



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS KINERJA
SISTEM PENDINGIN ARUS SEARAH (DC COOLER)
SEBAGAI UPAYA KONSERVASI ENERGI PADA BTS
(BASE TRANSCEIVER STATION)**

TESIS

JOESSIANTO EKO POETRO

0906578346

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JUNI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS KINERJA
SISTEM PENDINGIN ARUS SEARAH (DC COOLER)
SEBAGAI UPAYA KONSERVASI ENERGI PADA BTS
(BASE TRANSCEIVER STATION)**

TESIS

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister Teknik**

JOESSIANTO EKO POETRO

0906578346

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
KEKHUSUSAN TENAGA LISTRIK & ENERGI
DEPOK
JUNI 2011**

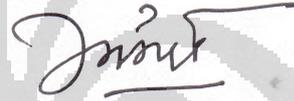
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Joessianto Eko Poetro

NPM : 0906578346

Tanda Tangan :



Tanggal : 30 Juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :

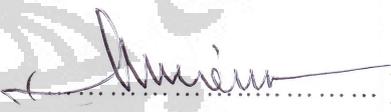
Nama : Joessianto Eko Poetro
NPM : 0906578346
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Analisis Kinerja Sistem Pendingin Arus Searah (*DC Cooler*)
sebagai Upaya Konservasi Energi pada BTS (*Base Transceiver Station*)

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr.-Ing. Eko Adhi Setiawan, ST.MT. ()

Penguji : Prof.Dr.Ir. Rudy Setiabudy, DEA. ()

Penguji : Ir. Amien Rahardjo, MT. ()

Penguji : Aji Nurwidiyanto, ST, MT. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 Juni 2011

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan ke hadirat Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik Kekhususan Tenaga Listrik & Energi pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr.-Ing. Eko Adhi Setiawan, ST.MT. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini;
- (2) Pimpinan PT Berathi beserta para staf yang telah menyediakan sarana dan prasarana yang banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang saya perlukan;
- (3) Orang tua dan keluarga saya yang telah membarikan bantuan dukungan moral, spiritual, dan material;
- (4) Teman-teman Gatrik dan Kontrol, serta pihak-pihak yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan tesis ini.

Akhir kata, saya berharap Allah Subhanallahi Wa Ta'ala berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 30 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 : Joessianto Eko Poetro
NPM : 0906578346
Program Studi : Kekhususan Tenaga Listrik & Energi
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Tesis

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

Analisis Kinerja Sistem Pendingin Arus Searah (*DC Cooler*)
sebagai Upaya Konservasi Energi pada BTS (*Base Transceiver Station*)

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di Depok
Pada tanggal 30 Juni 2010
Yang menyatakan



(Joessianto Eko Poetro)

ABSTRAK

Nama : Joessianto Eko Poetro
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Analisis Kinerja Sistem Pendingin Arus Searah (*DC Cooler*)
sebagai Upaya Konservasi Energi pada BTS (*Base Transceiver Station*)

BTS merupakan komponen jaringan telekomunikasi seluler yang berhubungan langsung dengan pelanggan yang berada dalam jangkauannya. Untuk mengurangi akumulasi panas dari radiasi matahari dan peralatan BTS, diperlukan sistem pendingin guna meningkatkan kinerja dan umur peralatan BTS. Sistem pendingin BTS menyerap hampir setengah dari konsumsi energi listrik BTS.

Tujuan penelitian ini adalah melakukan upaya konservasi energi pada BTS, dengan melakukan modifikasi *dc cooler* menjadi lebih efisien. Pada penelitian ini, akan dilakukan studi literatur yang berhubungan dengan sistem pendingin dan teknologi termoelektrik. Kemudian merancang prototip *dc cooler* dengan modifikasi *casing*, *fan*, dan *heatsink*. Selanjutnya prototip-prototip tersebut diuji untuk mengetahui kinerjanya. Hasil pengujian dianalisis dan dibandingkan dengan COP (Coefficient Of Performance) *dc cooler* awal.

Dari hasil pengujian diketahui bahwa penggunaan casing panjang yang menutupi seluruh heatsink dan penggunaan fan dengan daya lebih kecil dapat meningkatkan COP sebesar 10.46 %. Dan dapat menghemat energi listrik sebesar 18.5 KWH perunit selama satu tahun.

Kata Kunci: BTS, Termoelektrik, *DC Cooler*, COP

ABSTRACT

Name : Joessianto Eko Poetro
Study Program : Electrical Engineering
Title : Performance Analysis of Direct Current Cooling System (DC Cooler) as Energy Conservation Efforts at the BTS (Base Transceiver Station).

BTS is a component of a mobile telecommunications network that relate directly to customers within its range. To reduce the accumulated heat from solar radiation and BTS equipment, cooling systems needed to improve the performance and lifetime of BTS equipment. BTS cooling system absorbs almost half of electrical energy consumption of the BTS.

The purpose of this research is to perform energy conservation efforts at the BTS, by modifying dc cooler becomes more efficient. In this research, will carried out literature studies related to the cooling system and thermoelectric technology. Then design prototype dc cooler with modification of varying the casing, fan, and heatsink. Furthermore, the prototype is tested to determine its performance. The test result are analysed and compared with the COP (Coefficient Of Performance) of the original dc cooler.

From the test results are known that use of long casing that covers the whole heatsink and used of smaller power fan can improve the COP by 10.46 %.. And it can save electricity by 18.5 KWH perunit for one year

Keywords: BTS, Thermoelectric, DC Cooler, COP

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GRAFIK.....	xii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Metodologi Penelitian	4
1.6 Sistematika Pembahasan	4
2. LANDASAN TEORI	5
2.1 Perpindahan Kalor.....	5
2.1.1 Konduksi.....	5
2.1.2 Konveksi.....	6
2.1.3 Radiasi.....	7
2.2 Pendingin Termoelektrik (TEC).....	9
2.2.1 Sejarah Perkembangan Termoelektrik.....	9
2.2.2 Prinsip Kerja Pendingin Termoelektrik.....	10
2.2.3 Pendingin Termoelektrik Bertingkat.....	11
2.2.4 Susunan Sistem Pendingin Termoelektrik.....	12
2.2.5 Performa Pendingin Termoelektrik.....	13
2.3 Heatsink.....	14
2.3.1 Heatsink Jenis Estrude	14
2.3.2 Heatsink Jenis Slot.....	15
2.4 Konservasi Energi.....	16
2.4.1 Efisiensi.....	16
2.4.2 Kalor dan Usaha.....	17
2.4.2 Coefficient of Performance (COP).....	17
2.5 Panas pada Motor Arus Searah.....	18
3. RANCANG BANGUN PENDINGIN ARUS SEARAH (DC COOLER).....	20
3.1 Dasar Pemikiran	20
3.2 Cara Kerja DC Cooler.....	21
3.2 Desain & Konstruksi DC Cooler Awal.....	22
3.3 Komponen-komponen DC Cooler.....	23

3.3.1	Termoelektrik (Elemen Peltier).....	23
3.3.2	Heatsink.....	24
3.3.3	Kipas Arus Searah (DC Fan).....	24
3.3.4	Casing.....	25
3.3.5	Isolator/Gasket.....	26
3.3.6	Thermal Grease.....	25
3.4	Cara Kerja Pendinginan Ruangan dengan DC Cooler.....	25
3.5	Dasar Modifikasi.....	27
3.5.1	Kinerja Sistem Pendingin.....	27
3.5.2	Heatsink.....	28
3.5.3	Casing.....	29
3.5.4	Kipas Arus Searah (DC Fan).....	29
4.	PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA	31
4.1	Komponen Pengujian dan parameter yang Diukur.....	31
4.2	Rangkaian dan Variasi Pengujian.....	32
4.3	Prosedur Pengujian.....	33
4.4	Pengolahan Data.....	33
4.5	Analisis Perbandingan Grafik Pendinginan Kabin.....	34
4.5.1	DC Cooler Heatsink Extrude Fan Besar Variasi Casing	34
4.5.2	DC Cooler Heatsink Extrude Casing Pendek Variasi Fan.....	35
4.5.3	DC Cooler Heatsink Extrude Variasi Casing dan Fan.....	37
4.5.4	DC Cooler Casing Pendek Fan Besar Variasi Heatsink	38
4.6	Analisis Perbandingan COP (Coefficient of Performance).....	40
4.6.1	Perhitungan Beban Kalor.....	41
4.6.2	Perhitungan Daya Masukan.....	43
4.6.3	Perhitungan COP	44
4.7	Analisis Penghematan Energi.....	45
4.7.1	Perbandingan Daya Masukan	45
4.7.2	Perbandingan Kecepatan Pendinginan	46
	KESIMPULAN	47
	DAFTAR REFERENSI	48
	LAMPIRAN	49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	BTS dalam komunikasi seluler.....	1
Gambar 1.2	BTS Indoor, BTSE dan BTS Outdoor.....	2
Gambar 2.1	Susunan Elemen Peltier.....	10
Gambar 2.2	Prinsip kerja TEC.....	11
Gambar 2.3	Modul termoelektrik bertingkat.....	11
Gambar 2.4	Susunan dasar sistem pendingin termoelektrik	12
Gambar 2.5	Jenis susunan sistem pendingin termoelektrik	12
Gambar 2.6	Penampang sambungan elemen Peltier.....	13
Gambar 2.7	Heatsink plat bersirip.....	14
Gambar 2.8	Tebal lapis batas pada heatsink dengan slot.....	15
Gambar 2.9	Blok Diagram sistem pendingin	17
Gambar 3.1	Cara kerja pendinginan ruangan oleh dc cooler	21
Gambar 3.2	Desain & konstruksi dc cooler awal.....	22
Gambar 3.3	Elemen Peltier.....	23
Gambar 3.4	Heatsink extrude.....	24
Gambar 3.5	Bentuk dc fan.....	25
Gambar 3.6	Casing panjang dan pendek.....	25
Gambar 3.7	Isolator/Gasket.....	26
Gambar 3.8	Heatsink slot.....	28
Gambar 3.9	DC cooler casing pendek.....	29
Gambar 3.10	DC cooler casing panjang.....	29
Gambar 3.11	DC cooler fan besar.....	30
Gambar 3.12	DC cooler fan kecil.....	30
Gambar 4.1	Rangkaian pengujian	32
Gambar 4.2	Instalasi pengujian.....	32
Gambar 4.3	Daerah aliran lapisan batas pada permukaan datar.....	39
Gambar 4.4	Profil kecepatan aliran laminar dalam saluran	39
Gambar 4.5	Struktur medan aliran turbulen dekat permukaan	39
Gambar 4.6	Profil kecepatan aliran turbulen dalam saluran	39

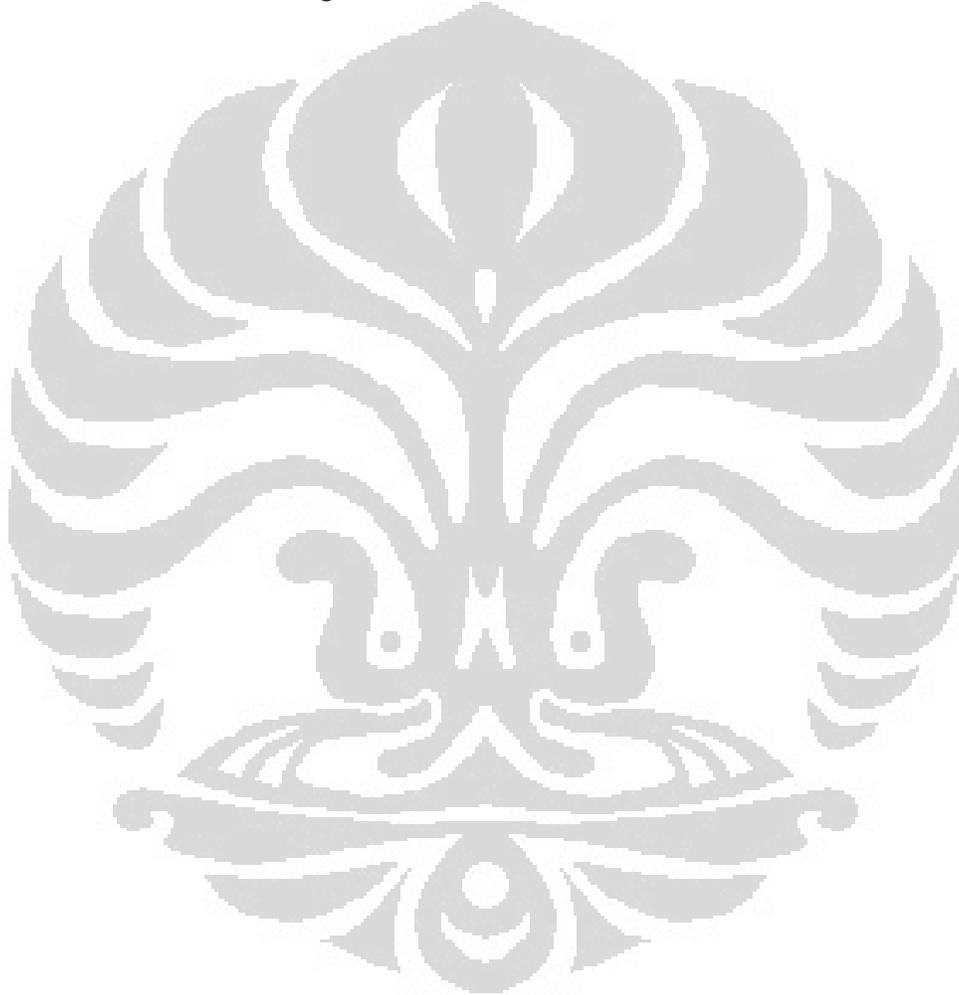
DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Hasil Perhitungan COP DC Cooler.....	44
Tabel 4.2	Kenaikan COP terhadap DC Cooler Casing pendek Fan besar	44



DAFTAR GRAFIK

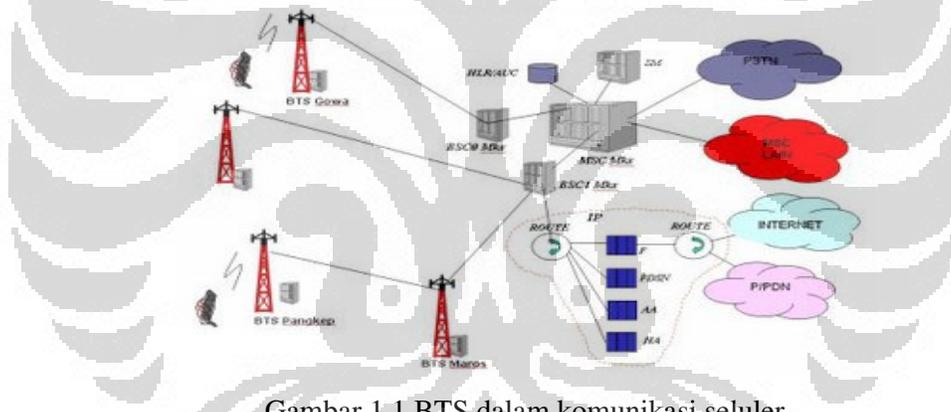
Grafik 4.1	Penurunan suhu kabin oleh dc cooler heatsink extrude fan besar..	34
Grafik 4.2	Penurunan suhu oleh dc cooler heatsink extrude casing pendek....	35
Grafik 4.3	Penurunan suhu kabin oleh dc cooler heatsink extrude.....	37
Grafik 4.4	Penurunan suhu kabin oleh dc cooler casing pendek fan besar.....	38
Grafik 4.5	Penurunan suhu kabin oleh dc cooler extrude casing pendek fan besar dengan beban 60 W	42



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

BTS (Base Transceiver Station) merupakan komponen jaringan telekomunikasi seluler yang berhubungan langsung dengan pelanggan, berfungsi sebagai penerima dan pemancar gelombang radio dan perangkat interface antara pelanggan dan MSC (*Mobile Switching Centre*). Dalam memperebutkan konsumen, operator selular harus meningkatkan kapasitas, kualitas dan jangkauan layanan. Salah satu implementasinya adalah pembangunan menara BTS di seluruh penjuru. Dengan banyaknya jumlah BTS, tiap operator harus menyediakan biaya operasional yang tak kecil. Dalam hal ini, biaya operasional yang lumayan besar adalah konsumsi energi listrik.



Gambar 1.1 BTS dalam komunikasi seluler

Pada umumnya suatu BTSE (BTS Equipment) membutuhkan energi listrik arus searah secara kontinyu. Peralatan ini biasanya diletakkan dalam suatu rumah tertutup (*shelter*) yang dilengkapi pendingin ruangan (AC). Peralatan pendingin ini biasanya memerlukan daya listrik arus bolak balik dengan kapasitas sama dengan BTS. Selain itu masih ada fan dan lampu. Dari jumlah itu, hampir setengahnya (45%) dipakai untuk mendinginkan ruangan. Sistem pendingin ini diperlukan untuk meningkatkan kinerja dan umur BTSE (peralatan BTS).

