

**PENGARUH BENTUK PENAMPANG TERHADAP
RESISTANSI DAN KENAIKAN SUHU PENGHANTAR**

SKRIPSI

Oleh

MUHAMAD MABRUR

04 03 03 075 6



**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
GENAP 2007/2008**

**PENGARUH BENTUK PENAMPANG TERHADAP
RESISTANSI DAN KENAIKAN SUHU PENGHANTAR**

SKRIPSI

Oleh

MUHAMAD MABRUR

04 03 03 075 6



**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN
PERSYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
GENAP 2007/2008**

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

PENGARUH BENTUK PENAMPANG TERHADAP RESISTANSI DAN KENAIKAN SUHU PENGHANTAR

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau di instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 25 Juni 2008

Muhamad Maburr

NPM 04 03 03 075 6

LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi dengan judul :

PENGARUH BENTUK PENAMPANG TERHADAP RESISTANSI DAN KENAIKAN SUHU PENGHANTAR

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan disetujui untuk diajukan dalam sidang ujian skripsi. Skripsi ini telah diujikan pada sidang ujian skripsi pada tanggal 10 Juli 2008 dan dinyatakan memenuhi syarat/sah sebagai skripsi pada Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, Juli 2008

Dosen Pembimbing,

Dr.Ir. Iwa Garniwa, MT

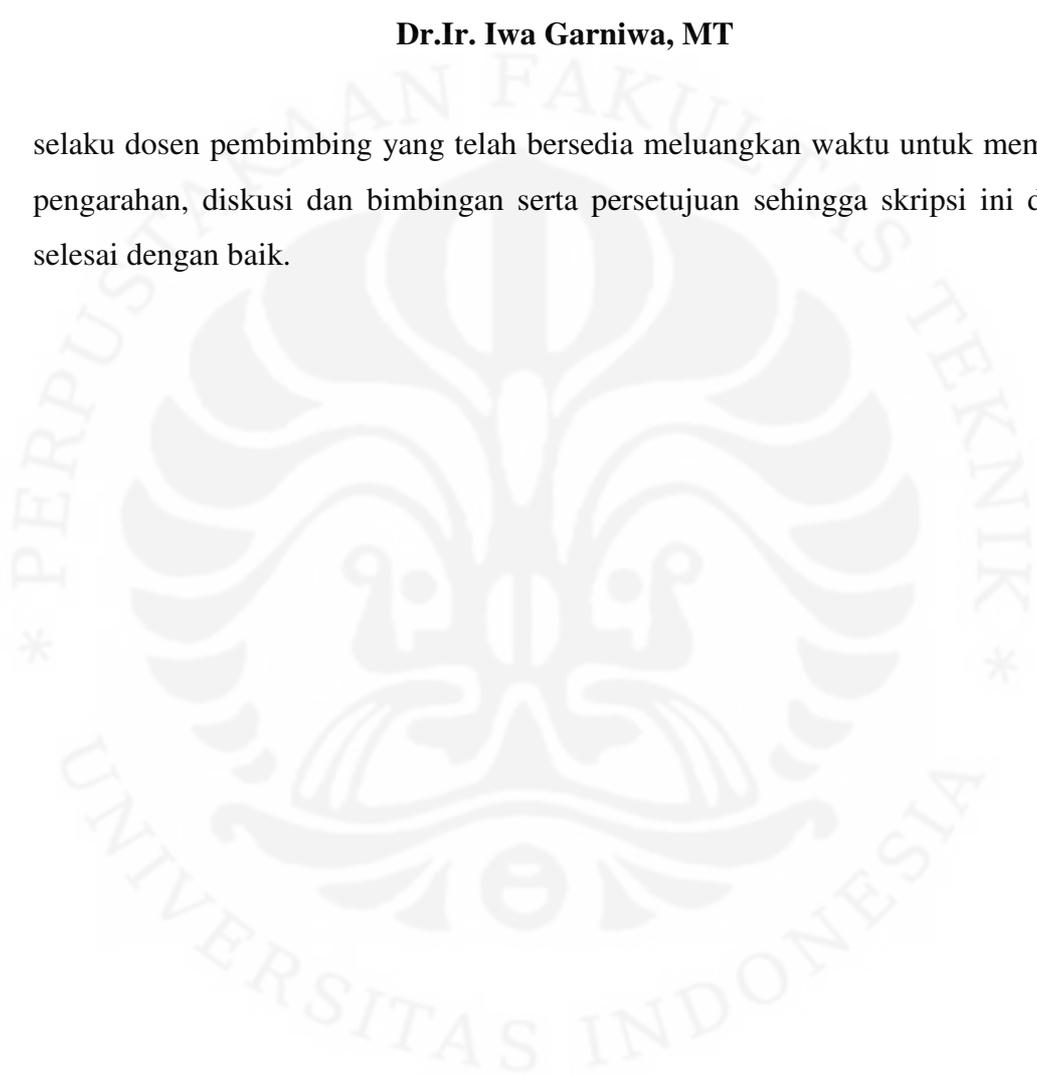
NIP 131 845 377

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

Dr.Ir. Iwa Garniwa, MT

selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi dan bimbingan serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik.



PERPUSTAKAAN FAKULTAS TEKNIK * UNIVERSITAS INDONESIA

PERPUSTAKAAN FAKULTAS TEKNIK * UNIVERSITAS INDONESIA

DAFTAR ISI

SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 TUJUAN PENELITIAN	1
1.3 BATASAN MASALAH	2
1.4 METODOLOGI PENELITIAN	2
1.5 SISTEMATIKA PENULISAN	2
BAB II KARAKTERISTIK LISTRIK PENGHANTAR	4
2.1 KONDUKTOR	4
2.2 ARUS DAN RAPAT ARUS	6
2.3 HAMBATAN	7
2.3.1 Pengaruh temperatur terhadap resistansi	7
2.3.2 <i>Skin effect</i>	9
2.3.3 <i>Eddy current</i>	9
2.4 RESISTIVITAS DAN KONDUKTIVITAS	10
2.5 KARAKTERISTIK TERMAL	12
2.5.1 Kapasitas kalor	12
2.5.2 Muai panas	12
2.5.3 Daya hantar panas	13
BAB III METODE PENGUJIAN DATA	14

3.1	SAMPEL UJI	14
3.1.1	Penghantar dengan penampang bentuk bulat	14
3.1.2	Penghantar dengan penampang bentuk kotak	14
3.1.3	Penghantar dengan penampang bentuk persegi panjang	15
3.1.4	Penghantar dengan penampang bentuk pipih	15
3.2	PENGUJIAN	16
3.2.1	Pengujian nilai resistansi penghantar	16
3.2.2	Pengujian nilai koefisien suhu resistansi penghantar	17
3.2.3	Pengujian kenaikan suhu masing-masing penghantar	20
BAB IV HASIL UJI COBA DAN ANALISIS DATA		22
4.1	SAMPEL UJI	22
4.2	DATA PENGUKURAN	23
4.2.1	Data resistansi penghantar	23
4.2.2	Data pengukuran koefisien suhu resistansi	23
4.2.3	Data pengukuran kenaikan suhu masing-masing penghantar	24
4.3	ANALISA DATA PENGUKURAN	25
4.3.1	Analisa nilai resistansi penghantar	25
4.3.2	Analisa nilai koefisien suhu resistansi penghantar	27
4.3.3	Analisa kenaikan suhu penghantar	28
4.4	ANALISA TAMBAHAN	31
BAB V KESIMPULAN		35
DAFTAR ACUAN		36
DAFTAR PUSTAKA		37

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pita energi pada konduktor	4
Gambar 2.2 Elektron-elektron hanyut di dalam arah yang berlawanan dengan arah medan listrik di dalam sebuah penghantar ^[3]	7
Gambar 3.1 Bentuk penampang bulat dengan jari-jari r	14
Gambar 3.2 Bentuk penampang kotak dengan sisi x	15
Gambar 3.5 Rangkaian pengujian resistansi penghantar	16
Gambar 3.6 Rangkaian pengujian nilai koefisien suhu resistansi	18
Gambar 3.7 Circuit Breaker Test Set (CBTS)	19
Gambar 3.8 Rangkaian pengujian kenaikan suhu penghantar	20
Gambar 4.1 Bentuk penampang penghantar yang diujicobakan	22
Gambar 4.2 Sampel uji berturut-turut dari atas adalah penghantar dengan penampang bentuk I, II, III, IV	23
Gambar 4.3 Grafik perbandingan kenaikan suhu masing-masing penghantar	28
Gambar 4.4 Grafik kenaikan suhu pada penghantar dengan penampang bentuk I	31
Gambar 4.5 Grafik kenaikan suhu pada penghantar dengan penampang bentuk II	31
Gambar 4.6 Grafik kenaikan suhu pada penghantar dengan penampang bentuk III	32
Gambar 4.7 Grafik kenaikan suhu pada penghantar dengan penampang bentuk IV	32

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai resistivitas beberapa logam pada 20°C ^[1]	5
Tabel 2.2 Nilai koefisien temperatur tahanan pada konduktor tembaga dan alumunium	8
Tabel 2.3 Sifat-sifat pada beberapa logam yang digunakan sebagai penghantar ^[5]	11
Tabel 2.4 Nilai konduktivitas listrik dari beberapa logam	12
Tabel 4.1 Hasil pengukuran hambatan penghantar	23
Tabel 4.2 Hasil pengujian percobaan kedua	23
Tabel 4.3 Hasil pengukuran kenaikan suhu masing-masing penghantar	24
Tabel 4.4 Perbandingan resistansi keempat penghantar dengan penghantar berpenampang bulat sebagai acuan	26
Tabel 4.5 Nilai koefisien suhu resistansi keempat penghantar	28
Tabel 4.6 Selisih penurunan suhu pada akhir percobaan untuk semua penghantar	32
Tabel 4.7 Selisih nilai arus pada awal dan akhir pengukuran	33

Muhamad Maburr
NPM 04 03 03 075 6
Departemen Teknik Elektro

Dosen Pembimbing
Dr.Ir. Iwa Garniwa, MT

PENGARUH BENTUK PENAMPANG TERHADAP RESISTANSI DAN KENAIKAN SUHU PENGHANTAR

ABSTRAK

Penghantar adalah salah satu instrumen penting dalam bidang kelistrikan yang digunakan sebagai penghubung antara sumber daya dengan pusat beban. Banyak kriteria yang digunakan dalam pemilihan penghantar yang akan digunakan untuk instalasi listrik seperti bahan dasar penghantar, nilai resistansi, hingga dimensi penghantar. Satu hal yang kurang menjadi perhatian adalah bentuk penampang yang dimiliki oleh penghantar tersebut. Sejauh ini penghantar konvensional berpenampang bulat/lingkaran masih mendominasi pilihan ini.

Makalah ini akan mencoba membandingkan nilai karakteristik listrik yang dihasilkan oleh penghantar dengan bentuk penampang lainnya, tentunya dalam dimensi luas penampang yang sama, dengan penampang konvensional berpenampang bulat. Nilai karakteristik listrik yang dibandingkan antara lain nilai resistansi serta pengaruhnya terhadap suhu.

Dari percobaan yang dilakukan diperoleh kesimpulan bahwa perbedaan bentuk penampang tidak membawa perubahan yang signifikan pada nilai resistansi penghantar. Bentuk penampang berpengaruh pada besarnya luas permukaan penghantar. Dengan luas yang sama, semakin pipih penghantar maka akan semakin besar pula luas penampangnya. Hal ini berpengaruh besar pada kenaikan suhu yang dialami konduktor.

Kata kunci : Bentuk Penampang Penghantar, Tahanan, Temperatur.

Muhamad Mabur
NPM 04 03 03 075 6
Electrical Engineering Department

Counselor
Dr.Ir. Iwa Garniwa, MT

CROSS-SECTION SHAPE INFLUENCE ON CONDUCTOR RESISTANCE AND TEMPERATURE INCREASEMENT

ABSTRACT

Conductor is one of the most important instruments in electrical field use to connect between the power source and the load. There are a lot of criteria which is being used in choosing the right conductor for the electrical installation like the conductor material, resistance, until the dimension of the conductor. One thing that paying less attention is the cross-section shape of the conductor. So far the conventional conductor with round cross-section shape is still dominating the option.

This paper will try to compare the electrical characteristic being produced by non-round cross-section shape, of course in the same cross-section area, and round cross-section shape conductor. The electrical characteristic which is being compared is the resistance and the effect on temperature.

The test shows that that the cross-section shape difference does not give any different result significantly to the resistance of the conductor. Cross-section shape has a great influence in the surface area. In the same wide, the thinner the conductor, the bigger the surface area. This matter greatly influences the temperature incensement in the conductor.

