



UNIVERSITAS INDONESIA



**STUDI PENGARUH KENAIKAN TEMPERATUR
PADA SAMBUNGAN KONDUKTOR ALUMINIUM DENGAN
TEMBAGA**

SKRIPSI

**DAVID SIMANJUNTAK
06 06 07 3833**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JUNI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PENGARUH KENAIKAN TEMPERATUR
PADA SAMBUNGAN KONDUKTOR ALUMINIUM DENGAN
TEMBAGA**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**DAVID SIMANJUNTAK
06 06 07 3833**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JUNI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : David Simanjuntak

NPM : 0606073833

Tanda Tangan :

Tanggal :

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : David Simanjuntak
NPM : 0606073833
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Studi Pengaruh Kenaikan Temperatur pada Sambungan
Konduktor Aluminium dengan Tembaga

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof.Dr. Ir. Rudy Setiabudy DEA

Penguji : Budi Sudiarto ST,MT

Penguji : Chairul Hudaya ST, M.Sc

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 28 Juni 2010

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik program studi Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Prof. Dr. Ir. Rudy Setiabudy DEA, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Asisten Laboratorium TTPL yang telah membantu dalam menyediakan peralatan yang digunakan dalam skripsi ini.
- (3) Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
- (4) Sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 15 Juni 2010

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : David Simanjuntak
NPM : 0606073833
Program Studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

**STUDI PENGARUH KENAIKAN TEMPERATUR PADA SAMBUNGAN
KONDUKTOR ALUMINIUM DENGAN TEMBAGA**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal :

Yang Menyatakan

(David Simanjuntak)

DAFTAR ISI

JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMAKASIH	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Metodologi Penulisan	3
1.5 Sistematika Penulisan	3
BAB 2 LANDASAN TEORI	4
2.1 Pemuaiian pada Logam	4
2.2 Tegangan pada Material Akibat Suhu (<i>Thermal Stresses</i>)	5
2.2.1 Tegangan akibat pemuaiian atau penyusutan material yang tertahan	6
2.2.2 Tegangan akibat gradien suhu (<i>temperature gradients</i>).....	6
2.2.3 Kejut termal pada material yang rapuh	7
2.3 Kelelahan Logam (<i>Metal Fatigue</i>)	7
2.3.1 Pengaruh Suhu pada kelelahan (<i>Fatigue</i>)	8
2.4 Pemuaiian dan Patahan pada Suhu Tinggi	8

2.4.1 Mulur (<i>creep</i>) dan Tegangan Patah (<i>stress rupture</i>)	8
2.4.2 Sifat logam yang Mengalami Deformasi Plastik	10
2.4.2.1 Perubahan Struktur Selama Mulur	10
2.4.2.2 Suhu transisi	10
2.4.3 Perpatahan (<i>Fracture</i>)	11
2.4.3.1 Kepatahan pada Suhu Tinggi	12
2.5 Sifat mekanik dan deformasi pada logam	12
2.5.1 Sifat mekanik logam	12
2.5.2 Deformasi elastis dan plastis pada logam	15
2.6 Panas yang Terbentuk Akibat Arus yang Mengalir pada Konduktor	16
2.6.1 Hukum Ohm	16
2.6.2 Konduktivitas Logam	16
2.7 Bimetal	19
BAB 3 METODOLOGI PENGUJIAN	20
3.1 Peralatan dan Rangkaian Pengujian	20
3.1.1 Peralatan pengujian	20
3.1.1.1 Aluminium	20
3.1.1.2 Tembaga	22
3.1.1.3 Termometer	24
3.1.1.4 Kunci torsi (<i>torque wrench</i>)	24
3.1.1.5 Bejana (<i>chamber</i>) pemanas	25
3.1.1.6 Jangka sorong digital	25
3.2 Tahap dan Proses Pengujian	26
BAB 4 HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS	28
4.1 Pengujian untuk Masing-Masing Logam	28
4.1.1 Pengujian pada Tembaga	28
4.1.2 Pengujian pada Aluminium	34

4.2 Pengujian dengan Sambungan	41
BAB 5 KESIMPULAN	50
DAFTAR ACUAN	51



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kurva mulur tipikal yang menggambarkan 3 tahapan mulur.	
Kurva <i>A</i> , uji beban tetap, kurva <i>B</i> uji tegangan tetap	.....9
Gambar 3.1 Termocouple digital	.....24
Gambar 3.2 Kunci torsi	.....24
Gambar 3.3 <i>Chamber</i> pemanas	.....25
Gambar 3.4 Jangka sorong	.....25
Gambar 3.5 Rangkaian pengujian sambungan	.....26
Gambar 4.1 Grafik pengujian pemuai panjang tembaga	.....30
Gambar 4.2 Grafik pengujian pemuai lebar tembaga	.....31
Gambar 4.3 Grafik pengujian pemuai tebal tembaga	.....31
Gambar 4.4 Grafik pemuai panjang rata-rata pada tembaga	.....33
Gambar 4.5 Grafik pemuai lebar rata-rata pada tembaga	.....33
Gambar 4.6 Grafik pemuai tebal rata-rata pada tembaga	.....34
Gambar 4.7 Grafik pengujian pemuai panjang aluminium	.....36
Gambar 4.8 Grafik pengujian pemuai lebar tembaga	.....37
Gambar 4.9 Grafik pengujian pemuai panjang tembaga	.....37
Gambar 4.10 Grafik perubahan panjang rata-rata pada aluminium	.....39
Gambar 4.11 Grafik perubahan lebar rata-rata pada aluminium	.....40
Gambar 4.12 Grafik perubahan tebal rata-rata pada aluminium	.....40
Gambar 4.13 Gambar titik pengukuran h_1, h_2, h_3, h_4, h_5	.....41
Gambar 4.14 Grafik rata-rata pemuai h_1	.....42
Gambar 4.15 Grafik rata-rata pemuai h_2	.....43
Gambar 4.16 Grafik rata-rata pemuai h_3	.....43
Gambar 4.17 Grafik rata-rata pemuai h_4	.....44
Gambar 4.18 Grafik rata-rata pemuai h_5	.....44

Gambar 4.19 Rangkaian las listrik49
Gambar 4.20 Sambungan saat terjadi *sparkover*49



DAFTAR TABEL

Tabel 3.2 Sifat mekanik tembaga	23
Tabel 4.1 Besar pemuaian dengan menggunakan perhitungan	28
Tabel 4.2 Pengujian pemuaian panjang tembaga	29
Tabel 4.3 Pengujian pemuaian lebar tembaga	29
Tabel 4.4 Pengujian pemuaian tebal tembaga	30
Tabel 4.5 Data nilai rata-rata pemuaian tembaga pada percobaan	32
Tabel 4.6 Besar Pemuaian pada Aluminium dengan perhitungan	34
Tabel 4.7 Data pengujian pemuaian panjang aluminium	35
Tabel 4.8 Data pengujian pemuaian lebar aluminium	35
Tabel 4.9 Data pengujian pemuaian tebal aluminium	36
Tabel 4.10 data nilai rata-rata pemuaian aluminium pada percobaan	38
Tabel 4.11 Data rata-rata pemuaian pada titik h1,h2,h3,h4,h5	42

ABSTRAK

Nama : David Simanjuntak
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Studi Pengaruh Kenaikan Temperatur pada Sambungan
Konduktor Aluminium dengan Tembaga

Kenaikan suhu pada konduktor logam seperti aluminium dan tembaga dapat dipengaruhi oleh faktor dalam yaitu pengaruh arus dan faktor luar berupa kenaikan suhu lingkungan. Hal ini akan mempengaruhi sifat mekanik maupun elektrik dari konduktor tersebut. Pengujian pada laboratorium dilakukan untuk melihat pengaruh kenaikan suhu terhadap sifat mekanis masing-masing konduktor aluminium dan tembaga. Selain itu, dilakukan juga pengujian pengaruh kenaikan temperatur pada konduktor aluminium dan tembaga yang telah disambungkan. Perubahan sifat mekanis yang terjadi akan dianalisis sehingga dapat mengetahui dampak elektrik yang terjadi pada sambungan konduktor tersebut.

Kata Kunci: pemuaiian, deformasi, sambungan

ABSTRACT

Name : David Simanjuntak
Study program : Electrical Engineering
Title : Studies of temperature rise influence at Aluminum with
Copper Conductors Joint.

The rising of temperature in metal conductors such as aluminum and copper can be influenced by internal factor like the current flow and external factor like the increasing of environment temperature. This will affect the mechanical and electrical properties of the conductor. Tests conducted at the laboratory to observe the influence of the increasing temperature on the mechanical properties at each of aluminum and copper conductors. In addition, testing was also conducted on the effect of rising temperature of aluminum and copper conductors that have been connected. The change in mechanical properties that occurred will be analyzed in order to know the impact that in connection electrical conductor.