Penggunaan system pendinginan yang menggunakan freon sebagai refrigeran (media pendingin) mulai dikurangi, karena meyebabkan penipisan lapisan ozon. Dewasa ini mulai dikembangkan system pendinginan yang lebih

baik dari pada AC, salah satunya ialah penggunaan elemen peltier atau pendingin termoelektrik. Di samping relatif lebih ramah lingkungan, pendingin termoelektrik ini lebih tahan lama dan fleksibel.

1.2 Perumusan Masalah

Untuk penempatan BTS, dibagi kedalam indoor dan outdoor. BTS indoor mempunyai spesifikasi desain yang lebih ramping dan relatif lebih awet karena ditempatkan di dalam ruangan. Namun BTS indoor memiliki kelemahan pada penempatan ruangan tersendiri dan harus dilengkapi AC (*air conditioner*) sebagai pendingin. Umumnya perangkat BTS ini terdapat di dalam shelter dan mall.



Gambar 1.2 BTS Indoor, BTSE dan BTS Outdoor

Selain itu terdapat BTS outdoor yang mempunyai spesifikasi tidak memerlukan ruangan khusus, dapat ditempatkan di dinding (*wall mounted*), terowongan, dan dipinggir jalan. Perbedaan biasanya hanya pada rack, tapi isi modulnya hampir sama dengan BTS indoor. Untuk pendinginan BTS ini biasanya menggunakan fan atau dc cooler.

Dalam pengoperasian BTS, salah satu faktor yang mempengaruhi kinerja BTSE (rectifier, baterai, radio, dll) adalah panas. Akumulasi panas dapat berasal dari lingkungan sekitar seperti radiasi matahari dan dari BTSE sendiri, yaitu: panas yang dihasilkan oleh rectifier, baterai, dll.

Agar kinerja peralatan BTS meningkat dan *lifetime* bertambah lama, maka diperlukan suhu yang relatif kecil. Selama ini pendinginan di dalam ruangan dilakukan oleh air conditioner (AC) dengan sistem kompresi. Tetapi sistem tersebut membutuhkan kompresor yang memerlukan energi besar. Disamping itu AC memerlukan pemeliharaan rutin seperti penggantian refrigeran atau lainnya.

Selama ini pendinginan BTS outdoor hanya digunakan fan, tetapi penggunaan fan biasa ini tidak bisa menurunkan suhu dibawah suhu lingkungan. Ini dikarenakan udara yang didistribusikan dalam kabin BTSE adalah udara luar. Hal ini dapat diatasi dengan menggunakan sistem pendingin arus searah (*dc cooler*), karena dapat menurunkan suhu dibawah suhu luar/lingkungan.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan upaya konservasi energi pada BTS, dengan merancang alternatif sistem pendingin ruangan dengan teknologi termoelektrik. Hal ini dilakukan dengan memodifikasi *dc cooler* yang sudah ada. Dalam penelitian ini modifikasi dilakukan dengan mengganti *casing* dan *fan* pada sisi dingin dan mengganti *heatsink* pada sisi panas.

Disamping itu juga untuk mengetahui kinerja *dc cooler* dalam mendinginkan kabin melalui pengujian. Dan dengan menghitung COP (*Coefficient of Performance*) semua *dc cooler*, kinerja dan COP dari *dc cooler* modifikasi dibandingkan dengan *dc cooler* semula. Dengan demikian prototipe *dc cooler* modifikasi yang paling efisien hemet energi listrik dapat ditentukan.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat mengurangi atau bahkan menghilangkan peran pendingin ruangan konvensional (AC), sehingga bisa mengurangi efek penipisan ozon. Disamping menyajikan sistem pendingin yang ramah lingkungan juga memiliki daya yang rendah, sehingga ketergantungan terhadap daya listrik PLN dan generator dapat dikurangi atau dihemat.

1.4 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, permasalahan dibatasi pada sistem pendinginan untuk BTS *outdoor*. Pada penelitian ini akan dilakukan upaya peningkatan efisiensi atau COP dengan melakukan modifikasi pada *dc cooler* tersebut. Modifikasi dibatasi pada perubahan *heatsink* pada sisi panas dengan variasi *heatsink* ekstrude dan *heatsink* slot. Dan pada sisi dingin dengan variasi *casing* pendek dan *casing* panjang, serta variasi fan besar dan fan kecil.

Pengujian dan pengukuran terhadap prototip *dc cooler* hasil modifikasi dilakukan dalam suatu kabin baterai yang terisolasi secara termal. Dalam analisis

perhitungan diasumsikan dinding kabin bersifat adiabatik (tidak ada pertukaran panas) terhadap lingkungan luar.

1.5 Metodologi Penelitian

- 1) Studi literature perihal sistem pendingin pada BTS (Base Transceiver Station) dan penggunaan teknologi termoelektrik sebagai pendingin (dc cooler).
- 2) Merancang prototip dc cooler dengan memodifikasi dc cooler dengan variasi casing, fan, dan heatsink untuk memperoleh prototip yang paling efisien.
- 3) Selanjutnya prototip tersebut diuji untuk mengetahui kinerjanya dalam mendinginkan kabin baterai.
- 4) Kemudian melakukan analisis perbandingan grafik pendinginan kabin dan COP (Coefficient Of Performance) terhadap *dc cooler* semula.
- 5) Menarik kesimpulan dari penelitian ini berdasarkan hasil analisis data

1.6 Sistematika Pembahasan

Bab Pendahuluan menjelaskan latar belakang yang melandasi penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, pembatasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika pembahasan. Bab kedua berisi teori-teori yang melandasi penelitian ini dan perkembangan teknologi termoelektrik sebagai pendingin ruangan. Bagian ini diambil dari beberapa buku literatur, jurnal penelitian dan situs-situs internet. Bab ketiga berisi penjelasan lengkap tentang dasar pemikiran dan konsep perancangan prototip pendingin ruangan termoelektrik dengan memodifikasi dc cooler yang tersedia. Bab keempat berisi pembahasan tentang pengujian prototip dc cooler, pengumpulan data dan perhitungannya. Dalam bab ini juga diuraikan analisis perbandingan kinerja dc cooler dalam mendinginkan kabin uji. Setelah itu akan diambil beberapa kesimpulan dari penelitian ini berdasarkan hasil analisis data yang telah dilakukan.

BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1. Perpindahan Kalor

Kalor adalah usaha/kerja yang merupakan perpindahan energi termal akibat adanya perubahan suhu. Kalor tidak dapat dilihat secara langsung atau diukur, tetapi pengaruhnya dapat dilihat dan diukur. Adanya energi termal pada sebuah benda atau sistem bisa dideteksi dari indikasi suhunya.

Bila pada suatu sistem terdapat gradien suhu atau bila dua sistem yang suhunya berbeda disinggungkan, maka otomatis kalor akan mengalir dari benda/sistem yang bersuhu tinggi ke benda bersuhu rendah. Jadi perpindahan kalor dapat didefinisikan sebagai berpindahnya energi dari suatu benda yang bersuhu tinggi (memiliki energi yang besar) ke benda yang bersuhu rendah (memiliki energi yang kecil). Kalor akan berhenti berpindah bila kedua benda mencapai suhu yang sama (tercapai kesetimbangan termal). Proses perpindahan kalor ini berlangsung dengan 3 cara, yaitu: konduksi, konveksi, dan radiasi.

2.1.1 Konduksi

Konduksi adalah perpindahan kalor melalui medium (zat perantara) tanpa disertai dengan perpindahan partikel-partikel medium tersebut. Perpindahan kalor secara konduksi biasanya terjadi pada zat padat, seperti logam, dan sebagainya. Dalam aliran kalor konduksi, perpindahan energi terjadi karena hubungan kalor secara langsung tanpa adanya perpindahan molekul yang cukup besar.[1] Jadi konduksi ialah pemindahan kalor akibat kontak langsung antara benda-benda.

Laju aliran kalor dengan cara konduksi melalui dinding datar dari suatu bahan yang homogen diusulkan oleh Fourier yang menyatakan bahwa:[1]

$$q_k = -k A \frac{dT}{dx} = -k A \frac{\Delta T}{\Delta x} = -k A \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \quad (2.1)$$

$$q_k = -\frac{T_1 - T_2}{\Delta x / k A} = \frac{T_1 - T_2}{R_k} \quad (2.2)$$

q_k = Laju perpindahan kalor konduksi (W)

k = Konduktivitas termal bahan (W/m K)

A = Luas penampang tegak lurus terhadap arah aliran kalor (m^2)

$\frac{dT}{dx}$ = Gradien suhu pada penampang tersebut (K/m)

Δx = Jarak dalam arah aliran kalor (m)

ΔT = Beda suhu (K)

T_1 = Suhu yang lebih tinggi (K)

T_2 = Suhu yang lebih rendah (K)

R_k = Tahanan termal konduksi(K/watt)

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

Konduktivitas termal k adalah sifat bahan yang menunjukkan jumlah kalor yang mengalir melalui satu satuan luas jika gradien suhunya satu. Bahan yang mempunyai konduktivitas termal tinggi dinamakan konduktor, sedangkan bahan yang konduktivitas termalnya rendah disebut isolator.

Mekanisme perpindahan energi secara konduksi dapat terjadi dengan cara melalui tumbukan molekul (dalam fluida) dan/atau dengan angkutan melalui elektron-elektron yang bergerak bebas (dalam zat padat). Disamping dapat mengangkut muatan listrik, elektron dapat pula membawa energi termal.

Pada umumnya perpindahan energi pada zat padat lebih banyak dengan cara angkutan elektron. Karena itu, konduktor listrik yang baik selalu merupakan konduktor kalor yang baik pula, seperti perak, tembaga, aluminium. Sebaliknya isolator listrik yang baik merupakan isolator kalor pula.

2.1.2 Konveksi

Konveksi adalah perpindahan kalor melalui medium dan disertai dengan perpindahan atau gerakan partikel-partikel medium tersebut. Gerakan inilah yang menyebabkan adanya transfer kalor. Perpindahan kalor secara konveksi biasa terjadi pada fluida (zat cair dan gas).

Konveksi merupakan proses angkutan energi dengan kerja gabungan dari konduksi, penyimpanan energi dan gerakan mencampur. Keefektifan perpindahan kalor secara konveksi tergantung sebagian besar pada gerakan mencampur fluida. Jadi pemindahan kalor berdasarkan gerakan fluida disebut konveksi.

Laju perpindahan kalor dengan cara konveksi antara suatu permukaan benda padat dan suatu fluida dapat dihitung dengan hukum Newton tentang pendinginan, yaitu:[1]

$$q_c = h A \Delta T = h A (T_S - T_\infty) \quad (2.3)$$

$$q_c = \frac{T_S - T_\infty}{1/h A} = \frac{T_S - T_\infty}{R_c} \quad (2.4)$$

q_c = Laju perpindahan kalor konveksi (J/s = watt)

h = Koefisien perpindahan kalor konveksi ($W/m^2 K$)

A = Luas permukaan perpindahan kalor yang menyinggung fluida (m^2)

ΔT = Beda suhu menyeluruh antara permukaan dan fluida (K)

T_S = Suhu permukaan (K)

T_∞ = Suhu fluida (K)

R_c = Tahanan termal konveksi (K/watt)

Nilai koefisien perpindahan kalor konveksi h dalam sebuah sistem tergantung pada geometri permukaan, viskositas fluida dan kecepatan fluidanya, serta sifat fisik fluida itu (konduktivitas termal, kalor spesifik, densitas) dan gradien suhu antara permukaan dan fluida.[1] Viskositas fluida mempengaruhi profil kecepatan, dan karena itu mempengaruhi laju perpindahan energi di daerah permukaan.[2] Viskositas yang tinggi, seperti pada minyak mengakibatkan kecepatan fluida rendah. Karena itu digunakan fluida udara yang mempunyai viskositas rendah, agar laju perpindahan kalor tinggi.

Perpindahan kalor konveksi dapat dibagi menjadi dua, yaitu konveksi bebas (alami) dan konveksi paksa. Konveksi alami terjadi apabila pergerakan fluida dikarenakan gaya apung akibat perbedaan kerapatan fluida tersebut akibat perbedaan suhu. Sedangkan pada konveksi paksa pergerakan fluida terjadi akibat gaya luar seperti kipas (*fan*) atau pompa.

2.1.3 Radiasi

Radiasi adalah perpindahan kalor tanpa melalui medium, bahkan dapat melalui hampa udara dan merambat dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Radiasi terjadi misalnya pada pancaran sinar matahari ke bumi atau panas (rasa hangat) yang kita rasakan ketika berada di dekat api unggun atau perapian.

Radiasi termal didefinisikan sebagai rambatan gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh suatu benda karena suhu benda tersebut. Apa yang dirasakan sebagai panas dari objek, tanpa menyentuh objek tersebut itulah radiasi termal. Semua benda yang suhunya diatas nol absolut, akan memiliki energi termal berdasarkan atas suhunya sendiri. Jadi radiasi termal ialah pemindahan kalor melalui gelombang elektromagnetik berdasarkan suhunya.

Jumlah energi yang meninggalkan suatu permukaan benda sebagai radiasi termal tergantung pada suhu mutlak dan sifat permukaan tersebut. Permukaan benda-hitam memancarkan energi yang sebanding dengan suhu mutlak pangkat empat dengan laju:[1]

$$q_r = \sigma A_1 T_1^4 \quad (2.5)$$

$$q_r = \sigma A_1 \epsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.6)$$

q_r = Laju perpindahan kalor radiasi (W)

σ = Konstanta Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8}$ (W/m² K⁴)

A_1 = Luas permukaan (m²)

ϵ_1 = Emisivitas permukaan (untuk benda-hitam $\epsilon = 1$)

T_1 = Suhu permukaan (K)

T_2 = Suhu permukaan yang lebih rendah (K)

Persamaan (2.5) di atas disebut hukum Stefan-Boltzmann tentang radiasi termal dan berlaku hanya untuk benda hitam sempurna. Persamaan (2.6) menyatakan laju perpindahan *netto* kalor dari benda nyata (benda kelabu) dengan suhu T_1 ke benda hitam dengan suhu T_2 yang mengelilinginya.[1]

Emisivitas adalah perbandingan antara energi yang diradiasi oleh material terhadap energi yang diradiasi benda-hitam pada suhu yang sama. Ini merupakan ukuran kemampuan material untuk menyerap dan meradiasi energi. Benda-hitam sempurna memiliki $\epsilon = 1$, sedangkan benda nyata memiliki $\epsilon < 1$.

Benda yang secara keseluruhan *non-reflective* dan buram dengan suhu lebih rendah akan semua menyerap energi radiasi yang diterima permukaan benda itu. Tipe benda ini adalah penyerap sempurna dan akan menjadi pemancar sempurna radiasi termal yang biasa disebut benda-hitam. Jadi benda-hitam merupakan pemancar dan penyerap energi radiasi yang sempurna. Benda-hitam adalah alat secara teori, tidaklah sama dengan hitam pada warna.

2.2. Pendingin Termoelektrik

Pendingin termoelektrik (thermoelectric cooler = TEC) merupakan *solid state technology* yang bisa menjadi alternatif pendingin selain sistem kompresi uap. Dibandingkan dengan teknologi kompresi uap yang masih menggunakan refrigeran sebagai media penyerap panas, teknologi pendingin termoelektrik relatif lebih ramah lingkungan, tahan lama, dan bisa digunakan dalam skala besar maupun kecil.

Pendingin termoelektrik ini mempunyai kemampuan mendinginkan dan memanaskan sekaligus dimana perubahan polaritas tegangan akan membalikkan fungsi dari panas ke dingin dan sebaliknya. Jika sebuah elemen termoelektrik dialiri arus listrik DC maka kedua sisi elemen ini akan menjadi panas dan dingin. Sisi dingin inilah yang dimanfaatkan sebagai pendingin udara ruangan dengan bantuan heatsink dan fan. Dengan demikian tidak diperlukan kompresor seperti halnya di mesin-mesin pendingin konvensional, sehingga tidak menimbulkan suara bising.

2.2.1. Sejarah Perkembangan Termoelektrik

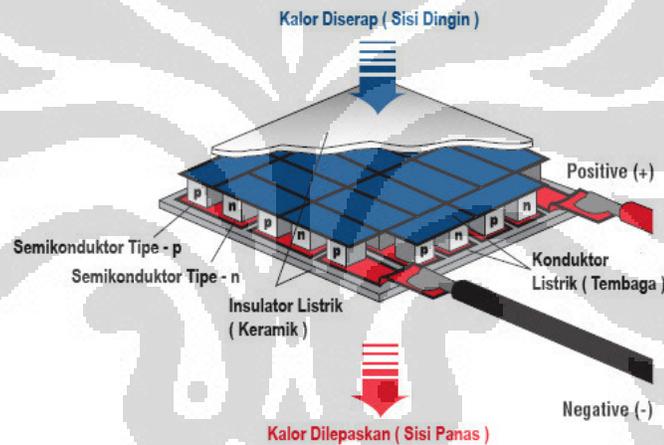
Fenomena termoelektrik pertamakali ditemukan oleh Thomas Johann Seebeck pada tahun 1821 seorang ilmuwan yang berkebangsaan Jerman. Ia menghubungkan tembaga dan besi dalam sebuah rangkaian, dimana salah satu sisi logam tersebut dipanaskan dan sisi logam yang lainnya didinginkan. Ternyata perbedaan suhu yang terjadi menyebabkan adanya aliran listrik. Fenomena tersebut kemudian dikenal dengan efek Seebeck, yang kemudian digunakan sebagai prinsip pengukuran suhu dengan termokopel.