Keywords: Conductor Cross-section Shape, Resistance, Temperature.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Penghantar adalah salah satu instrumen penting dalam bidang kelistrikan yang digunakan sebagai penghubung antara sumber daya dengan pusat beban. Banyak kriteria yang digunakan dalam pemilihan penghantar yang akan digunakan untuk instalasi listrik seperti bahan dasar penghantar, nilai resistansi, hingga dimensi penghantar. Satu hal yang kurang menjadi perhatian atau diabaikan dalam pemilihan ini adalah bentuk penampang yang dimiliki oleh penghantar tersebut. Sejauh ini penghantar konvensional berpenampang bulat/lingkaran masih mendominasi pilihan ini. Padahal selain bentuk bulat, penampang penghantar dapat dibentuk dalam bentuk apapun.

Untuk mengetahui apakah penghantar dengan bentuk penampang non-bulat dapat digunakan pada instalasi listrik rumah, terlebih dahulu harus diketahui nilai karakteristik listrik yang dihasilkannya. Apakah unjuk kerjanya lebih baik atau malah lebih buruk daripada penghantar konvensional?

Pada skripsi ini akan diteliti sejauh mana bentuk penampang pada suatu penghantar akan berpengaruh pada unjuk kerja penghantar itu sendiri. Bentuk-bentuk yang akan diujicoba pada percobaan ini antara lain bentuk penampang persegi, persegi panjang dan pipih, dengan penampang bulat sebagai acuan.

1.2 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membandingkan karakteristik listrik yang dihasilkan suatu kabel yang memiliki bentuk penampang yang berbeda-beda. Bentuk penampang kabel yang diteliti pada makalah adalah kabel berpenampang persegi, persegi panjang, dan pipih dengan kabel berpenampang bulat sebagai acuan.

1.3 BATASAN MASALAH

Yang menjadi batasan masalah pada makalah ini antara lain:

- Penghantar bulat yang diteliti dan dijadikan acuan adalah penghantar berdiameter 4 mm yang diperuntukkan untuk keperluan instalasi rumah.
- Penelitian yang dilakukan hanya sebatas karakteristik listrik dari masing-masing jenis kabel.
- Karakteristik listrik yang diteliti antara lain resistansi, pengaruh resistansi terhadap suhu, dan pola kenaikan suhu yang dihasilkan masing-masing jenis kabel.
- Dalam perhitungan, nilai hambatan akibat *skin effect* dan *eddy current* diabaikan.
- Pada percobaan kalibrasi alat tidak dilakukan dan besarnya toleransi error alat mencapai 5%.

1.4 METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dilakukan untuk mengetahui karakteristik listrik yang dihasilkan pada tiap kabel yang memiliki bentuk penampang yang berbeda untuk kemudian diteliti hasilnya berdasarkan teori yang ada. Semua pengujian pada skripsi ini dilakukan di Laboratorium Tegangan Tinggi dan Pengukuran Listrik Departemen Teknik Elektro FTUI.

1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

Skripsi ini dibagi menjadi 5 bab yang diawali dengan bab 1 yang berisi latar belakang penulisan skripsi, tujuan penulisan, batasan masalah yang diambil, metode penelitian yang digunakan dan sistematika penulisan skripsi ini.

Bab 2 berisi dasar teori, terutama mengenai penghantar/konduktor dan karakteristik listrik yang dimilikinya, yang digunakan untuk mendukung analisa yang akan dilakukan.

Pada bab 3 terdapat penjelasan dari metode penelitian yang telah dilakukan. Penjelasan tersebut antara lain mengenai alat-alat dan perlengkapan yang digunakan, persiapan yang dilakukan pra-pengujian hingga jalannya percobaan.

Kemudian pada bab 4 terdapat data hasil penelitian, pengolahan data dan analisa data tersebut. Analisa yang dilakukan sebatas perbandingan karakteristik listrik yang dihasilkan oleh masing-masing sampel uji.

Terakhir pada bab 5 akan disajikan kesimpulan yang didapat dari skripsi ini.

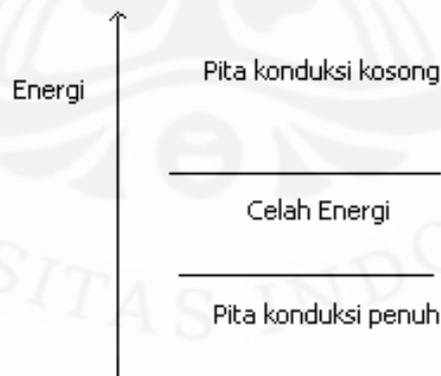


BAB II

KARAKTERISTIK LISTRIK PENGHANTAR

2.1 KONDUKTOR

Di dalam sebuah bahan padat, atom-atom berada saling berdekatan antara yang satu dengan yang lainnya, mengandung lebih banyak elektron dan dapat memiliki tingkatan energi diskrit yang lebih tinggi karena gaya tarik-menarik antara atom-atom yang bersebelahan. Nilai-nilai energi yang dimiliki oleh elektron dikelompokkan menjadi “pita-pita” energi di mana setiap pita adalah sekumpulan tingkat energi diskrit berjumlah banyak dan berdekatan. Elektron dengan tingkat energi tertinggi disebut dengan elektron valensi dan menduduki pita energi yang dinamakan pita valensi, sedangkan elektron bebas berkumpul pada pita konduksi. Antara kedua pita ini terdapat celah energi yang menghalangi elektron valensi untuk dapat pindah ke pita konduksi. Bila celah energi yang dimiliki oleh suatu bahan sangat kecil sehingga hanya diperlukan sedikit energi yang diperlukan bagi elektron valensi untuk dapat terbebas, maka bahan tersebut dapat dikategorikan sebagai konduktor.



Gambar 2.1 Pita energi pada konduktor

Konduktor adalah salah satu instrumen penting dalam bidang kelistrikan yang digunakan untuk menghantarkan arus dari sumber daya ke pusat beban. Pertimbangan dasar dalam pemilihan penghantar yang akan digunakan untuk instalasi listrik adalah penghantar tersebut dapat menghantarkan arus dengan

secara efisien dan ekonomis. Secara umum bahan-bahan yang dipakai untuk konduktor harus memenuhi persyaratan-persyaratan sebagai berikut :

- Konduktivitasnya cukup baik
- Kekuatan mekanisnya (kekuatan tarik) cukup tinggi
- Koefisien muai panjangnya kecil
- Modulus kekenyalannya (modulus elastisitas) cukup besar

Bahan-bahan yang biasa digunakan sebagai konduktor, antara lain :

- Logam biasa seperti tembaga, alumunium, besi, dll
- Logam campuran (alloy) adalah tembaga atau alumunium yang diberi campuran dalam jumlah tertentu dari logam jenis lainnya guna menaikkan kekuatan mekanisnya.
- Logam paduan (composite) yaitu dua jenis logam atau lebih yang dipadukan dengan cara kompresi, peleburan, atau pengelasan.

Ada beberapa logam yang memiliki nilai resistivitas yang rendah atau memiliki nilai konduktivitas yang tinggi yang biasa digunakan dalam pembuatan kabel. Contoh beberapa logam tersebut dapat dilihat pada tabel 2.1.

Dilihat dari nilai resistivitas dan harga bahan tersebut, maka logam tembaga dan alumunium menjadi pilihan paling masuk akal untuk dijadikan sebagai penghantar. Ini pula yang menjadi sebab mengapa tembaga dan alumunium mendominasi pasar penghantar secara global.

Tabel 2.1 Nilai resistivitas beberapa logam pada 20oC [1]

Metal	Ohm-mm ² /m x 10 ⁻⁸
Perak	1.629
Tembaga	1.741-1.814
Alumunium	2.803
Sodium	4.3
Nikel	7.8

Tembaga yang digunakan sebagai penghantar umumnya adalah tembaga dengan kemurnian 99.9% dengan tahanan jenis tidak melebihi 0.017241 ohm mm²/m pada suhu 20°C. Ketidakmurnian pada tembaga akan berpengaruh pada

daya hantar tembaga itu sendiri. Misalnya campuran besi 0.02% akan dapat meningkatkan tahanan jenis tembaga kurang dari 10%. Sedangkan aluminium yang digunakan sebagai penghantar memiliki kemurnian setidaknya sebesar 99.5% dengan tahanan jenis sebesar $0.028264 \text{ ohm mm}^2/\text{m}$ pada suhu 20°C [2].

2.2 ARUS DAN RAPAT ARUS

Elektron-elektron bebas di dalam sebuah penghantar logam, seperti suatu panjang dari kawat tembaga, berada di dalam gerakan sembarang seperti halnya molekul-molekul sebuah gas yang dibatasi dalam tabung. Jika ujung-ujung kawat penghantar tersebut dihubungkan ke sebuah sumber tegangan seperti baterai, maka akan timbul sebuah medan listrik di setiap titik di dalam kawat penghantar tersebut. Jika perbedaan potensial yang dipertahankan oleh baterai adalah 12 V dan jika kawat tersebut (yang dianggap uniform) memiliki panjang 2 m, maka kekuatan medan di tiap titik akan sama dengan 2 V/m. Medan E ini akan bekerja pada elektron dan akan memberikan suatu gerak resultan pada elektron-elektron tersebut di dalam arah E. Dalam hal ini kita mengatakan bahwa sebuah arus listrik i dihasilkan. Jika sebuah muatan q melewati suatu penampang penghantar selama waktu t , maka arus (yang dianggap konstan) adalah:

$$i = q/t \dots\dots\dots(2.1)$$

Jika banyaknya muatan yang mengalir per satuan waktu tidak konstan, maka arus akan berubah dengan waktu dan diberikan oleh limit diferensial, atau:

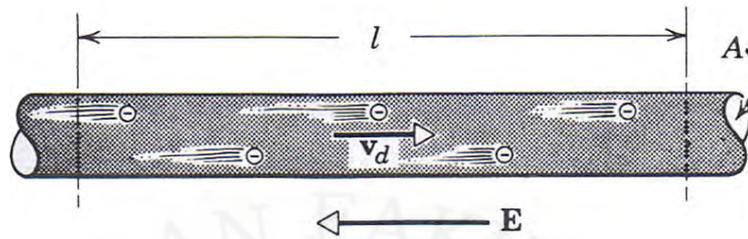
$$i = \frac{dq}{dt} \dots\dots\dots(2.2)$$

Arus i adalah sama untuk semua penampang penghantar, walaupun luas penampang mungkin berbeda pada titik-titik yang berbeda.

Arus i merupakan ciri (karakteristik) khas dari suatu penghantar. Arus tersebut adalah sebuah kuantitas makroskopik seperti massa, volume atau panjang. Sebuah kuantitas makroskopik yang dihubungkan dengan itu adalah rapat arus (*current density*) j . Rapat arus tersebut adalah sebuah vektor dan merupakan ciri dari sebuah titik di dalam penghantar dan bukan merupakan ciri penghantar secara keseluruhan. Jika arus tersebut didistribusikan secara uniform pada sebuah penghantar yang luas penampangnya A seperti nampak pada gambar

berikut, maka besarnya rapat arus untuk semua titik pada penampang tersebut adalah:

$$j = i/A$$



Gambar 2.2 Elektron-elektron hanyut di dalam arah yang berlawanan dengan arah medan listrik di dalam sebuah penghantar [3]

2.3 HAMBATAN

Jika kita memberikan perbedaan potensial yang sama di antara ujung-ujung dari beberapa penghantar yang memiliki geometri yang serupa, maka akan dihasilkan arus yang berbeda-beda. Karakteristik (sifat) penghantar yang menyebabkan hal ini adalah hambatannya. Kita dapat mendefinisikan hambatan dari suatu penghantar (R) sebagai hasil pembagian beda potensial yang dimilikinya (V) dengan arus yang melalui penghantar tersebut (i), atau dapat dirumuskan sebagai:

$$R = \frac{V}{i} \dots\dots\dots(2.3)$$

Jika V dinyatakan dalam volt dan i dinyatakan dalam ampere, maka hambatan akan dinyatakan dalam ohm (Ω).

