.



Gambar 4.12 Simulasi Distribusi Temperatur dengan Variasi Penggunaan Exhaust fan pada Beban Panas 400 Watt dan Tegangan TEC 8 V

Dari gambar 4.12 terlihat bahwa temperatur udara kabin dari hasil simulasi mencapai 29,27°C hingga 30,89°C. Ini menunjukkan bahwa temperatur kabin cukup dingin sehingga masih memungkinkan untuk mengurangi penggunaan udara lingkungan untuk menjaga kebersihan alat. Bila dibandingkan dengan hasil eksperimen perbedaannya tidak terlalu besar.



Gambar 4.13 Grafik Temperatur dengan Variasi Penggunaan Exhaust fan pada Beban Panas 400 Watt dan Tegangan TEC 8 V

Dari grafik 4.13 diatas terlihat bahwa temperatur rata-rata sisi panas perangkat pendingin mencapai 35°C. Temperatur rata-rata kabin mencapai 30°C. Temperatur rata-rata sisi dingin mencapai 25°C-26°C. Hal ini menunjukkan bahwa temperatur kabin sudah memadai untuk temperatur kerja alat yaitu dibawah 40°C.

Besarnya kalor yang dibawa oleh udara keluar kabin dapat diperkirakan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 Q &= m \cdot C_p \cdot dT \\
 &= 2,45 \text{ (m}^3\text{/min)} \cdot 1/60 \cdot 1.007 \text{ (J/kg.K)} \cdot (30,05-28) \text{ (K)} \\
 &= 309,65 \text{ W}
 \end{aligned}$$

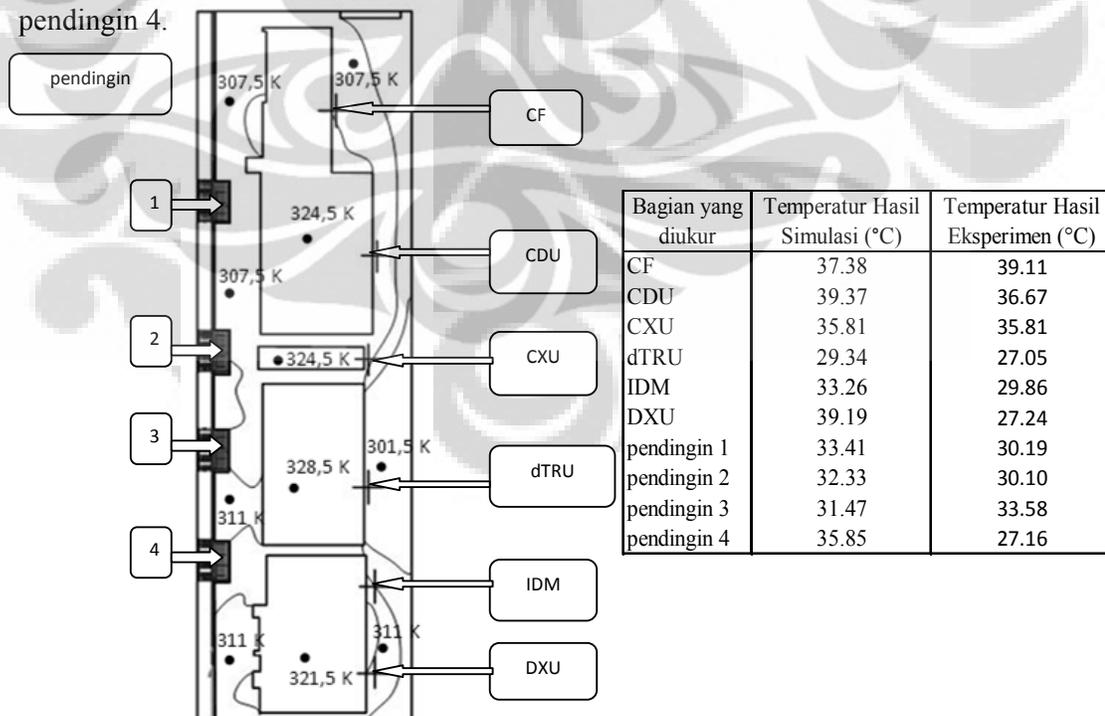
Dari grafik 4.13 diatas terlihat bahwa temperatur sisi dingin masih cukup jauh dibawah temperatur kabin selisihnya sekitar 4°C-5°C. Hal ini menunjukkan bahwa perpindahan kalor antara heatsink sisi dingin TEC dengan udara kabin masih kurang optimal. Bila perpindahan kalor antara sisi dingin dengan udara kabin bisa dimaksimalkan maka temperatur udara kabin kemungkinan bisa lebih rendah lagi.

Begitu pula untuk temperatur sisi panas TEC masih cukup jauh diatas temperatur lingkungan selisihnya sekitar 7°C . Hal ini menunjukkan bahwa perpindahan kalor antara heatsink sisi panas TEC dengan udara lingkungan masih belum optimal. Semakin dingin sisi panas TEC maka akan semakin dingin sisi dingin TEC, karena semua panas dialirkan dan dibuang dengan lancar ke lingkungan. Tidak terdapat panas yang berbalik ke sisi dingin.

4.7 Temperatur Pendinginan Lemari RBS untuk Beban Panas 1615 Watt Dengan Pemasangan *Exhaust Fan*

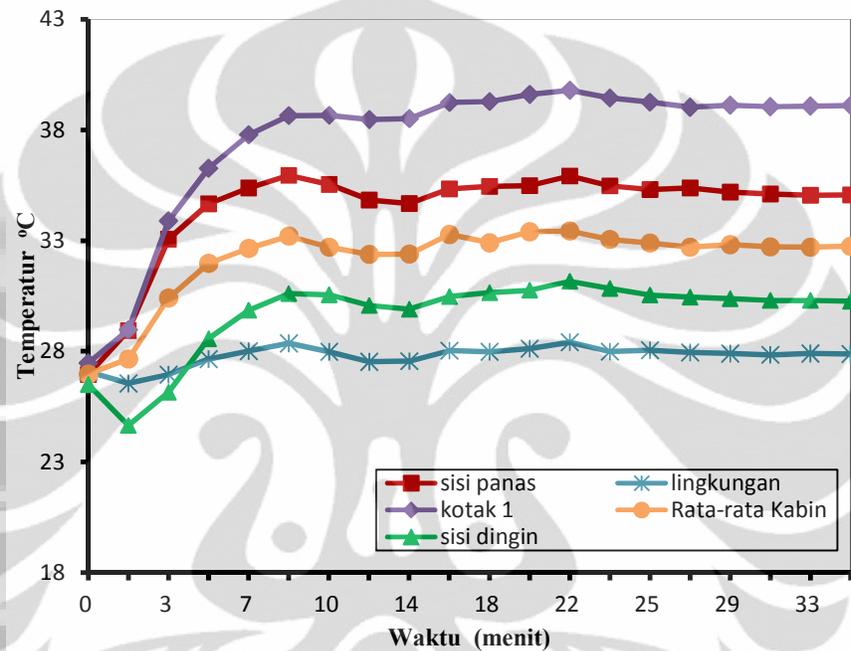
Pengujian dilakukan dengan beban panas 1615 W, pendingin TEC diberi tegangan 8 V sedangkan fan luar dan fan dalam diberi tegangan sebesar 6 V. Untuk mengatasi beban panas yang besar diberikan tambahan pendinginan *exhaust fan* dengan ventilasi dibagian belakang lemari RBS sebagai sisi input udara luar.