Kemudian pada tahun 1834, seorang pembuat jam dan fisikawan paruh waktu bernama Jean Charles Athanase Peltier, ketika meneliti efek Seebeck menemukan bahwa ada fenomena kebalikan. Jika arus listrik searah dialirkan pada suatu rangkaian tertutup yang terdiri dari sambungan dua material logam yang berbeda, maka terjadi penyerapan panas pada sambungan logam tersebut dan pelepasan panas pada sambungan yang lainnya. Pelepasan dan penyerapan panas ini saling berbalik begitu arah arus dibalik. Ini kemudian dikenal dengan efek Peltier.

Pada tahun 1854, William Thomson atau lebih dikenal Lord Kelvin, memberikan penjelasan yang lebih lengkap dari Efek Seebeck dan Efek Peltier, serta menggambarkan hubungan timbal balik keduanya

2.2.2 Prinsip Kerja Pendingin Termoelektrik

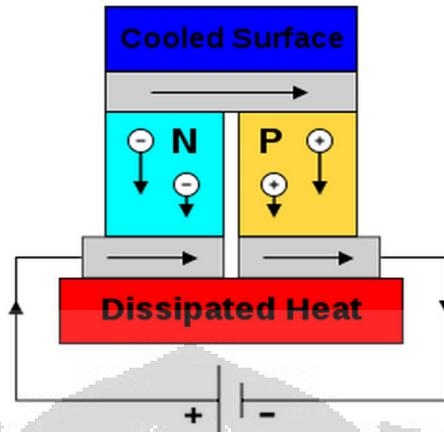
Komponen pendingin termoelektrik (TEC) terdiri dari semikonduktor tipe P dan N yang masing-masing terhubung seri secara elektrik, namun terhubung paralel secara termis. Prinsip kerja pendingin termoelektrik berdasarkan efek Peltier, yaitu ketika arus DC dialirkan ke elemen Peltier, maka salah satu sisi elemen Peltier menjadi dingin (kalor diserap) dan sisi lainnya menjadi panas (kalor dilepaskan), seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Susunan Elemen Peltier

Hal yang menyebabkan sisi dingin elemen Peltier menjadi dingin adalah adanya aliran elektron dari tingkat energi yang lebih rendah pada semikonduktor tipe-P, ke tingkat energi yang lebih tinggi yaitu semikonduktor tipe-N. Supaya elektron tipe P yang mempunyai tingkat energi yang lebih rendah dapat mengalir maka elektron menyerap energi yang mengakibatkan sisi tersebut menjadi dingin.

Sebaliknya pada sambungan sisi panas, elektron mengalir dari tingkat energi yang lebih tinggi (semikonduktor tipe-N) ke tingkat energi yang lebih rendah (semikonduktor tipe-P). Agar elektron dapat mengalir ke semikonduktor tipe-P, kelebihan energi pada tipe-N dibuang ke lingkungan, sehingga sisi tersebut menjadi panas.

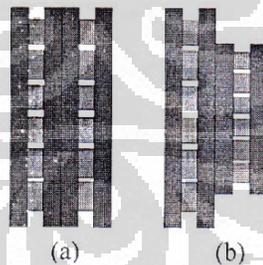


Gambar 2.2 Prinsip Kerja TEC

Berdasarkan Gambar 2.2, elektron mengalir dari semikonduktor pada tipe P yang kekurangan energi, menyerap kalor pada bagian yang didinginkan kemudian mengalir ke semikonduktor tipe N. Semikonduktor tipe N yang kelebihan energi membuang energi tersebut ke lingkungan dan mengalir ke semikonduktor tipe P dan seterusnya.

2.2.3 Pendingin Termoelektrik Bertingkat

Sistem bertingkat pada modul termoelektrik digunakan jika modul tunggal tidak bisa mencapai perbedaan suhu yang diinginkan. Penambahan modul akan mengakibatkan daya yang dibutuhkan semakin besar.



Gambar 2.3 Modul termoelektrik bertingkat:

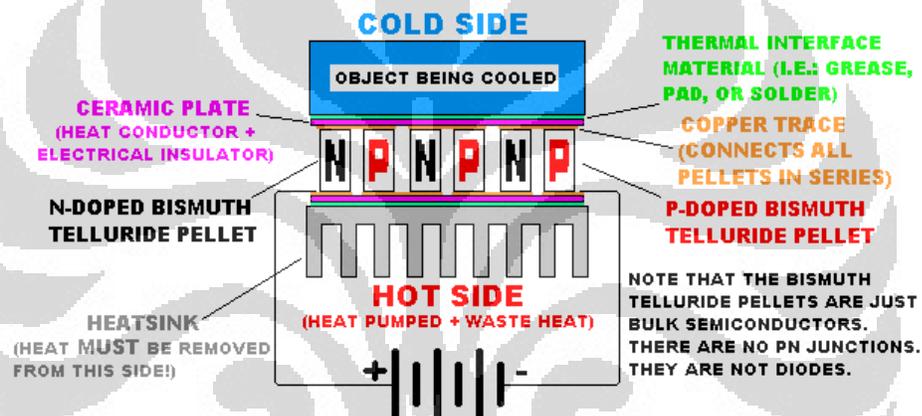
(a) Peltier paralel (b) Peltier Cascade

Kemampuan memompa kalor dari beban pada sistem pendingin termoelektrik dapat ditingkatkan tergantung pada jumlah tingkat modul. Semakin banyak tingkat, maka semakin besar selisih antara T_h dengan T_c atau ΔT . Karena ΔT yang semakin besar, maka kalor yang dapat dipindahkan dari beban juga semakin besar.

2.2.4 Susunan Sistem Pendingin Termoelektrik

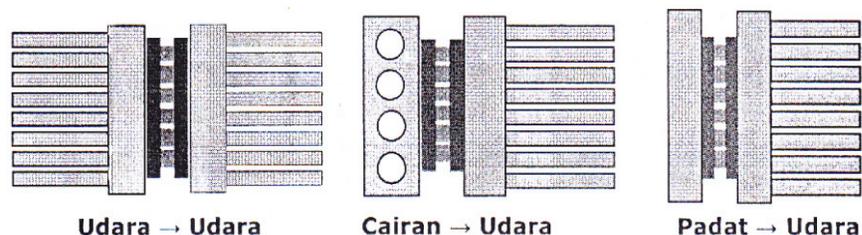
Bagian penting dari sebuah sistem pendingin termoelektrik adalah alat penukar kalor (heat exchanger), seperti heatsink, heatpipe, dll. Bagian ini mutlak diperlukan, sebab jika sisi panas peltier dapat dipertahankan konstan, maka sisi dingin dari elemen peltier akan mampu menyerap kalor secara konstan pula.

Sistem pendingin termoelektrik memerlukan heatsink yang berfungsi untuk menyerap kalor pada sisi dingin elemen peltier dan membuang kalor pada sisi panas peltier. Susunan dasar sistem pendingin termoelektrik setidaknya terdiri dari elemen peltier dan heatsink baik pada sisi dingin elemen peltier maupun pada sisi panas peltier, seperti pada Gambar 2.6.



Gambar 2.4 Susunan dasar sistem pendingin termoelektrik

Bagian yang akan didinginkan dapat langsung dihubungkan dengan sisi dingin elemen peltier. Dapat juga dihubungkan terlebih dahulu dengan alat penukar kalor sebelum dihubungkan dengan sisi dingin elemen peltier. Alat penukar kalor tersebut dapat berupa fluida atau dengan konveksi udara. Sedangkan kalor yang dihasilkan pada sisi panas elemen peltier juga dapat disalurkan ke lingkungan melalui udara baik secara alami maupun konveksi paksa atau dengan media pendingin air maupun fluida lainnya.



Gambar 2.5 Jenis susunan sistem pendingin termoelektrik

Alat penukar kalor ini dapat divariasikan penggunaannya seperti yang terlihat pada Gambar 2.5. Penyusunan sistem pendingin termoelektrik ini bergantung pada media penukar kalor yang digunakan. Media penukar kalor dapat berupa zat gas/udara, cair, dan padat.

2.2.5 Performa Pendingin Termoelektrik

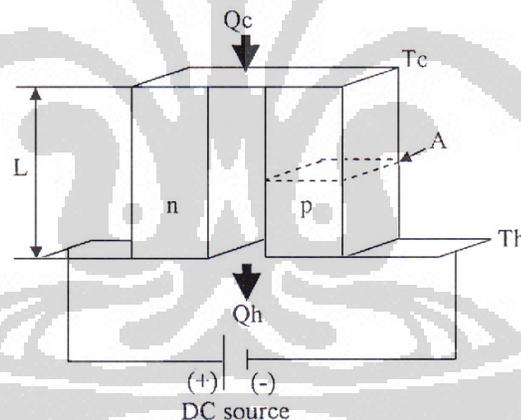
Pada Gambar 2.6 terlihat hubungan antara suplai yang diberikan dengan nilai kalor yang diserap pada sisi dingin dan kalor yang dilepaskan pada sisi panas. Hubungan antara kalor yang dilepaskan pada sisi panas dan kalor yang diserap pada sisi dingin serta energi listrik yang diberikan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Q_h = Q_c + P_{in} \quad (2.7)$$

Q_h = Kalor yang dilepas pada sisi panas modul (Watt)

Q_c = Kalor yang diserap pada sisi dingin modul (Watt)

P_{in} = Daya listrik yang diberikan (Watt)



Gambar 2.6 Penampang sambungan elemen Peltier

Performa modul termoelektrik, secara sederhana dinyatakan dalam bentuk skema pada Gambar 2.6, dan untuk perhitungannya menggunakan persamaan-persamaan berikut ini:

Kalor yang dipompa pada sisi dingin atau beban kalor yang dipindahkan (Watt):

$$Q_c = C \cdot \Delta T \quad (2.8)$$

Daya listrik yang diberikan kepada elemen Peltier (Watt):

$$P_{in} = V \cdot I \quad (2.9)$$

COP terhadap elemen Peltier:

$$\text{COP} = Q_c / P_{in} \quad (2.10)$$

Dengan:

C = kapasitas kalor

ΔT = $T_h - T_c$ = beda suhu ($^{\circ}\text{C}$)

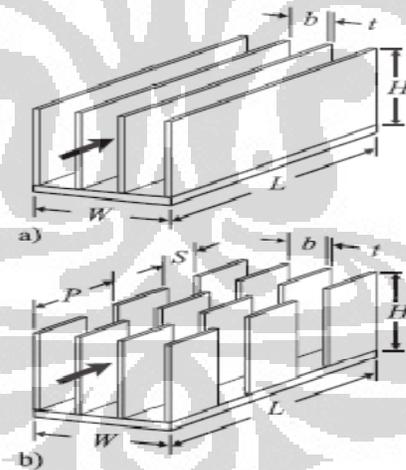
T_h = suhu sisi panas ($^{\circ}\text{C}$)

T_c = suhu sisi dingin ($^{\circ}\text{C}$)

2.3 Heatsink

Komponen elektronika dalam suatu rangkaian akan menghasilkan panas, sehingga perlu pelepasan kalor atau pendinginan, agar kinerja komponen-komponen tidak terganggu atau bahkan terjadi kerusakan. Peralatan pelepas kalor pada komponen elektronik yang banyak digunakan adalah *heatsink*.

Sistem pendingin termoelektrik juga memerlukan heatsink yang berfungsi untuk menyerap kalor pada sisi dingin elemen peltier dan membuang kalor pada sisi panas peltier.



Gambar 2.7 Heatsink Plat Bersirip

a) Jenis *extrude* b) Jenis slot

2.3.1 Heatsink Jenis Extrude

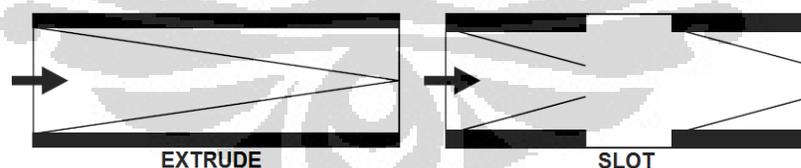
Heatsink plat bersirip, banyak digunakan untuk meningkatkan pelepasan kalor pada komponen mikroelektronik dan komponen elektronik penghasil panas lainnya. Penggunaan *heatsink* plat bersirip adalah untuk menurunkan tahanan

termal dan suhu operasi komponen. Hal ini dapat diwujudkan karena adanya penambahan luas permukaan pendingin dari sirip plat, juga dengan didapatkannya peningkatan koefisien perpindahan kalor konveksi.

2.3.2 Heatsink Jenis Slot

Pengembangan dan peningkatan unjuk kerja termal jenis *heatsink* ini adalah dengan dibentuknya slot-slot pada sirip-sirip plat seperti Gambar 2.7.b). Ukuran dan jarak antar sirip serta panjang dan jarak antar slot mempunyai pengaruh penting terhadap unjuk kerja *heatsink*. Pada jenis slot, pola aliran fluida dalam saluran yang dibentuk oleh dua sirip yang berjejer, akan berubah. Perubahan pola aliran, adalah terjadinya lapis batas aliran yang berlangsung hanya sepanjang slot, kemudian dimulai lagi pembentukan lapis batas pada slot berikutnya. Hal ini akan memperpendek terbentuknya lapisan batas sehingga sepanjang *heatsink* tebal lapis batas yang terbentuk lebih kecil.

Sementara itu, pada *heatsink extrude*, lapis batas akan tumbuh dari ujung plat hingga ujung yang terakhir, sehingga tebal lapis batas secara keseluruhan menjadi lebih tebal, dan akibatnya tahanan termalnya menjadi besar. Sebaliknya dengan kecilnya tebal lapis batas pada permukaan sirip (*heatsink slot*), mengakibatkan turunnya tahanan termal konveksi, atau meningkatnya koefisien konveksinya. Dengan meningkatnya koefisien konveksi, maka pada gilirannya akan menurunkan suhu permukaan *heatsink*.



Gambar 2.8 Tebal lapis batas pada heatsink extrude dan heatsink slot

Peningkatan koefisien perpindahan kalor pada *heat sink* dengan slot dipicu oleh perubahan pola aliran dalam saluran diantara sirip. Perubahan pola aliran terjadi karena terputusnya pembentukan lapis batas dalam saluran akibat adanya slot pada sirip, sehingga tebal lapis batas menjadi lebih tipis. Dengan menipisnya tebal lapis batas dalam saluran, maka tahanan termal pada permukaan plat menjadi lebih kecil

2.4 Konservasi Energi

Konservasi energi adalah upaya sistematis, terencana, dan terpadu guna melestarikan sumber daya energi dalam negeri serta meningkatkan efisiensi pemanfaatannya. (UU No.30 thn 2007 ttg Energi). Landasan pemikiran pada konservasi energi adalah pemanfaatan sumber-sumber daya energi dengan efisiensi yang lebih tinggi dengan mempergunakan cara-cara yang mempunyai kelayakan teknis, dapat dibenarkan secara ekonomis, tidak mengganggu lingkungan, dan dapat diterima oleh masyarakat.

Konservasi energi meliputi penggunaan energi lebih sedikit untuk mencapai layanan energi yang lebih rendah, misalnya melalui perubahan perilaku, serta efisiensi penggunaan energi. Meskipun pada konservasi energi dengan penambahan peralatan atau perubahan proses dengan efisiensi tinggi memerlukan biaya tinggi, namun biaya investasi rata-rata per kW yang dihemat jauh lebih kecil dibandingkan dengan biaya investasi.

2.4.1 Efisiensi

Bilamana sebuah peralatan melakukan suatu konversi energi, adalah penting untuk mengetahui apakah alat itu bekerja secara efisien. Efisiensi secara umum didefinisikan sebagai berikut:

$$\eta = \frac{\text{Energi keluaran}}{\text{Energi masukan}} = \frac{W_{out}}{W_{in}} \quad (2.11)$$

$$\eta = \frac{\text{Energi keluaran}}{\text{Energi masukan} + \text{Rugi-rugi Energi}} \quad (2.12)$$

W_{out} = Energi keluaran/berguna (Joule)

W_{in} = Energi masukan (Joule)

Jadi konservasi energi merupakan semua langkah yang diambil ke arah menurunkan berbagai kehilangan (rugi-rugi) energi pada semua taraf pengelolaan energi mulai dari eksploitasi, pengangkutan, pemrosesan, sampai pemanfaatan energi. Hemat energi merupakan bagian dari konservasi energi.