2.3.1 Pengaruh temperatur terhadap resistansi

Resistansi pada beberapa bahan konduktor (terutama pada bahan logam murni) akan bertambah seiring peningkatan temperturnya. Perubahan resistivitas penghantar per satuan perubahan temperatur dinamakan koefisien temperatur tahanan dari bahan, dan dinyatakan dengan α . Tahanan dari konduktor akan berubah sesuai dengan perubahan temperatur sesuai dengan persamaan :

$$R_t = R_0 (1 + \alpha_0 t) \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana : R_t = adalah tahanan dari konduktor pada $t^\circ\text{C}$

PERPUSTAKAAN FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA

PERPUSTAKAAN FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA

- R_o = Tahanan dari konduktor pada saat 0°C
- α_o = Koefesien temperature dari tahanan per °C pada 0°
- t = Temperatur °C

Jika temperatur suatu penghantar meningkat dari suhu $t^\circ\text{C}$ menjadi $T^\circ\text{C}$, maka resistansi pada saat suhu $T^\circ\text{C}$ (RT) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$R_t = R_i(1 + \alpha_i(T - t)) \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana α_t adalah koefesien temperatur dari tahanan per°C pada $t^\circ\text{C}$ dan hubungan dengan α_0 akan mempunyai hubungan sebagai berikut:

$$\alpha_t = \alpha_0 / (1 + \alpha_0 t) \dots\dots\dots(2.6)$$

Hal ini berarti bahwa tahanan pada temperatur $T^\circ\text{C}$ dapat dihitung bila tahanan pada $t^\circ\text{C}$ diketahui. Berikut adalah nilai koefisien temperatur tahanan untuk konduktor tembaga dan alumunium pada beberapa suhu tertentu.

Tabel 2.2 Nilai koefisien temperatur tahanan pada konduktor tembaga dan alumunium

Konduktor	Koefisien temperatur tahanan ($\times 10^{-3}$)						
	α_0	α_{20}	α_{25}	α_{50}	α_{75}	α_{80}	α_{100}
Cu 100%	4.27	3.93	3.85	3.52	3.25	3.18	2.99
Cu 97.5%	4.15	3.83	3.76	3.44	3.16	3.12	2.93
Al 61%	4.38	4.03	3.95	3.60	3.30	3.25	3.05

Selain dari luar, panas pada penghantar juga dapat muncul karena adanya rugi-rugi daya pada penghantar itu sendiri. Besarnya rugi-rugi daya pada suatu penghantar dapat ditentukan oleh rumus

$$P = i^2 R \dots\dots\dots(2.7)$$

- Dimana P = rugi-rugi daya
- i = arus
- R = tahanan

Jadi semakin besar arus dan tahanan yang digunakan semakin besar pula besarnya rugi-rugi daya yang dihasilkan yang berarti semakin besar pula panas yang dapat dihasilkan.

2.3.2 Skin effect

Dalam sebuah rangkaian ac, bagian tengah dari sebuah konduktor akan memiliki fluks magnet yang lebih besar dibandingkan dengan bagian dekat permukaan. Hal ini membuat induktansi pada bagian tengah konduktor membesar dan membuat kerapatan arusnya lebih kecil bila dibandingkan dengan bagian dekat permukaan. Dengan kerapatan arus yang lebih tinggi ini arus akan cenderung mengalir melalui bagian dekat permukaan, hal inilah yang disebut dengan *skin effect*.

Pada frekuensi 60 Hz, fenomena ini dapat diabaikan pada penghantar tembaga dengan ukuran #2 AWG dan lebih kecil dan pada penghantar aluminium dengan ukuran #1/0 AWG dan lebih kecil ^[4]. Rumus ini dapat digunakan untuk memberikan pendekatan nilai skin effect yang terjadi pada frekuensi 60 Hz

$$Y_{CS} = \frac{11.18}{R_{dc}^2 + 8.8} \dots\dots\dots(2.8)$$

Di mana Y_{CS} = resistansi skin effect
 R_{dc} = tahanan dc

Untuk kabel yang beroperasi pada frekuensi yang lebih tinggi perlu dilakukan evaluasi ulang karena penggunaan frekuensi tersebut dapat menyebabkan jatuh tegangan yang lebih besar daripada yang telah diantisipasi akibat meningkatnya reaktansi induksi. Untuk frekuensi selain 60 Hz, perlu dikalikan lagi dengan faktor koreksi yang besarnya

$$x = 0.027678\sqrt{f/R_{dc}} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana f = frekuensi (Hz)
 R_{dc} = tahanan dc

2.3.3 Eddy current

Arus eddy (arus pusar) tercipta ketika konduktor melewati sebuah magnet statis atau ketika ada perubahan medan magnet yang memotong permukaan konduktor statis. Pusaran arus terjadi pada konduktor karena elektron mengalami gaya lorentz yang tegak lurus dengan arah mereka akibat adanya medan magnet.

Semakin besar dan semakin cepat medan magnet yang digunakan, semakin besar pula nilai arus eddy yang dihasilkan. Selain itu semakin tebal suatu bahan dan rendahnya nilai resistivitas juga akan memperbesar nilai arus eddy yang dihasilkan. Maka dari itu, arus eddy dapat diperlemah dengan memperlemah dan memperlambat medan magnet, serta menggunakan bahan dengan nilai resistivitas yang lebih tinggi. Penggunaan bahan dengan nilai resistivitas yang lebih tinggi tentu akan membawa kerugian tersendiri sehingga penggunaan penghantar berbentuk lembaran-lembaran tipis menjadi salah satu pilihan untuk mengurangi nilai arus eddy.

2.4 RESISTIVITAS DAN KONDUKTIVITAS

Sesuatu yang dihubungkan dengan hambatan adalah resistivitas ρ yang dapat diartikan sebagai hambatan antara dua permukaan paralel yang saling berlawanan dalam sebuah penghantar. Hubungannya dengan resistansi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$R = \rho \frac{l}{A} \dots\dots\dots(2.10)$$

- dimana :
- R adalah resistansi dari bahan (Ohm (Ω))
 - ρ adalah resistivitas bahan (ohm-m)
 - L adalah panjang dari penghantar (m)
 - A adalah luas penampang penghantar (m^2)

Untuk bahan-bahan isotropik, resistivitas juga dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\rho = \frac{E}{j} \dots\dots\dots(2.11)$$

Tinjau sebuah penghantar berpenampang bulat yang memiliki luas A dan panjang l yang mengangkut sebuah arus i yang tetap. Bila kita beri beda potensial V dan jika penampang-penampang bulat pada tiap ujung penghantar adalah merupakan permukaan-permukaan ekipotensial, maka medan listrik dan rapat arus akan konstan untuk semau titik di dalam penghantar dan akan memiliki nilai-nilai:

$$E = \frac{V}{l} \quad \text{dan} \quad j = \frac{i}{A} \dots\dots\dots(2.12)$$

Maka resistivitas ρ dapat ditulis sebagai berikut:

$$\rho = \frac{E}{j} = \frac{V/l}{i/A} \dots\dots\dots(2.13)$$

Tabel berikut memberikan daftar sifat-sifat listrik untuk logam-logam yang lazim dikenal.

Tabel 2.3 Sifat-sifat pada beberapa logam yang digunakan sebagai penghantar ^[5]

Logam	Resistivitas (pada 20°C) 10 ⁻⁸ ω.m	Temperatur Koefisien Resistivitas α per °C (x10 ⁻³)
Perak	1.6	3.8
Tembaga	1.7	3.9
Alumunium	2.8	3.9
Tungsten	5.6	4.5
Nikel	6.8	6
Besi	10	5
Baja	18	3
Karbon	3500	-50

Untuk tabel di atas, misalkan nilai koefisien α untuk alumunium adalah $3.9 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Ini berarti nilai resistivitas alumunium akan bertambah sebesar 0.039 persen untuk kenaikan temperatur sebesar 1°C pada suhu awal 20°C. Perhatikan bahwa nilai koefisien α untuk karbon bertanda negatif, yang berarti bahwa resistivitasnya akan berkurang seiring dengan kenaikan suhu.

Koefisien temperatur tahanan α memiliki hubungan dengan resistivitas ρ sesuai dengan rumus berikut:

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \dots\dots\dots(2.14)$$

Konduktivitas adalah sifat daya hantar listrik dari suatu material dan merupakan kebalikan dari resistivitas, atau tahanan jenis penghantar; dimana konduktivitas σ didefinisikan sebagai :

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \dots\dots\dots(2.15)$$

PERPUSTAKAAN FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA

PERPUSTAKAAN FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA

Konduktivitas menyatakan kemudahan suatu material untuk meneruskan arus listrik. Satuan konduktivitas adalah Ωm^{-1} (ohm meter)⁻¹. Konduktivitas merupakan sifat listrik yang diperlukan dalam berbagai pemakaian sebagai penghantar tenaga listrik; dan sebagaimana diketahui mempunyai rentang harga yang sangat luas. Logam/material yang merupakan penghantar listrik yang baik memiliki konduktivitas listrik yang baik dengan orde $10^7 \Omega\text{m}^{-1}$. Sebaliknya material isolator memiliki konduktivitas yang sangat rendah; yaitu antara 10^{-10} sampai $10^{-20} \Omega\text{m}^{-1}$. Diantara kedua sifat ekstrim tersebut, ada material semi konduktor yang konduktivitasnya berkisar antara 10^{-6} sampai dengan $10^{-4} \Omega\text{m}^{-1}$. Berikut adalah beberapa nilai konduktansi dari beberapa logam yang lazim ditemui.

Tabel 2.4 Nilai konduktivitas listrik dari beberapa logam

Logam	Konduktivitas listrik dalam ohmmeter
Perak	$6,8 \times 10^7$
Tembaga	$6,0 \times 10^7$
Alumunium	$3,8 \times 10^7$
Kuningan	$1,6 \times 10^7$
Besi	$1,0 \times 10^7$
Baja	$0,6 \times 10^7$

2.5 KARAKTERISTIK TERMAL

2.5.1 Kapasitas kalor

Kapasitas kalor (*heat capacity*) dapat dijelaskan pula sebagai perubahan kandungan kalor per °C. Pada tabel teknik seringkali tercatat panas jenis untuk menggantikan nilai kapasitas kalor. Panas jenis dari suatu bahan adalah perbandingan antara kapasitas kalor bahan tersebut dengan kapasitas kalor air. Besarnya kapasitas kalor air sendiri adalah 1 kal/g °C atau 4.184 joule/g °C.

2.5.2 Muai panas

Panas yang diberikan pada suatu bahan dapat meningkatkan getaran termal atom-atom yang berujung pada pemuaian pada bahan tersebut. Besarnya

pemuaian panjang yang terjadi pada suatu bahan dapat ditentukan oleh rumus berikut:

$$\Delta L = L \cdot \alpha_l \cdot \Delta T \dots\dots\dots(2.16)$$

- Di mana
- L = panjang awal bahan
 - ΔL = pertambahan panjang bahan
 - α_l = koefisien muai linear
 - ΔT = pertambahan suhu

Bila pemuaian panjang terjadi ke segala arah, maka akan terjadi pemuaian volume pada bahan tersebut. Besarnya pemuaian volume yang terjadi pada suatu bahan memiliki hubungan yang serupa dengan persamaan di atas dengan perubahan volume ΔV dari volume awal V dengan koefisien muai volume α_v . Besarnya nilai koefisien muai volume adalah 3 kali besar koefisien muai panjang.

2.5.3 Daya hantar panas

Daya hantar panas (*thermal conductivity*) adalah kemampuan suatu bahan untuk menghantarkan panas secara merata ke seluruh bagian bahan. Koefisien daya hantar panas k adalah konstanta yang menghubungkan aliran panas Q dengan gradien suhu $\Delta T/\Delta x$ sesuai persamaan:

$$Q = k \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \dots\dots\dots(2.17)$$

BAB III

METODE PENGUJIAN DATA

3.1 SAMPEL UJI

Percobaan ini bertujuan untuk melihat apakah ada perbedaan pada karakteristik listrik bila suatu penghantar diubah bentuk penampangnya. Untuk itu diperlukan beberapa buah penghantar yang memiliki bentuk penampang yang berbeda-beda. Pada percobaan ini disediakan empat buah sampel yang masing-masing berbeda bentuk penampangnya.

3.1.1 Penghantar dengan penampang bentuk bulat

Penghantar konvensional dengan bentuk penampang bulat yang memiliki diameter 4 mm dan panjang 1 m. Dalam percobaan ini penghantar ini dijadikan acuan perbandingan karakteristik listrik yang dihasilkan oleh penghantar dengan bentuk penampang lainnya. Untuk selanjutnya penghantar ini akan disebut penghantar dengan bentuk penampang I.



Gambar 3.1 Bentuk penampang bulat dengan jari-jari r

3.1.2 Penghantar dengan penampang bentuk kotak

Penampang dengan bentuk penampang kotak yang memiliki empat sisi yang sama panjang. Penghantar ini dibuat dari penghantar bulat biasa agar menyerupai bentuk kotak yang diinginkan dengan menggunakan mesin. Bentuk penampang penghantar ini dibuat sedemikian rupa agar tetap memiliki luas penampang yang sama dengan penghantar berpenampang bulat sehingga diharapkan terjadi perbandingan yang seimbang di antara keduanya. Jadi bila penghantar konvensional dengan jari-jari 2 mm memiliki luas πr^2 , maka

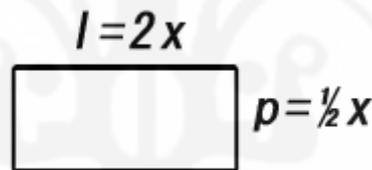
besarnya sisi x pada penampang bentuk kotak agar memiliki luas yang sama adalah $r\sqrt{\pi}$. Untuk selanjutnya penghantar ini akan disebut penghantar dengan bentuk penampang II.