Key words: thermal expansion, deformation, connection

BAB 1

PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang

Sambungan logam dengan jenis yang berbeda banyak ditemukan pada sebuah gardu seperti pada busbar dan transformator. Hal ini dilakukan untuk berbagai tujuan salah satunya adalah untuk tujuan ekonomis. Logam yang biasanya digunakan adalah logam aluminium dan tembaga. Kedua logam ini memiliki karakteristik yang berbeda satu sama lain, baik dari segi kemampuan hantaran maupun karakteristik lainnya seperti kekuatan dan koefisien muainya. Tiap logam juga memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing sehingga perancangan busbar dengan penyambungan dua jenis logam ini dilakukan dengan memperhatikan faktor-faktor tersebut.

Keberadaan suhu tinggi pada sebuah konduktor distribusi adalah akibat adanya aliran arus yang cukup besar yang secara kontinu menghasilkan panas. Suhu di dalam sebuah gardu dapat mengalami kenaikan yang disebabkan oleh beberapa faktor seperti terjadinya korona atau adanya arus lebih pada saluran. Kenaikan suhu ini tentunya akan berpengaruh pada komponen-komponen pada gardu khususnya logam-logam konduktor seperti busbar maupun sambungan atau konduktor lain seperti pada transformator. Logam-logam ini akan mengalami pemuaian akibat pengaruh kenaikan suhu. Besarnya pemuaian akan sesuai dengan nilai koefisien muai dari bahan logam tersebut.

Pada penyambungan dua logam berbeda dengan besar koefisien muai yang berbeda pada sistem hantaran busbar, tentunya akan terjadi masalah saat terjadi kenaikan temperatur dan terjadi pemuaian. Salah satu contoh masalah yang timbul pada penyambungan dua logam berbeda adalah masalah pembengkokan logam. Jika pada penyambungannya logam dipasang berimpit seolah-olah membentuk gabungan bimetal, maka saat pemuaian akan terjadi pembengkokan ke salah satu arah logam dan bahkan dapat menyebabkan kerusakan dalam skala kecil pada

salah satu atau kedua logam. Selain itu terdapat masalah lain seperti terjadinya mulur pada logam bahkan dapat terjadinya retak atau patahan. Kerusakan pada logam ini tentunya dapat menjadi pemicu timbulnya gangguan seperti timbulnya korona pada busbar atau bahkan terjadinya busur api.

Kegagalan seperti ini tentunya harus dihindari karena akan sangat mempengaruhi kemampuan sistem dalam penyaluran daya listrik. Untuk itu perlu dilakukan studi analisis tentang kemampuan dan karakteristik dari logam konduktor saat terjadi kondisi yang telah disebutkan diatas.

I.2. Tujuan Penulisan

Tujuan penulisan dari skripsi ini adalah untuk menganalisis potensi gangguan pada dua konduktor yang berbeda jenisnya saat terjadi kenaikan suhu yang dapat menyebabkan gangguan ataupun kerusakan pada logam dan fungsinya. dari analisis data akan diperoleh besar nilai kenaikan suhu yang dapat menyebabkan gangguan ataupun kerusakan pada logam konduktor.

I.3 Batasan Masalah

skripsi ini membahas tentang karakteristik dari dua jenis logam yang disambungkan. Jenis logam yang diuji adalah logam alumunim dan tembaga konduktor. Pemuaian yang akan di analisis adalah muai panjang dari logam dan pengaruh akibat pemuaian atau bahkan ke pembentukan rongga di antara sambungan kedua logam tersebut.

I.4 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian yang akan dilakukan antara lain dengan studi literatur dan analisis data literatur, serta dengan penelitian yaitu pengambilan data data dari pengujian yang dilakukan di FTUI.

I.5 Sistematika Penelitian

Sistematika penulisan skripsi ini dilakukan dalam beberapa bab. Bab pertama akan menguraikan latar belakang, Tujuan Penulisan, Batasan Masalah, Metodologi Penulisan, Sistematika Penulisan. Bab kedua akan menguraikan

landasan teori mengenai pemuaian, patahan, dan efek suhu pada material khususnya logam. Selain itu pada bab kedua akan dibahas juga teori tentang pengaruh aliran arus terhadap kenaikan suhu pada sebuah konduktor logam. Bab ketiga akan menguraikan tentang pengujian yaitu peralatan dan proses pengujian yang dilakukan. Bab keempat akan menguraikan analisis tentang hasil pengujian. Bab kelima akan menguraikan kesimpulan.



BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 Pemuaiian pada Logam

Ukuran Material akan mengalami perubahan saat mengalami perubahan temperatur pada keadaan tekanan konstan. Tekanan dianggap tidak berpengaruh pada pemuaiian material padat (solid) dan hanya berpengaruh untuk material gas dan cair. Besar perubahan ukuran yang terjadi pada saat pemuaiian berbeda-beda untuk setiap material. Besar perubahan ini dipengaruhi nilai koefisien muai termal masing-masing material.

Perubahan panjang akibat perubahan temperatur pada material padat dapat dinyatakan dengan persamaan [1]:

$$\frac{l_f - l_o}{l_o} = \alpha_l (T_f - T_o) \quad (2.1)$$

Atau,

$$\frac{\Delta l}{l_o} = \alpha_l \Delta T$$

Dimana l_o dan l_f merupakan panjang inisial dan panjang akhir dari perubahan suhu dari T_o ke T_f . α_l merupakan koefisien muai termal linear.

Untuk muai luas persamaan yang digunakan untuk menghitung perubahannya

adalah: $\frac{\Delta A}{A} = \alpha_A \Delta T$ (2.2)

Dimana ΔA merupakan perubahan luas, ΔT merupakan perubahan temperatur, A merupakan luas awal dan α_A merupakan koefisien muai termal luas.

Nilai koefisien muai luas sama dengan dua kali koefisien muai panjang:

$$\alpha_A \approx 2\alpha_l \quad (2.3)$$

Untuk muai volume dapat digunakan persamaan:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \alpha_v \Delta T \quad (2.4)$$

Dimana ΔV dan V_0 adalah nilai perubahan volume dan nilai volume awal, sementara α_v adalah Koefisien muai volume.

Sehingga koefisien muai termal volume pada material padat dapat dituliskan dengan persamaan:

$$\alpha_v = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (2.5)$$

Dengan V merupakan volume untuk material dan dV/dT merupakan kecepatan perubahan volume material terhadap perubahan temperatur. Jadi, sebagai contoh jika sebuah volume material memuai menjadi 1.02 dari ukuran awal 1 satuan pada kenaikan temperatur 100°C atau terjadi perubahan 2 persen pada kenaikan 100°C , maka koefisien muai termal volume material tersebut adalah 0.02 persen tiap derajat celcius atau 0.0002 satuan/ $^\circ\text{C}$.

Untuk material padat *isotropic*, nilai koefisien muai termal volume hampir sama dengan tiga kali nilai koefisien muai termal panjangnya

$$\alpha_v \approx 3\alpha_l \quad (2.6)$$

2.2 Tegangan pada Material Akibat Suhu (*Thermal Stresses*)

Tegangan suhu (*thermal stresses*) yang terjadi pada material adalah akibat dari terjadinya perubahan suhu. Dalam hal ini, kita perlu mengetahui sifat dasar material saat terjadi tegangan akibat perubahan suhu ini, karena tekanan ini dapat menyebabkan terjadinya retakan pada material logam khususnya. Tegangan yang dapat terjadi pada sebuah material akibat pengaruh suhu[2].

2.2.1 Tegangan akibat pemuaian atau penyusutan material yang tertahan

Sebuah material padat (misalkan sebuah logam) dengan bahan sama dan *isotropic* dipanasi atau didinginkan secara seragam dan tidak ada gradien temperatur yang mengganggu. Jika terjadi pemuaian dan penyusutan yang bebas atau dengan kata lain tidak ada kontak dengan material padat lainnya maka material akan bebas dari tegangan. Sebaliknya, jika material tersebut ditahan oleh material lain yang bersifat kaku atau keras pada ujung material tersebut, maka akan terjadi tegangan σ yang dapat dirumuskan sebagai [3]:

$$\sigma = E\alpha_l(T_0 - T_f) = E\alpha_l\Delta T \quad (2.7)$$

dimana, σ merupakan besar tegangan yang terjadi

E merupakan modulus elastisitas,

α_l merupakan koefisien muai termal linear dan

ΔT adalah perubahan suhu.

Pada saat terjadi pemanasan ($T_f > T_0$), maka material akan bersifat menekan karena saat pemuaian logam dipaksa konstan ($\sigma < 0$), demikian juga sebaliknya saat terjadi pendinginan ($T_f < T_0$), daya regang material akan dipaksa tetap konstan sehingga terjadi tegangan (*stress*) pada material.

2.2.2 Tegangan akibat gradien suhu (*temperature gradients*)

Ketika sebuah material padat dipanasi atau didinginkan, distribusi temperatur internal akan tergantung kepada bentuk dan ukuran material, konduktivitas suhu, dan kecepatan perubahan suhu pada material tersebut. *Thermal stresses* dapat terjadi akibat gradien suhu sepanjang badan material. Gradien suhu ini biasanya terbentuk karena pemanasan ataupun pendinginan material secara cepat (suhu yang digunakan ekstrim). Sehingga saat dilakukan pemanasan cepat pada permukaan material (suhu yang digunakan tinggi) perubahan suhu pada bagian luar material lebih cepat daripada bagian dalamnya. Akibatnya, bagian luar material akan merenggang atau memuai dengan cepat sementara bagian dalam masih memuai dengan kecepatan yang lambat. Hal ini tentunya menyebabkan

tegangan antara permukaan material dan bagian dalamnya. Sebaliknya, pada saat pendinginan dengan cepat (suhu yang sangat rendah) bagian luar akan menyusut sementara bagian dalam relatif tertahan konstan sehingga terjadi tegangan termal (*thermal stresses*).