Biasanya persamaan efisiensi dinyatakan dalam besaran daya. Daya adalah besar energi perdetik (watt = Joule/detik). Sehingga persamaan efisiensi dapat dinyatakan sebagai:

$$\eta = \frac{\text{Daya keluaran}}{\text{Daya masukan}} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.13)$$

$$\eta = \frac{\text{Daya keluaran}}{\text{Daya keluaran} + \text{Rugi-rugi Daya}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \quad (2.14)$$

P_{out} = Daya keluaran/berguna (watt)

P_{in} = Daya masukan (watt)

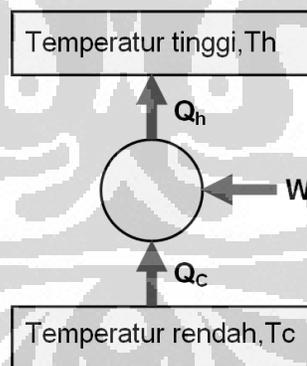
P_{loss} = Daya yang hilang = Rugi-rugi Daya (watt)

2.4.2 Kalor dan Usaha

Kalor dan usaha sama-sama berdimensi energi. Kalor merupakan energi (tenaga) yang dipindahkan (ditransferkan) dari suatu benda ke benda lain karena adanya perbedaan suhu. Dan bila transfer tenaga tersebut tidak terkait dengan perbedaan suhu, disebut usaha (kerja).

Menurut hukum kedua termodinamika, kalor secara alami selalu mengalir dari benda (daerah) panas ke dingin; kalor tidak mengalir secara spontan dari daerah dingin ke panas.

Pompa kalor (refrigerator, AC) adalah peralatan pendinginan ruangan yang berfungsi untuk menyerap kalor/panas Q_c dari dalam ruangan (eksterior) dan melepaskan panas Q_h di luar ruangan (eksterior). Ini hanya mungkin terjadi bila ada usaha W yang dilakukan pada sistem, seperti terlihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Blok diagram sistem pendingin

2.4.3 Coefficient of Performance (COP)

Membandingkan kerja suatu sistem pendingin (pompa kalor) berarti bukan membicarakan efisiensi, namun koefisien kinerja/performa (COP). Secara luas mengandung arti sama, yaitu seberapa baik kinerjanya dibandingkan dengan usaha yang dilakukan. COP adalah rasio seberapa besar energi kalor yang bisa

dipindahkan dibandingkan dengan kerja (energi) yang diberikan. Semakin besar kalor yang dapat dipindahkan dengan sejumlah energi demikian, maka COP semakin tinggi, dan semakin hemat sistem tersebut.

$$COP = \frac{Q_c}{P_{in}} \quad (2.15)$$

Q_c = Kalor yang dipindahkan oleh sistem pendingin (watt)

P_{in} = Daya masukan sistem pendingin (watt)

2.5 Panas pada Motor Arus Searah

Konversi dari energi listrik menjadi energi mekanik (motor) berlangsung melalui medan magnet. Medan magnet disini selain berfungsi sebagai tempat untuk menyimpan energi, sekaligus berfungsi sebagai tempat berlangsungnya proses perubahan energi. Dengan mengacu pada hukum kekekalan energi, dapat dinyatakan bahwa:

Apabila motor beroperasi secara terus menerus maka suhu dari motor juga akan terus meningkat. Apabila motor telah mencapai suhu yang tinggi dan motor terus digunakan maka akan membuat kinerja kecepatan motor akan menurun dan tidak efektif lagi serta dapat menimbulkan kerusakan. Ini dapat dilihat pada hubungan resistansi pada kawat kumparan/lilitan motor dengan suhu, yaitu:

$$R_t = R_0(1 + \alpha \Delta T) \quad (2.16)$$

R_t = Resistansi konduktor pada suhu T

R_0 = Resistansi konduktor pada suhu referensi/awal

α = Koefisien suhu konduktor

ΔT = Perubahan suhu ($^{\circ}\text{C}$)

Apabila suhu kawat lilitan/kumparan pada motor semakin panas maka akan menaikkan resistansi pada kawat tersebut, sehingga menyebabkan penurunan arus pada motor. Penurunan arus inilah yang akan menyebabkan adanya daya terdisipasi (energi yang hilang) menjadi panas. Karena terjadinya kehilangan energi itulah yang menyebabkan pemanasan terhadap motor sehingga akan menaikkan suhu motor yang menurunkan efisiensi motor itu sendiri.

Rugi-rugi menentukan pemanasan motor listrik, sehingga menentukan keluaran daya atau ukuran yang dapat diperoleh tanpa mempercepat kerusakan

isolasinya. Efisiensi pada umumnya sering ditentukan dengan pengukuran rugi-ruginya, bukan langsung mengukur masukan dan keluarannya dalam keadaan dibebani. Pengukuran rugi-rugi lebih mudah dan murah dilaksanakan serta menghasilkan harga yang lebih teliti dan cermat

Rugi-rugi elektris/tembaga (I^2R) akan ditemukan pada semua lilitan mesin listrik. Dari persamaan efisiensi, jelas bahwa untuk memaksimalkan efisiensi suatu mesin listrik salah satu caranya adalah dengan meminimumkan rugi-ruginya. Misalnya rugi-rugi lilitan dapat dikurangi dengan memperbesar luas celah, sehingga memperbesar luas panampang lilitan dan mengurangi tahanannya.



BAB 3 RANCANG BANGUN PENDINGIN ARUS SEARAH (DC COOLER)

3.1 Dasar Pemikiran

Radio BTS merupakan perangkat telekomunikasi seluler yang sangat vital. Oleh karena itu radio BTS harus bekerja terus menerus meskipun suplai energi listrik dari PLN mati. Untuk menanggulangi hal itu, diperlukan baterai yang memiliki tegangan output sebesar 48 volt. Baterai BTS ini bekerja dengan cara mengisi (*charge*), menyimpan energi, dan kemudian mengeluarkan (*discharge*) arus searah ke perangkat radio BTS. Proses pengisian dan pelepasan ini menyebabkan baterai cepat panas. Untuk mencegah kerusakan akibat suhu ruangan yang tinggi yang dihasilkan oleh baterai dan peralatan BTS lainnya, maka dalam kabin baterai harus dipasang sistem pendingin.

Dasar pemikiran dari perancangan sistem pendingin ruangan arus searah (*dc cooler*) adalah mencari alternatif sistem pendingin ruangan selain sistem kompresi uap sebagai upaya konservasi energi. Dengan adanya pendinginan tersebut, ruangan kabin BTSE berada pada suhu normal (± 25 °C) sehingga kinerja baterai dan peralatan BTS lainnya dapat meningkat dan umurnya lebih tahah lama.

Dibandingkan dengan teknologi kompresi uap yang masih menggunakan refrigeran sebagai media penyerap kalor, teknologi pendingin termoelektrik relatif lebih ramah lingkungan, karena tidak menggunakan refrigeran seperti freon. Selain itu alasan pemilihan termoelektrik adalah:

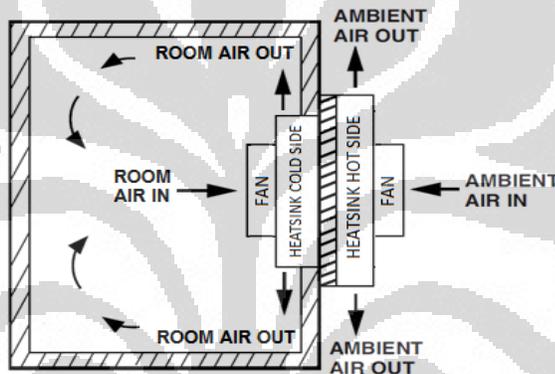
- 1) Konsumsi daya rendah dengan respon pendinginan yang cepat.
- 2) Mudah diaplikasikan pada peralatan yang sudah ada karena dimensi kecil dan ringan
- 3) Dapat memberikan pendinginan dibawah suhu lingkungan sekitar.
- 4) Mudah perawatannya karena sedikit bagian yang bergerak dan tidak memakai material yang rutin diganti seperti freon.
- 5) Tahan lama dan mempunyai kemampuan kontrol yang tepat.

- 6) Minim getaran/vibrasi sehingga cocok untuk pendingin peralatan yang sensitif terhadap getaran mekanis

3.2 Cara Kerja DC Cooler

Untuk mendinginkan suatu ruangan, dc cooler dapat dipasang seperti terlihat pada Gambar 3.4. Yang perlu diperhatikan adalah:

- 1) Agar hasil pendinginan maksimal, bagian ruangan yang hendak didinginkan harus terisolasi secara termal dengan bagian luar (adiabatik).
- 2) Pemasangan dc cooler jangan terbalik, sisi dingin harus dipasang pada bagian dalam ruangan, sedangkan yang sisi panas pada bagian luar ruangan.



Gambar 3.1 Cara kerja pendinginan ruangan oleh dc cooler

Adapun cara kerja dc cooler dalam mendinginkan kabin BTSE dapat dijelaskan sebagai berikut:

Pada saat satu daya tegangan searah dihubungkan, elemen Peltier mulai bekerja, sehingga heatsink sisi dingin mulai menjadi dingin, dan heatsink sisi panas menjadi panas.

Pada bagian dalam ruangan, udara dalam ruangan disedot masuk oleh fan sisi dingin dan ditekan agar melewati sirip-sirip heatsink sisi dingin. Udara yang keluar dari heatsink sisi dingin ini mempunyai suhu lebih rendah dari pada udara ruangan yang masuk. Proses ini terjadi berulang-ulang secara terus menerus hingga ruangan menjadi lebih dingin mendekati suhu heatsink sisi dingin.

Pada bagian luar ruangan, udara lingkungan disedot masuk oleh fan sisi panas dan ditekan agar melewati sirip-sirip heatsink sisi panas. Udara yang keluar dari heatsink sisi panas ini mempunyai suhu lebih tinggi dari pada udara

lingkungan yang masuk. Proses ini terjadi berulang-ulang secara terus menerus, hingga suhu heatsink sisi panas mendekati suhu lingkungan.

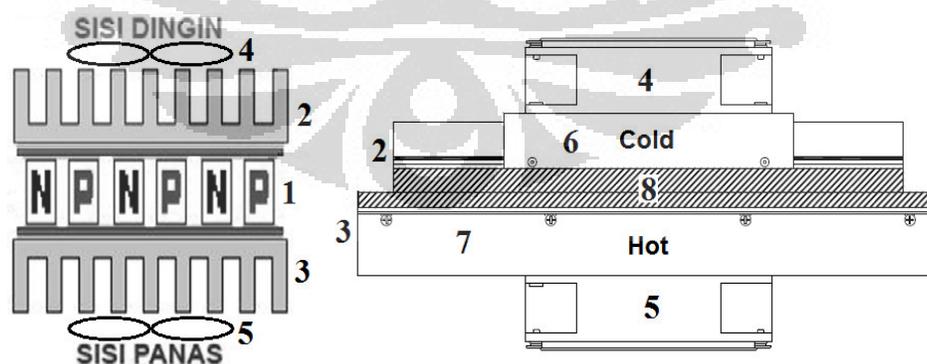
Bila catu daya dimatikan, proses diatas akan berhenti dengan sendirinya. Selanjutnya akan terjadi proses perpindahan panas secara alami, sehingga suhu dalam ruangan kabin akan sama dengan suhu lingkungan.

3.3 Desain & Konstruksi DC Cooler Awal

Target dalam melakukan perancangan ini adalah membuat sistem sesederhana mungkin dengan tujuan agar setiap komponennya mudah ditemukan di pasaran, hemat biaya, mudah dirakit, dan mudah dilakukan pemeliharaan. Selain itu sistem harus dapat bekerja secara optimal, efisien, dan mampu bersaing dengan pendingin ruangan konvensional.

Dalam mendesain alat pendingin ruangan dc cooler tentunya mengacu pada ukuran komponen-komponen lainnya seperti elemen peltier, plat, *heat sink*, fan, ruang pendinginan, dan ukuran komponen-komponen pelengkap lainnya. Selain ukuran juga memperhatikan nilai estetika dan biaya karena tentunya inti dari disain alat ini adalah dapat bersaing di pasar.

Selain itu dalam memilih material komponen-komponen yang diperlukan tentu juga melihat dari sisi kualitas, harga, dan ketersediaan komponen yang ada di pasaran. Adapun desain dan konstruksi pendingin arus searah (dc cooler) dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Desain & konstruksi dc cooler awal

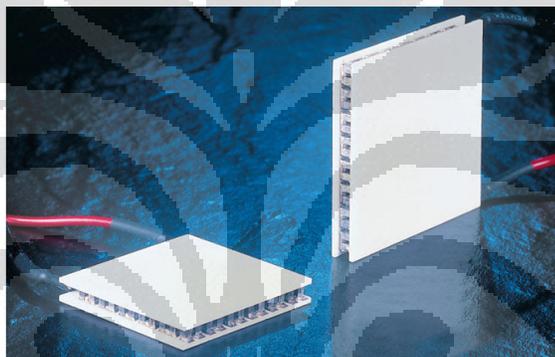
- 1) Termoelektrik
- 2) Heatsink dingin;
- 3) Heatsink panas;
- 4) Fan dingin;
- 5) Fan panas;
- 6) Casing dingin;
- 7) Casing panas;
- 8) Isolator

3.4 Komponen-komponen DC Cooler

Sistem pendingin ruangan arus searah (dc cooler) ini terdiri dari beberapa komponen yang memiliki fungsi yang berlainan. Berikut ini akan dijelaskan komponen-komponen yang digunakan.

3.3.1 Termoelektrik (Elemen Peltier)

Elemen peltier memiliki peranan yang paling vital, sebagai pompa kalor yang merupakan elemen utama sistem pendingin arus searah (dc cooler). Termoelektrik merupakan komponen yang dapat menghasilkan efek dingin dan panas. Ketika suatu tegangan listrik diberikan pada komponen ini, akan dihasilkan suhu dingin pada satu sisi dan suhu pada sisi yang lain.



Gambar 3.3 Elemen Peltier

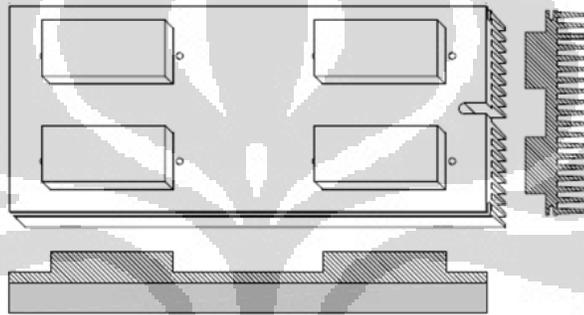
Dalam pembuatan dc cooler ini menggunakan delapan buah termoelektrik (elemen Peltier) dengan ukuran 40 x 40 x 3,8 mm. Untuk setiap termoelektrik membutuhkan tegangan masukan 12 VDC dengan daya 72 watt. Penggunaan delapan termoelektrik ini dilakukan dengan pertimbangan agar beban kalor yang dapat dipindahkan menjadi lebih besar, karena luas permukaan perpindahan kalornya lebih besar.

Dalam pengoperasiannya, suhu sisi panas termoelektrik perlu dijaga supaya tidak terlalu tinggi agar tidak terjadi kerusakan pada termoelektrik tersebut. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan heatsink dan fan. Termoelektrik ini dipasang pada isolator dari bahan spon hitam yang kemudian diapit oleh sepasang heatsink (panas & dingin). Agar termoelektrik dapat menghantarkan panas maupun dingin dengan sempurna, sebelumnya perlu diberi lapisan *thermal grease* pada permukaan termoelektrik dan heatsink bagian dalam.

3.3.2 Heatsink

Heatsink merupakan komponen yang berfungsi menyerap atau melepas kalor/panas. Heatsink ini terbuat dari pelat aluminium yang bersip dan telah dianodize (pelapisan oksida anoda). Anodisasi bertujuan untuk perlindungan terhadap korosi dan jamur serta meningkatkan isolasi listrik.

Heatsink sisi dingin memiliki ukuran 150 mm x 350 mm dan di anodisasi warna perak, berfungsi menghantarkan dingin yang dihasilkan termoelektrik. Kemudian suhu dingin pada sirip heatsink dihembuskan oleh fan agar udara dingin menyebar diseluruh ruangan kabin.



Gambar 3.4 Heatsink extrude

Heatsink sisi panas berfungsi sebagai pelepas panas dari elemen termoelektrik, berbahan aluminium dan memiliki ukuran 150 mm x 400 mm. Heatsink ini dianodisasi warna hitam dengan tujuan dapat menyerap radiasi dari termoelektrik sisi panas dan memancarkan radiasi ke lingkungan dengan mudah.

Heatsink sisi panas ini sangat mempengaruhi kinerja dari sistem pendingin arus searah. Semakin baik heatsink melepaskan kalor, maka semakin baik pula kinerja dari sistem pendingin termoelektrik tersebut. Oleh karena itu digunakan ukuran heatsink yang lebih besar dari heatsink sisi dingin dengan harapan luasan yang dimiliki menjadi lebih besar, sehingga pelepasan panas menjadi semakin cepat.[3]

3.3.3 Kipas Arus Searah (DC Fan)

Untuk mengoptimalkan proses pelepasan kalor, tidak cukup hanya dengan konveksi alami mengingat tingginya suhu yang dihasilkan oleh sisi panas termoelektrik. Maka dari itu digunakan metode konveksi paksa dengan menggunakan *dc fan*.