Dari gambar 4.14 terlihat bahwa temperatur udara kabin dari hasil simulasi mencapai $29,34^{\circ}\text{C}$ hingga $39,37^{\circ}\text{C}$. Ini menunjukkan bahwa temperatur kabin masih memenuhi syarat temperatur kerja normal RBS. Bila dibandingkan dengan hasil eksperimen, hasil simulasi perbedaannya tidak terlalu besar kecuali pada titik DXU dan pendingin 4.



Gambar 4.14 Simulasi Distribusi Temperatur dengan Variasi Penggunaan *Exhaust fan* pada Beban Panas 1615 Watt dan Tegangan TEC 8 V

Berikut ini ditampilkan grafik data hasil pengujian dengan temperatur udara tepat dibelakang CF terpisah dari temperatur kabin rata-rata untuk menunjukkan temperatur kabin maksimum.



Gambar 4.15 Grafik Temperatur Pendinginan Lemari RBS untuk Beban Panas 1615 Watt Dengan Pemasangan Exhaust Fan

Dari grafik 4.15 diatas terlihat bahwa pada beban panas maksimum yaitu 1615 W temperatur kabin rata-rata maupun temperatur kabin maksimum, temperatur udara dibelakang kotak 1 (CF), masih berada pada batas temperatur kerja yang aman yaitu di bawah 40°C. Hal ini menunjukkan bahwa dengan pendinginan TEC 8 V yang dikombinasikan dengan *exhaust fan* sudah mampu mengatasi beban panas maksimum. Besarnya panas yang dibuang melalui *exhaust fan* dapat diperkirakan sebagai berikut:

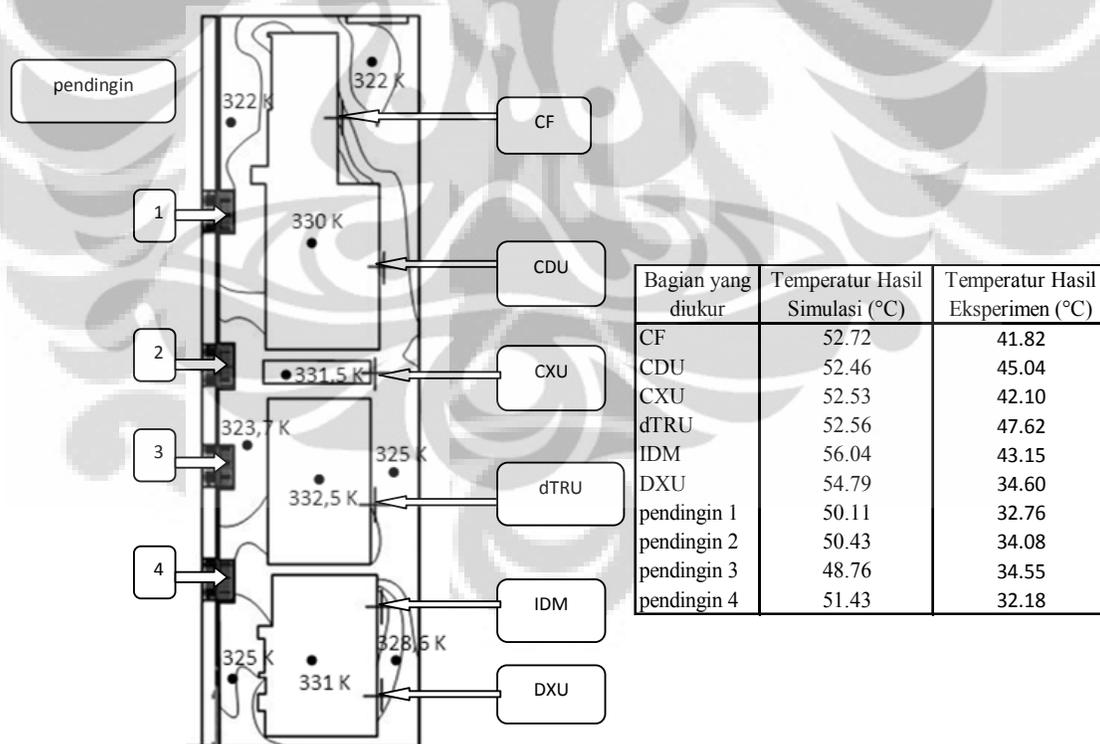
$$\begin{aligned}
 Q &= m \cdot C_p \cdot dT \\
 &= 2.45 \text{ (m}^3\text{/min)} \cdot 1/60 \cdot 1.007 \text{ (J/kg.K)} \cdot (32,62-28) \text{ (K)} \\
 &= 697,85 \text{ W}
 \end{aligned}$$

Dari grafik 4.15 ditunjukkan temperatur kabin maksimum yaitu pada posisi dibelakang kotak CF, padahal kotak CF memiliki beban panas yang kecil yaitu 20 W. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan *exhaust fan* menyebabkan panas kabin

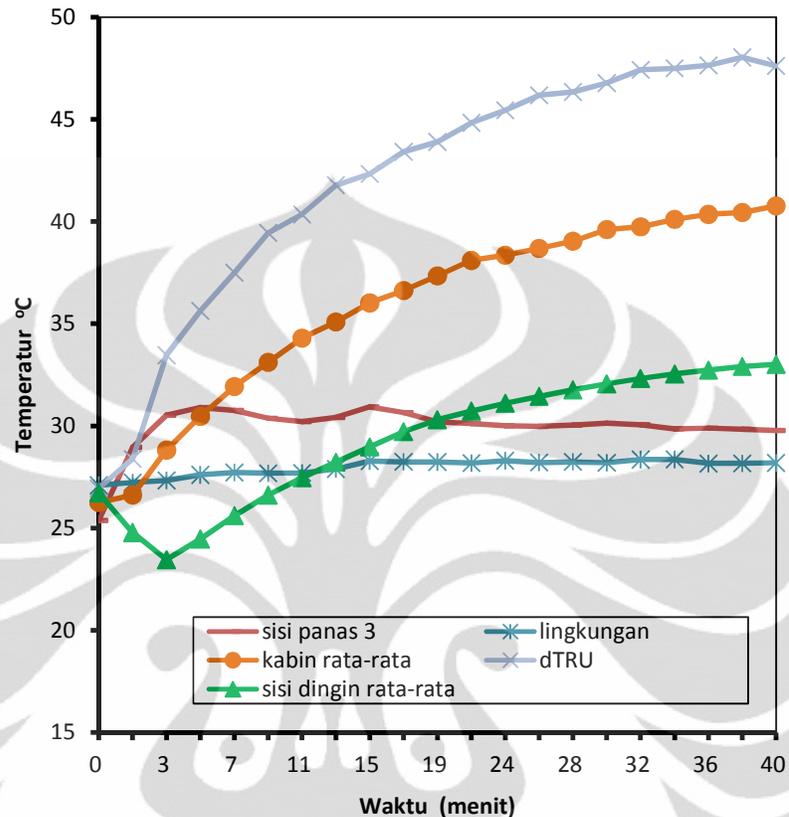
menumpuk pada bagian atas lemari RBS. Ini dikarenakan udara yang dihisap oleh exhaust fan membawa panas dari semua kotak dan terkumpul menjadi satu di bagian atas lemari RBS sebelum terbuang ke lingkungan.