2.2.3 Kejut termal pada material yang rapuh

Untuk material logam dan polimer yang mudah berubah bentuk, pengurangan tegangan yang disebabkan oleh termal dapat dilakukan oleh sifat deformasi plastiknya. Sedangkan untuk bahan yang bersifat rapuh (*nonductility*) yang kebanyakan berupa keramik dapat mempertinggi kemungkinan patahan yang terlihat rapuh akibat dari adanya tegangan. Pendinginan secara cepat pada sebuah bahan rapuh memiliki kemungkinan lebih besar dalam menyebabkan kejut termal dibandingkan dengan pemanasan secara cepat.

2.3 Kelelahan Logam (*Metal Fatigue*)

Logam yang dikenai tegangan berulang akan mengalami kerusakan pada tegangan yang jauh lebih rendah dibandingkan yang dibutuhkan untuk menimbulkan perpatahan pada penerapan beban tunggal. Kegagalan yang terjadi pada keadaan beban dinamik dinamakan kegagalan lelah (*fatigue failures*), disebut demikian karena pada umumnya kegagalan tersebut hanya terjadi setelah periode pemakaian yang cukup lama[4].

Kegagalan lelah terjadi tanpa petunjuk awal. Kelelahan menyebabkan patah yang terlihat rapuh, tanpa deformasi pada patahan tersebut. Suatu kegagalan biasanya terjadi pada bagian dimana terdapat konsentrasi tegangan, seperti sudut yang tajam, atau takik, atau pada tempat dimana terdapat tegangan metalurgis seperti inklusi.

Tiga faktor dasar yang menyebabkan terjadinya kegagalan lelah adalah[5]:

1. tegangan tarik maksimum yang cukup tinggi
2. variasi atau fluktuasi tegangan yang cukup besar

3. siklus penerapan tegangan cukup besar

faktor lain yang juga dapat mempengaruhi kegagalan ini yakni : konsentrasi tegangan, korosi, suhu, kelebihan bahan, struktur metalurgis, tegangan-tegangan sisa dan tegangan kombinasi.

2.3.1 Pengaruh Suhu pada Kelelahan (*Fatigue*)

Uji lelah logam pada suhu di bawah suhu kamar menunjukkan bahwa kekuatan lelah bertambah besar apabila suhu turun. Walaupun sifat-sifat lelah baja menjadi lebih peka pada suhu-suhu yang rendah, tetapi tidak terdapat fakta yang menunjukkan adanya perubahan mendadak dari sifat-sifat lelah pada suhu-suhu di bawah suhu transisi dari liat menjadi getas. Kekuatan lelah memperlihatkan pertambahan yang lebih besar dibandingkan dengan kekuatan tarik dengan turunnya suhu.

Pada umumnya, makin tinggi kekuatan mulur bahan, makin tinggi juga kekuatan lelah pada suhu tinggi. Akan tetapi, perlakuan-perlakuan metalurgi yang menghasilkan sifat lelah suhu tinggi yang terbaik tidak harus menghasilkan sifat-sifat mulur dari tegangan patah yang terbaik

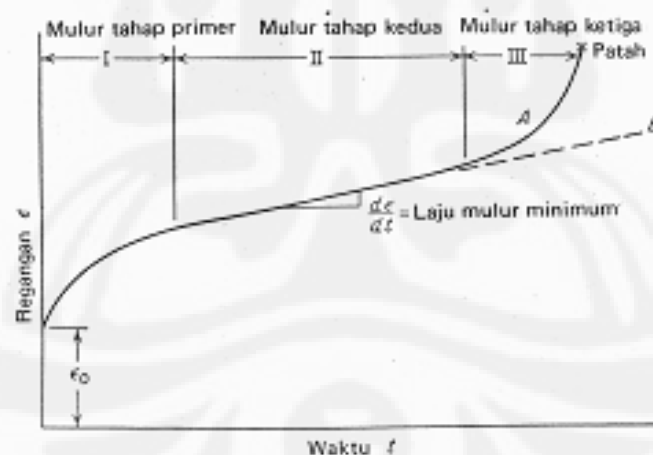
2.4 Pemuaihan dan Patahan pada Suhu Tinggi

2.4.1 Mulur (*creep*) dan tegangan patah (*stress rupture*)

Suatu karakteristik penting dari kekuatan pada suhu tinggi adalah keharusan untuk menyatakan kekuatan tersebut terhadap skala waktu tertentu. Untuk keperluan praktis, dianggap bahwa sifat-sifat tarik sebagian besar logam teknik pada suhu kamar tidak tergantung terhadap waktu. Akan tetapi pada suhu tinggi, kekuatan bahan sangat tergantung pada laju perubahan regangan dan waktu keberadaan pada suhu tinggi tersebut. Sejumlah logam pada keadaan demikian mempunyai perilaku seperti bahan-bahan *viskoelastis*. Logam yang diberi beban tarik tetap pada suhu tinggi akan mulur (*creep*) dan mengalami pertambahan panjang yang tergantung terhadap waktu.

Bertambahnya deformasi bahan pada tegangan tetap dinamakan *mulur*. Untuk menentukan kurva mulur rekayasa suatu logam, maka pada benda tarik dikenakan beban tetap sedang suhu benda uji dijaga tetap, regangan (perpanjangan) yang terjadi ditentukan sebagai fungsi waktu. Walaupun prinsip pengukuran tersebut memerlukan peralatan laboratorium yang cukup banyak. Waktu yang diperlukan dapat berbulan-bulan, bahkan beberapa pengujian memerlukan waktu lebih dari 10 tahun. prosedur umum mengenai uji mulur terdapat dalam spesifikasi ASTM E139-70[8].

Kurva *A* pada gambar merupakan bentuk kurva mulur ideal. Kemiringan pada kurva ($d\varepsilon/dt$ atau $\dot{\varepsilon}$) tersebut dinyatakan sebagai laju mulur. Mula-mula benda uji mengalami perpanjangan yang sangat cepat, ε_0 , kemudian laju mulur akan turun terhadap waktu waktu hingga mencapai keadaan hampir setimbang, dimana laju mulurnya mengalami perubahan yang kecil terhadap waktu. Pada tahap akhir, laju mulur bertambah besar secara cepat hingga terjadi patah.



Gambar 2.1 Kurva mulur tipikal yang menggambarkan 3 tahapan mulur. Kurva *A*, uji beban tetap, kurva *B* uji tegangan tetap.

Tahap mulur yang pertama, yaitu mulur primer, merupakan daerah dimana laju mulur turun. Mulur primer merupakan daerah utama dari mulur transien, dimana hambatan mulur bahan bertambah besar akibat deformasi yang terjadi. Untuk

suhu-suhu dan tegangan rendah, mulur primer merupakan proses mulur utama. Tahap mulur yang kedua, yakni mulur sekunder, adalah periode dimana laju mulur hampir tetap. Hal ini disebabkan oleh terjadinya keseimbangan antara kecepatan proses pengerasan regang dan proses pemulihan (*recovery*). Oleh karena itu mulur sekunder, biasanya dinyatakan sebagai mulur keadaan tunak (*steady-state*). Nilai rata-rata laju mulur selama terjadi mulur sekunder dinamakan laju mulur minimum. Tahap mulur ketiga atau mulur tersier, terjadi pada uji mulur beban tetap pada suhu dan tegangan-tegangan yang tinggi. Mulur tersier terjadi apabila terdapat pengurangan efektif pada luas penampang lintang yang disebabkan oleh penyempitan setempat atau pembentukan rongga internal.

2.4.2 Sifat logam yang mengalami deformasi plastik

Deformasi plastik merubah struktur intern logam, oleh karena itu deformasi deformasi dapat juga merubah sifat-sifat dari sesuatu logam. Salah satu sifat yang dapat berubah adalah kekuatannya. Logam yang mengalami deformasi plastik menjadi lebih kuat atau lebih keras. Pertambahan kekerasan akibat deformasi plastik disebut pengerasan regangan.

2.4.2.1 Perubahan Struktur Selama Mulur

Proses deformasi utama pada suhu tinggi adalah pergelinciran, pembentukan sub butir (subgrain), dan pergelinciran batas butir. Deformasi suhu tinggi ditandai oleh ketidakhomogenan yang ekstrim. Logam-logam yang berada pada suhu tinggi mengalami sejumlah deformasi sekunder. Proses ini terdiri atas pergelinciran ganda, pembentukan pita gelincir yang sangat kasar, pita-pita tertekuk, pembentukan lipatan pada batas-batas butir, dan migrasi batas butir.