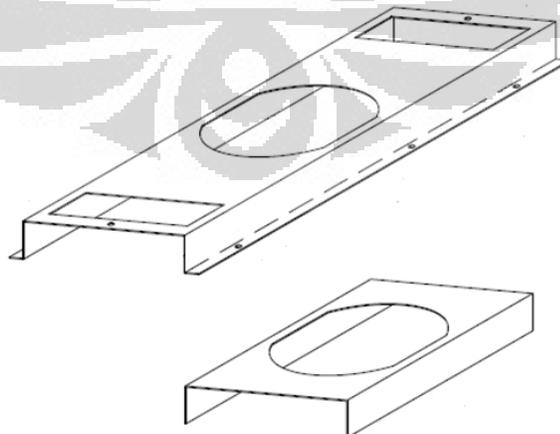
Gambar 3.5 Bentuk dc fan

Sistem pendingin ruangan termoelektrik ini menggunakan dua buah fan (kipas listrik) yang ditempatkan pada sisi panas dan sisi dingin. Fan ini berfungsi sebagai pembuat aliran paksa pada udara sisi panas dan sisi dingin. Fan bekerja pada tegangan 48 volt dengan arah aliran udaranya mendekati sistem.

Pada sisi dingin, fan menyebarkan udara dingin agar proses pendinginan di dalam kabin lebih cepat merata. Sedangkan pada sisi panas, fan berfungsi untuk mendinginkan fan agar panas heatsink tidak terlalu tinggi karena dapat menyebabkan kerusakan pada termoelektrik yang terdapat didalamnya.

3.3.4 Casing

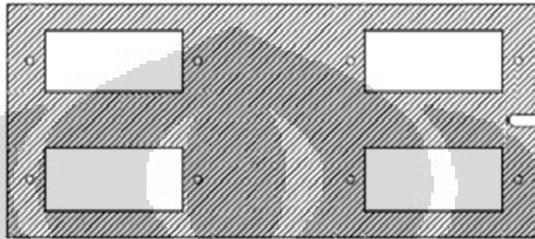
Casing (penutup) berfungsi sebagai pelindung bagian luar sistem dan sebagai pengarah aliran udara. Selain itu juga berfungsi tempat pemegang fan, kotak terminal kabel listrik dan kontrol. Casing ini terbuat dari plat aluminium dengan ketebalan 2 mm, dengan lubang 6 inci sebagai tempat dudukan fan.



Gambar 3.6 Casing panjang dan pendek

3.3.3 Isolator/Gasket

Gasket berfungsi sebagai separator antara heatsink sisi dingin dengan heatsink sisi panas, sehingga suhu panas maupun suhu dingin yang dihasilkan termoelektrik tidak bercampur. Gasket ini terbuat dari spoon dan memiliki konduktivitas termal yang sangat kecil sehingga tidak dapat mengalirkan kalor.



Gambar 3.7 Isolator/gasket

Selain itu gasket juga berfungsi sebagai tempat kabel penghubung termoelektrik dan sebagai pengisi rongga antara termoelektrik satu dengan lainnya. Adanya udara di dalam rongga tersebut dapat mengurangi kinerja sistem, karena dapat menyebabkan perpindahan panas antara heatsink sisi panas dan dingin, sehingga udara tersebut menjadi beban pendinginan sistem.

3.3.6 Thermal Grease

Thermal grease merupakan suatu pasta yang berfungsi sebagai penghantar panas maupun dingin antara termoelektrik dengan heatsink. Cara pemakaiannya dengan dioleskan pada permukaan termoelektrik dan permukaan heatsink bagian dalam yang bersentuhan dengan termoelektrik.

Dalam penyusunan antara heatsink, *bracket*, dan termoelektrik pasti terdapat rongga atau sela-sela berukuran mikro yang dapat menyebabkan tidak meratanya proses transfer kalor antar komponen. Untuk itu diperlukanlah suatu material yang bersifat konduktor dan mampu mengisi celah-celah kosong tersebut. Material yang digunakan berupa pasta dengan daya hantar termal yang tinggi sekaligus memiliki sifat melekatkan sehingga membantu menjaga posisi komponen-komponen yang saling bersentuhan supaya tidak bergeser sewaktu alat dioperasikan.

3.5 Dasar Modifikasi

Modifikasi adalah salah satu cara pengembangan suatu alat. Modifikasi itu sendiri harus memiliki tujuan yang jelas dan tepat guna. Dalam melakukan modifikasi ada beberapa hal yang harus diperhatikan, yaitu:

- 1) Waktu; maksudnya berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk memodifikasi alat tersebut. Jangan sampai terlalu banyak menyita waktu, karena pengujian alat butuh waktu yang tidak sedikit.
- 2) Bentuk; jika akan melakukan modifikasi hendaknya tidak merubah konstruksi dan mekanisme kerja yang ada saat ini agar bisa dicari perbandingan yang cukup nyata.
- 3) Instrumen; bila melakukan penambahan atau pengurangan instrumen hendaknya instrumen yang ditambahkan itu mudah didapat dan harganya murah, sehingga bila terjadi kerusakan dapat dengan mudah digantikan.

Bila semua hal penting di atas diperhatikan dengan baik, diharapkan modifikasi yang dilakukan dapat dikembangkan lebih lanjut untuk mendapatkan hasil yang terbaik dikemudian harinya.

Dalam penelitian ini, dilakukan modifikasi pada DC Cooler yang ada dengan tujuan untuk memperoleh prototipe DC Cooler yang lebih efisien, yaitu mampu menghasilkan suhu ruangan yang lebih dingin dan/atau menyerap energi listrik yang lebih rendah.

3.5.1 Kinerja Sistem Pendingin

Membandingkan kerja suatu sistem pendingin arus searah (dc cooler) berarti bukan membicarakan efisiensi, namun koefisien kinerja/performa (COP). Berdasarkan persamaan (2.15) koefisien performa/kinerja sistem pendingin adalah perbandingan antara panas yang diambil/dipindahkan dari ruang dingin dengan pemakaian usaha.

$$COP = \frac{Q_c}{P_{in}}$$

Q_c = Kalor yang dipindahkan (watt)

P_{in} = Daya input sistem pendingin (watt)

Jadi, untuk meningkatkan COP dapat dilakukan dengan menaikkan jumlah kalor yang dapat dipindahkan dan mengurangi energi yang diserap. Untuk tujuan

ini, kemungkinan modifikasi yang dilakukan dalam penelitian ini dapat diuraikan sebagai berikut.

3.5.2 Heatsink

Heatsink dan fan pada sisi dingin digunakan untuk mempercepat penyerapan panas pada bagian ruangan yang didinginkan. Jenis heatsink yang digunakan adalah heatsink plat bersirip (heatsink extrude). Heatsink dan fan pada sisi panas berfungsi untuk menjaga T_h termoelektrik tidak terlalu tinggi, sehingga T_c yang dicapai dapat menjaga suhu ruang pada kisaran yang dibutuhkan. Karena prinsip kerja termoelektrik menggunakan prinsip ΔT , yaitu:

$$T_c = T_h - \Delta T$$

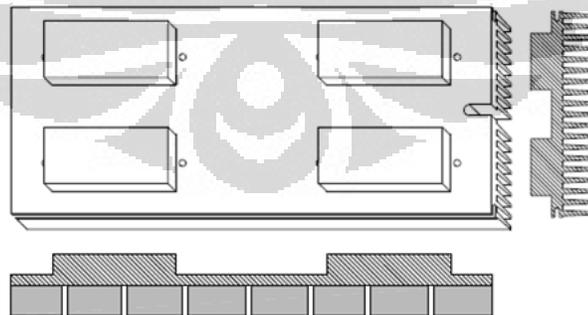
T_c = Suhu sisi dingin

T_h = Suhu sisi panas

ΔT = Beda suhu antara sisi panas dan dingin

Agar dapat mencapai suhu sisi dingin yang minimum, maka suhu pada sisi panasnya harus ditekan serendah mungkin. Untuk itu diperlukan alat penukar kalor berupa heatsink dibantu dengan fan..

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Bambang Yuniyanto, yang menyimpulkan bahwa pada heatsink jenis slot terjadi peningkatan koefisien perpindahan kalor konveksi lebih dari 100% dari pada heatsink extrude. Hal ini dapat dilakukan dengan cara memotong sirip-sirip heatsink extrude tersebut, sehingga menjadi menjadi heatsink jenis slot.



Gambar 3.8 Heatsink Slot

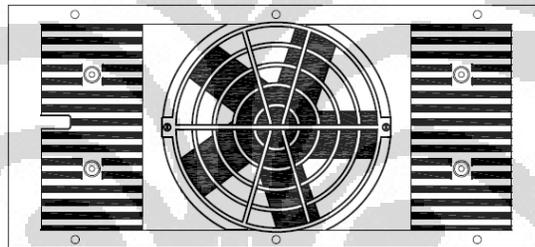
Dalam penelitian ini akan diuji bagaimana kinerja dc cooler yang menggunakan heatsink jenis slot di atas dibandingkan dengan dc cooler yang menggunakan heatsink extrude (Gambar 3.4).

3.5.3 Casing

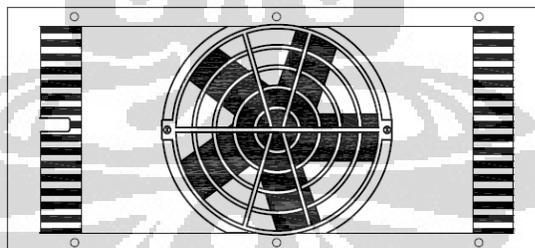
Disamping sebagai tempat dudukan fan dan mengarahkan aliran udara, berdasarkan persamaan perpindahan kalor konveksi (2.3), penggunaan casing ditujukan untuk memperbesar luas permukaan perpindahan kalor (A).

$$q_c = h A \Delta T.$$

Casing yang digunakan untuk menutupi heatsink pada dc cooler awal ini masih pendek, karena tidak menutupi seluruh permukaan heatsink. Hal ini mengakibatkan hembusan udara dari dc fan tidak seluruhnya menyinggung permukaan heatsink (luas permukaan perpindahan kalor berkurang). Berdasarkan persamaan perpindahan kalor diatas, maka ntuk meningkatkan laju perpindahan kalor dapat dilakukan dengan mengarahkan hembusan udara agar seluruhnya menyinggung permukaan heatsink. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan casing panjang, agar luas bidang perpindahan kalor meningkat.



Gambar 3.9 DC Cooler casing pendek



Gambar 3.10 DC Cooler casing panjang

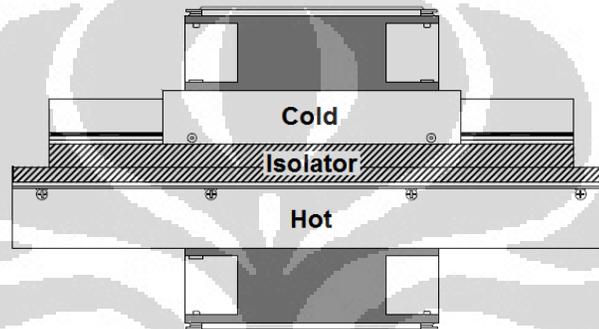
Dalam penelitian ini akan diuji bagaimana kinerja dc cooler yang menggunakan casing pendek dibandingkan dengan dc cooler yang menggunakan casing panjang.

3.5.4 Kipas Arus Searah (DC Fan)

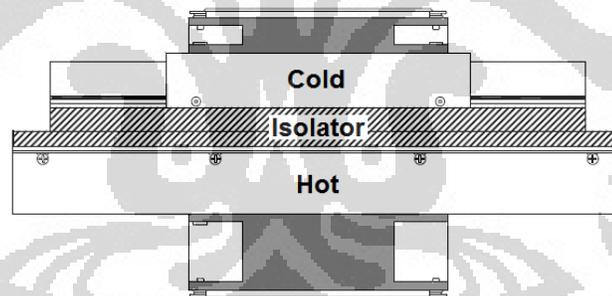
Fan (kipas) adalah faktor pendongkrak performa pendinginan. Kecepatan fan untuk mendinginkan heatsink yang terbaik adalah memiliki ukuran besar

(CFM), putaran yang tinggi (RPM) dan blade yang banyak. Semakin cepat dan besar aliran udara yang dihasilkan akan membuat heatsink lebih cepat di dinginkan. Tetapi rotor yang berputar pada kecepatan tinggi akan menimbulkan suara bising dan panas. Panas itu berasal dari gesekan putaran rotor dan daya yang dipakai oleh fan.

Salah satu komponen dc cooler yang menyerap energi listrik adalah dc fan. Oleh karena itu, untuk meningkatkan efisiensi sistem pendingin dc cooler ini dapat dilakukan dengan menggunakan dc fan berdaya kecil.



Gambar 3.11 DC Cooler fan besar



Gambar 3.12 DC Cooler fan kecil

Dalam penelitian ini akan diuji bagaimana kinerja dc cooler yang menggunakan fan besar dibandingkan dengan dc cooler yang menggunakan fan kecil.

BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA

Setelah proses rancang bangun selesai, kemudian dilakukan pengujian pada dc cooler dan prototipenya. Tujuan pengujian ini adalah untuk mendapatkan data-data yang diperlukan, seperti tegangan dan arus masukan dan perubahan suhu kabin untuk mengetahui kinerja dc cooler dan semua prototipenya.

4.1 Komponen Pengujian dan Parameter yang Diukur.

Untuk mendapatkan data-data yang akurat, maka diperlukan peralatan-peralatan yang menunjang dalam pengukuran. Adapun peralatan ukur yang digunakan adalah sebagai berikut:

- 1) Termometer *Microlite data logger temperature*, digunakan untuk mencatat besarnya suhu tiap menitnya. Dalam penelitian ini termometer tersebut digunakan untuk mengukur suhu dalam kabin dan suhu lingkungan.
- 2) Amperemeter, digunakan untuk mencatat arus yang masuk sistem pendingin arus searah (dc cooler).
- 3) Voltmeter, digunakan untuk mencatat tegangan suplai dc power supply. Dari hasil pengukuran arus dan tegangan ini, nilai daya masukan bisa dihitung.

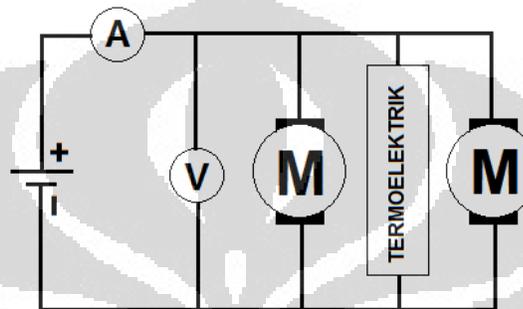
Disamping peralatan ukur diatas, masih ada peralatan pendukung yang menunjang pengujian ini, seperti:

- 1) *DC Power Supply*, digunakan sebagai sumber energi, agar termoelektrik dapat bekerja memompa kalor dan fan bekerja mengalirkan udara.
- 2) Kabin Baterai, digunakan sebagai tempat untuk menguji dc cooler dalam mendinginkan ruangan dalam. Kabin ini terbuat dari plat besi dengan ketebalan 3 mm dan pada bagian dalamnya dilapisi dengan isolator *thermaflex* yang tebalnya 1 cm.
- 3) Lampu pijar 60 watt, sebagai beban pendinginan kabin, digunakan untuk menentukan kapasitas kalor sistem pendingin dc cooler.
- 4) Personal komputer, digunakan untuk menyeting waktu start *Microlite data logger temperature* dan interval waktu pencatatan data suhu kabin, serta dan menyimpan data pencatatan sebagai file komputer.

- 5) Termometer digital NTC, digunakan untuk memantau suhu dalam kabin selama proses pengujian.

4.2 Rangkaian dan Variasi Pengujian

Semua alat yang telah dijelaskan sebelumnya dirangkai menurut rangkaian seperti pada Gambar 4.



Gambar 4.1 Rangkaian pengujian



Gambar 4.2 Instalasi pengujian

Pengujian dan pengambilan data ini dilakukan di workshop PT Berathi Jakarta. Pengambilan data ini akan dilakukan terhadap berbagai variasi prototipe dc cooler yang sudah dirancang sebelumnya, yaitu:

- 1) Heatsink extrude casing pendek & fan besar (dc cooler awal)
- 2) Heatsink extrude casing panjang & fan besar
- 3) Heatsink extrude casing pendek & fan kecil
- 4) Heatsink extrude casing panjang & fan kecil
- 5) Heatsink slot casing pendek & fan besar

4.3 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian ini menjelaskan urutan langkah-langkah yang dilakukan untuk mengaktifkan alat uji. Pada pengujian prototipe ini, tegangan yang diberikan adalah sebesar 48 volt, sama dengan tegangan catu daya yang tersedia di BTS. Setelah prototipe selesai dirakit sesuai dengan variasinya dilakukan pengujian dengan prosedur sebagai berikut:

- 1) Memasang prototipe pada tutup/pintu kotak uji (kabin baterai).
- 2) Menghubungkan kabel *power* sistem pendingin termoelektrik ke *dc power supply* melalui amperemeter dan voltmeter.
- 3) Melakukan set-up (waktu mulai dan interval waktu pencatatan data: 2 menit) terhadap *Microlite data logger temperature*.
- 4) Menempatkan termometer *Microlite data logger temperature* pada titik-titik pengukuran yang telah ditentukan.
- 5) Menempatkan sensor suhu NTC untuk memantau suhu dalam kabin dan ditunggu hingga mendekati suhu lingkungan.
- 6) Setelah semua prosedur diatas dilaksanakan, pintu kabin ditutup dengan rapat.
- 7) Pengambilan data suhu dimulai dengan kondisi awal sistem mati selama lima menit (*data logger* hidup).
- 8) Setelah 5 menit power supply dihidupkan sehingga sistem bekerja.
- 9) Catat waktu, besar tegangan supply dan arus yang mengalir ke sistem, serta penunjukan termometer NTC pada menit ke 5, ke 30, dan menit ke 55.
- 10) Setelah suhu kabin tidak mengalami penurunan yang berarti atau setelah 60 menit, *dc power supply* dimatikan.
- 11) Data yang tercatat dalam *Microlite data logger temperature* dipindahkan dan disimpan ke komputer.
- 12) Mengulangi prosedur 1 s/d 11 untuk melakukan pengujian terhadap prototipe dc cooler variasi yang lain.