4.8 Temperatur Pendinginan Lemari RBS untuk Beban Panas 400 Watt dengan Pemasangan *Heat pipe*

Pengujian dilakukan dengan beban panas 400 W, tegangan untuk semua TEC sebesar 8 V sehingga daya total TEC sebesar 356,8 W. Tegangan fan luar, fan dalam, dan fan *heat pipe* sebesar 12 V. *Heat pipe* dipasang untuk mendinginkan sisi panas TEC pada perangkat pendingin 3 yaitu perangkat pendingin yang berada di depan kotak simulasi dTRU. Karena kotak dTRU merupakan kotak dengan beban panas paling besar. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.16. Perbedaan dengan hasil eksperimen cukup besar bisa disebabkan oleh masukan efisiensi *heatpipe* yang kecil.



Gambar 4.16 Simulasi Distribusi Temperatur dengan Variasi Penggunaan *heatpipe* pada Beban Panas 400 Watt dan Tegangan TEC 8 V



Gambar 4.17 Grafik Temperatur Pendinginan Lemari RBS untuk Beban Panas 400 Watt dengan Pemasangan Heat pipe

Pada gambar 4.17 ditampilkan temperatur kotak 4 yaitu temperatur udara tepat dibelakang simulasi kotak dTRU. dTRU merupakan kotak dengan beban panas paling besar. Dari gambar 4.17 terlihat bahwa temperatur kotak 4 mencapai 47°C-48°C. Hal ini menunjukkan bahwa temperatur kabin masih belum masuk pada batas aman temperatur kerja. Akan tetapi bila dibanding dengan menggunakan heatsink pada sisi panas, penggunaan *heat pipe* dapat menurunkan panas dTRU hingga sekitar 22°C. Sedangkan untuk temperatur rata-rata kotak selain dTRU mencapai 40°C-41°C. Sehingga dapat dikatakan temperatur kotak selain dTRU hampir mencapai batas aman.

Sisi panas pada perangkat 1, 2, dan 4 mencapai 35°C. Sedangkan temperatur sisi panas pada perangkat pendingin 3 mencapai kisaran 29°C. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan *heat pipe* cukup efektif untuk mendinginkan sisi panas TEC bila dibanding dengan penggunaan heatsink biasa. Penggunaan *heat pipe* mampu menurunkan selisih

antara temperatur sisi panas TEC dengan temperatur udara lingkungan, yang berarti perpindahan kalor dari sisi panas TEC ke lingkungan dapat berlangsung dengan cukup baik atau dengan kata lain hambatan thermalnya cukup rendah.

Dari gambar 4.17 terlihat bahwa temperatur sisi dingin rata-rata mencapai 33°C-34°C. Temperatur ini berada di bawah temperatur sisi panas rata-rata perangkat pendingin 1, 2, 4, dan berada diatas temperatur sisi panas perangkat pendingin 3. Hal ini menunjukkan bahwa pada perangkat pendingin 1, 2, dan 4 kalor yang diterima oleh sisi dingin akan dialirkan ke sisi panas dengan proses pompa panas oleh TEC. Sedangkan pada perangkat pendingin 3, kalor yang diterima oleh sisi dingin akan dialirkan ke sisi panas melalui proses pompa panas oleh TEC dan secara konduksi melalui materi TEC.

4.9 Temperatur Pendinginan Lemari RBS untuk Beban Panas 400 Watt Dengan Pemasangan *Heat pipe* dan Tegangan TEC 12 V

Pengujian dilakukan pada beban panas 400 W, tegangan fan dalam dan fan luar disetting pada angka 12 V. *Heat pipe* dipasang untuk mendinginkan sisi panas perangkat pendingin 3, yaitu perangkat pendingin yang menghadap kotak simulasi dTRU. Sedangkan untuk sisi panas perangkat pendingin yang lain digunakan heatsink. Tegangan TEC yang didinginkan menggunakan *heat pipe* dinaikkan menjadi 12 V, sedangkan tegangan TEC lainnya masih tetap 8 V. Dengan pemasangan *heat pipe* sisi panas dapat didinginkan hampir mendekati temperatur lingkungan, sehingga dengan menaikkan tegangan TEC diharapkan laju kalor lebih tinggi tanpa terjadi penumpukan kalor pada sisi panas. Berikut adalah tabel daya TEC dan fan pada penggunaan *heatpipe*.

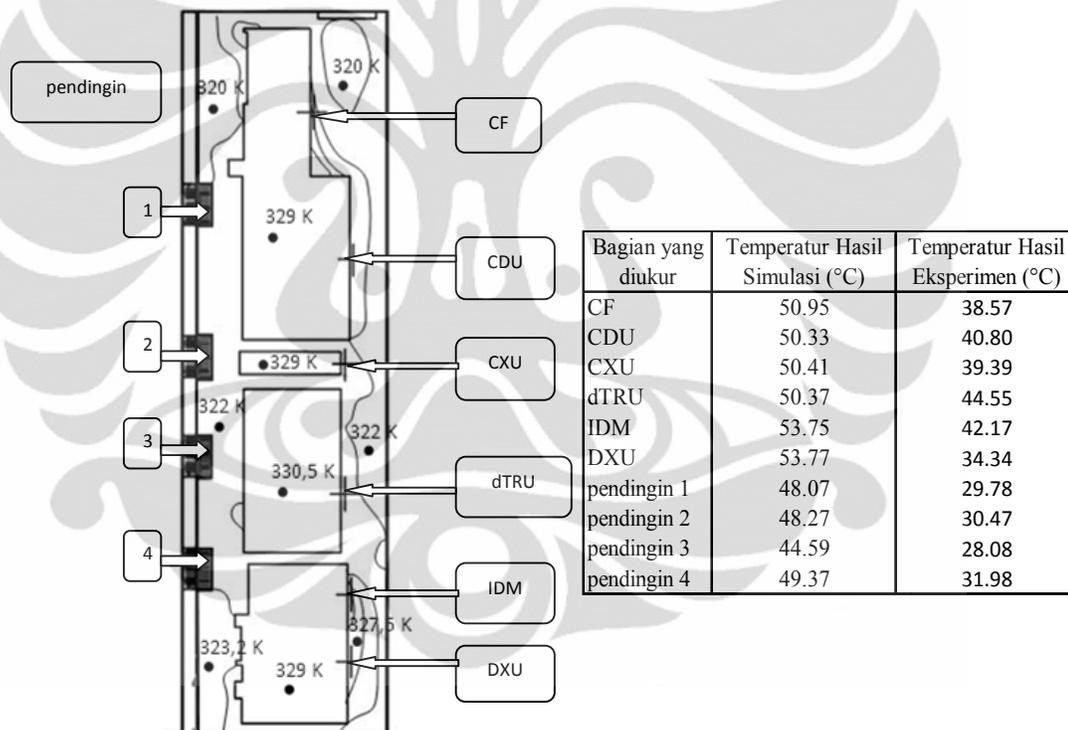
Tabel 4.4 Perbandingan Daya TEC 8 V dengan TEC 12 V