Gambar 3.2 Bentuk penampang kotak dengan sisi x

3.1.3 Penghantar dengan penampang bentuk persegi panjang

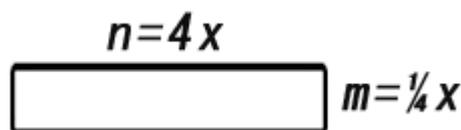
Penghantar dengan bentuk penampang persegi panjang dengan panjang p dan lebar l . Besarnya nilai p diusahakan sedemikian rupa agar memiliki nilai $\frac{1}{2}x$ sehingga lebarnya memiliki nilai $2x$. Untuk selanjutnya penghantar ini akan disebut penghantar dengan bentuk penampang III.



Gambar 3.3 Penampang bentuk persegi panjang dengan panjang p dan lebar l

3.1.4 Penghantar dengan penampang bentuk pipih

Penghantar dengan bentuk penampang pipih yang dimaksud di sini adalah penampang dengan bentuk persegi panjang yang memiliki panjang m dan lebar n . Besarnya nilai m diusahakan sedemikian rupa agar memiliki nilai $\frac{1}{4}x$ sehingga lebarnya memiliki nilai $4x$. Untuk selanjutnya penghantar ini akan disebut penghantar dengan bentuk penampang IV.



Gambar 3.4 Bentuk penampang persegi panjang dengan panjang m dan lebar n

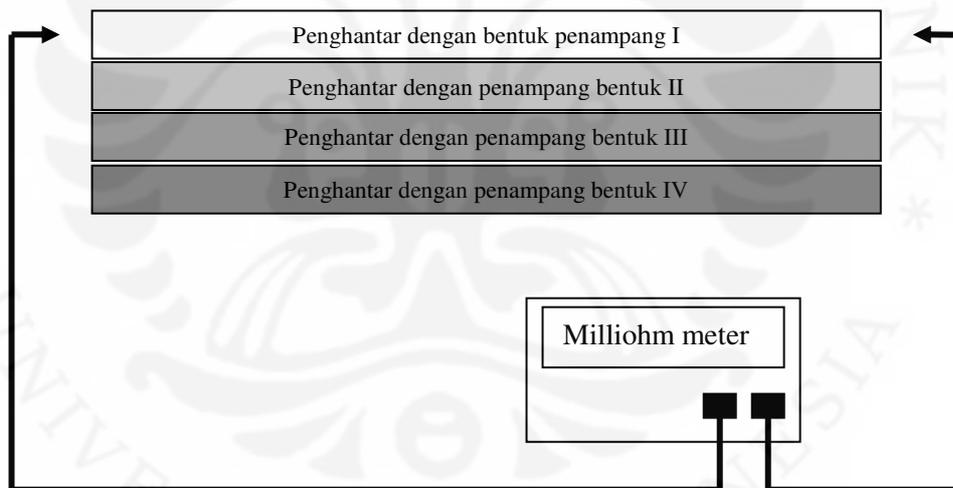
Semua sampel yang akan diuji dibuat dari bahan tembaga campuran yang sama dan masing-masing memiliki panjang 1 m. Untuk keakuratan data, tiap penghantar dibuat sebanyak tiga buah.

3.2 PENGUJIAN

Semua pengujian yang dilakukan untuk semua percobaan ini dilakukan di Labolatorium Tegangan Tinggi dan Pengukuran Listrik (LTTPL) yang berada di lantai II gedung elektro.

3.2.1 Pengujian nilai resistansi penghantar

Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan nilai resistansi penghantar per meter. Alat yang digunakan untuk mengukur besarnya resistansi penghantar ini adalah miliohm meter yang terdapat pada LTTPL. Berikut adalah rangkaian skematik pengukuran resistansi penghantar.



Gambar 3.5 Rangkaian pengujian resistansi penghantar

Ada beberapa persiapan yang harus dilakukan sebelum pengujian ini dilakukan, antara lain:

- Menyamakan suhu yang dimiliki penghantar yang akan diuji dengan suhu ruangan tempat percobaan dilakukan. Kontrol suhu ruangan dapat dilakukan dengan menggunakan *Air Conditioner* (AC). Hal ini dilakukan untuk mengurangi pengaruh lingkungan terhadap hasil percobaan.

- Agar pengukuran nilai resistansi lebih akurat, semua penghantar yang akan diuji diletakkan mengambang di atas meja percobaan dengan menggunakan balok tumpuan.
- Mengecek semua peralatan dan perlengkapan yang dibutuhkan dalam pengujian seperti miliohm meter dan form pengisian data.

Setelah persiapan selesai maka langkah selanjutnya adalah menguji nilai resistansi penghantar. Langkah-langkah pengujian yang dilakukan adalah:

1. Menyiapkan penghantar yang akan diuji pada meja percobaan.
2. Memasang kabel terminal miliohm meter pada kedua ujung penghantar.
3. Menyalakan miliohm meter.
4. Mencatat nilai resistansi penghantar yang tertera pada miliohm meter.
5. Mematikan miliohm meter setelah pencatatan selesai dilakukan.
6. Mengulangi langkah 1 s.d 5 untuk penghantar lainnya.

3.2.2 Pengujian nilai koefisien suhu resistansi penghantar

Pengujian ini dilakukan untuk mencari nilai koefisien suhu resistansi penghantar yang nantinya akan digunakan dalam perhitungan nilai resistansi pada percobaan selanjutnya. Percobaan ini didasarkan pada rumus (2.5) dimana besarnya nilai resistansi akan meningkat seiring meningkatnya suhu:

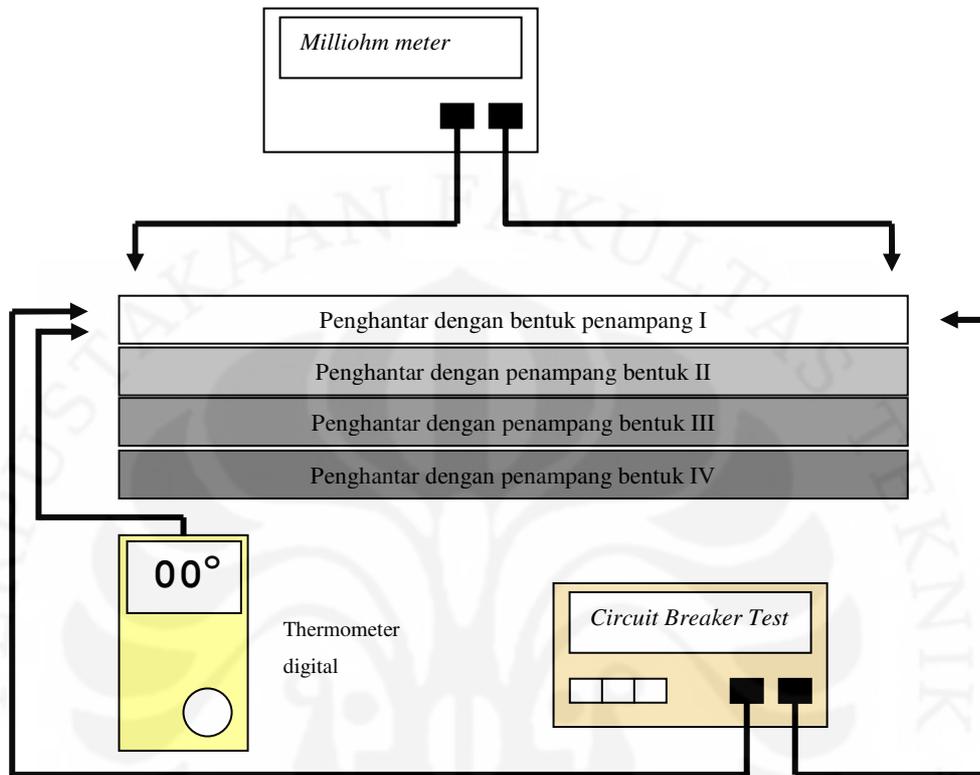
$$R_{t_2} = R_{t_1} (1 + \alpha(t_2 - t_1))$$

Di mana

R_{t_1}	= hambatan penghantar pada suhu awal t_1 °C
R_{t_2}	= hambatan penghantar pada suhu akhir t_2 °C
t_1	= suhu awal pengukuran
t_2	= suhu akhir pengukuran
α	= nilai koefisien suhu resistansi

Jadi dalam percobaan ini akan dicari besarnya nilai resistansi awal dengan suhu awal yang telah ditetapkan sebelumnya dan nilai resistansi akhir pada suhu maksimum yang didapat dari percobaan. Nanti dari data yang diketahui, nilai koefisien α akan dicari dengan menggunakan rumus di atas.

Percobaan ini dilakukan dengan menggunakan miliohmmeter, termometer digital, clamp dan *circuit breaker test set*. Berikut adalah rangkaian pengujian nilai koefisien suhu resistansi penghantar:



Gambar 3.6 Rangkaian pengujian nilai koefisien suhu resistansi

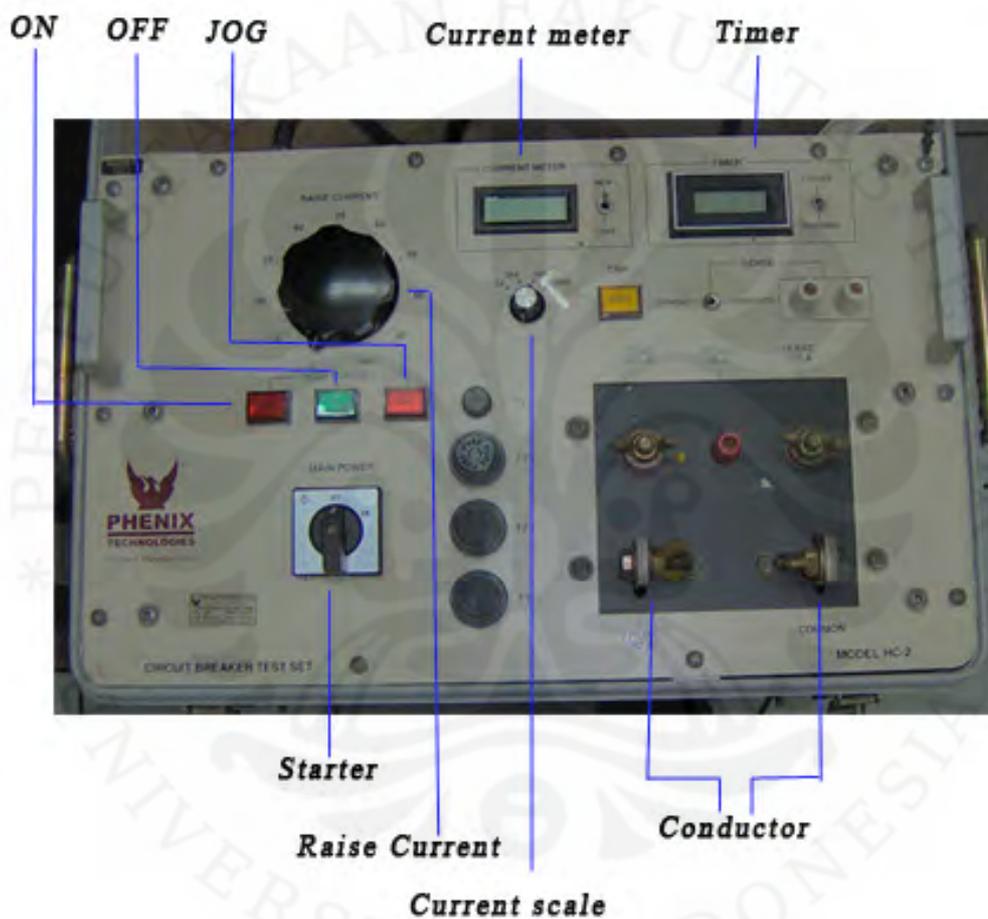
Beberapa persiapan yang dilakukan sebelum percobaan dimulai antara lain:

- Suhu dijaga agar berada pada suatu nilai tertentu, dalam hal ini nilainya harus sama dengan suhu awal pengujian ketiga, karena nilai koefisien akan berbeda-beda untuk tiap suhu.
- Mengecek semua peralatan dan perlengkapan yang dibutuhkan dalam pengujian.