4.4 Pengolahan Data

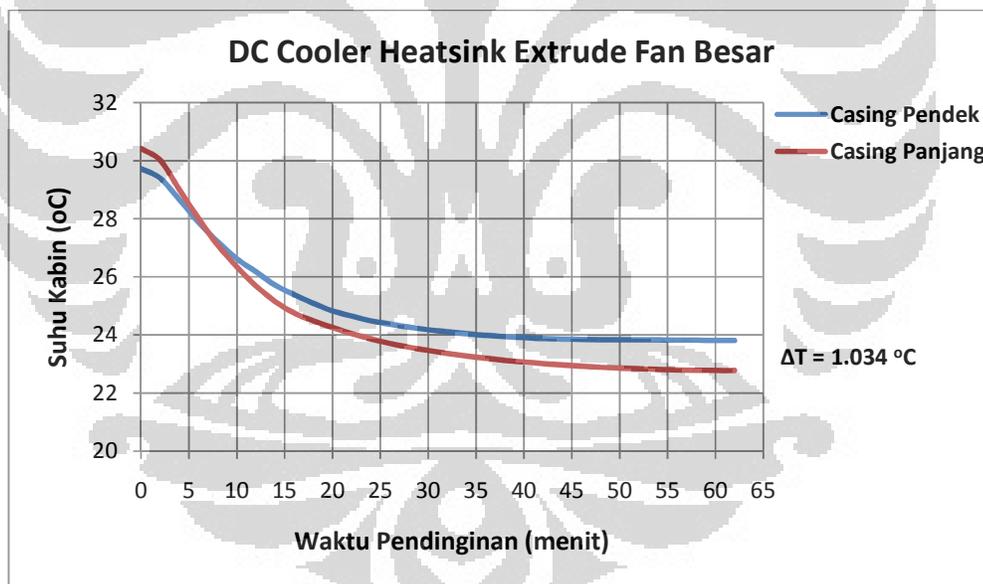
Dari hasil pengujian diperoleh data-data berupa suhu, waktu, tegangan, dan arus, kemudian dilakukan pengolahan data. Dari data yang diperoleh,

dilakukan perhitungan ΔT dan dilakukan koreksi terhadap suhu dalam kabin dengan asumsi suhu lingkungan rata-rata adalah 31°C . Hal ini dilakukan agar dapat lebih mudah dipahami, dibandingkan, dan dianalisis lebih lanjut. Data-data hasil pengukuran dan perhitungan ini dapat dilihat di Lampiran.

4.5 Analisis Perbandingan Grafik Pendinginan Kabin

Pada analisis ini, data-data yang berupa angka tersebut digambarkan dalam bentuk grafik penurunan suhu kabin terhadap waktu pendinginan. Hal ini dilakukan untuk mempermudah analisis kinerja dc cooler. Berikut ini akan disajikan grafik-grafik hasil pengujian beserta analisis perbandingan antara dc cooler awal dengan beberapa dc cooler prototipe.

4.5.1. DC Cooler Heatsink Extrude Fan Besar Variasi Casing



Grafik 4.1 Penurunan suhu kabin oleh dc cooler heatsink extrude fan besar.

Dari Grafik 4.1 dapat dilihat bahwa begitu dc power supply dihidupkan, kedua dc cooler prototipe segera mendinginkan suhu dalam kabin dengan kecepatan dan suhu pendinginan yang berbeda.

DC cooler dengan casing panjang mempunyai kecepatan pendinginan lebih besar (grafik lebih curam) dibandingkan dengan dc cooler dengan casing pendek. Setelah mencapai keadaan tunak (*steady state*), dc cooler yang memakai

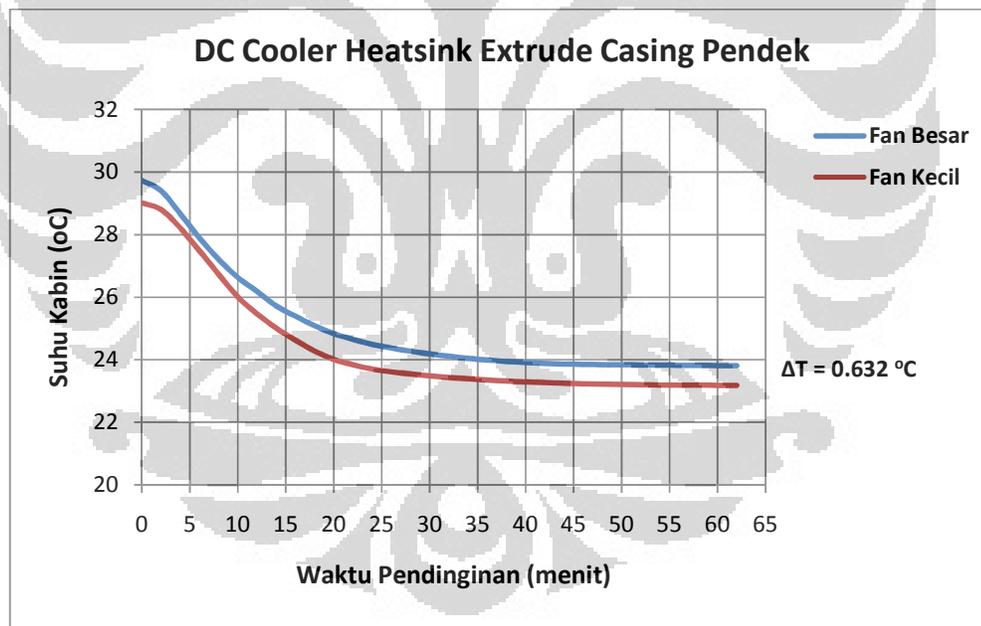
fan besar dan casing panjang menghasilkan beda suhu rata-rata yang lebih rendah ($\Delta T = 1.034 \text{ }^\circ\text{C}$) apabila dibandingkan dengan dc cooler awal yang memakai fan kecil casing pendek.

Hal ini dikarenakan casing panjang yang menutupi permukaan heatsink lebih luas dapat mengarahkan aliran udara ke permukaan heatsink yang lebih luas. Karena luas bidang perpindahan kalor (A) lebih besar, maka berdasarkan persamaan (2.3), maka laju aliran kalor yang dibuang dari kabin lebih besar, sehingga suhu dalam kabin lebih rendah.

$$q_c = h A \Delta T \quad (2.3)$$

Jadi grafik di atas menunjukkan bahwa prototipe dc cooler dengan casing panjang dan fan besar pada sisi dingin mempunyai kinerja yang lebih baik dibandingkan dc cooler awal yang memakai casing pendek dan fan besar.

4.5.2 DC Cooler Heatsink Extrude Casing Pendek Variasi Fan



Grafik 4.2 Penurunan suhu kabin oleh dc cooler heatsink extrude casing pendek.

Dari Grafik 4.2 dapat dilihat bahwa dc cooler modifikasi yang memakai casing pendek dan fan kecil mampu mendinginkan kabin dengan lebih baik. Setelah mencapai keadaan tunak, dc cooler yang memakai casing pendek dan fan kecil ini menghasilkan beda suhu rata-rata yang lebih rendah ($\Delta T = 0.632 \text{ }^\circ\text{C}$)

apabila dibandingkan dengan dc cooler awal yang memakai fan kecil casing pendek.

Kecepatan aliran udara yang lebih rendah yang dihasilkan oleh fan kecil, mengakibatkan koefisien konveksi (h) juga lebih kecil. Oleh karena itu, berdasarkan persamaan (2.3), seharusnya kecepatan pendinginannya lebih kecil dan menghasilkan suhu kabin yang lebih tinggi atau naik. Tetapi hal ini berlawanan dengan hasil pengujian seperti yang ditunjukkan dalam grafik di atas. Meskipun fan kecil menghasilkan aliran udara lebih lambat dan menyebabkan koefisien konveksi lebih kecil, serta laju aliran kalor yang dibuang dari kabin lebih lambat, tetapi suhu kabin justru turun.

Hal ini dikarenakan adanya efek pemanasan yang dihasilkan oleh fan, dimana panas yang dihasilkan fan ini akan meningkatkan suhu kabin. Panas ini timbul sebagai akibat adanya rugi-rugi daya pada motor listrik arus searah yang terdiri dari rugi-rugi tembaga (I^2R), dan rugi-rugi gesekan antara rotor dengan bantalannya. Besarnya rugi-rugi ini bisa dihitung bila efisiensi motor tersebut diketahui, dan nilainya sebanding dengan kapasitas atau daya motor.

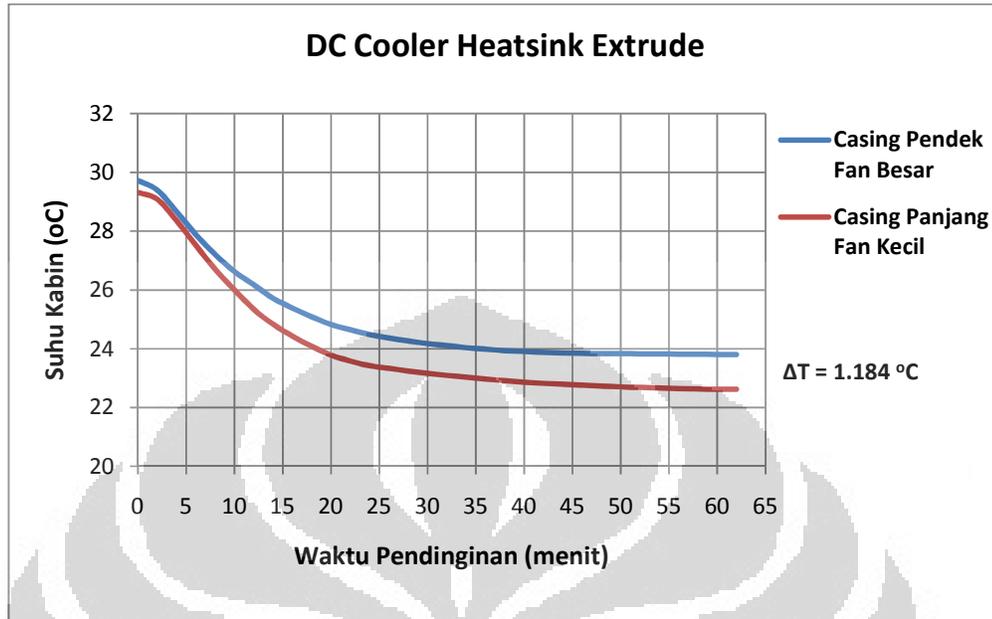
Daya motor yang lebih kecil akan mempunyai rugi-rugi yang lebih kecil juga dan menghasilkan efek pemanasan yang juga lebih kecil. Maka penggunaan dc fan dengan daya lebih kecil akan menghasilkan panas yang lebih kecil, akibatnya kenaikan suhu kabin juga lebih kecil, sehingga penurunan suhu kabin lebih besar dibandingkan dengan pemakaian dc fan dengan daya yang lebih besar.

Bila ditinjau dari ilmu perpindahan kalor, maka dc fan ini berlaku sebagai beban kalor aktif dalam sistem pendingin. Beban kalor aktif adalah kalor yang dilepas oleh peralatan yang didinginkan. Secara umum sama juga dengan daya masukan untuk peralatan. Beban kalor aktif merupakan bagian dari beban pendinginan yang benar-benar menghasilkan kalor. Persamaan umum untuk pelepasan daya beban kalor aktif adalah:

$$Q_{aktif} = I^2R$$

Jadi grafik di atas menunjukkan bahwa prototipe dc cooler yang memakai casing pendek dan fan kecil mempunyai kinerja yang lebih baik apabila dibandingkan dengan kinerja dc cooler awal yang memakai casing pendek dan fan besar.

4.5.3 DC Cooler Heatsink Extrude Variasi Casing dan Fan



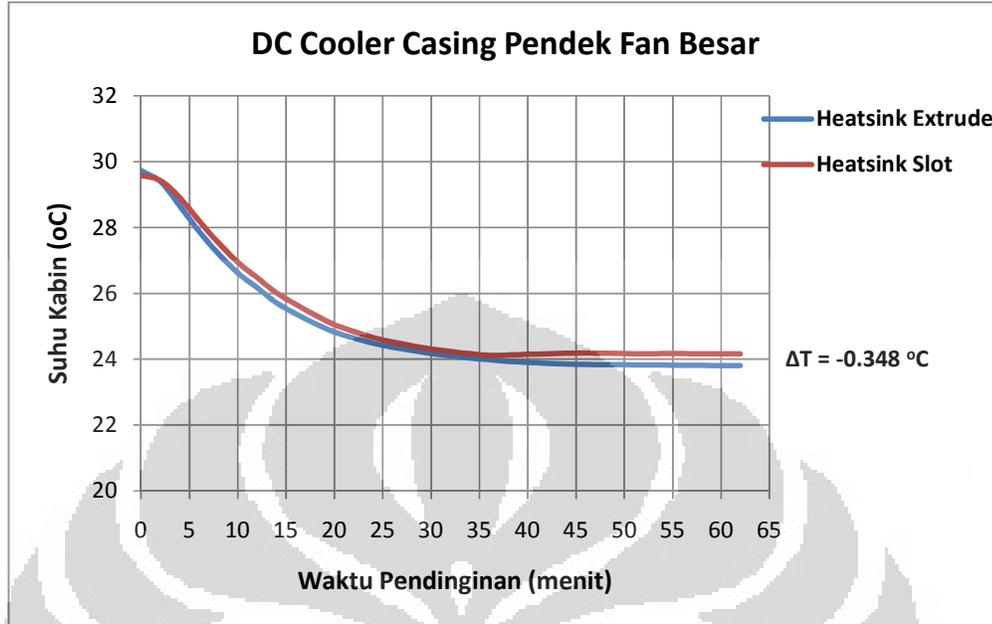
Grafik 4.3 Penurunan suhu kabin oleh dc cooler heatsink extrude

Dari Grafik 4.3 dapat dilihat bahwa dc cooler prototipe yang memakai casing panjang fan kecil pada sisi dingin menghasilkan suhu kabin yang lebih rendah ($\Delta T = 1.184 \text{ }^{\circ}\text{C}$) apabila dibandingkan dengan dc cooler awal yang memakai casing pendek dan fan besar. Prototipe ini tidak lain merupakan kombinasi dengan mengambil keuntungan dari dua prototipe sebelumnya, yaitu dc cooler yang memakai casing panjang (dari Grafik 4.1) dan dc cooler yang memakai fan kecil (dari Grafik 4.2).

Dari ketiga grafik di atas dapat diambil kesimpulan bahwa ditinjau dari aspek pencapaian suhu kabin terendah dapat diperoleh pada prototipe dc cooler extrude yang memakai casing panjang dan fan kecil. Prototipe dc cooler ini mampu mendinginkan kabin sekitar satu derajat lebih rendah dibandingkan dengan dc cooler awal yang memakai casing pendek dan fan besar.

Dan dari ketiga grafik di atas juga dapat ditarik kesimpulan, bahwa kinerja pendinginan kabin paling baik didapatkan pada prototipe dc cooler dengan heatsink extrude yang memakai casing panjang yang menutupi seluruh permukaan heatsink dan fan kecil pada sisi dingin, dengan penurunan suhu kabin sebesar $1.184 \text{ }^{\circ}\text{C}$, bila dibandingkan dengan dc cooler awal..