2.4.2.2 Suhu transisi

Berbagai bahan memperlihatkan transisi rapuh-ulet dan memiliki suhu transisi tertentu. Pada suhu rendah, retak dapat merambat lebih cepat daripada terjadinya deformasi plastik, ini berarti energi yang diserap sedikit. Pada suhu yang lebih tinggi, retakan didahului oleh deformasi yang memerlukan energi. Suhu transisi tergantung pada laju pembebanan. Jadi baja yang dibebani secara perlahan-lahan dapat patah ulet, dan patah rapuh oleh impak (beban kejut), hingga tidak ada kesempatan terjadinya deformasi plastik.

2.4.3 Perpatahan (*Fracture*)[6]

Perpatahan hasil akhir dari proses deformasi plastis, pemisahan bagian komponen disebabkan oleh tegangan menjadi dua atau lebih bagian. Pemisahan ini dapat disebabkan oleh beban mekanik dan kimia. Hasilnya adalah permukaan baru. Proses perpatahan terdiri dari dua tahapan yaitu dimulai dengan inisiasi retak dan berlanjut dengan propagasi retak dan berakhir dengan perpatahan.

Jenis perpatahan dibagi dua yaitu perpatahan ulet (*Ductile Fracture*) dan perpatahan getas (*Brittle Fracture*). Perpatahan dapat didahului oleh deformasi plastik. Bila ada deformasi plastik, maka kita sebut ” perpatahan ulet” (*ductile fracture*); bila tidak diiringi deformasi plastik, disebut “perpatahan rapuh” (*brittle fracture*). Jenis perpatahan tergantung pada:

- (a) Sifat material /logam
- (b) Temperatur
- (c) Kondisi Beban
- (d) Laju Pembebanan

Keuletan relatif dapat ditentukan dari [7] :

1. Pengukuran keuletan (dengan mengukur % perpanjangan atau % penyusutan penampang)
2. Jumlah energi yang diserap pada percobaan dampak

Percobaan ini dilakukan untuk menguji ketangguhan sebuah material. Ketangguhan adalah ukuran energi yang diperlukan untuk mematahkan bahan. Suatu bahan ulet dengan kekuatan yang sama dengan bahan rapuh (tidak ulet) akan memerlukan energi perpatahan yang lebih besar dan mempunyai sifat tangguh yang lebih baik.

Patah getas merupakan karakteristik dari laju propagasi retak cepat dengan energi absorsi minimum, tidak mengalami deformasi plastik yang jelas. Dalam patah getas pergerakan retak sangat kecil. Pada logam kristalin biasanya terjadi sepanjang bidang kristalografi yang disebut *Cleavage planes*. Dia memperlihatkan penampakan granular dan disebut patah cleavage.

Kecenderungan patah getas meningkat bila:

- (a) Turunnya temperature
- (b) Meningkatnya laju regangan
- (c) Kondisi tegangan triaksial hasil dari terdapatnya takik.

Patah getas harus dihindari, karena terjadi tanpa memberi peringatan sebelumnya, biasanya komponen langsung patah.

Patah ulet dikarakteristikan dengan deformasi plastik nyata sebelum dan selama propagasi retak, selalu menghasilkan deformasi lokal yang dikenal dengan *necking*. Deformasi yang cukup jelas terlihat pada permukaan patah. Gambar dibawah ini memperlihatkan perpatahan ulet pada material yang ulet seperti Au dan Pb. Patah ulet terjadi melalui butir yang membentuk *cup-and-cone fracture*.

2.4.3.1 Perpatahan pada Suhu Tinggi

Jenis mekanisme kepatahan dapat dilihat pada peta mekanisme kepatahan[8]. Patah ulet biasa, berawal di inklusi dan partikel fasa kedua dan mungkin terjadi pada suhu yang cukup tinggi. Pada logam terjadi peralihan dari patah *transgranular* menjadi patah *intergranular* apabila suhunya naik.

Selama proses mulur akan terbentuk rongga secara kontinu. Namun pada tahap mulur ketiga, timbulnya cacat batas-butir dan retak dipercepat. Proses ini sering disebut kavitasi mulur. Bila tegangan kapiler adalah $2\gamma_s / r$, Pertumbuhan rongga akan terjadi bila pergelinciran batas-butir melampaui nilai kritis [9]:

$$\delta \geq \frac{1}{a^2} \left(\frac{2\gamma_s}{\sigma} \right)^3 \quad (2.8)$$

Dimana σ adalah tegangan yang dikenakan

a adalah diameter partikel

2.5 Sifat mekanik dan deformasi pada logam [10]

2.5 Sifat mekanik logam

Secara umum beberapa sifat mekanik dari logam dibagi menjadi

- a). Batas proporsionalitas (*Proportionality Limit*)

Adalah daerah batas dimana tegangan dan regangan mempunyai hubungan proporsionalitas satu dengan lainnya. Setiap penambahan tegangan akan diikuti dengan penambahan regangan secara proporsional dalam hubungan linier :

$$s = E e \quad (2.9)$$

b). Batas elastis (*Elastic limit*)

Adalah daerah dimana bahan akan kembali kepada panjang semula bila tegangan luar dihilangkan. Daerah proporsionalitas merupakan bagian dari batas elastik. Bila beban terus diberikan tegangan maka batas elastis pada akhirnya akan terlampaui sehingga bahan tidak kembali seperti ukuran semula. Maka batas elastis merupakan titik dimana tegangan yang diberikan akan menyebabkan terjadinya deformasi plastis untuk pertama kalinya. Kebanyakan material teknik mempunyai batas elastis yang hampir berhimpitan dengan batas proporsionalitasnya.

c). Titik Luluh (*Yield Point*) dan Kekuatan Luluh (*Yield Strength*)

Adalah batas dimana material akan terus mengalami deformasi tanpa adanya penambahan beban. Tegangan (stress) yang mengakibatkan bahan menunjukkan mekanisme luluh ini disebut tegangan luluh (yield stress).

Gejala luluh umumnya hanya ditunjukkan oleh logam-logam ulet dengan struktur kristal BCC dan FCC yang membentuk interstitial solid solution dari atom-atom karbon, boron, hidrogen dan oksigen. Interaksi antar dislokasi dan atom-atom tersebut menyebabkan baja ulet seperti mild steel menunjukkan titik luluh bawah (*lower yield point*) dan titik luluh atas (*upper yield point*).

Untuk baja berkekuatan tinggi dan besi tuang yang getas pada umumnya tidak memperlihatkan batas luluh yang jelas. Sehingga digunakan metode *offset* untuk menentukan kekuatan luluh material. Dengan metode ini kekuatan luluh ditentukan sebagai tegangan dimana bahan memperlihatkan batas penyimpangan/deviasi tertentu dari keadaan proporsionalitas tegangan dan regangan.

Kekuatan luluh atau titik luluh merupakan suatu gambaran kemampuan bahan menahan deformasi permanen bila digunakan dalam penggunaan struktural yang melibatkan pembebanan mekanik seperti tarik, tekan, bending atau puntiran. Di sisi lain, batas luluh ini harus dicapai ataupun dilewati bila bahan dipakai dalam proses manufaktur produk-produk logam seperti proses rolling, drawing, stretching dan sebagainya. Dapat dikatakan titik luluh adalah suatu tingkatan tegangan yang tidak boleh dilewati dalam penggunaan struktural (in service) dan harus dilewati dalam proses manufaktur logam (forming process).

d). Kekuatan Tarik Maksimum (*Ultimate Tensile Strength*)

Adalah tegangan maksimum yang dapat ditanggung oleh material sebelum terjadinya perpatahan (fracture). Nilai kekuatan tarik maksimum tarik ditentukan dari beban maksimum dibagi luas penampang.

e). Kekuatan Putus (*Breaking Strength*)

Kekuatan putus ditentukan dengan membagi beban pada saat benda uji putus ($F_{breaking}$) dengan luas penampang awal (A_0). Untuk bahan yang bersifat ulet pada saat beban maksimum M terlampaui dan bahan terus terdeformasi hingga titik putus B maka terjadi mekanisme penciutan (*necking*) sebagai akibat adanya suatu deformasi yang terlokalisasi.

Pada bahan ulet, kekuatan putus lebih kecil dari kekuatan maksimum, dan pada bahan getas kekuatan putus sama dengan kekuatan maksimumnya.

f). Keuletan (*Ductility*)

Adalah sifat yang menggambarkan kemampuan logam menahan deformasi hingga terjadinya perpatahan. Pengujian tarik memberikan dua metode pengukuran keuletan bahan yaitu :

- Persentase perpanjangan (*Elongation*) :

$$e (\%) = [(L_f - L_0) / L_0] \times 100\% \quad (2.10)$$

dimana : L_f = panjang akhir benda uji

L_0 = panjang awal benda uji

- Persentase reduksi penampang (Area Reduction) :

$$R (\%) = [(A_1 - A_0)/A_0] \times 100\% \quad (2.11)$$

dimana : A_f = luas penampang akhir

A_0 = luas penampang awal

g). Modulus Elastisitas (*Modulus Young*)

Adalah ukuran kekakuan suatu material, semakin besar harga modulus ini maka semakin kecil regangan elastis yang terjadi, atau semakin kaku. Jika hanya terjadi deformasi elastik, regangan akan sebanding dengan tegangan. Perbandingan antara tegangan dan regangan disebut modulus elastisitas (modulus Young). Makin besar gaya tarik menarik antar atom logam, makin tinggi pula modulus elastisitasnya. Pada logam aluminium dan tembaga, modulus elastisitasnya akan turun dengan naiknya suhu. Pemuaiian termal menyebabkan turunnya harga dF/da , dan dengan demikian modulus elastisitasnya juga turun.