Setelah persiapan selesai maka langkah selanjutnya adalah menguji nilai resistansi penghantar. Langkah-langkah pengujian yang dilakukan adalah:

1. Menyiapkan penghantar pada meja percobaan.

2. Menyusun peralatan pengujian seperti tertera pada gambar rangkaian pengujian di atas.
3. Menyalakan miliohm meter dan termometer digital terlebih dahulu.
4. Mencatat nilai suhu awal dan besar resistansi penghantar pada suhu tersebut.
5. Menyalakan *Circuit Breaker Test Set* (CBTS). Berikut adalah gambar CBTS yang digunakan pada percobaan ini.



Gambar 3.7 Circuit Breaker Test Set (CBTS)

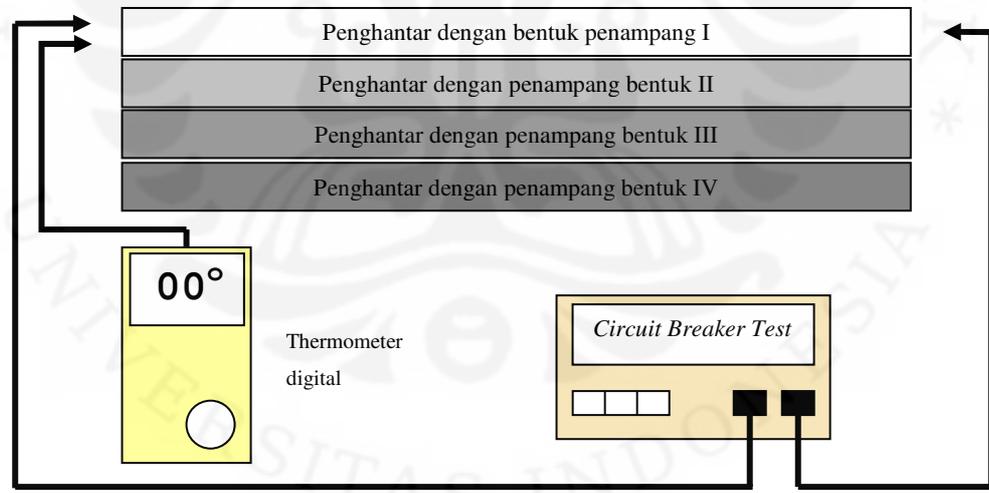
Langkah-langkah berikut dapat dilakukan untuk menggunakan alat tersebut pada percobaan ini.

- a. Menyambungkan penghantar dengan konduktor yang ada pada alat dengan menggunakan kabel yang telah disediakan oleh alat.
- b. Memutar starter dari posisi OFF ke posisi ON untuk mulai menggunakan alat.

- c. Mengatur besarnya arus yang akan digunakan dengan memutar *current scale* dan *raise current*. Pemutaran dilakukan sambil menekan tombol ON dan JOG secara bersamaan.
 - d. Besarnya arus yang dikeluarkan alat akan terlihat pada *current meter* dan pada LCD *timer* akan terlihat lama waktu penggunaan alat.
 - e. Pencatatan data dapat mulai dilakukan.
 - f. Setelah selesai tekan tombol OFF untuk mematikan alat dan putar kembali starter ke posisi OFF.
6. Tunggu hingga suhu penghantar stabil.
 7. Catat nilai suhu stabil penghantar dan besar hambatan pada suhu tersebut.
 8. Ulangi langkah di atas untuk penghantar lainnya.

3.2.3 Pengujian kenaikan suhu masing-masing penghantar

Percobaan ini dilakukan untuk melihat pola kenaikan suhu yang terjadi pada masing-masing penghantar. Berikut adalah rangkaian pengujian kenaikan suhu penghantar:



Gambar 3.8 Rangkaian pengujian kenaikan suhu penghantar

Beberapa persiapan yang dilakukan sebelum pengujian dilakukan sama seperti pada percobaan sebelumnya. Sedangkan langkah-langkah yang dilakukan untuk percobaan ini adalah:

1. Menyiapkan peralatan dan sampel uji yang akan digunakan pada percobaan.

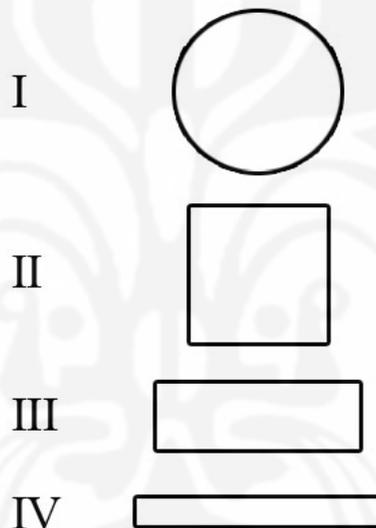
2. Merangkai peralatan seperti gambar 3.8 di atas.
3. Mengukur dan mencatat nilai suhu awal penghantar.
4. Menyalakan CBTS dan menset alat agar mengalirkan arus dengan besar tertentu. Untuk percobaan ini digunakan arus sebesar 40A.
5. Mencatat besarnya suhu penghantar dengan interval 10 s.
6. Pencatatan dilakukan hingga suhu pada penghantar stabil pada nilai tertentu.
7. Mematikan alat.
8. Mengulangi langkah 1 s.d 7 untuk penghantar lainnya.

BAB IV

HASIL UJI COBA DAN ANALISIS DATA

4.1 SAMPEL UJI

Sampel uji yang digunakan pada percobaan ini terdiri dari empat macam yaitu empat buah penghantar dengan panjang ± 1 meter yang terbuat dari tembaga campuran yang masing-masing memiliki bentuk penampang yang berbeda-beda. Bentuk penampang yang akan diuji dalam percobaan ini adalah bentuk bulat, kotak, persegi dan pipih dengan penghantar berpenampang bulat sebagai acuan.



Gambar 4.1 Bentuk penampang penghantar yang diujicobakan

Seperti telah dijelaskan sebelumnya pada bab III, untuk penghantar dengan bentuk penampang II, III. Dan IV dibentuk dari penghantar berpenampang bulat yang merupakan penghantar dengan diameter 4mm , sehingga diharapkan terjadi perbandingan yang seimbang di antara keempat bentuk tersebut. Kemudian keempat sampel tersebut dibuat dalam tiga set untuk memperbanyak sampel sehingga diharapkan data yang didapat nantinya akan menjadi lebih akurat

Berikut adalah gambar keempat sampel penghantar yang berhasil dibuat dan akan diujicobakan pada percobaan ini:



Gambar 4.2 Sampel uji berturut-turut dari atas adalah penghantar dengan penampang bentuk I, II, III, IV

4.2 DATA PENGUKURAN

4.2.1 Data resistansi penghantar

Dari percobaan yang dilakukan didapat data-data berupa nilai resistansi dari semua penghantar yang akan diuji. Besarnya nilai resistansi dari masing-masing penghantar tersebut dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4.1 Hasil pengukuran hambatan penghantar

Konduktor	R set 1 (mΩ)	R set 2 (mΩ)	R set 3 (mΩ)
Bentuk I	47.5	47.6	47.5
Bentuk II	47.8	47.5	47.6
Bentuk III	48.0	48.0	48.0
Bentuk IV	48.6	48.6	48.2

4.2.2 Data pengukuran koefisien suhu resistansi

Pengukuran koefisien suhu resistansi hanya dilakukan pada sampel penghantar dari masing-masing bentuk penampang yang memiliki nilai resistansi mendekati rata-rata resistansi dari penghantar dengan bentuk penampang masing-masing. Pengukuran dilakukan mulai pada suhu 26 °C dan pencatatan nilai resistansi akhir dilakukan pada suatu suhu tertentu, pada percobaan ini 36 °C. Data-data yang didapat pada percobaan ini adalah sebagai berikut:

Tabel 4.2 Hasil pengujian percobaan kedua

	Bentuk I	Bentuk II	Bentuk III	Bentuk IV
Suhu awal (°C)	26.0	26.1	26.1	26.2
Suhu akhir (°C)	36.0	36.0	36.0	36.0
Resistansi awal (mΩ)	47.5	47.6	48.0	48.0
Resistansi akhir (mΩ)	49.2	49.3	49.7	50.4

4.2.3 Data pengukuran kenaikan suhu masing-masing penghantar

Pengukuran yang ketiga adalah pengukuran kenaikan suhu pada masing-masing penghantar. Untuk pengukuran kenaikan suhu hanya menggunakan sampel penghantar dari masing-masing bentuk penampang yang memiliki nilai resistansi mendekati rata-rata resistansi dari penghantar dengan bentuk penampang masing-masing. Hal ini dilakukan untuk menjaga keakuratan data. Kemudian tiap penghantar dicatat kenaikan arusnya tiap range waktu tertentu hingga mencapai suhu maksimum yang dapat dicapainya. Untuk ketelitian data, percobaan dilakukan dua kali untuk setiap penghantar.

Pada percobaan ini dilakukan pencatatan nilai suhu tiap interval 10 s untuk 350 detik pertama dan tiap 50 s untuk detik selanjutnya. Hal ini dilakukan karena cepatnya kenaikan suhu yang dialami penghantar terutama selama 2.5 menit pertama. Data yang didapat dari percobaan ini adalah sebagai berikut:

4.3 Hasil pengukuran kenaikan suhu masing-masing penghantar

t (s)	Percobaan pertama				Percobaan kedua			
	bentuk I (°C)	bentuk I (°C)	bentuk III (°C)	bentuk IV (°C)	bentuk I (°C)	bentuk II (°C)	bentuk III (°C)	bentuk IV (°C)
0	26.3	25.7	28.2	25.2	26.8	26.4	26.2	25.9
10	28.5	28.0	29.7	28.0	28.9	28.9	28.3	28.5
20	29.9	29.4	31.4	30.4	29.8	30.4	30.2	30.6
30	31.6	31.0	32.9	32.8	31.7	31.9	31.9	32.7
40	32.8	32.4	34.0	34.9	33.0	33.1	33.6	34.6
50	34.2	33.7	35.3	36.6	34.3	34.5	34.7	36.0
60	35.2	35.0	36.4	38.3	35.3	35.8	36.1	37.7
70	36.2	35.9	37.4	39.6	36.3	36.8	37.2	38.8
80	37.2	36.9	38.3	40.5	37.3	37.8	38.3	40.2
90	38.1	37.8	39.2	41.7	38.1	38.7	39.1	41.1
100	38.9	38.6	40.0	42.5	38.9	39.4	39.9	42.2
110	39.7	39.4	40.7	43.3	39.6	40.3	40.8	42.9
120	40.3	40.1	41.3	43.7	40.2	40.9	41.4	43.6

130	41.0	40.8	41.9	44.3	40.8	41.6	41.9	44.3
140	41.6	41.3	42.3	44.7	41.3	42.2	42.4	44.9
150	42.0	41.6	42.8	45.3	41.8	42.6	42.8	45.4
160	42.4	42.1	43.2	45.6	42.3	43.0	43.1	45.8
170	42.9	42.6	43.4	45.9	42.7	43.4	43.6	46.2
180	43.2	43.1	43.6	46.2	43.1	43.9	43.9	46.6
190	43.7	43.3	43.8	46.5	43.5	44.4	44.1	46.7
200	44.0	43.6	44.2	46.5	43.8	44.7	44.2	47.0
210	44.3	44.0	44.4	46.7	44.0	44.9	44.6	47.2
220	44.7	44.3	44.7	46.8	44.2	45.1	44.7	47.4
230	45.0	44.3	44.8	47.1	44.6	45.3	44.9	47.6
240	45.2	44.7	45.0	47.2	44.8	45.5	45.1	47.6
250	45.4	44.7	45.2	47.2	45.0	45.7	45.1	47.7
260	45.8	44.8	45.3	47.3	45.1	45.9	45.1	47.9
270	45.9	45.1	45.5	47.5	45.2	46.1	45.1	48.1
280	46.1	45.2	45.6	47.8	45.5	46.3	45.1	48.3
290	46.4	45.4	45.7	47.9	45.7	46.5	45.1	48.4
300	46.5	45.7	45.9	47.9	45.8	46.6	45.1	48.7
310	46.6	45.7	45.9	48.0	46.0	46.6	45.3	48.9
320	46.7	45.7	45.9	48.1	46.0	46.6	45.4	49.1
330	46.9	45.8	45.9	48.2	46.1	46.8	45.5	49.1
340	47.1	45.8	45.9	48.3	46.2	46.9	45.7	49.1
350	47.3	45.9	46.0	48.3	46.3	46.9	45.8	49.1
400	47.3	45.9	46.1	48.3	46.4	47.0	46.3	49.2
450	47.4	45.9	46.2	48.4	46.5	47.0	46.3	49.0
500	47.4	46.0	46.4	48.8	46.6	47.1	46.0	48.8
550	47.5	46.2	46.6	48.9	46.9	47.4	45.7	48.6
600	47.0	46.3	46.6	49.0	46.7	47.5	45.5	48.2
650	46.8	46.3	46.6	49.1	46.6	47.5	45.3	47.9
700	46.5	46.5	46.3	49.3	46.4	47.5	44.9	47.5
750	46.2	46.8	45.9	49.0	46.1	47.6	45.0	
800	46.0	46.8	45.7	48.7	45.9	47.8		
850		46.8	45.4	48.4	45.7	48.0		
900		46.5	45.2	47.9	45.4	47.8		
950		46.3		47.5		47.5		
1000		46.0				47.2		
1050		45.7				47.0		
1100		45.5				46.9		
1150		45.2				46.7		
1200						46.5		