4.5.4 DC Cooler Casing Pendek Fan Besar dengan Variasi Heatsink



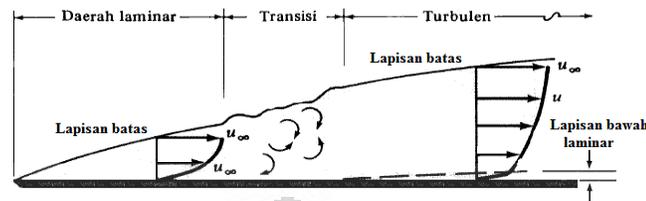
Grafik 4.4 Penurunan suhu kabin oleh dc cooler casing pendek fan besar

Dari Grafik 4.4 di atas dapat dilihat bahwa dc cooler prototipe yang memakai heatsink jenis slot menghasilkan suhu kabin rata-rata yang lebih tinggi ($\Delta T = -0.348 \text{ }^\circ\text{C}$) apabila dibandingkan dengan dc cooler awal yang memakai heatsink extrude. Jadi grafik di atas menunjukkan bahwa prototipe dc cooler dengan heatsink slot ternyata mempunyai kinerja yang lebih rendah bila dibandingkan dengan kinerja dc cooler dengan heatsink extrude.

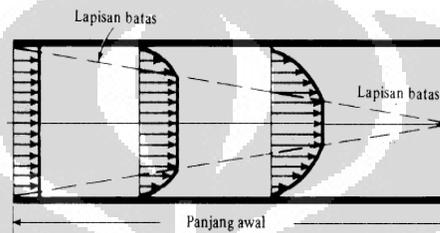
Hasil ini ternyata berlawanan dengan hasil penelitian acuan[1], yang menyatakan bahwa dibandingkan heatsink extrude, penggunaan heatsink slot mampu meningkatkan koefisien perpindahan kalor konveksi (h) dua kali dan laju pendinginan dengan perbedaan suhu akhir pada kecepatan yang sama kurang lebih 1°C . Penjelasan tentang hal ini diuraikan berikut ini.

Karena cara perpindahan energi secara konveksi berkaitan erat dengan gerakan fluida, maka sebelumnya perlu mengetahui mekanisme aliran fluida, apakah aliran fluidanya laminar atau turbulen. Mekanisme aliran fluida bergantung dari medan aliran dan sifat-sifat fluida.[2] Dalam aliran laminar (garis aliran), fluida bergerak teratur dalam lapisan-lapisan dan partikel-partikel fluida mengikuti garis-garis aliran yang tegas. Perpindahan kalor terjadi dengan

konduksi molekuler di dalam fluida maupun pada bidang batas permukaan dan fluida. Tidak terdapat pencampuran energi yang tersimpan di dalam partikel-partikel fluida tersebut melintasi garis aliran.

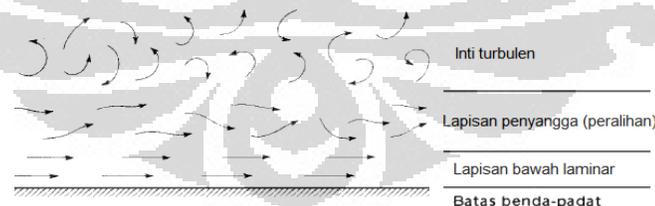


Gambar 4.3 Daerah aliran lapisan batas pada permukaan datar[2]

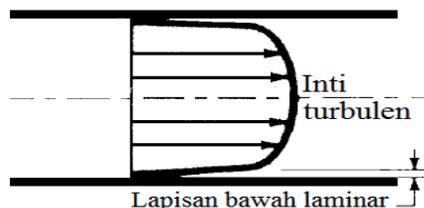


Gambar 4.4 Profil kecepatan aliran laminar dalam saluran[2]

Mekanisme pencampuran aliran turbulen terdiri dari pusaran-pusaran yang berfluktuasi secara cepat, yang mengangkut gumpalan-gumpalan fluida yang bertabrakan secara acak, dan mencampur fluida secara efektif. Pencampurannya terjadi dalam skala makroskopik dengan terangkutnya kelompok-kelompok partikel melintasi fluida. Karena partikel-partikel ini berperan sebagai pembawa energi dan memindahkan energi dengan cara bercampur dengan partikel-partikel lain fluida tersebut, maka laju perpindahan kalor dalam aliran turbulen berkali-kali lebih besar daripada dalam aliran laminar.



Gambar 4.5. Struktur medan aliran turbulen dekat permukaan[1]



Gambar 4.6. Profil kecepatan aliran turbulen dalam saluran[2]

Mekanisme aliran fluida yang digunakan dalam pengujian penelitian acuan[1] adalah aliran laminar. Disamping untuk memperkecil lapisan batas, penggunaan slot pada heatsink juga bertujuan untuk merubah aliran laminar menjadi turbulen. Karena pengujian terhadap heatsink extrude maupun heatsink slot dalam penelitian ini keduanya menggunakan aliran turbulen, maka hasil penelitian acuan[1] tidak akan berlaku untuk penelitian ini. Maka berdasarkan persamaan (2.5), besarnya laju perpindahan kalor konveksi ditentukan oleh luas permukaan bidang perpindahan kalor. Bila diamati, luas permukaan dari heatsink slot lebih kecil dibandingkan heatsink extrude, sehingga laju perpindahan kalornya lebih kecil juga.

$$q_c = h A \Delta T \quad (2.5)$$

Berdasarkan hasil dari analisis perbandingan semua grafik di atas dapat disimpulkan bahwa sistem pendingin dc cooler akan memiliki kinerja yang lebih baik ditinjau dari suhu pendinginan bila menggunakan heatsink extrude, casing panjang yang menutupi seluruh permukaan heatsink dan fan kecil pada sisi dingin.

4.6 Analisis Perbandingan COP (Coefficient of Performance)

Membandingkan kerja suatu sistem pendingin, berarti membicarakan koefisien performa (COP). COP adalah rasio seberapa besar energi kalor yang dipindahkan dibandingkan dengan kerja (energi) yang diberikan. Semakin besar kalor yang dapat dipindahkan dengan sejumlah energi demikian, maka COP semakin tinggi, dan semakin hemat sistem tersebut

Nilai COP adalah jumlah energi termal yang dipindahkan dari sistem ke lingkungan dibagi dengan setiap satuan energi yang dikonsumsi. Perhitungan nilai COP pada sistem pendingin secara garis besar mengikuti persamaan berikut:

$$COP = \frac{Q_c}{P_{in}}$$

$$Q_c = C \Delta T$$

$$Q_c = m C_p \Delta T$$

$$P_{in} = VI$$

Q_c = Beban kalor yang dipindahkan (watt)

P_{in} = Daya input sistem pendingin(watt)

m = Massa beban (kg)

C_p = Kalor spesifik (kalor jenis) beban (J/kgK)

ΔT = Perubahan suhu beban (K)

Untuk mempermudah analisis dalam perhitungan kalor dalam sistem isolasi kabin baterai digunakan asumsi seperti berikut :

- 1) Permukaan dalam dianggap adiabatik
- 2) Keadaan tunak (*steady state*) – satu dimensi
- 3) Tahanan kontak termal antara dinding diabaikan
- 4) Konduktivitas termal tak berubah menurut waktu pendinginan
- 5) Efisiensi dc fan 90%

Langkah-langkah untuk menghitung COP sistem pendingin termoelektrik dc cooler adalah sebagai berikut :

4.6.1 Perhitungan Beban Kalor

4.6.1.1 Kapasitas Kalor

Perhitungan COP yang biasanya dilakukan di industri adalah dengan menentukan besarnya efek pendinginan (*cooling effect*) kemudian dibagi dengan daya listrik masukan. Besarnya efek pendinginan (C) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan kapasitas kalor.

Kapasitas kalor adalah banyaknya kalor yang diserap/dilepaskan untuk menaikkan/menurunkan suhu sebesar 1 °C. Kapasitas kalor dilambangkan dengan C . Untuk menaikkan/menurunkan suhu suatu benda/sistem sebesar ΔT diperlukan kalor sebesar:

$$Q = C \times \Delta T$$

Keterangan:

Q = kalor (Joule atau watt)

C = kapasitas kalor (Joule/°C atau watt/°C)

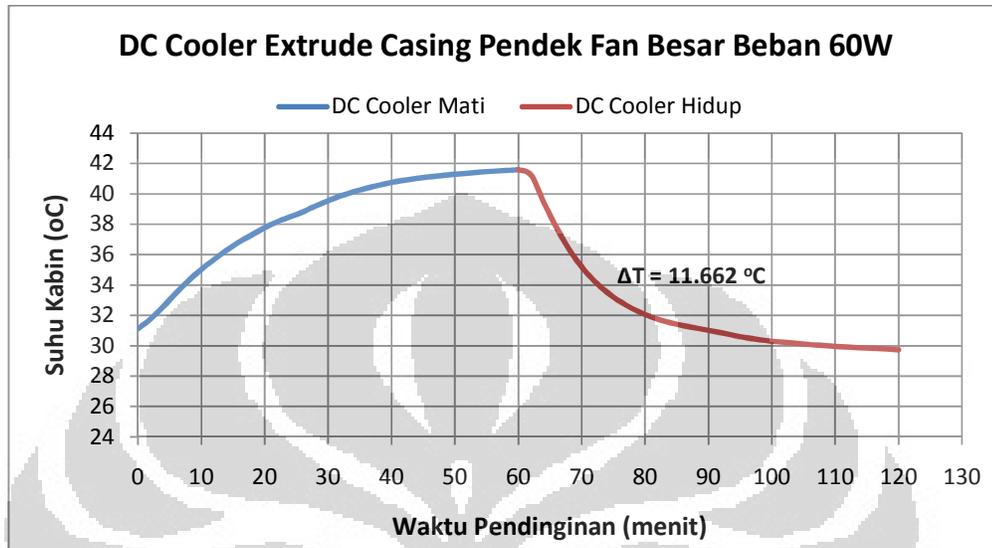
ΔT = perubahan (kenaikan/penurunan) suhu (°C)

Maka kapasitas kalor dapat ditentukan dengan persamaan:

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

Nilai Q dan ΔT dapat ditentukan dari pengujian dc cooler dengan beban elemen pemanas (energi listrik dirubah menjadi energi kalor). Dalam penelitian ini pengujian dilakukan pada dc cooler extrude casing pendek fan besar dengan

beban lampu pijar 60 watt. ΔT adalah besarnya perubahan suhu kabin antara keadaan tanpa beban dan keadaan berbeban. Hasil pengujian ini diperlihatkan dalam Grafik 2.10.



Grafik 4.5 Penurunan suhu kabin oleh dc cooler extrude casing pendek fan besar dengan beban 60 W

Dengan mengambil nilai rata-rata dalam keadaan tunak diperoleh data-data dan berikut:

$$Q = 60 \text{ watt} ; \Delta T = 11.662 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Maka kapasitas kalor sistem ini:

$$C = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{60}{11.662} = 5.145 \text{ watt/}^{\circ}\text{C}$$

Sehingga beban kalor kabin untuk dc cooler extrude casing pendek fan besar dapat dihitung dengan persamaan:

$$Q = C \Delta T$$

$$Q = 5.145 \times 7.43 = 38.227 \text{ watt}$$

4.6.1.2 Beban Motor Fan

Motor yang bekerja memutar baling-baling fan akan menghasilkan panas/kalor sebagai akibat adanya rugi-rugi daya pada motor listrik yang terdiri dari rugi-rugi tembaga (I^2R), rugi-rugi inti (histerisis dan arus-edy), dan rugi-rugi gesekan antara rotor dengan bantalannya. Besarnya rugi-rugi ini bisa dihitung bila

efisiensi motor tersebut diketahui, dan nilainya sebanding dengan daya motor. Dalam penelitian ini diasumsikan efisiensi fan 90%.

Adapun data-data fan yang dipergunakan dalam penelitian ini dan perhitungan beban kalor oleh fan adalah sebagai berikut:

Fan besar $V = 48$ volt

$I = 0.74$ ampere

$$P_{in} = 48 \times 0.74 = 35.52 \text{ watt}$$

$$Q_{fan} = P_{loss} = P_{in}(1 - \eta) = 35.52(1 - 0.9) = 3.552 \text{ watt}$$

Fan kecil $V = 48$ volt

$I = 0.52$ ampere

$$P_{in} = 48 \times 0.52 = 24.96 \text{ watt}$$

$$Q_{fan} = P_{loss} = P_{in}(1 - \eta) = 24.96(1 - 0.9) = 2.496 \text{ watt}$$

4.6.1.3 Beban kalor keseluruhan:

Dengan menganggap dinding kabin adiabatik (tidak ada kalor yang keluar/masuk dalam kabin), maka beban kalor keseluruhan yang dipindahkan dari dalam kabin oleh dc cooler extrude casing pendek fan besar adalah:

$$Q_c = Q + Q_{fan} = 38.227 + 3.552 = 41.779 \text{ watt}$$

4.6.2 Perhitungan Daya Masukan

Untuk menghitung total daya listrik yang diserap oleh dc cooler digunakan persamaan seperti berikut:

$$P_{in} = V I$$

P_{in} = Daya input sistem pendingin(watt)

V = Tegangan listrik (volt)

I = Arus listrik (ampere)

Berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus listrik pada pengujian dc cooler heatsink extrude casing pendek fan besar telah diperoleh:

$$V = 52.8 \text{ volt}$$

$$I = 2.98 \text{ ampere}$$

Maka:

$$P_{in} = V I = 52.8 \times 2.98 = 157.344 \text{ watt}$$

4.6.3 Perhitungan COP

Perhitungan kinerja dc cooler atau nilai COP pada sistem pendingin dc cooler extrude casing pendek fan kecil adalah sebagai berikut:

$$COP = \frac{Q_c}{P_{in}}$$

$$COP = \frac{Q_c}{P_{in}} = \frac{41.779}{157.344} = 0.2612$$

Nilai COP untuk dc cooler prototipe yang lain dapat dihitung dengan langkah-langkah yang sama seperti yang telah dijelaskan di atas. Hasil perhitungannya dapat dirangkum dalam tabel berikut:

Tabel 4.1 Hasil Perhitungan COP DC Cooler

No	DC Cooler Heatsink	Qc (watt)	Pin (watt)	COP
1	Extrude Casing pendek Fan besar	41.779	157.344	0.2612
2	Extrude Casing panjang Fan besar	45.823	157.344	0.2864
3	Extrude Casing pendek Fan kecil	42.699	155.232	0.2705
4	Extrude Casing panjang Fan kecil	45.539	155.232	0.2885
5	Slot Casing pendek Fan besar	38.723	157.344	0.2421

Dari tabel COP di atas, kemudian dilakukan perhitungan besarnya kenaikan efisiensi atau COP dc cooler modifikasi (No: 2,3,4, 5) terhadap dc cooler awal (No: 1) dengan menggunakan persamaan:

$$\Delta COP = \frac{COP_{2,3,4,5} - COP_1}{COP_1} \times 100\% = \left(\frac{COP_{2,3,4,5}}{COP_1} - 1 \right) \times 100\%$$

Hasil perhitungannya dapat dirangkum dalam tabel berikut:

Tabel 4.2 Kenaikan COP terhadap DC Cooler Casing pendek Fan besar

No	DC Cooler	ΔCOP (%)
1	Heatsink Extrude Casing pendek Fan besar	
2	Heatsink Extrude Casing panjang Fan besar	9.68
3	Heatsink Extrude Casing pendek Fan kecil	3.57
4	Heatsink Extrude Casing panjang Fan kecil	10.46
5	Heatsink Slot Casing pendek Fan besar	-7.32

Dari hasil perhitungan pada Tabel 4.2 diatas dapat dilihat bahwa, pada dc cooler yang menggunakan heatsink jenis slot terjadi penurunan kinerja sebesar 7.32 % bila dibandingkan dengan kinerja dc cooler yang menggunakan heatsink extrude.

Dan berdasarkan Tabel 4.2 juga dapat diambil kesimpulan bahwa, prosentase kenaikan kinerja atau kenaikan COP terbesar dapat diperoleh pada prototipe dc cooler yang menggunakan casing panjang dan fan kecil, yaitu sebesar 10.46%.

4.7 Analisis Penghematan Energi

Berdasarkan persamaan COP dapat dijelaskan bahwa semakin besar kalor yang dapat dipindahkan dengan sejumlah energi tertentu, maka COP semakin tinggi, dan semakin hemat sistem tersebut. Demikian juga bila semakin kecil energi yang dibutuhkan untuk memindahkan kalor dari ruang pendinginan sejumlah tertentu, maka COP juga semakin tinggi dan semakin hemat.

4.7.1 Perbandingan Daya Masukan

Besarnya penghematan yang diperoleh dari modifikasi dc cooler awal (heatsink extrude casing pendek fan besar) menjadi dc cooler heatsink extrude casing panjang fan kecil atau heatsink extrude casing pendek fan kecil dapat dihitung sebagai berikut:

DC Cooler awal (heatsink extrude casing pendek fan besar):

$$V = 52.8 \text{ volt} \quad I = 2.98 \text{ ampere}$$

$$P_1 = 157.344 \text{ watt}$$

DC Cooler modifikasi (heatsink extrude casing panjang fan kecil):

$$V = 52.8 \text{ volt} \quad I = 2.94 \text{ ampere}$$

$$P_2 = 155.232 \text{ watt}$$

Karena $P_1 > P_2$, maka $COP_1 < COP_2$

Jadi dc cooler modifikasi lebih hemat dari pada dc cooler awal. Dan besar daya yang dapat dihemat oleh dc cooler modifikasi adalah:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 157.344 - 155.232 = 2.11 \text{ watt}$$

Sehingga selama satu tahun, untuk satu unit dc cooler dapat menghasilkan penghematan energi listrik sebesar:

$$W = P \times t = 2.11 (24 \times 365) = 18.484 \text{ KWH}$$

4.7.2 Perbandingan Kecepatan Pendinginan

Daya masukan pada dc cooler heatsink extrude casing pendek fan besar sama besar dengan daya masukan pada dc cooler heatsink extrude casing panjang fan besar. Untuk menentukan dc cooler mana yang lebih efisien dapat dianalisis dari kecepatan pendinginannya. Hal ini dapat dilakukan dengan mengamati garis kecenderungan (trend line) pada grafik pendinginan kabin.