Voltase TEC dg Heatsink (V)	Voltase TEC dg <i>Heat pipe</i> (V)	Arus TEC dg Heatsink (A)	Arus TEC dg <i>Heat pipe</i> (A)	Daya (Watt)
16	16	16	6.2	355.2
16	24	16	9	472

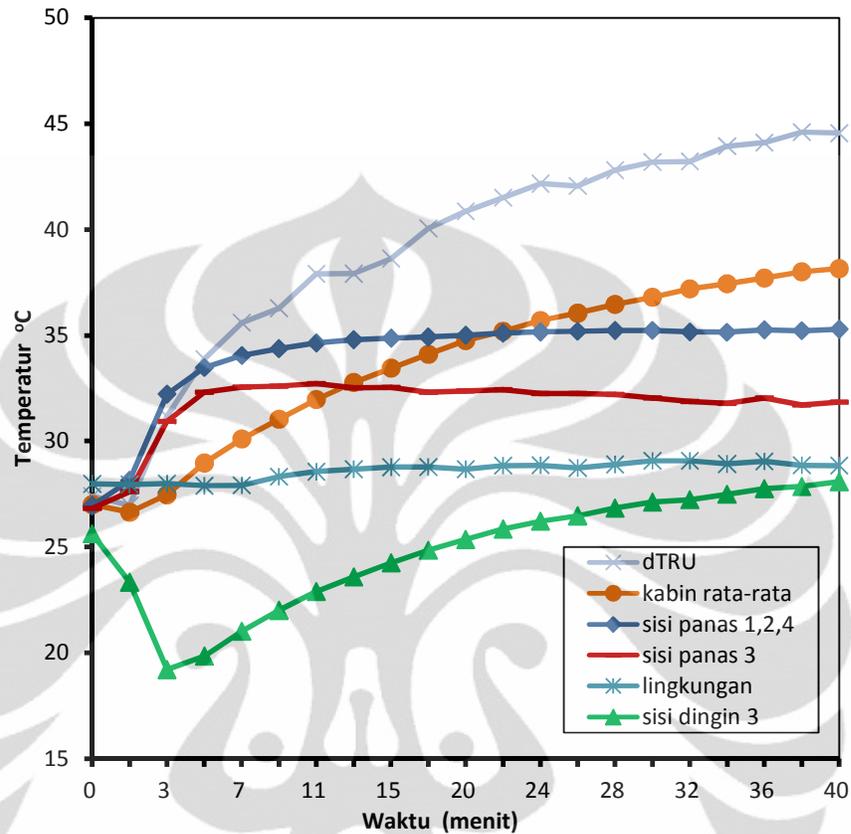
Tabel 4.5 Perbandingan Daya Fan Luar Dengan dan Tanpa *Heat pipe*

Variasi	Voltase (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Watt)
Tanpa <i>Heat pipe</i>	12	2.86	34.32
Dengan <i>heat pipe</i>	12	3.15	37.74

Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.18. Perbedaannya dengan hasil eksperimen cukup besar. Hal ini bisa disebabkan masukan efisiensi *heatpipe* yang kecil. Dibandingkan penggunaan *heatpipe* dengan TEC 8V, dengan TEC 12V dapat menurunkan temperatur kabin hingga selisih 2,29°C.



Gambar 4.18 Simulasi Distribusi Temperatur dengan Variasi Penggunaan *Heatpipe* pada Beban Panas 400 Watt dan Tegangan TEC 12 V



Gambar 4.19 Grafik Temperatur Pendinginan Lemari RBS untuk Beban Panas 400 Watt dengan Pemasangan Heat pipe dan Tegangan TEC 12 V

Dari gambar 4.19 kita dapat melihat bahwa temperatur kotak 4, temperatur udara tepat dibelakang kotak simulasi dTRU, mencapai 44°C-45°C. Temperatur ini masih melebihi batas temperatur kerja yang aman yaitu dibawah 40°C, akan tetapi terjadi penurunan yang cukup besar bila dibanding dengan tanpa penggunaan *heat pipe* sebesar 24°C-25°C. Peningkatan tegangan TEC menjadi 12 V ini menghasilkan temperatur kotak 4 yang lebih rendah bila dibanding TEC 8 V, besar penurunan temperaturnya sekitar 2°C-3°C.

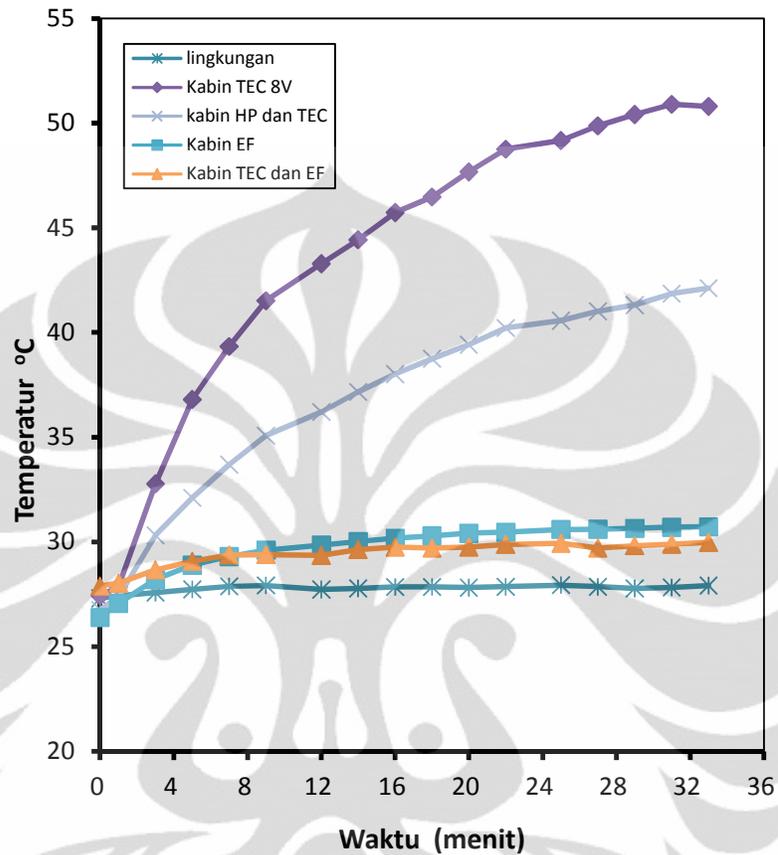
Sedangkan rata-rata temperatur kabin, yaitu untuk rata-rata temperatur kotak selain kotak 4, mencapai 38°C. Temperatur ini sudah masuk dalam batas aman temperatur kerja karena dibawah 40°C. Terlihat terjadi penurunan jika dibandingkan dengan tegangan TEC 8 V, yaitu sebesar 2°C-3°C. Ini menunjukkan bahwa pendinginan kotak 4 berpengaruh cukup signifikan terhadap temperatur kotak yang lain.