4.3 ANALISA DATA PENGUKURAN

4.3.1 Analisa nilai resistansi penghantar

Dari tabel data percobaan resistansi yang dilampirkan sebelumnya terlihat bahwa semakin pipih penghantar maka semakin besar pula selisih resistansi yang didapatkan dengan selisih terbesar dimiliki oleh penghantar dengan bentuk

penampang IV yaitu sekitar 2 persen. Berikut adalah besar rata-rata hambatan dari masing-masing penghantar dan selisihnya terhadap hambatan penghantar berpenampang bulat yang digunakan sebagai acuan :

Tabel 4.4 Perbandingan resistansi keempat penghantar dengan penghantar berpenampang bulat sebagai acuan

	Bentuk I	Bentuk II	Bentuk III	Bentuk IV
Hambatan rata-rata (mΩ)	47.53	47.63	48.00	48.47
Selisih hambatan (mΩ)	0.00	0.10	0.47	0.94
Selisih hambatan (%)	0.00	0.21	0.99	1.98

Secara umum, besarnya nilai resistansi dari suatu penghantar dapat ditentukan oleh,

$$R = \rho \frac{l}{A} \dots\dots\dots(4.1)$$

Dengan ρ adalah resistivitas penghantar serta l dan A masing-masing adalah panjang penghantar dan luas penghantarnya. Karena keempat penghantar berasal dari bahan yang sama maka nilai ρ juga sudah seharusnya bernilai sama. Jadi perbedaan nilai resistansi dari keempat penghantar yang diujikan kemungkinan besar berasal dari perbedaan nilai penghantar.

Dalam proses pembuatannya, penghantar yang akan diuji dibentuk dengan cara ditekan dengan menggunakan mesin sehingga menghasilkan bentuk yang diinginkan. Kriteria utama yang harus dipenuhi dalam pembuatan penghantar dengan bentuk penampang II, III, dan IV adalah penampangnya memiliki luas yang sama dengan penghantar dengan bentuk penampang bulat. Namun dalam kenyataannya, penghantar dengan bentuk penampang tersebut memiliki luas yang lebih kecil bila dibandingkan dengan penghantar dengan bentuk penampang bulat. Bila kita menganggap tidak terjadi pemampatan pada penghantar dan volume penghantar tetap, maka mengecilnya luas permukaan akan terkompensasi dengan memanjangnya penghantar. Jadi, sesuai dengan persamaan di atas, nilai resistansi dari penghantar dengan bentuk penampang II, III, IV dengan luas penampang

yang lebih kecil dan panjang yang lebih besar akan memiliki nilai resistansi yang lebih besar .

$$R \uparrow = \rho \frac{l \uparrow}{A \downarrow}$$

Percobaan ini dapat sekaligus membuktikan bahwa rumus tersebut berlaku untuk mengukur besarnya resistansi sebuah penghantar tanpa harus menghiraukan bentuk penampang penghantar itu sendiri.

Untuk keperluan instalasi listrik rumah, dengan selisih hambatan sebesar 2 persen tidak menyebabkan perubahan yang signifikan pada besarnya arus yang mengalir pada penghantar. Misalnya untuk penghantar normal, besarnya arus yang mengalir adalah:

$$i_1 = \frac{V}{R} \dots\dots\dots(4.2)$$

Sedangkan besarnya arus pada penghantar baru yang memiliki selisih hambatan maksimal 2% adalah:

$$i_2 = \frac{V}{R + 0.02R} = \frac{V}{1.02R} = 0.98i_1$$

Jadi penggunaan penghantar dengan bentuk penampang non-bulat masih dapat ditolerir untuk keperluan instalasi listrik rumah.

4.3.2 Analisa nilai koefisien suhu resistansi penghantar

Percobaan ini dilakukan untuk mencari nilai koefisien suhu resistansi α dari penghantar yang diujicobakan di sini. Untuk tembaga murni, nilai koefisien α pada suhu 25 °C adalah sebesar $3.93 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Namun karena tembaga yang digunakan dalam percobaan ini adalah tembaga campuran dan suhu awal percobaan $\pm 26 \text{ } ^\circ\text{C}$, maka sangat perlu untuk dilakukan percobaan untuk mengetahui besarnya koefisien yang dimiliki oleh sampel yang diujicobakan di sini.

Percobaan yang dilakukan untuk mencari besarnya nilai koefisien suhu resistansi α didasarkan pada rumus (2.5), yaitu:

$$R_{t_2} = R_{t_1} (1 + \alpha(t_2 - t_1)) \dots\dots\dots(4.3)$$

sehingga untuk mencari nilai koefisien α perlu dicari nilai resistansi pada suhu awal R_{t_1} , resistansi pada suhu akhir R_{t_2} serta nilai suhu awal t_1 dan akhir t_2 . Dari

data-data tersebut nantinya dapat dihitung besarnya nilai koefisien tersebut dengan menggunakan rumus di atas. Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan didapat besarnya koefisien α dari masing-masing penghantar adalah sebagai berikut:

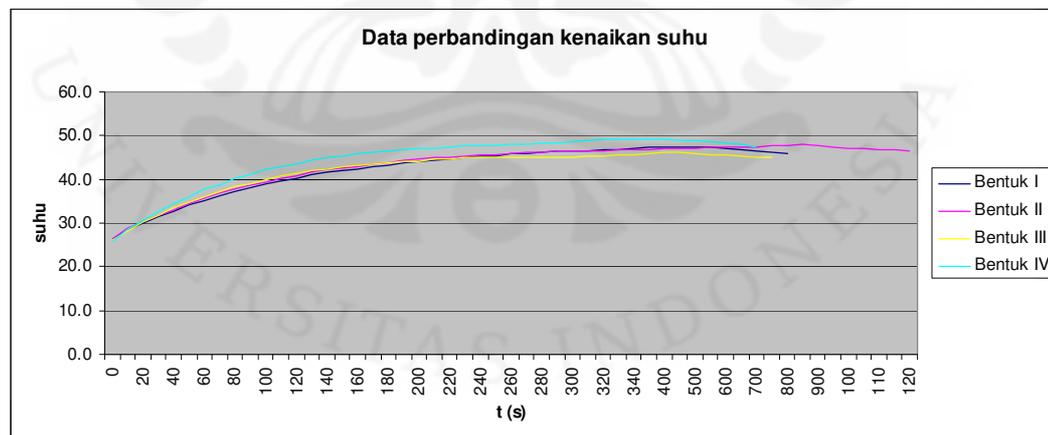
Tabel 4.5 Nilai koefisien suhu resistansi keempat penghantar

	Bentuk I	Bentuk II	Bentuk III	Bentuk IV
Koefisien α ($\times 10^{-3} \Omega ^\circ\text{C}^{-1}$)	3.5789	3.5714	3.5416	3.7037

Bila dihitung nilai koefisien rata-rata dari semua penghantar adalah sekitar $3.6 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Ini berarti ada peningkatan resistivitas sebesar 0.036 persen untuk setiap derajat kenaikan suhu pada penghantar ini.

4.3.3 Analisa kenaikan suhu penghantar

Dari data hasil percobaan mengenai kenaikan suhu yang terjadi pada masing-masing penghantar bila diberi arus tertentu, dapat dibuat grafik pola kenaikan suhu pada masing-masing penghantar tersebut. Grafik perbandingan kenaikan suhu yang didapat oleh masing-masing penghantar dapat dilihat pada grafik berikut :



Gambar 4.3 Grafik perbandingan kenaikan suhu masing-masing penghantar

Terlihat dari grafik perbandingan kenaikan suhu bahwa keempat penghantar memiliki pola kenaikan suhu yang cenderung sama, kecuali sedikit perbedaan untuk penghantar bentuk IV. Semua penghantar mengalami kenaikan suhu secara drastis selama ± 2.5 menit pertama untuk kemudian naik secara

perlahan hingga mencapai suhu maksimal yang dapat diraihnya dan untuk kemudian turun sedikit dan mempertahankan suhu stabil tersebut.

Untuk penurunan suhu, penghantar dengan bentuk penampang IV memiliki nilai penurunan suhu yang lebih besar dibandingkan dengan penghantar lainnya karena luasnya daerah permukaan yang dimilikinya untuk membuang panas ke daerah sekitarnya. Sebagai ilustrasi, misalkan untuk penghantar dengan bentuk penampang bulat berjari-jari 2mm dan panjang 1000mm seperti penghantar yang digunakan dalam sampel, tanpa menghitung luas penampangnya, akan memiliki luas permukaan sebesar:

$$L_{pI} = 2\pi r.l = 2\pi 2.1000 = 4000\pi \text{ mm}^2$$

karena penampang bentuk II dibentuk dari penampang bentuk I, maka luas penampang penghantar berpenampang bulat berjari-jari r akan sama dengan luas penampang berpenampang bentuk II bersisi x , sehingga besarnya sisi x akan dapat diketahui, yaitu:

$$x^2 = \pi r^2 \text{ mm}^2$$

$$x = 2\sqrt{\pi} \text{ mm}$$

Jadi penghantar dengan penampang bentuk II akan memiliki luas permukaan sebesar,

$$L_{pII} = 4x.l = 4.2.\sqrt{\pi}.1000 = 8000\sqrt{\pi} \text{ mm}^2$$

Sedangkan untuk penghantar dengan penampang bentuk III yang dikondisikan memiliki lebar l dan panjang p yang memiliki besar;

$$p = \frac{1}{2}x \text{ mm} \text{ dan } l = 2x \text{ mm}$$

akan memiliki luas permukaan sebesar:

$$L_{pIII} = (2l + 2p)l = \left(2.2x + 2.\frac{1}{2}x\right)1000 = 10.000\sqrt{\pi} \text{ mm}^2$$

Dan bila penghantar dengan penampang bentuk IV yang dikondisikan memiliki lebar n dan panjang m , dengan besar seperti berikut,

$$m = \frac{1}{4}x \text{ mm} \text{ dan } n = 4x \text{ mm}$$

akan memiliki luas permukaan sebesar;

$$L_{pIV} = (2n + 2m)l = \left(2.4x + 2 \cdot \frac{1}{4}x \right) 1000 = 17.000\sqrt{\pi} \text{ mm}^2$$

Dengan asumsi bahwa pelepasan panas terjadi secara merata pada seluruh permukaan penghantar, maka penghantar bentuk IV yang memiliki luas penampang terbesar akan dapat menurunkan suhunya lebih baik dibandingkan dengan penghantar bentuk lainnya seperti terlihat dari hasil percobaan.

Dari pembahasan tersebut terlihat bahwa penghantar dengan bentuk penampang IV mampu melepaskan panas ke sekitarnya dengan baik karena memiliki luas permukaan terbesar sehingga seharusnya memiliki kenaikan suhu dan nilai suhu akhir terkecil bila dibandingkan dengan penghantar dengan bentuk penampang lainnya. Tapi pada percobaan ternyata yang terjadi adalah sebaliknya, penghantar dengan bentuk IV memiliki tingkat kenaikan suhu tercepat serta nilai suhu akhir percobaan tertinggi bila dibandingkan dengan penghantar dengan bentuk penampang lainnya. Hal ini dapat disebabkan karena besar resistansi yang dimiliki oleh penghantar dengan penampang bentuk IV lebih besar dibandingkan dengan penghantar berpenampang bulat seperti terlihat pada data percobaan pertama. Dengan menggunakan rumus (2.7) di mana besarnya rugi-rugi daya yang timbul pada penghantar (P),

$$P = i^2 R \dots\dots\dots(4.4)$$

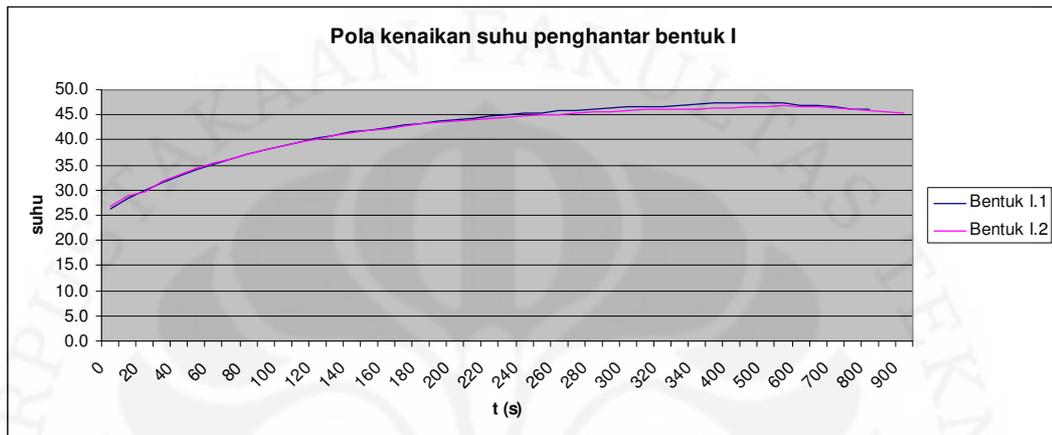
terlihat bahwa bila nilai resistansi (R) membesar, maka besarnya daya yang dapat menyebabkan panas pada penghantar akan semakin membesar juga. Besarnya rugi daya yang ditimbulkan pada penghantar dengan bentuk penampang IV menghasilkan panas yang lebih besar daripada besar panas yang mampu dilepaskan ke sekitarnya sehingga kenaikan suhu dan nilai suhu akhirnya memiliki nilai terbesar bila dibandingkan dengan penghantar lainnya.