Dari Grafik 4.1 di atas dapat dilihat, bahwa dc cooler dengan casing panjang mempunyai kecepatan pendinginan lebih besar (grafik lebih curam atau gradien lebih besar) dibandingkan dengan dc cooler yang menggunakan casing pendek. Jadi dc cooler dengan casing panjang lebih hemat dari pada dc cooler dengan casing pendek.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisa data dapat ditarik kesimpulan bahwa dibandingkan terhadap dc cooler awal yang menggunakan heatsink extrude casing pendek dan fan besar, maka pada dc cooler modifikasi dengan:

- 1) Penggunaan casing panjang yang menutupi seluruh permukaan heatsink dapat meningkatkan performa dc cooler, yaitu COP meningkat 9.68 %.
- 2) Penggunaan fan dengan daya lebih kecil dapat meningkatkan performa dc cooler, yaitu COP naik 3.57 %.
- 3) Penggunaan heatsink slot ternyata mengurangi performa dc cooler, yaitu COP menurun 7.32 %.
- 4) Penggunaan casing panjang dan fan kecil dapat menghasilkan kenaikan COP sebesar 10.46 %, dan dapat menghemat energi listrik sebesar 18.5 KWH perunit selama satu tahun.

DAFTAR REFERENSI

1. Kreith, Frank dan Prijono Arko, *Prinsip-prinsip Perpindahan Panas*, Penerbit Erlanga, 1990
2. Holman, J.P., *Heat Transfer*, (SI Metric Edition), McGraw-Hill Book Company, Singapore, 1989
3. Incopera, Frank P., Dewitt, David P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, New York, Fifth Edition: John Wiley and Sons, 2002
4. Bambang Yuniarto, *Pengujian Perpindahan Panas Konveksi pada Heatsink Plat Jenis Extrude dan Heatsink Plat dengan Slot*, Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin ke-9, Palembang, 13-15 Oktober 2010.
5. Nandy P, Aziz O, Idam B, Fery Y, *Penggunaan Hetsink Fan sebagai Pendingin Sisi Panas Elemen Peltier pada Pengembangan Vaccine Carrier*, Jurnal Teknologi, edisi 1 tahun XXI, Maret 2007
6. S.B. Riffat, Xiaoli Ma, *Thermoelectric: a review of present and potential applications*, Journal of Applied Thermal Engineering, 23 (2003) 913-935.
7. S.B. Riffat, S.A. Omer, Xiali Ma (2001), *A novel thermoelectric refrigeration system employing heta pipe and a phase change material: an experience investigation*. Journal of Renewable Energy, 23 (2001) 313-323
8. Abdul Kadir, *ENERGI: Sumber Daya, Inovasi, Tenaga Listrik, Potensi Ekonomi*, cetakan ketiga, 1990, UI-Press
9. Goodfrey, Sara, *An Introduction to Thermoelectric Coolers*, Trenton: Melcor Corporation, 2000
10. Melcor Thermal Solutions, *The Standard in Thermoelectric*, 1999
11. Thermoelectric Handbook
12. www.melcor.com
13. www.heatsink-guide.com
14. www.mit.edu
15. www.kuliselular.com

LAMPIRAN

Data Hasil Pengujian Pendingin Arus Searah (DC Cooler)

HeatsinkExtrude=ShortCasing+BigFan				
Time	Tin (°C)	Tout (°C)	ΔT (°C)	Tin' (°C)
11:00:00	30.3	31.57	1.27	29.73
11:02:00	30	31.6	1.6	29.4
11:04:00	29.31	31.64	2.33	28.67
11:06:00	28.58	31.69	3.11	27.89
11:08:00	27.94	31.73	3.79	27.21
11:10:00	27.4	31.77	4.37	26.63
11:12:00	27	31.82	4.82	26.18
11:14:00	26.15	31.87	5.72	25.72
11:16:00	26.52	31.91	5.39	25.39
11:18:00	26.04	31.95	5.91	25.09
11:20:00	25.82	31.99	6.17	24.83
11:22:00	25.68	32.03	6.35	24.65
11:24:00	25.57	32.08	6.51	24.49
11:26:00	25.47	32.1	6.63	24.37
11:28:00	25.4	32.13	6.73	24.27
11:30:00	25.31	32.13	6.82	24.18
11:32:00	25.26	32.15	6.89	24.11
11:34:00	25.2	32.16	6.96	24.04
11:36:00	25.16	32.17	7.01	23.99
11:38:00	25.13	32.19	7.06	23.94
11:40:00	25.09	32.18	7.09	23.91
11:42:00	25.05	32.17	7.12	23.88
11:44:00	25	32.14	7.14	23.86
11:46:00	24.97	32.12	7.15	23.85
11:48:00	24.94	32.1	7.16	23.84
11:50:00	24.93	32.09	7.16	23.84
11:52:00	24.92	32.09	7.17	23.83
11:54:00	24.93	32.1	7.17	23.83
11:56:00	24.96	32.14	7.18	23.82
11:58:00	24.99	32.17	7.18	23.82
12:00:00	24.37	32.18	7.81	23.81
12:02:00	24.4	32.21	7.81	23.81
	V	52.8 V		
	I	2.98 A		

HeatsinkExtrude=LongCasing+SmallFan				
Time	Tin (°C)	Tout (°C)	ΔT (°C)	Tin' (°C)
12:20:00	30.4	32.08	1.68	29.32
12:22:00	30.2	32.11	1.91	29.09
12:24:00	29.53	32.17	2.64	28.36
12:26:00	28.77	32.25	3.48	27.52
12:28:00	28.03	32.33	4.3	26.7
12:30:00	27.41	32.41	5	26
12:32:00	26.83	32.49	5.66	25.34
12:34:00	26.38	32.55	6.17	24.83
12:36:00	26.06	32.63	6.57	24.43
12:38:00	25.79	32.71	6.92	24.08
12:40:00	25.57	32.79	7.22	23.78
12:42:00	25.44	32.86	7.42	23.58
12:44:00	25.36	32.94	7.58	23.42
12:46:00	25.35	33.02	7.67	23.33
12:48:00	25.32	33.08	7.76	23.24
12:50:00	25.27	33.11	7.84	23.16
12:52:00	25.22	33.13	7.91	23.09
12:54:00	25.17	33.14	7.97	23.03
12:56:00	25.11	33.14	8.03	22.97
12:58:00	25.04	33.13	8.09	22.91
13:00:00	24.95	33.09	8.14	22.86
13:02:00	24.86	33.04	8.18	22.82
13:04:00	24.81	33.02	8.21	22.79
13:06:00	24.75	32.99	8.24	22.76
13:08:00	24.7	32.97	8.27	22.73
13:10:00	24.66	32.96	8.3	22.7
13:12:00	24.63	32.95	8.32	22.68
13:14:00	24.6	32.94	8.34	22.66
13:16:00	24.57	32.93	8.36	22.64
13:18:00	24.55	32.92	8.37	22.63
13:20:00	24.52	32.9	8.38	22.62
13:22:00	24.48	32.86	8.38	22.62
	V	52.8 V		
	I	2.94 A		

HeatsinkExtrude=LongCasing+BigFan				
Time	Tin (°C)	Tout (°C)	ΔT (°C)	Tin' (°C)
14:30:00	30.07	30.65	0.58	30.42
14:32:00	29.68	30.66	0.98	30.02
14:34:00	28.68	30.67	1.99	29.01
14:36:00	27.7	30.69	2.99	28.01
14:38:00	26.81	30.71	3.9	27.1
14:40:00	26.09	30.74	4.65	26.35
14:42:00	25.47	30.78	5.31	25.69
14:44:00	25	30.85	5.85	25.15
14:46:00	24.67	30.92	6.25	24.75
14:48:00	24.47	30.99	6.52	24.48
14:50:00	24.31	31.06	6.75	24.25
14:52:00	24.18	31.14	6.96	24.04
14:54:00	24.08	31.22	7.14	23.86
14:56:00	23.99	31.29	7.3	23.7
14:58:00	23.9	31.33	7.43	23.57
15:00:00	23.83	31.37	7.54	23.46
15:02:00	23.78	31.42	7.64	23.36
15:04:00	23.75	31.48	7.73	23.27
15:06:00	23.72	31.53	7.81	23.19
15:08:00	23.71	31.59	7.88	23.12
15:10:00	23.72	31.66	7.94	23.06
15:12:00	23.72	31.71	7.99	23.01
15:14:00	23.73	31.77	8.04	22.96
15:16:00	23.72	31.8	8.08	22.92
15:18:00	23.72	31.84	8.12	22.88
15:20:00	23.73	31.88	8.15	22.85
15:22:00	23.77	31.94	8.17	22.83
15:24:00	23.8	31.99	8.19	22.81
15:26:00	23.82	32.03	8.21	22.79
15:28:00	23.85	32.07	8.22	22.78
15:30:00	23.87	32.1	8.23	22.77
15:32:00	23.89	32.12	8.23	22.77
	V	52.8 V		
	I	2.98 A		

HeatsinkExtrude=ShortCasing+SmallFan				
Time	Tin (°C)	Tout (°C)	ΔT (°C)	Tin' (°C)
15:50:00	31.13	33.12	1.99	29.01
15:52:00	30.98	33.18	2.2	28.8
15:54:00	30.45	33.24	2.79	28.21
15:56:00	29.76	33.28	3.52	27.48
15:58:00	29.05	33.32	4.27	26.73
16:00:00	28.37	33.36	4.99	26.01
16:02:00	27.88	33.41	5.53	25.47
16:04:00	27.46	33.45	5.99	25.01
16:06:00	27.11	33.49	6.38	24.62
16:08:00	26.83	33.55	6.72	24.28
16:10:00	26.61	33.6	6.99	24.01
16:12:00	26.48	33.64	7.16	23.84
16:14:00	26.37	33.67	7.3	23.7
16:16:00	26.3	33.69	7.39	23.61
16:18:00	26.22	33.68	7.46	23.54
16:20:00	26.15	33.67	7.52	23.48
16:22:00	26.08	33.65	7.57	23.43
16:24:00	26	33.61	7.61	23.39
16:26:00	25.91	33.56	7.65	23.35
16:28:00	25.83	33.51	7.68	23.32
16:30:00	25.74	33.45	7.71	23.29
16:32:00	25.66	33.39	7.73	23.27
16:34:00	25.6	33.35	7.75	23.25
16:36:00	25.52	33.29	7.77	23.23
16:38:00	25.46	33.24	7.78	23.22
16:40:00	25.4	33.19	7.79	23.21
16:42:00	25.35	33.15	7.8	23.2
16:44:00	25.3	33.11	7.81	23.19
16:46:00	25.25	33.06	7.81	23.19
16:48:00	25.21	33.02	7.81	23.19
16:50:00	25.17	32.99	7.82	23.18
16:52:00	25.14	32.96	7.82	23.18
	V	52.8 V		
	I	2.94 A		

HeatsinkSlot=ShortCasing+BigFan				
Time	Tin (°C)	Tout (°C)	?T (°C)	Tin' (°C)
14:25:00	31.24	32.66	1.42	29.58
14:27:00	31.14	32.71	1.57	29.43
14:29:00	30.67	32.76	2.09	28.91
14:31:00	30.04	32.83	2.79	28.21
14:33:00	29.4	32.86	3.46	27.54
14:35:00	28.83	32.88	4.05	26.95
14:37:00	28.38	32.9	4.52	26.48
14:39:00	27.95	32.93	4.98	26.02
14:41:00	27.66	32.99	5.33	25.67
14:43:00	27.37	33.03	5.66	25.34
14:45:00	27.12	33.07	5.95	25.05
14:47:00	26.93	33.09	6.16	24.84
14:49:00	26.78	33.12	6.34	24.66
14:51:00	26.69	33.17	6.48	24.52
14:53:00	26.6	33.19	6.59	24.41
14:55:00	26.5	33.19	6.69	24.31
14:57:00	26.4	33.17	6.77	24.23
14:59:00	26.29	33.12	6.83	24.17
15:01:00	26.2	33.08	6.88	24.12
15:03:00	26.17	33.04	6.87	24.13
15:05:00	26.13	32.98	6.85	24.15
15:07:00	26.06	32.9	6.84	24.16
15:09:00	26	32.82	6.82	24.18
15:11:00	25.93	32.74	6.81	24.19
15:13:00	25.84	32.66	6.82	24.18
15:15:00	25.75	32.58	6.83	24.17
15:17:00	25.66	32.5	6.84	24.16
15:19:00	25.6	32.43	6.83	24.17
15:21:00	25.53	32.36	6.83	24.17
15:23:00	25.46	32.3	6.84	24.16
15:25:00	25.41	32.25	6.84	24.16
15:27:00	25.37	32.21	6.84	24.16
	V	52.8 V		
	I	2.98 A		

Heatsink Extrude=ShortCasing+BigFan+60w DC Cooler Off				
Time	Tin (°C)	Tout (°C)	ΔT (°C)	Tin' (°C)
9:00:00	30.2	30.09	-0.11	31.11
9:02:00	30.86	30.1	-0.76	31.76
9:04:00	31.69	30.11	-1.58	32.58
9:06:00	32.56	30.1	-2.46	33.46
9:08:00	33.38	30.1	-3.28	34.28
9:10:00	34.15	30.12	-4.03	35.03
9:12:00	34.83	30.15	-4.68	35.68
9:14:00	35.46	30.17	-5.29	36.29
9:16:00	36.02	30.18	-5.84	36.84
9:18:00	36.54	30.23	-6.31	37.31
9:20:00	37.02	30.25	-6.77	37.77
9:22:00	37.45	30.28	-7.17	38.17
9:24:00	37.82	30.33	-7.49	38.49
9:26:00	38.17	30.36	-7.81	38.81
9:28:00	38.48	30.28	-8.2	39.2
9:30:00	38.77	30.22	-8.55	39.55
9:32:00	39.04	30.17	-8.87	39.87
9:34:00	39.29	30.15	-9.14	40.14
9:36:00	39.51	30.14	-9.37	40.37
9:38:00	39.72	30.15	-9.57	40.57
9:40:00	39.91	30.15	-9.76	40.76
9:42:00	40.08	30.18	-9.9	40.9
9:44:00	40.24	30.22	-10.02	41.02
9:46:00	40.37	30.25	-10.12	41.12
9:48:00	40.5	30.29	-10.21	41.21
9:50:00	40.63	30.34	-10.29	41.29
9:52:00	40.74	30.38	-10.36	41.36
9:54:00	40.82	30.39	-10.43	41.43
9:56:00	40.89	30.4	-10.49	41.49
9:58:00	40.95	30.41	-10.54	41.54
10:00:00	41.02	30.43	-10.59	41.59

Heatsink Extrude=ShortCasing+BigFan+60w DC Cooler On				
Time	Tin (°C)	Tout (°C)	ΔT (°C)	Tin' (°C)
10:00:00	41.02	30.43	-10.59	41.59
10:02:00	40.7	30.46	-10.24	41.24
10:04:00	38.93	30.49	-8.44	39.44
10:06:00	37.3	30.52	-6.78	37.78
10:08:00	35.91	30.56	-5.35	36.35
10:10:00	34.8	30.61	-4.19	35.19
10:12:00	33.91	30.66	-3.25	34.25
10:14:00	33.22	30.71	-2.51	33.51
10:16:00	32.67	30.75	-1.92	32.92
10:18:00	32.21	30.77	-1.44	32.44
10:20:00	31.85	30.8	-1.05	32.05
10:22:00	31.57	30.82	-0.75	31.75
10:24:00	31.34	30.83	-0.51	31.51
10:26:00	31.15	30.83	-0.32	31.32
10:28:00	30.98	30.82	-0.16	31.16
10:30:00	30.83	30.82	-0.01	31.01
10:32:00	30.69	30.84	0.15	30.85
10:34:00	30.57	30.89	0.32	30.68
10:36:00	30.46	30.94	0.48	30.52
10:38:00	30.38	30.98	0.6	30.4
10:40:00	30.32	31.03	0.71	30.29
10:42:00	30.3	31.07	0.77	30.23
10:44:00	30.26	31.11	0.85	30.15
10:46:00	30.24	31.17	0.93	30.07
10:48:00	30.25	31.23	0.98	30.02
10:50:00	30.26	31.3	1.04	29.96
10:52:00	30.27	31.36	1.08	29.91
10:54:00	30.26	31.4	1.11	29.86
10:56:00	30.27	31.45	1.16	29.82
10:58:00	30.3	31.52	1.22	29.78
11:00:00	30.3	31.57	1.27	29.73