Dari gambar 4.19 kita dapat melihat bahwa temperatur sisi panas TEC menggunakan heatsink mencapai 34°C, terjadi sedikit penurunan bila dibandingkan dengan TEC 8 V. Hal ini dipengaruhi oleh penurunan temperatur kabin. Sedangkan untuk temperatur sisi panas TEC tegangan 12 V menggunakan *heat pipe* mencapai 32°C, lebih tinggi 3°C dibanding temperatur sisi panas TEC 8 V menggunakan *heat pipe*, tetapi masih lebih rendah 5°C jika dibanding temperatur sisi panas TEC 10 V menggunakan heatsink. Hal ini menunjukkan bahwa *heat pipe* cukup efektif mendinginkan sisi panas TEC tegangan 12 V, sehingga kemampuan pendinginannya masih lebih tinggi jika dibanding TEC tegangan 8 V.

Dari gambar 4.19 terlihat bahwa temperatur sisi dingin mencapai 30°C. Temperatur ini berada dibawah temperatur semua sisi panas termasuk sisi panas perangkat 3. Hal ini berbeda dengan kondisi pada subbab 4.19. Ini menunjukkan bahwa aliran kalor pada perangkat 3 dari sisi dingin ke sisi panas cukup lancar sehingga tidak terjadi penumpukan kalor pada sisi dingin.

4.10 Variasi Penggunaan TEC, *Exhaust Fan*, dan *Heat pipe* Untuk Beban Panas 400 Watt

Dari beberapa pengujian sebelumnya dibuat sebuah grafik perbandingan rata-rata temperatur kabin dengan beban panas 400 W. Perbandingan yaitu pada sistem pendingin. Sistem pendingin yang diperbandingkan yaitu pendingin TEC, kombinasi TEC dan *heat pipe*, exhaust fan tanpa TEC, serta kombinasi TEC dan *exhaust fan*.



Gambar 4.20 Grafik Temperatur Perbandingan Kombinasi Pendinginan pada Beban Panas 400 Watt

Dari gambar 4.20 diatas terlihat bahwa temperatur rata-rata kabin tanpa EF mencapai 50°C, temperatur kabin TEC dan HP mencapai 41°C, temperatur kabin tanpa TEC mencapai 30°C, dan temperatur kabin TEC dan EF mencapai 29°C. Hal ini menunjukkan bahwa pendinginan paling besar yaitu menggunakan kombinasi pendingin TEC dan EF. Pendingin TEC tanpa EF menghasilkan temperatur kabin yang melebihi batas aman, pendingin TEC yang dilengkapi *heat pipe* menghasilkan temperatur kabin yang sedikit diatas batas aman, pendingin *exhaust fan* tanpa dilengkapi TEC menghasilkan temperatur kabin yang cukup aman akan tetapi bergantung sepenuhnya pada masukan udara luar ke dalam kabin yang dapat menimbulkan penumpukan debu.

4.11 Nilai COP Optimal dan Aktual pada Beberapa Variasi Daya TEC

4.11.1 Perhitungan COP Aktual

Nilai COP merupakan perbandingan dari jumlah kalor yang dipindahkan system ke lingkungan, dibagi dengan jumlah daya masukan yang digunakan untuk menjalankan system. Secara matematis COP disajikan dalam persamaan berikut :

$$COP = \frac{Q_L}{W} \dots\dots\dots (4.2)$$

Dengan : Q_L = Beban pendinginan

W = Daya masukan yang digunakan

Untuk melakukan perhitungan nilai COP aktual diperlukan perhitungan nilai beban pendinginan dari setiap benda yang terdapat di dalam kabin lemari RBS. Berikut ini contoh perhitungan beban pendinginan pada perhitungan nilai COP aktual untuk kondisi pengujian sistem termoelektrik dengan daya 356,8 watt (TEC 8V) pada temperatur lingkungan 28°C :

- Udara
 $T_{awal} = 27,99^\circ\text{C} = 300,99 \text{ K}$
 $T_{akhir} = 26,10^\circ\text{C} = 299,10 \text{ K}$
 $m \cdot C_p \cdot \Delta T = 0,501 \text{ kg} \cdot 1.007 \text{ J/kg} \cdot 1,89 \text{ K} = 5702,28 \text{ Joule}$
- Aluminium
 $T_{awal} = 28,16^\circ\text{C} = 301,16 \text{ K}$
 $T_{akhir} = 24,74^\circ\text{C} = 297,74 \text{ K}$
 $m \cdot C_p \cdot \Delta T = 3,003 \text{ kg} \cdot 903 \text{ J/kg} \cdot 3,42 \text{ K} = 1547,63 \text{ Joule}$
- Kayu
 $T_{awal} = 28,76^\circ\text{C} = 301,76 \text{ K}$
 $T_{akhir} = 25,83^\circ\text{C} = 298,83 \text{ K}$
 $m \cdot C_p \cdot \Delta T = 2,616 \text{ kg} \cdot 1255 \text{ J/kg} \cdot 2,94 \text{ K} = 9637,25 \text{ Joule}$

Jumlah beban pendinginan total = 16887,2 Joule

Durasi pengujian = 238 detik

Beban pendinginan = $16887,2/238 = 70,85 \text{ Watt}$

Perhitungan nilai Q loss dari sistem :

$$Q_{\text{loss}} = K \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$A = 3,84 \text{ m}^2$$

$$\Delta T = (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) = 1,3 \text{ K}$$

$$K_{\text{sterofoam}} = 0,029 \text{ W/m.K}$$

$$\Delta x = 0,03 \text{ m}$$

$$Q = 0,029 \text{ W/m.K} \cdot 3,84 \text{ m}^2 \cdot 6 \text{ K} \cdot \frac{1,3 \text{ W/m.K}}{0,03 \text{ m}} = 4,83 \text{ Watt}$$

$$\text{Beban pendinginan total} = 4,83 + 70,85 = 75,67 \text{ Watt}$$

$$\text{Nilai COP} = 75,67 / 356,8 = 0,212$$

4.11.2 Perhitungan Nilai COP Optimal

Pada system pendingin termoelektrik, persamaan yang digunakan untuk mencari nilai COP optimal modul adalah sebagai berikut :

$$COP(opt) = \left(\frac{T_c}{T_h - T_c} \right) \left[\frac{\sqrt{1 + Z \cdot T_m} - \frac{T_h}{T_c}}{\sqrt{1 + Z \cdot T_m} + 1} \right] \dots \dots \dots (4.3)$$

Dengan :