Luas penampang yang besar yang dimiliki penghantar dengan penampang bentuk IV tidak hanya memberikan keuntungan tersendiri bagi penghantar tersebut. Dengan luas penampang yang mencapai lebih dari dua kali lipat dibandingkan dengan penghantar konvensional dengan bentuk bulat, maka penyedia kabel harus menyiapkan isolasi dua-tiga kali lebih banyak pula. Hal ini jelas merugikan produsen serta pemakai yang nantinya akan dikenakan biayanya. Dengan nilai karakteristik listrik yang hampir sama dengan penghantar dengan bentuk

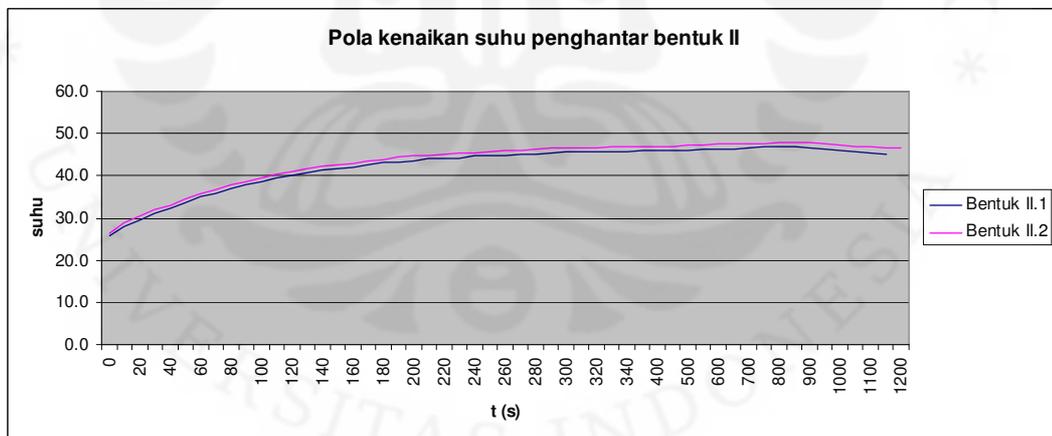
konvensional, maka harga yang dikenakan untuk kabel dengan penghantar yang memiliki bentuk penampang IV tidak sebanding dengan hasil yang didapat.

4.4 ANALISA TAMBAHAN

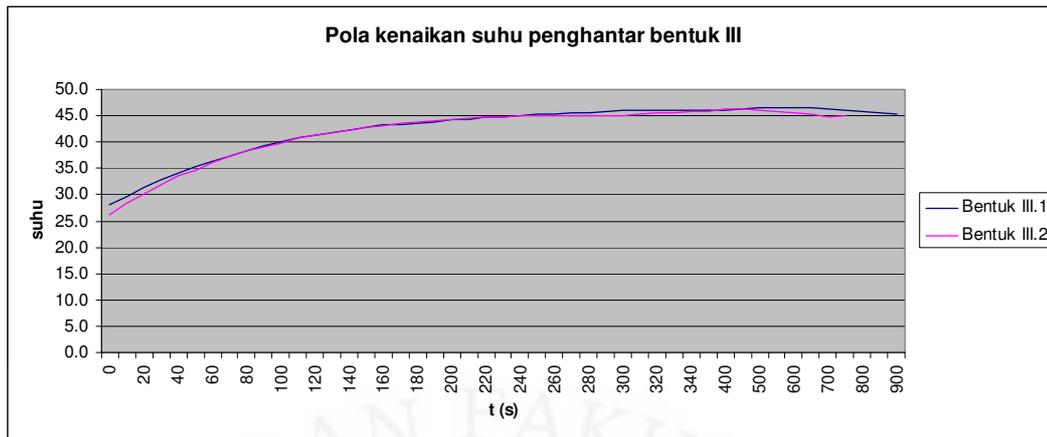
Berikut adalah grafik yang menunjukkan pola kenaikan suhu pada masing-masing penghantar:



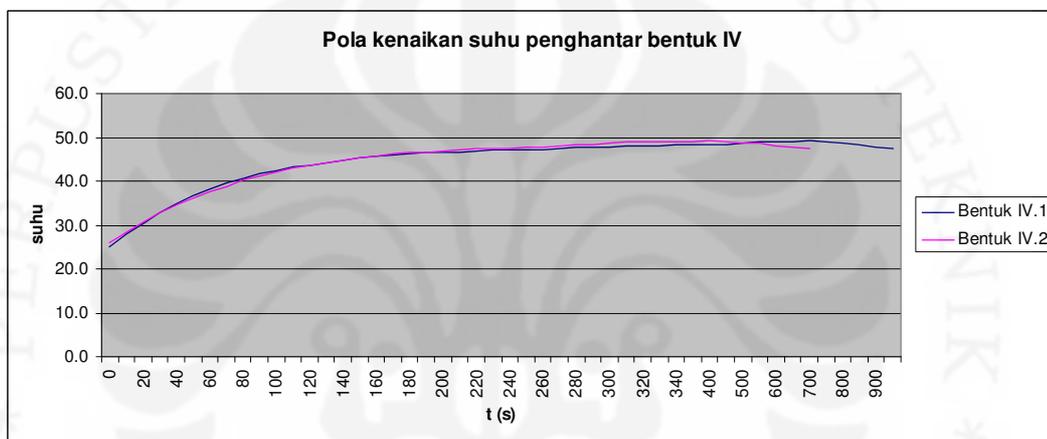
Gambar 4.4 Grafik kenaikan suhu pada penghantar dengan penampang bentuk I



Gambar 4.5 Grafik kenaikan suhu pada penghantar dengan penampang bentuk II



Gambar 4.6 Grafik kenaikan suhu pada penghantar dengan penampang bentuk III



Gambar 4.7 Grafik kenaikan suhu pada penghantar dengan penampang bentuk IV

Dari keempat grafik terlihat adanya penurunan suhu pada keempat penghantar yang diuji di sini. Pada percobaan, setelah penghantar mencapai suhu maksimum yang dapat diraihinya terjadi penurunan suhu yang berkisar antara 1 s.d 2 °C. Sampai di sini ternyata suhu masih belum kunjung stabil, pada beberapa menit selanjutnya suhu pada penghantar mengalami naik-turun selama beberapa saat. Ini adalah anomali yang terjadi pada percobaan di mana ternyata penghantar yang diberi arus dengan nilai tertentu akan memiliki suhu maksimum yang dapat diraihinya dan suhu “stabil” yang ada pada range tertentu. Berikut adalah besarnya suhu maksimum dan penurunan suhu yang terjadi pada keempat penghantar:

Tabel 4.6 Selisih penurunan suhu pada akhir percobaan untuk semua penghantar

	Bentuk I.1	Bentuk I.2	Bentuk II.1	Bentuk II.2	Bentuk III.1	Bentuk III.2	Bentuk IV.1	Bentuk IV.2
suhu awal	26.3	26.8	25.7	26.4	28.2	26.2	25.2	25.9
suhu max	47.5	46.9	46.8	48.0	46.6	46.3	49.3	49.2
suhu akhir	46.0	45.4	45.2	46.5	45.2	45.0	47.5	47.5
selisih max-akhir	1.5	1.5	1.6	1.5	1.4	1.3	1.8	1.7

Ada beberapa alasan yang dapat dikemukakan berkenaan dengan terjadinya fenomena ini. Sampel uji yang digunakan di sini adalah sebuah penghantar atau kabel tanpa isolasi. Sehingga panas yang terjadi pada penghantar ketika percobaan dilakukan akan sangat mungkin tidak hanya terdistribusi sepanjang penghantar saja tetapi juga ke lingkungan sekitarnya. Karena itu, penghantar dengan bentuk penampang IV yang memiliki luas permukaan terbesar, seperti telah dijelaskan sebelumnya, mengalami penurunan suhu terbesar di antara semua penghantar yang diujicobakan di sini.

Pada percobaan, arus yang digunakan untuk percobaan kenaikan suhu penghantar adalah 40 A. Namun ternyata setelah dilakukan pengukuran ulang pada akhir percobaan, pada penghantar didapat nilai arus yang berbeda. Berikut adalah nilai arus pada awal pengukuran dan akhir pengukuran:

Tabel 4.7 Selisih nilai arus pada awal dan akhir pengukuran

	Bentuk I	Bentuk II	Bentuk III	Bentuk IV
Arus awal (A)	40	40	40	40
Arus akhir (A)	37.8	38.6	38.4	37.6
Selisih (%)	5.5	3.5	4	6

Timbulnya panas pada penghantar pada saat pengukuran disebabkan oleh adanya rugi-rugi daya P yang besarnya:

$$P = i^2 R$$

Sedangkan dalam percobaan, besarnya tahanan R akan bertambah seiring pertambahan suhu sesuai dengan persamaan:

$$R_{t_2} = R_{t_1} (1 + \alpha(t_2 - t_1))$$

Dengan menganggap bahwa besarnya beda potensial yang diberikan pada kedua ujung penghantar tetap, maka sesuai dengan persamaan,

$$V = iR$$

Dengan nilai hambatan R yang membesar akan membuat nilai arus i mengecil. Hal ini mungkin menjadi salah satu faktor mengapa nilai arus pada akhir percobaan bernilai lebih kecil bila dibandingkan dengan nilai arus pada awal pengukuran.

Turunnya nilai arus i dan meningkatnya nilai tahanan R berpengaruh pada besarnya rugi-rugi daya P yang menyebabkan panas pada penghantar. Ini juga dapat menjadi salah satu alasan mengapa terjadi penurunan suhu pada akhir percobaan. Misalnya, bila besarnya nilai arus i dan tahanan R sampai pada suatu titik di mana nilai kuadrat arus dan tahanan sesudah lebih kecil dibandingkan dengan nilai kuadrat arus dan tahanan sebelumnya, maka besarnya rugi daya yang dihasilkan akan lebih kecil dari nilai sebelumnya. Hal ini dapat menyebabkan penghantar tidak mampu menahan suhu sebelumnya karena kurangnya nilai daya yang dihasilkan sehingga nilai suhu pun turun.

BAB V

KESIMPULAN

1. Pada luas penampang yang sama, bentuk penampang tidak memberi pengaruh yang cukup signifikan pada nilai resistansi dari suatu penghantar.
2. Dengan luasan yang sama, semakin pipih bentuk penampang semakin besar pula luas permukaannya. Hal ini memberi pengaruh yang cukup signifikan pada peningkatan suhu penghantar.
3. Semakin besar luas penampang penghantar, semakin luas pula area yang dapat digunakan untuk melepaskan panas. Pada percobaan, penghantar dengan bentuk penampang IV dengan luas terbesar mengalami penurunan suhu terbesar hingga 1.8°C .

DAFTAR ACUAN

- [1] Thue, William A, *Electrical Power Cable Engineering*, Marcel Dekker.Inc, New York , 1999, hal 33.
- [2] Farizandi, Dananto, “Analisis karakteristik kabel fleksibel dengan kabel inti tunggal NYM 2.5 mm² dan 4 m²,” Teknik Elektro FTUI, 2004.
- [3] Halliday, David, Robert Resnick, *Physics 3rd edition*, (New Jersey: John Wiley & Sons.Inc, 1978).
- [4] Thue, William A, *Electrical Power Cable Engineering*, Marcel Dekker.Inc, New York , 1999, hal 45-46.
- [5] Halliday, David, Robert Resnick, *Physics 3rd edition*, (New Jersey: John Wiley & Sons.Inc, 1978).