2.5.2 Deformasi elastis dan plastis pada logam [11]

Saat sebuah logam ataupun material lainnya diberi beban yang cukup, maka material (logam) tersebut akan mengalami perubahan bentuk. Perubahan bentuk ini disebut deformasi. Perubahan bentuk yang bersifat sementara dimana bentuk material dapat kembali ke bentuk aslinya saat beban dilepaskan disebut deformasi elastis. Dengan kata lain, deformasi elastis adalah perubahan bentuk material pada tekanan (beban) rendah dan dapat pulih kembali saat tekanan (beban) dilepaskan. Deformasi dengan jenis ini melibatkan peregangan pada ikatan-ikatan atom namun tidak menyebabkan pergeseran pada struktur atom. Saat beban yang diberikan cukup besar sehingga mengubah bentuk material secara permanen, maka perubahan ini disebut deformasi plastis.

2.6 Panas yang Terbentuk Akibat Arus yang Mengalir pada Konduktor

2.6.1 Hukum Ohm

Salah satu karakteristik listrik yang penting pada sebuah material padat adalah kemampuan material dalam menghantarkan arus listrik. Hukum ohm dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$V = IR \quad (2.12)$$

Dimana I merupakan arus atau muatan yang bergerak tiap satuan waktu

V merupakan tegangan dan R adalah hambatan material dimana arus mengalir.

Nilai dari R dipengaruhi oleh jenis dan bentuk bahan. Nilai dari R dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad \text{atau} \quad \rho = \frac{RA}{l} \quad (2.13)$$

Dimana ρ merupakan tahanan jenis material , l adalah jarak antara dua titik dimana tegangan diukur, dan A adalah luas penampangnya. Dari persamaan hukum ohm dan persamaan diatas maka dapat ditulis persamaan baru:

$$\rho = \frac{VA}{Il} \quad (2.14)$$

2.6.2 Konduktivitas Logam [12]

Logam, dengan ikatannya yang lemah dengan elektron valensi, merupakan konduktor listrik dan penghantar panas yang baik. Konduktivitas ini terjadi karena hanya diperlukan energi sedikit saja untuk mengaktifkan elektron yang terdelokalisir ke level konduksi.

Nilai konduktivitas listrik σ digunakan untuk menentukan karakter listrik pada sebuah material. Nilai konduktivitas ini berbanding terbalik dengan nilai daya hambat, atau dalam persamaan:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = nq\mu \quad (2.15)$$

nilai konduktivitas ini menyatakan kemampuan dari sebuah material dalam menghantarkan arus listrik. Daya hantar ini tergantung pada jumlah pembawa muatan n , besar muatan q , dan mobilitas μ dari pembawa muatan. Persamaan untuk Hukum Ohm dapat ditulis juga dengan

$$J = \sigma E \quad (2.16)$$

Dimana J adalah kepadatan arus, yaitu banyaknya arus pada suatu luas penampang I/A . dan E merupakan intensitas medan listrik, yaitu besarnya tegangan diantara dua titik dibagi dengan jarak pisah kedua titik tersebut. Atau dalam bentuk persamaan :

$$E = \frac{V}{l} \quad (2.17)$$

Mobilitas suatu muatan dapat dianggap sebagai kecepatan rata-rata atau kecepatan gerak v pembawa, yang ditimbulkan oleh adanya medan listrik \mathcal{E} :

$$\mu = \frac{v}{\mathcal{E}} \quad (2.18)$$

Arus yang mengalir pada sebuah konduktor dapat menyebabkan panas. Besar energi panas yang dapat terjadi pada sebuah konduktor yang dialiri arus dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$W = J E = \sigma E^2 \quad (2.19)$$

Misalkan sebuah partikular elektron saat $t = 0$ menyebabkan tubrukan pada kisi-kisi. Pada saat itu juga hanggap komponen laju (kecepatan) dari elektron sebagai v_x, v_y, v_z . asumsikan bahwa pada saat $t(>0)$ elektron tidak lagi mengalami tubrukan, dan asumsikan medan E diaplikasikan sepanjang sumbu x negatif, komponen kecepatan elektron pada waktu t menjadi :

$$v_x + (e/m)Et, \quad v_y, \quad \text{dan} \quad v_z \quad (2.20)$$

penambahan $(e/m)Et$ adalah sebagai hasil dari percepatan sepanjang sumbu x yang dihasilkan oleh medan. Pertambahan energi elektron saat waktu t menjadi :

$$(\Delta W)_t = \frac{1}{2} m [(2e/m)Ev_x t + (e/m)^2 E^2 t^2] \quad (2.21)$$

Jika persamaan ini dirata-ratakan pada sejumlah besar elektron yang bergerak dalam waktu t tanpa mengalami tubrukan, dengan anggapan elektron mempunyai distribusi acak pada kecepatannya maka didapatkan persamaan :

$$(\Delta W)_t = \frac{1}{2} m [(e/m)^2 E^2 t^2] = e^2 E^2 t^2 / 2m \quad (2.22)$$

Karena $\langle v_x \rangle$ akan bernilai nol pada kondisi ini.

Misalkan $F(t)$ menyatakan peluang pergerakan elektron dalam waktu t tanpa mengalami tubrukan, dan $F(t + dt)$ menyatakan jumlah peluang yang sama untuk waktu $t + dt$. Maka dapat ditulis persamaan:

$$F(t + dt) = F(t) + \frac{dF}{dt} dt \quad (2.23)$$

Persamaan ini juga dapat ditulis sebagai :

$$F(t + dt) = F(t)F(dt) = F(t) [1 - dt/\tau_c] \quad (2.24)$$

Dari defenisi τ_c , dapat dituliskan persamaan:

$$dF/dt = - F/\tau_c \quad \text{atau} \quad F(t) = e^{-t/\tau_c} \quad (2.25)$$

Sesuai persamaan diatas, peluang elektron akan bergerak dalam waktu t tanpa mengakibatkan tabrakan adalah $F(t) = \exp [- t/\tau_c]$. Untuk menyederhanakannya kita harus mengansumsikan elektron-elektron berserak secara isotropis, sehingga waktu rata-rata antara tubrukan τ_c sama dengan waktu waktu relaksasi τ .

Peluang elektron akan mengalami tubrukan dalam interval waktu dt dapat dituliskan menjadi $dt/\tau_c = dt/\tau$. oleh karena itu, persamaan $e^{-t/\tau} (dt/\tau)$ akan memberikan kemungkinan terjadinya tabrakan diantara t dan $t + dt$. akibatnya, rata-rata energi elektron yang meningkat selama waktu antara dua tubrukan adalah:

$$\langle \Delta W \rangle = \int_{t=0}^{\infty} \langle \Delta W \rangle_t e^{-t/\tau} \frac{dt}{\tau} \quad (2.26)$$

Dimana $\langle \Delta W \rangle_t = \tau^2 e^{-t/\tau} E^2 / m$

Asumsikan terdapat sejumlah n elektron dengan satuan unit m^3 , dan elektron tersebut mengirim energinya sepanjang kisi-kisi, sehingga dihasilkan persamaan untuk total energi yang terdissipasi per m^3 , tiap satuan waktu:

$$W = \frac{n}{\tau} \langle \Delta W \rangle = \left(\frac{ne^2 \tau}{m} \right) E^2 = \sigma E \quad (2.27)$$

2.7 Bimetal

Dua keping logam yang mempunyai koefisien muai panjang berbeda dikeling menjadi satu disebut keping bimetal. Keping bimetal peka terhadap perubahan suhu. Jika keping bimetal dipanaskan, maka akan melengkung ke arah logam yang angka koefisien muai termal linearnya kecil. Bila didinginkan, keping bimetal akan melengkung ke arah logam yang angka koefisien muai termal linearnya besar.

Pada penyambungan logam bimetal antara aluminium dan tembaga akan diperoleh keping bimetal . dengan melihat besar koefisien muai termal kedua logam (aluminium dan tembaga) kita dapat mengetahui bahwa saat terjadi pemanasan, maka akan terjadi pembengkokan ke arah koefisien muai termal linear terkecil yaitu tembaga.

BAB 3

METODOLOGI PENGUJIAN

Pengujian karakteristik muai tembaga dan aluminium serta sambungannya dilakukan dengan dua variasi. Pengujian pertama adalah dengan menguji karakteristik muai masing-masing bahan dalam kondisi lepas (tanpa tekanan dan tegangan) dan tidak tersambung. Pengujian kedua dilakukan dalam kondisi kedua bahan disambung dengan menggunakan baut dan mur yang dikencangkan dengan kunci torsi.