T_h = Temperatur sisi panas termoelektrik (Kelvin)

$$= 31,86 \text{ }^\circ\text{C} = 304,86 \text{ K}$$

T_c = Temperatur sisi dingin termoelektrik (Kelvin)

$$= 19,87 \text{ }^\circ\text{C} = 292,87 \text{ K}$$

ΔT = $T_h - T_c$ (Kelvin)

$$= 11,99 \text{ K}$$

T_m = $\frac{1}{2} (T_h + T_c)$ (Kelvin)

$$= 25,87 \text{ }^{\circ}\text{C} = 298,87 \text{ K}$$

Z = Figure of merit (Kelvin⁻¹)

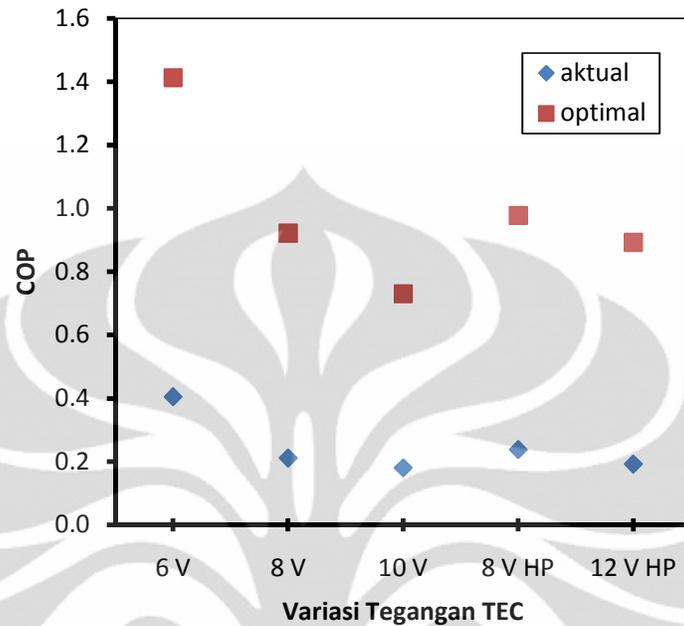
$$= 0,00087 \text{ K}^{-1}$$

Sehingga didapatkan:

$$\begin{aligned} \text{COP}(\text{opt}) &= \left(\frac{292,87}{11,99} \right) \left[\frac{\sqrt{1+0,00087 \cdot 298,87} - \frac{304,86}{292,87}}{\sqrt{1+0,00087 \cdot 298,87} + 1} \right] \\ &= (24,43) \left[\frac{1,12 - 1,04}{1,12 + 1} \right] \\ &= (24,43) \left[\frac{0,08}{2,12} \right] = 0,922 \end{aligned}$$

Tabel 4.6 Nilai COP Aktual dan Optimal

COP	aktual	optimal
6 V	0.406	1.413
8 V	0.212	0.922
10 V	0.181	0.731
8 V HP	0.239	0.978
12 V HP	0.193	0.893



Gambar 4.21 Grafik Nilai COP Aktual dan Optimal pada Variasi Tegangan TEC

Dari gambar 4.21 diatas terlihat bahwa nilai COP aktual tertinggi yaitu pada tegangan TEC 6 V, diikuti COP tegangan TEC 8 V yang dilengkapi *heat pipe*, yang ketiga COP tegangan TEC 8 V tanpa *heat pipe*, yang keempat COP tegangan TEC 12 V yang dilengkapi *heat pipe*, dan yang terendah adalah nilai COP tegangan TEC 10 V tanpa dilengkapi *heat pipe*. Tegangan TEC 6 V menghasilkan COP paling tinggi karena membutuhkan daya listrik yang paling kecil, akan tetapi daya pendinginan TEC 6 V masih yang terendah dibanding daya pendinginan variasi lainnya. Tegangan TEC 8 V yang dilengkapi *heat pipe* menghasilkan COP aktual yang lebih tinggi dari TEC 8 V tanpa *heat pipe*, ini dikarenakan peningkatan daya pendinginan karena penggunaan *heat pipe* yang mampu menambah laju aliran kalor pada sisi panas TEC.[45] Tegangan TEC 12 V yang dilengkapi *heat pipe* menghasilkan daya pendinginan yang paling besar dibandingkan dengan variasi yang lainnya, akan tetapi karena kebutuhan daya listriknya cukup besar sehingga nilai COP aktualnya menjadi rendah. Tegangan TEC 10 V membutuhkan daya listrik paling besar akan tetapi daya pendinginan yang dihasilkan tidak terlalu besar sehingga COP aktualnya paling rendah dibanding variasi yang lainnya.

4.12 Perbandingan Secara Ekonomi dengan Pendingin AC Konvensional

Berikut ini akan dibahas mengenai perhitungan ekonomi yang membandingkan antara penggunaan pendingin thermoelektrik dengan penggunaan pendingin konvensional yaitu dengan AC (*Air Conditioner*). Perbandingan yang dihitung yaitu untuk penggunaan tiga buah kotak RBS dalam sebuah shelter BTS dengan kapasitas pendinginan yang sama. Perbandingan meliputi biaya investasi, biaya operasional, dan biaya perawatan.

4.12.1 Biaya investasi

1. Biaya investasi pendingin thermoelektrik

Untuk pendingin tiga buah RBS maka dibutuhkan 12 buah perangkat pendingin thermoelektrik dan 6 buah *Exhaust Fan*.

- Harga 1 buah perangkat pendingin (6 modul) = Rp. 480.000,-
- Harga 1 buah perangkat pendingin (4 modul) = Rp. 410.000,-
- Harga 1 buah *Exhaust Fan* = Rp. 160.000,-
- Biaya pemasangan untuk 1 buah RBS = Rp. 50.000,-
- Total biaya untuk tiga buah kotak RBS = $(9 \times 480.000) + (3 \times 410.000) + (6 \times 160.000) + (3 \times 50.000) = \mathbf{Rp. 6.660.000,-}$

2. Biaya investasi pendingin AC konvensional

Untuk pendingin tiga buah RBS maka dibutuhkan AC konvensional dengan kapasitas 2 kW.

- Harga 1 buah AC split kapasitas 2 kW = Rp. 5.100.000,-
- Biaya pemasangan = Rp. 200.000,-
- Total biaya untuk AC kapasitas 2 kW = **Rp. 5.300.000,-**

4.12.2 Biaya operasional

Biaya operasional dihitung secara harian 24 jam berdasarkan jumlah energi listrik yang dibutuhkan untuk pendinginan. Kemudian total energi listrik ini dikalikan dengan tarif listrik tiap jamnya.

1. Biaya operasional pendingin thermoelektrik

- Jumlah daya listrik total pendingin untuk 1 kotak RBS = 454 Watt
- Jumlah energi pendingin total untuk 3 RBS dalam 1 hari = $(3 \times 454) / 1000 \times 24 = 32,688 \text{ kWh}$

- Total biaya listrik pendingin termoelektrik tiap 1 hari = $32,688 \times 700$
= **Rp. 22.881,60**

2. Biaya operasional pendingin AC konvensional

- Jumlah daya listrik total pendingin untuk 3 kotak RBS = 2.000 Watt
- Jumlah energi pendingin total untuk 3 RBS dalam 1 hari = $2.000 / 1000 \times 24$
= 48 kWh
- Total biaya listrik pendingin termoelektrik tiap 1 hari = 48×700
= **Rp. 33.600,-**

4.12.3 Biaya perawatan

Perawatan yang diperhitungkan disini adalah penggantian spare part dan perkiraan biaya servis untuk jangka waktu 3 tahun.