DAFTAR PUSTAKA

- Farizandi, Dananto, "Analisis karakteristik kabel fleksibel dengan kabel inti tunggal NYM 2.5 mm² dan 4 m²," Teknik Elektro FTUI, 2004.
- Halliday, David, Robert Resnick, *Physics 3rd edition*, (New Jersey: John Wiley & Sons.Inc, 1978).
- Laughton, M.A., D.J. Warne, *Electrical Engineer's Reference Book 16th edition*, (Oxford, England: Elsevier Science, 2003).
- Sclater, Neil, John E. Traister, *Handbook of Electrical Design Details*, (USA: The McGraw-Hill Companies.Inc, 2003).
- Thue, William A, *Electrical Power Cable Engineering*, (New York: Marcel Dekker.Inc, 1999).
- Warne, D.F., *Newnes Electrical Power Engineer's Book 2nd edition*, (Oxford, England: Elsevier Science, 2005).

Lampiran 1 Data pengukuran resistansi penghantar

Resistansi Penghantar

Konduktor	R set 1 (m Ω)	R set 2 (m Ω)	R set 3 (m Ω)
Bentuk I	47.5	47.6	47.5
Bentuk II	47.8	47.5	47.6
Bentuk III	48.0	48.0	48.0
Bentuk IV	48.6	48.6	48.2

Lampiran 2 Data pengukuran koefisien suhu resistansi

	Bentuk I	Bentuk II	Bentuk III	Bentuk IV
Suhu awal (°C)	26.0	26.1	26.1	26.2
Suhu akhir (°C)	36.0	36.0	36.0	36.0
Resistansi awal (mΩ)	47.5	47.6	48.0	48.0
Resistansi akhir (mΩ)	49.2	49.3	49.7	50.4



**Lampiran 3 Data pengukuran kenaikan suhu dan grafik pola kenaikan suhu
keempat penghantar**

Data kenaikan suhu

t (s)	Percobaan pertama				Percobaan kedua			
	bentuk I (°C)	bentuk I (°C)	bentuk III (°C)	bentuk IV (°C)	bentuk I (°C)	bentuk II (°C)	bentuk III (°C)	bentuk IV (°C)
0	26.3	25.7	28.2	25.2	26.8	26.4	26.2	25.9
10	28.5	28.0	29.7	28.0	28.9	28.9	28.3	28.5
20	29.9	29.4	31.4	30.4	29.8	30.4	30.2	30.6
30	31.6	31.0	32.9	32.8	31.7	31.9	31.9	32.7
40	32.8	32.4	34.0	34.9	33.0	33.1	33.6	34.6
50	34.2	33.7	35.3	36.6	34.3	34.5	34.7	36.0
60	35.2	35.0	36.4	38.3	35.3	35.8	36.1	37.7
70	36.2	35.9	37.4	39.6	36.3	36.8	37.2	38.8
80	37.2	36.9	38.3	40.5	37.3	37.8	38.3	40.2
90	38.1	37.8	39.2	41.7	38.1	38.7	39.1	41.1
100	38.9	38.6	40.0	42.5	38.9	39.4	39.9	42.2
110	39.7	39.4	40.7	43.3	39.6	40.3	40.8	42.9
120	40.3	40.1	41.3	43.7	40.2	40.9	41.4	43.6
130	41.0	40.8	41.9	44.3	40.8	41.6	41.9	44.3
140	41.6	41.3	42.3	44.7	41.3	42.2	42.4	44.9
150	42.0	41.6	42.8	45.3	41.8	42.6	42.8	45.4
160	42.4	42.1	43.2	45.6	42.3	43.0	43.1	45.8
170	42.9	42.6	43.4	45.9	42.7	43.4	43.6	46.2
180	43.2	43.1	43.6	46.2	43.1	43.9	43.9	46.6
190	43.7	43.3	43.8	46.5	43.5	44.4	44.1	46.7
200	44.0	43.6	44.2	46.5	43.8	44.7	44.2	47.0
210	44.3	44.0	44.4	46.7	44.0	44.9	44.6	47.2
220	44.7	44.3	44.7	46.8	44.2	45.1	44.7	47.4
230	45.0	44.3	44.8	47.1	44.6	45.3	44.9	47.6
240	45.2	44.7	45.0	47.2	44.8	45.5	45.1	47.6
250	45.4	44.7	45.2	47.2	45.0	45.7	45.1	47.7
260	45.8	44.8	45.3	47.3	45.1	45.9	45.1	47.9
270	45.9	45.1	45.5	47.5	45.2	46.1	45.1	48.1
280	46.1	45.2	45.6	47.8	45.5	46.3	45.1	48.3
290	46.4	45.4	45.7	47.9	45.7	46.5	45.1	48.4
300	46.5	45.7	45.9	47.9	45.8	46.6	45.1	48.7
310	46.6	45.7	45.9	48.0	46.0	46.6	45.3	48.9
320	46.7	45.7	45.9	48.1	46.0	46.6	45.4	49.1
330	46.9	45.8	45.9	48.2	46.1	46.8	45.5	49.1
340	47.1	45.8	45.9	48.3	46.2	46.9	45.7	49.1
350	47.3	45.9	46.0	48.3	46.3	46.9	45.8	49.1
400	47.3	45.9	46.1	48.3	46.4	47.0	46.3	49.2
450	47.4	45.9	46.2	48.4	46.5	47.0	46.3	49.0
500	47.4	46.0	46.4	48.8	46.6	47.1	46.0	48.8

PERPUSTAKAAN FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA

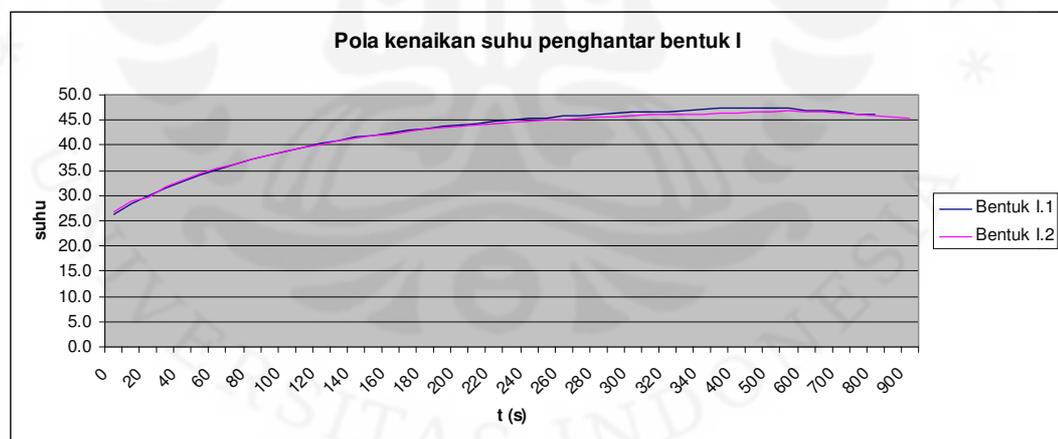
PERPUSTAKAAN FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA

550	47.5	46.2	46.6	48.9	46.9	47.4	45.7	48.6
600	47.0	46.3	46.6	49.0	46.7	47.5	45.5	48.2
650	46.8	46.3	46.6	49.1	46.6	47.5	45.3	47.9
700	46.5	46.5	46.3	49.3	46.4	47.5	44.9	47.5
750	46.2	46.8	45.9	49.0	46.1	47.6	45.0	
800	46.0	46.8	45.7	48.7	45.9	47.8		
850		46.8	45.4	48.4	45.7	48.0		
900		46.5	45.2	47.9	45.4	47.8		
950		46.3		47.5		47.5		
1000		46.0				47.2		
1050		45.7				47.0		
1100		45.5				46.9		
1150		45.2				46.7		
1200						46.5		

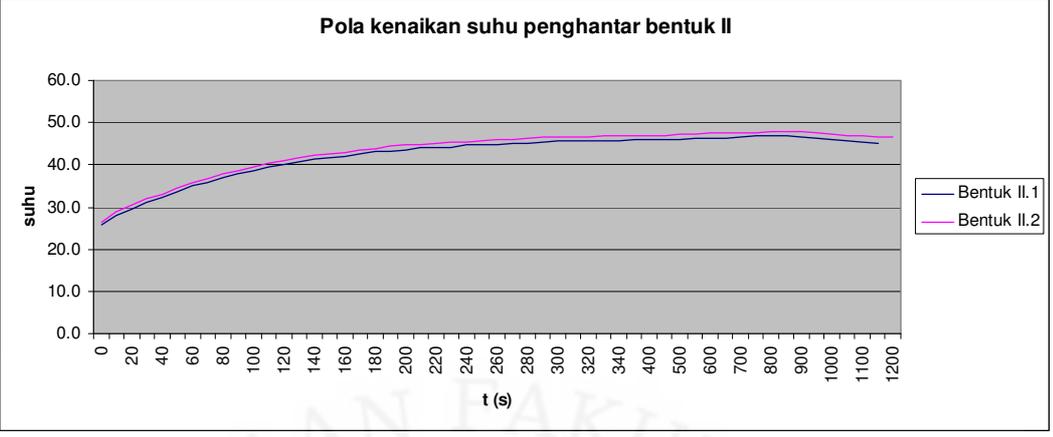
Nilai arus percobaan

	Bentuk I	Bentuk II	Bentuk III	Bentuk IV
Arus awal (A)	40	40	40	40
Arus akhir (A)	37.8	38.6	38.4	37.6

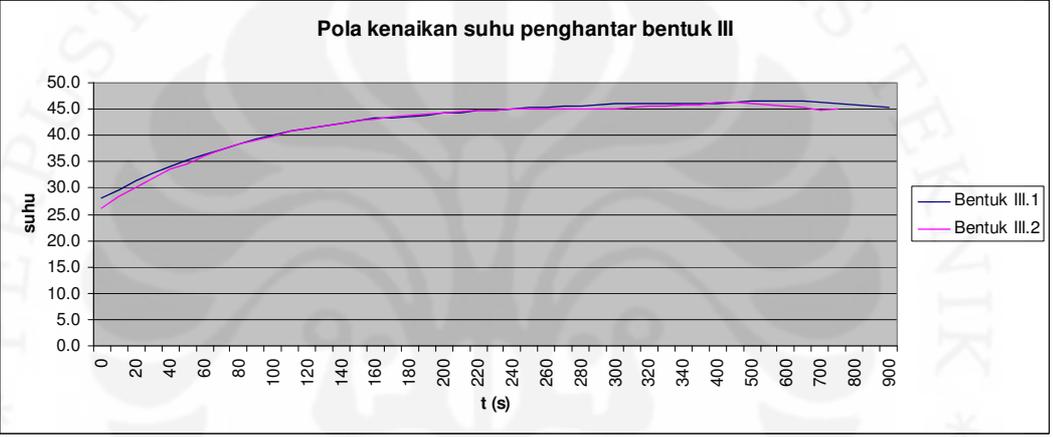
Grafik kenaikan suhu



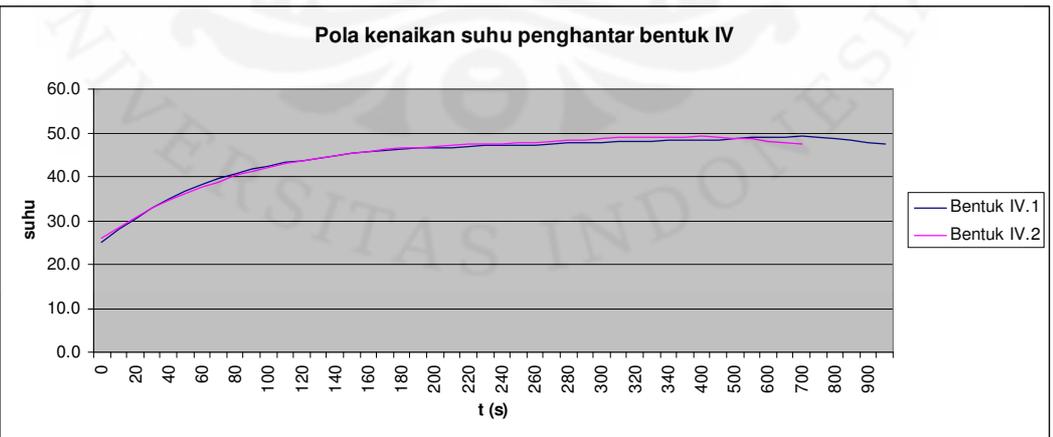
Grafik kenaikan suhu pada penghantar dengan penampang bentuk I



Grafik kenaikan suhu pada penghantar dengan penampang bentuk II



Grafik kenaikan suhu pada penghantar dengan penampang bentuk III



Grafik kenaikan suhu pada penghantar dengan penampang bentuk IV