3.1 Peralatan dan Rangkaian Pengujian

3.1.1 Peralatan pengujian

Peralatan yang digunakan dalam pengujian adalah:

1. Tembaga
2. Aluminium
3. Bejana (*chamber*) pemanas
4. Termometer
5. Jangka sorong digital dengan ketelitian 0.01 mm
6. Mur dan baut
7. Kunci torsi

3.1.1.1 Aluminium

Sifat-sifat penting yang dimiliki aluminium sehingga banyak digunakan sebagai material teknik[13]:

- Berat jenisnya ringan (hanya 2,7 gr/cm³, sedangkan besi ± 8,1 gr/ cm³)
- Tahan korosi

- Penghantar listrik dan panas yang baik
- Mudah di fabrikasi/di bentuk
- Kekuatannya rendah tetapi pemaduan (alloying) kekuatannya bisa ditingkatkan
- Koefisien muai panjang termal linear dari aluminium adalah $24 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$
- Koefisien muai panjang termal volume dari aluminium adalah

$$24 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1} \times 3 = 72 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$$

Sifat bahan korosi dari aluminium diperoleh karena terbentuknya lapisan aluminium oksida (Al_2O_3) pada permukaan aluminium. Lapisan ini membuat Al tahan korosi tetapi sekaligus sukar dilas, karena perbedaan *melting point* (titik lebur). Aluminium umumnya melebur pada temperature $\pm 600^{\circ}\text{C}$ dan aluminium oksida melebur pada temperatur 2000°C .

Kekuatan dan kekerasan aluminium tidak begitu tinggi, namun dengan pemaduan dan heat treatment kekuatan dan kekerasannya dapat ditingkatkan. Aluminium komersil selalu mengandung ketidak murnian $\pm 0,8\%$ biasanya berupa besi, silikon, tembaga dan magnesium.

Berikut ini salah satu contoh paduan aluminium dan sifat mekaniknya

Aluminium Alloy (AA) 6101-T6 ,UNS A96101: [14]

Komposisi

Element	Al	Boron (B)	Chromium (Cr)	Cu	Fe	Mg	Si
Weight %	97.6	0.06	0.03	0.1	0.5	0.3 – 0.8	0.3 - 0.7

Mechanical Properties (pada temperatur 25°C)

density ($\times 1000 \text{ kg/m}^3$)	2.7
Poissons's Ratio	0.33

Elastic Modulus (GPa)	68.9
Tensile Strength (MPa)	221
Yield Strength (MPa)	193
Elongation (%)	15
Hardness (HB500)	71
Shear Strength (MPa)	138

Thermal properties

Properties		Condition	
		T (°C)	Treatment
Thermal expansion ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	23.4	20-100	
Thermal conductivity (W/m-k)	218	25	O more

Electric Resistivity : 29.9×10^{-7} ohm-cm

3.1.1.2 Tembaga

Tembaga merupakan logam dengan kemampuan daya hantar listrik dan panas yang baik. Tembaga memiliki lambang Cu (*Cuprum*) dan nomor atom 29. secara mekanik, tembaga mudah dibentuk dan lunak. Penggunaan tembaga sebagai konduktor seperti sebagai bahan pada busbar adalah karena kemampuan daya hantar listriknya yang sangat baik kedua setelah perak dengan konduktivitas listrik 59.6×10^6 S/m. Tabel berikut memperlihatkan sifat mekanik dari tembaga

Tabel 3.2 Sifat mekanik tembaga [15]

Condition	Proof stress 0-1% extension (ton/sq in.)	Tensile Strength (tons/sq in.)	Elongation percent on 2 in.	Diamond pyramid hardness
As cast				
Hot worked				
Cold worked	2	10	25	40
10% reduction in thickness	6	15	45	50
50% reduction in thickness	4	14	50	45
60% reduction in thickness	12	17	38	82
90% reduction in thickness	17	20	15	103
	21	25	6	114
	25	29	3	125
Fatigue strength	5 tons/sq in. For 10 ⁸ reversals			
Thermal expansion	17 x 10 ⁻⁶ per C deg.			

Koefisien muai termal volume (α_V) tembaga murni *isotropic* adalah

$$17 \times 10^{-6} \times 3 = 51 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

Berikut ini salah satu contoh paduan Tembaga dan sifat mekaniknya

Copper No. C11000, Electrolytic Tough Pitch Copper [16]

Komposisi

Element	Cu	Oxygen
Weight %	99,9	0.04

Mechanical Properties (pada temperatur 25⁰C)

density (lb/cu in @ 68 F)	2.7
Elastic Modulus (GPa)	117.13

Tensile Strength (MPa)	330.72
Yield Strength (MPa)	303.16
Hardness (HB500)	87

Thermal expansion : $17 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

Electric Resistivity : 29.9×10^{-7} ohm-cm

3.1.1.3 Termometer

Untuk mengukur temperatur logam digunakan termometer digital. Termometer ini menggunakan sensor suhu termokopel yang dapat mengubah perbedaan suhu pada benda ke perubahan tegangan (dalam ukuran μV).



Gambar 3.1 Termometer digital

3.1.1.4 Kunci torsi (*torque wrench*)

Kunci torsi digunakan untuk mengatur kekencangan penyambungan dengan baut sehingga besar tekanan oleh kedua baut sama besarnya dan tekanan dianggap merata pada semua daerah sambungan.



Gambar 3.2 Kunci torsi

3.1.1.5 Bejana (*chamber*) pemanas

Kenaikan temperature logam diatur dengan menggunakan chamber pemanas. dengan menggunakan alat ini panas yang diperoleh bahan lebih merata dan kenaikan temperturnya lebih terkontrol. *Chamber* pemanas yang digunakan berupa oven dengan kemampuan pengaturan temperature dan waktu pemanasan.



Gambar 3.3 *Chamber* pemanas

3.1.1.6 Jangka sorong digital

Alat ukur untuk mengetahui panjang pemuaian adalah jangka sorong digital dengan ketelitian 0.01 mm atau 10 μm .



Gambar 3.4 Jangka sorong

Selain itu digunakan baut dengan ukuran diameter 8 mm untuk alat penyambung.

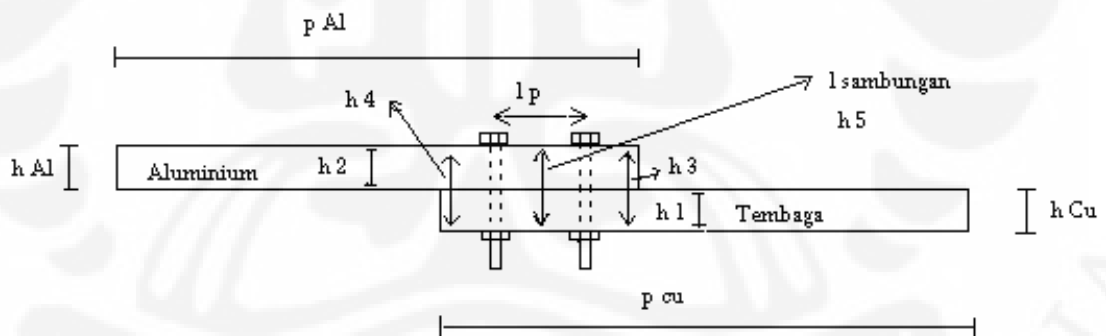
3.2 Tahap dan Proses Pengujian

Pengujian masing-masing bahan sebelum dilakukan sambungan yaitu :

1. Melakukan pengukuran bahan uji pada suhu kamar. Pengujian dilakukan pada temperature ruangan sebesar $\pm 29^{\circ}\text{C}$. kemudian dilakukan juga pengukuran temperature pada bahan. Setelah itu, panjang lebar dan tinggi bahan kemudian diukur dengan menggunakan jangka sorong digital.
2. Menaikkan temperature bahan dengan pemanasan merata menggunakan bejana pemanas. Dan dilakukan pengukuran panjang, lebar, dan tebal bahan setiap kenaikan temperature sebesar 10°C hingga temperature bahan mencapai $\pm 100^{\circ}\text{C}$.

Pengujian untuk bahan dalam kondisi sambungan.

Kedua bahan akan disambung dengan menggunakan mur berbahan besi yang memiliki daya tahan panas lebih tinggi (pengaruh panas terhadap perubahan karakteristik materialnya jauh lebih kecil dibanding kedua bahan) sehingga pengaruh mur dapat diabaikan. Kedua bahan akan disambung seperti pada gambar 3.5



Gambar 3.5 Rangkaian pengujian sambungan

Pada kondisi temperatur ruangan (27°C), ukuran ketebalan awal adalah:

$h_1 = 8.32 \text{ mm}$, $h_2 = 8.876 \text{ mm}$, $h_3 = 17.248 \text{ mm}$, $h_4 = 16.908 \text{ mm}$, $h_5 = 17.056 \text{ mm}$.

$p_{cu} = 171.19 \text{ mm}$, $p_{Al} = 170.71 \text{ mm}$.

Diameter mur yang digunakan 8 mm.