1. Perawatan pendingin thermoelektrik

Dalam jangka waktu 3 tahun komponen thermoelektrik pada umumnya belum mengalami kerusakan karena modul thermoelektrik yang baik memiliki umur pakai hingga 100.000 jam atau sekitar 11 tahun.

2. Perawatan pendingin AC konvensional

Dalam jangka waktu 3 tahun komponen AC konvensional pada umumnya belum mengalami kerusakan. Akan tetapi kemungkinan mengalami penurunan pendinginan karena berkurangnya refrigeran, sehingga dibutuhkan biaya pengisian refrigeran yang berkisar Rp. 165.000,-

4.12.4 Analisa Perbandingan Secara Ekonomi

Tabel 4.7 Perbandingan Secara Ekonomi

Jenis Pendingin	Biaya Investasi	Daya listrik	Biaya Operasional	Biaya Operasi/Tahun	Perkiraan Biaya Perawatan dalam 3 thn
* Termoelektrik dan Exhaust fan	Rp. 6.660.000,-	1362 Watt	Rp. 22.881,60	Rp. 8.351.784,-	-
* AC Konvensional	Rp. 5.300.000,-	2.000 Watt	Rp. 33.600,-	Rp. 12.264.000,-	Rp. 165.000,-

Dari tabel 4.7 diatas dapat kita lihat perbandingan penggunaan pendingin termoelektrik yang dikombinasikan *exhaust fan* dengan penggunaan pendingin AC konvensional ditinjau dari segi ekonomi. Untuk biaya investasi pendingin termoelektrik terlihat lebih mahal sekitar 1,3 juta rupiah. Akan tetapi dalam satu tahun operasional,

pendingin termoelektrik telah menghemat sekitar 2,6 juta rupiah bila dibandingkan dengan pendingin AC konvensional. Pendingin termoelektrik lebih mahal dalam biaya investasi atau pengadaan awal, akan tetapi lebih murah dalam biaya operasional karena pendingin termoelektrik mendinginkan bagian yang perlu pendinginan saja.

Pendingin termoelektrik hampir tidak membutuhkan biaya untuk perawatan ringan. Karena modul termoelektrik memiliki umur pakai yang panjang untuk pemakaian normal. Selain itu pendingin termoelektrik tidak memerlukan fluida kerja, sehingga bebas perawatan pengisian ulang fluida kerja. Berbeda dengan sistem pendingin AC konvensional yang masih membutuhkan fluida kerja yang masih memungkinkan terjadinya kebocoran akibat tekanan fluida, getaran, dan korosi.

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisa yang telah dilakukan sebelumnya dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem pendingin RBS yang telah dirancang telah mampu menjaga temperatur kabin pada temperatur kerja normal dibawah 40°C untuk beban panas maksimal 1615W yaitu $39,11^{\circ}\text{C}$, dengan kebutuhan daya pendingin sebesar 454W.
2. Pendingin TEC mampu mengurangi ketergantungan penggunaan udara lingkungan untuk pendinginan terutama pada beban panas rendah yaitu 100 W dan 400 W. Pada beban panas 400 W, pendingin TEC mampu menjaga temperatur kabin pada $44,55^{\circ}\text{C}$ dengan penggunaan *heat pipe*.
3. Semakin besar daya TEC semakin besar panas yang dipindahkan ke sisi panas. Akan tetapi pada tegangan TEC 10 V terjadi penumpukan kalor pada sisi panas yang disebabkan aliran kalor dari sisi panas ke lingkungan yang tidak mencukupi. Akibatnya terjadi aliran balik kalor dari sisi panas ke sisi dingin, sehingga menyebabkan temperatur sisi dingin TEC 10 V lebih tinggi dibanding temperatur sisi dingin TEC 8 V sekitar $1,78^{\circ}\text{C}$.
4. Daya fan dalam yang besar menghasilkan aliran udara yang besar didalam kabin. Semakin besar aliran udara semakin besar kalor yang dipindahkan dari kabin menuju sisi dingin. Akan tetapi pada beban panas yang rendah yaitu 100 W, aliran udara yang besar mengakibatkan panas dari dTRU menyebar sehingga temperatur rata-rata kabin untuk tegangan fan dalam 12V lebih besar dari temperatur kabin dengan tegangan fan dalam 8V sekitar $0,93^{\circ}\text{C}$.
5. Nilai COP aktual tertinggi untuk penggunaan TEC terjadi pada tegangan TEC 6V yang mencapai 0,406. Nilai COP aktual terendah terjadi pada tegangan TEC 10V yang mencapai 0,181. Sedangkan untuk daya pendinginan terbesar terjadi pada tegangan TEC 12V dengan penggunaan *heatpipe* yang mencapai 91,06 Watt.

5.2 Saran

Dari hasil pengujian dan analisa yang telah dilakukan terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Perlunya diteliti lebih lanjut mengenai pengaruh temperatur lingkungan yang tinggi untuk mengetahui kinerja sistem pendingin terutama *exhaust fan* yang menggunakan udara lingkungan.
2. Perlunya dipertimbangkan kembali penggunaan isolator pada dinding luar RBS untuk mendekati kondisi aktual di lapangan, sekaligus untuk mengetahui pengaruh pendinginan lingkungan melalui dinding.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Jeffrey Snyder, Marco Soto, Randy Alley, David Koester, Bob Conner. *Hot Spot Cooling using Embedded Thermoelectric Coolers*. 22nd IEEE Semi-Therm Symposium, 0-7803-XXXX-X/06.
- [2] Nasruddin, Imam Syafi'I, Dani Arsanto, Sarwono dan Yan Turyana. *Penelitian Perbandingan Unjuk Kerja Tiga Refrigeran Hidrokarbon Indonesia Terhadap Refrigeran R12 (CFC-12)*. Jurnal Teknologi, Edisi No.4 Tahun XX, Desember 2006, 241-251 ISSN 0215-1685.
- [3] S.B. Riffat, Guoquan Qiu. *Comparative Investigation Of Thermoelectric Air-Conditioners Versus Vapour Compression And Absorption Air-Conditioners*. Applied Thermal Engineering 24 (2004) 1979–1993.
- [4] Charoenporn Lertsatitthanakorn, Lamul Wiset, and Surat Atthajariyaku. *Evaluation of the Thermal Comfort of a Thermoelectric Ceiling Cooling Panel (TE-CCP) System*. Journal of Electronic Materials, Vol. 38, No. 7, 2009 Special Issue Paper, DOI: 10.1007/s11664-008-0637-7.
- [5] <http://tyomultimedia.blogspot.com/2009/01/bts-base-transceiver-station.html>, didownload tanggal 25 Oktober 2010.
- [6] <http://tata50.wordpress.com/2008/08/23/mengenal-jaringan-gsm-bagian-1/>, didownload tanggal 25 Oktober 2010.
- [7] http://readone_88.erc-unand.com/?id=67, didownload tanggal 25 Oktober 2010.
- [8] Nanqiang Zhu, Daniel Plaza, and Craig R. Maitz. *Thermal Design of Base Transceiver Station using Macroflow*. Lucent Technology, Inc., 450 Clark Drive, Mt. Olive, NJ 07828.
- [9] <http://www.detikinet.com/read/2010/03/25/074657/1324849/328/12-ribu-bts-xl-diklaim-ramah-lingkungan>, didownload tanggal 25 Oktober 2010.
- [10] Ericsson GSM System: RBS 2101, RBS 2102 RBS 2103, RBS 2202, BSS R7 Reference Manual.