Jarak pusat antara mur sambungan (l_p) = 300 mm

Tahap pengujian untuk sambungan tembaga dan aluminium:

1. Mengukur tebal masing-masing aluminium dan tembaga pada suhu awal (dilakukan pada saat suhu logam 30°C) di titik sambungan.
2. Mengukur tebal masing-masing logam sebelum disambungkan pada titik h1,h2,h3,h4 dan h5 dalam kondisi suhu awal (30°C).
3. Menyambung kedua logam sesuai dengan rangkaian dengan menggunakan mur dan baut berbahan besi dengan ukuran diameter 8 mm. Kekencangan kedua mur diatur dengan menggunakan kunci torsi dengan kekuatan kekencangan 20 Nm.
4. Mengukur ketebalan sambungan yaitu pada titik h3,h4,h5 pada suhu awal (30°C)
5. Menaikkan temperatur bahan dengan pemanasan merata menggunakan bejana pemanas. mengukur ketebalan h1,h2,h3,h4,h5 setiap kenaikan temperatur sebesar 10°C hingga temperatur bahan mencapai $\pm 100^{\circ}\text{C}$.

BAB 4

HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS

4.1 Pengujian untuk Masing-Masing Logam

Sebelum dilakukan pengujian sambungan logam, kedua logam akan diuji masing-masing untuk melihat karakteristik tiap logam dan pengaruh suhu terhadap sifat mekanis logam. Pengujian dilakukan sebanyak lima kali untuk masing-masing logam. Pertama, logam akan diukur pada suhu awal (29 °C), kemudian diukur pada tiap kenaikan 10 °C.

4.1.1 Pengujian pada tembaga

Sebelum dilakukan pengujian, dilakukan dahulu perhitungan besar pemuaian yang dapat terjadi pada tembaga sesuai persamaan pemuaian. Dengan nilai dimensi awal yang sama, besar pemuaian pada tembaga dihitung dengan menggunakan nilai koefisien muai termal linear tembaga 17×10^{-6} ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) dan diperoleh besar pemuaian seperti pada table berikut:

Tabel 4.1 Besar pemuaian dengan menggunakan perhitungan

T(°C)	p (mm)	l (mm)	t (mm)	v (mm ³)
29	171.19	40.324	8.286	57198.8
39	171.2191	40.33086	8.287409	57227.98
49	171.2482	40.33771	8.288817	57257.17
59	171.2773	40.34457	8.290227	57286.37
69	171.3064	40.35143	8.291636	57315.6
79	171.3356	40.35829	8.293045	57344.83
89	171.3647	40.36515	8.294455	57374.08
99	171.3938	40.37201	8.295865	57403.35
109	171.423	40.37887	8.297276	57432.63

Berikut tabel hasil pengujian panjang, lebar dan tebal untuk tembaga.

Tabel 4.2 Pengujian pemuaian panjang tembaga

T (°C)	P (mm)				
	data 1	data 2	data 3	data 4	data 5
29	171.19	171.19	171.2	171.17	171.2
39	171.29	171.21	171.24	171.2	171.24
49	171.32	171.24	171.29	171.24	171.28
59	171.35	171.29	171.31	171.27	171.3
69	171.38	171.31	171.36	171.29	171.32
79	171.4	171.34	171.38	171.31	171.37
89	171.43	171.37	171.45	171.34	171.39
99	171.46	171.41	171.47	171.39	171.42
109	171.5	171.47	171.49	171.41	171.45

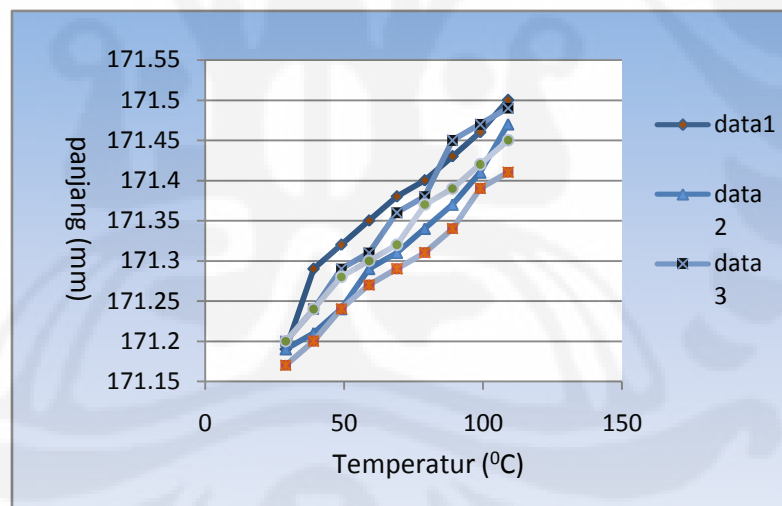
Tabel 4.3 Pengujian pemuaian lebar tembaga

T (°C)	l (mm)				
	data 1	data 2	data 3	data 4	data 5
29	40.32	40.32	40.38	40.3	40.3
39	40.37	40.33	40.39	40.32	40.33
49	40.38	40.34	40.4	40.34	40.35
59	40.39	40.36	40.4	40.35	40.36
69	40.41	40.37	40.41	40.36	40.37
79	40.42	40.38	40.41	40.37	40.39
89	40.44	40.4	40.41	40.39	40.4
99	40.45	40.42	40.43	40.4	40.41
109	40.47	40.42	40.44	40.41	40.43

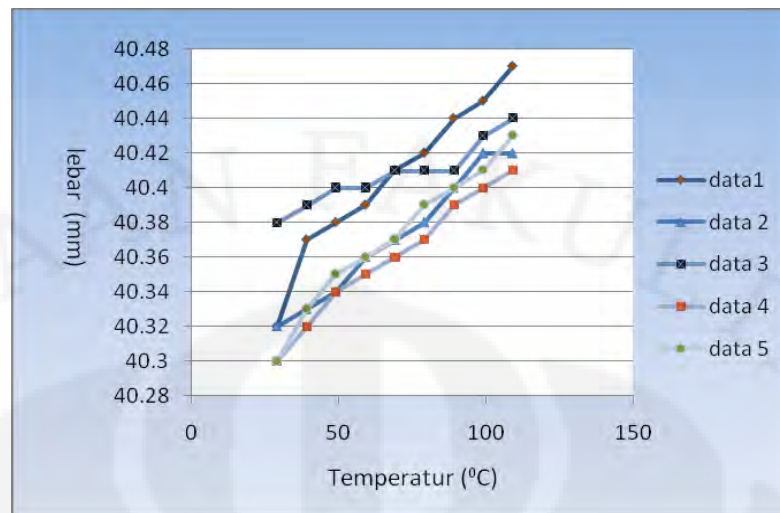
Tabel 4.4 Pengujian pemuaiian tebal tembaga

T (°C)	h (mm)				
	data 1	data 2	data 3	data 4	data 5
29	8.32	8.29	8.32	8.23	8.27
39	8.33	8.3	8.32	8.24	8.29
49	8.34	8.3	8.34	8.24	8.29
59	8.36	8.33	8.35	8.25	8.29
69	8.37	8.33	8.36	8.25	8.3
79	8.39	8.33	8.36	8.25	8.32
89	8.4	8.34	8.36	8.26	8.33
99	8.41	8.34	8.38	8.27	8.34
109	8.43	8.35	8.38	8.27	8.34

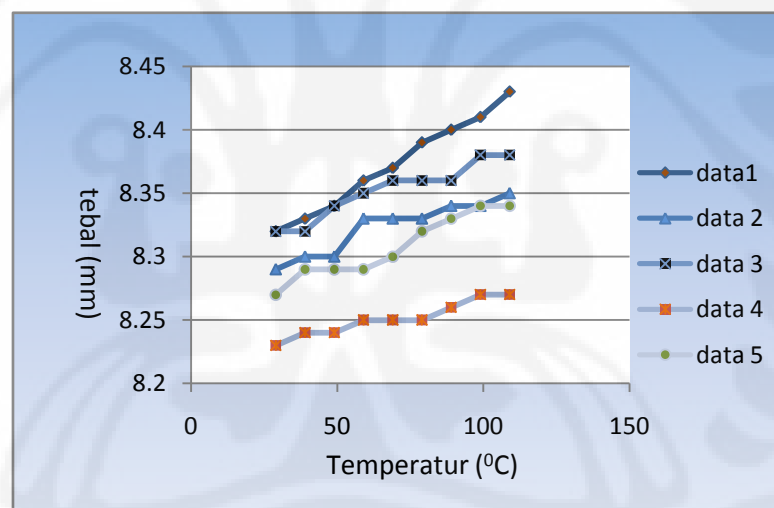
Dari data pengujian, diperoleh grafik perubahan panjang, lebar, dan tebal tembaga sebagai berikut :



Gambar 4.1 Grafik pengujian pemuaiian panjang tembaga



Gambar 4.2 Grafik pengujian pemuai lebar tembaga



Gambar 4.3 Grafik pengujian pemuai tebal tembaga

Dari kelima data dihitung nilai rata-rata hasil pengujian sehingga diperoleh persamaan regresi linear dan diperoleh grafik untuk nilai rata-rata perubahan panjang, lebar, dan tebal pada tiap kenaikan temperatur. Berikut tabel nilai pemuai rata-rata pada tembaga.