- [11] Michael K Patterson. *The Effect of Data Center Temperature on Energy Efficiency*. Intel Corporation, 2111 NE 25th Avenue Hillsboro, Oregon, USA, 97124, IEEE, 978-1-4244-1701-8/08.
- [12] <http://www.kuliselular.com/2009/10/energi-efisien-pendinginbts.html>, didownload tanggal 25 Oktober 2010.
- [13] <http://www.ozon-indonesia.org/index.php?table=arsip&view=true&no=21>, didownload tanggal 16 November 2010.
- [14] <http://www.ozon-indonesia.org/index.php?table=lbozon&view=true&no=1>, didownload tanggal 16 November 2010.
- [15] <http://www.customthermoelectric.com/History.html>, didownload tanggal 2 Desember 2010.
- [16] Hendi Riyanto, Sigit Yoewono. *Kaji Penerapan Efek Peltier Untuk Alat Kecil-Ringan Pendingin Minuman*. Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) ke-9, 13-15 Oktober 2010, ISBN: 978-602-97742-0-7, Universitas Sriwijaya, Palembang, Indonesia.
- [17] S. Maneewan, W. Tipsaenprom, and C. Lertsatitthanakorn. *Thermal Comfort Study of a Compact Thermoelectric Air Conditioner*. Journal of Electronic Materials, Vol. 39, No. 9, 2010, DOI: 10.1007/s11664-010-1239-8.
- [18] G Gromov. *Thermoelectric Cooling Modules*. RMT Ltd, 53 Leninskij prosp. Moscow 119991, Russia, <http://www.rmtltd.ru>.
- [19] M. Davis, R. Weymouth, and P. Clarke. *Thermoelectric CPU Cooling using High Efficiency Liquid Flow Heat Exchangers*. Hydrocool Pty Ltd 46 Pakenham Street, Fremantle, West Australia 6160.
- [20] Laird Technologies. *Thermoelectric Handbook Product Information Assembly Information Performance and Properties*. www.lairdtech.com.
- [21] Reiyu Chein, Guanming Huang. *Thermoelectric cooler application in electronic cooling*. Applied Thermal Engineering 24 (2004) 2207-2217.
- [22] Nandy Putra, Ardiyansyah, William Sukyono, David Johansen, Ferdiansyah N. Iskandar. *The characterization of a Cascade Thermoelectric Cooler In A Cryosurgery Device*. Cryogenics 50 (2010) 759–764.

- [23] 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.
- [24] Qinghai Luo, Gangfa Tang, Zhiqiang Liu, Jingwei Wang. *A Novel Water Heater Integrating Thermoelectric Heat Pump With Separating Thermosiphon*. Applied Thermal Engineering 25 (2005), 2193–2203.
- [25] Nandy Putra, Aziz Oktrianto, Idam Bariyanto dan Fery Yusivar. *Penggunaan Heatsink-Fan Sebagai Pendingin Sisi Panas Elemen Peltier Pada Pengembangan Vaccine Carrier*. Jurnal Teknologi, Edisi No. 1. Tahun XXI, Maret 2007, 24-31 ISSN 0215-1685.
- [26] Hao Peng, Xiang Ling. *Experimental Investigation On Flow And Heat Transfer Performance Of A Novel Heat Fin-Plate Radiator For Electronic Cooling*. Heat Mass Transfer (2009) 45:1575–1581, DOI 10.1007/s00231-009-0532-7.
- [27] P. K. Bansal and A. Martin. *Comparative Study Of Vapour Compression, Thermoelectric And Absorption Refrigerators*. International Journal Of Energy Research, Int. J. Energy. Res. 2000; 24:93-107.
- [28] Gao Min, D. M. Rowe. *Experimental evaluation of prototype thermoelectric domestic-refrigerators*. Applied Thermal Engineering 23 (2006) 113-152.
- [29] Cengel Y.A. *Heat Transfer A Practical Approach*. McGraw-Hill: New York, U.S.A. 2002.
- [30] Kyung Min Kim, Hyun Lee, Beom Seok Kim, Sangwoo Shin, Dong Hyun Lee, Hyung Hee Cho. *Optimal Design Of Angled Rib Turbulators In A Cooling Channel*. Heat Mass Transfer (2009) 45:1617–1625, DOI 10.1007/s00231-009-0536-3.
- [31] Syaiful. *Efek Swirl Fan Terhadap Pendinginan Ekstrude Fin Dengan Variasi Daya 95 - 120 Watt*. Rotasi – Volume 7 Nomor 2 April 2005.
- [32] A. Abo El-Nasr, S. M. El-Haggag. *Effective thermal conductivity of heat pipes*. Heat and Mass Transfer 32 (1996) 97-101, Springer-Verlag 1996.
- [33] <http://www.coolingzone.com>.

- [34] Gaugler, Richard. *Heat Transfer Divices*. Dayton, Ohio: U.S. Patent Office, (1994) pp.4,2350348.
- [35] Arthur P.Fraas. *Heat Exchanger Design*, 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons. 1989.
- [36] Gaugler, R.S. *Heat Transfer Device*. US Patent No. 2350348, Appl. 21 Desember 1942. Published 6 Juni 1944.
- [37] Feldman, K.T. and Whiting, G.H. *The heat pipe and its potentialities*. Eng. Dig., Vol. 28 No. 3, pp 86–86, 1967.
- [38] Eastman, G.Y. *The heat pipe*. Sci. Am., Vol. 218, No. 5, pp 38–46, 1968.
- [39] Feldman, K.T. and Whiting, G.H. *Applications of the heat pipe*. Mech. Eng., Vol. 90, pp 48–53, 1968.
- [40] 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.
- [41] Blackshield™. *Mengenal Teknologi Heat Pipe*. 2008.
- [42] H.K.Versteeg, W. Malalasekera. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Volume Method*. Longman Group Ltd. 1995.
- [43] SolidWorks Flow Simulation 2009 Technical Reference.
- [44] D. Astrain, J.G. Vian, M. Dominguez, *Increase of COP in thermoelectric refrigerant by the optimization of heat dissipation*, Applied Thermal Engineering 23 (2003) 2183-2200.
- [45] Nandy Putra, Yanuar, Ferdiansyah N. Iskandar. *Application of Nanofluids to A Heat Pipe Liquid-Block And The Thermoelectric Cooling Of Electronic Equipment*. Experimental Thermal and Fluid Science (2011), Elsevier.