Tabel 4.5 Data nilai rata-rata pemuaian tembaga pada percobaan

T (°C)	p (mm)	l (mm)	t (mm)	V (mm)
29	171.19	40.324	8.286	57198.8
39	171.236	40.348	8.296	57317.31
49	171.274	40.362	8.302	57391.4
59	171.304	40.372	8.316	57512.5
69	171.332	40.384	8.322	57580.51
79	171.36	40.394	8.33	57659.56
89	171.396	40.408	8.338	57747.07
99	171.43	40.422	8.348	57847.83
109	171.464	40.434	8.354	57918.08

Dari data rata-rata diatas,nilai koefisien muai termal panjang (linear) dapat kita lihat dari nilai perubahan panjang 0.274 mm dan perubahan suhu 80°C yaitu:

$$\alpha_l = \frac{1}{p} \frac{dp}{dT} = \frac{1}{171.19} \frac{0.274}{80} \quad (\text{pada panjang})$$

$$\alpha_l = 20.007 \times 10^{-6} (^\circ\text{C})^{-1}$$

Dengan persamaan yang sama kita dapat menghitung besar koefisien muai termal linear lebar sehingga diperoleh:

$$\alpha_l = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT} = \frac{1}{40.324} \frac{0.11}{80} \quad (\text{pada lebar})$$

$$\alpha_l = 34.098 \times 10^{-6} (^\circ\text{C})^{-1}$$

Untuk koefisien muai luas dapat kita peroleh dengan menghitung luas rata-rata atau dengan cara menjumlahkan nilai koefisien muai termal linear panjang dan lebar tembaga yaitu :

$$\alpha_A \approx 20.007 \times 10^{-6} + 34.098 \times 10^{-6} = 54.105 \times 10^{-6} (^\circ\text{C})^{-1}$$

Koefisien muai termal linear pada tebal tembaga dihitung dengan persamaan:

$$\alpha_l = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT} = \frac{1}{8.286} \frac{0.068}{80}$$

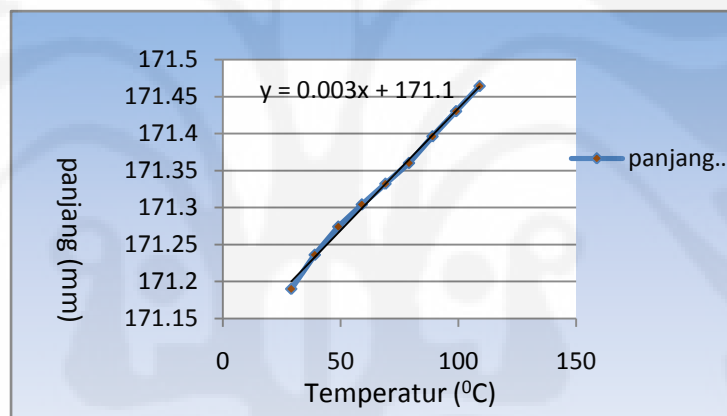
$$\alpha_l = 103 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$$

Untuk nilai koefisien muai volume percobaan dengan nilai perubahan volume 719.28 mm³ maka :

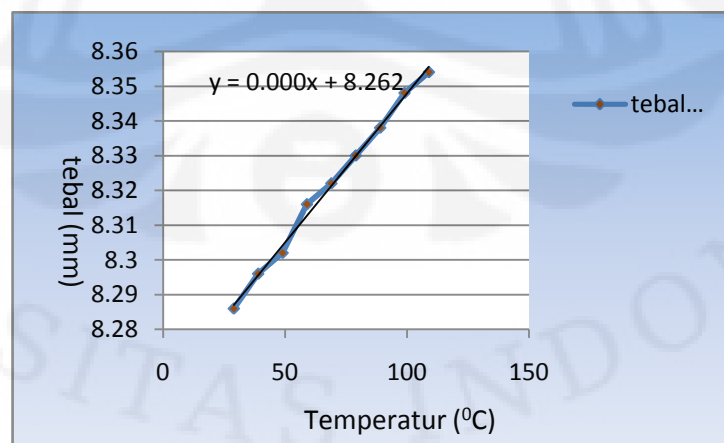
$$\alpha_v = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} = \frac{1}{57198.8} \frac{719.28}{80}$$

$$\alpha_v = 157 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$$

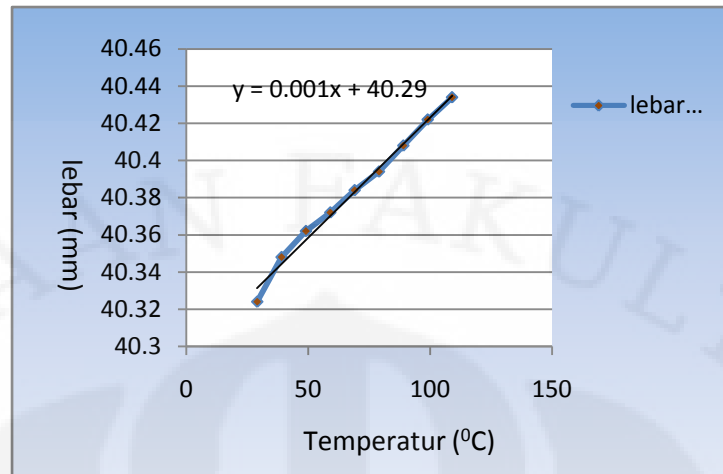
Berikut grafik rata-rata perubahan panjang, lebar, dan tebal yang terjadi pada tembaga.



Gambar 4. Grafik pemuai panjang rata-rata pada tembaga



Gambar 4.5 Grafik pemuai lebar rata-rata pada tembaga



Gambar 4.6 Grafik pemuaian tebal rata-rata pada tembaga

Dari grafik dan persamaan regresi terlihat bahwa perubahan yang terjadi pada panjang tembaga lebih signifikan dibandingkan pada lebar dan tebal tembaga.

4.1.2 Pengujian pada aluminium

Sebelum dilakukan pengukuran untuk aluminium, dilakukan perhitungan besar pemuaian dengan rumus sesuai dengan teori pemuaian. Besar pemuaian pada aluminium dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.6 Besar Pemuaian pada Aluminium dengan perhitungan

T	p	l	t	v
29	170.7075	40.53	8.645	59812.81
39	170.7485	40.53973	8.647075	59855.89
49	170.7894	40.54946	8.64915	59898.99
59	170.8304	40.55919	8.651226	59942.13
69	170.8714	40.56892	8.653302	59985.3
79	170.9124	40.57866	8.655379	60028.5
89	170.9535	40.5884	8.657456	60071.73
99	170.9945	40.59814	8.659534	60114.99
109	171.0355	40.60788	8.661612	60158.28

Pengujian dilakukan sebanyak lima kali. Aluminium diukur pada suhu awal (29 °C) dan setiap kenaikan 10°C .

Berikut data hasil pengujian untuk aluminium.

Tabel 4.7 Data pengujian pemuaian panjang aluminium

T (°C)	P (mm)				
	data 1	data 2	data 3	data 4	data 5
29	170.75	170.71	170.71	170.71	170.7
39	170.81	170.76	170.74	170.74	170.76
49	170.85	170.82	170.77	170.81	170.79
59	170.9	170.9	170.82	170.87	170.83
69	170.95	170.94	170.88	170.9	170.89
79	171.02	170.96	170.91	170.94	170.92
89	171.06	171	170.99	170.99	170.99
99	171.09	171.06	171.04	171.06	171.04
109	171.11	171.11	171.11	171.11	171.1

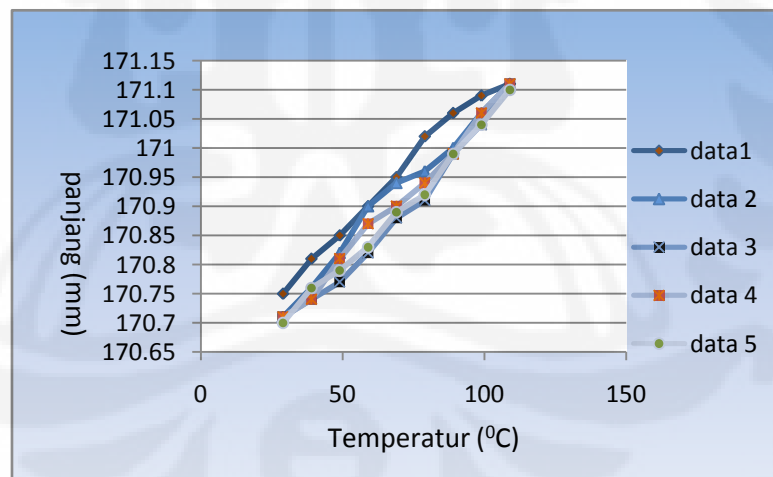
Tabel 4.8 Data pengujian pemuaian lebar aluminium

T (°C)	l (mm)				
	data 1	data 2	data 3	data 4	data 5
29	40.61	40.53	40.51	40.55	40.53
39	40.61	40.57	40.53	40.57	40.56
49	40.63	40.61	40.54	40.58	40.57
59	40.65	40.62	40.57	40.6	40.58
69	40.65	40.64	40.59	40.61	40.59
79	40.68	40.65	40.61	40.62	40.6
89	40.69	40.65	40.63	40.64	40.62
99	40.71	40.66	40.65	40.66	40.65
109	40.71	40.68	40.67	40.66	40.68

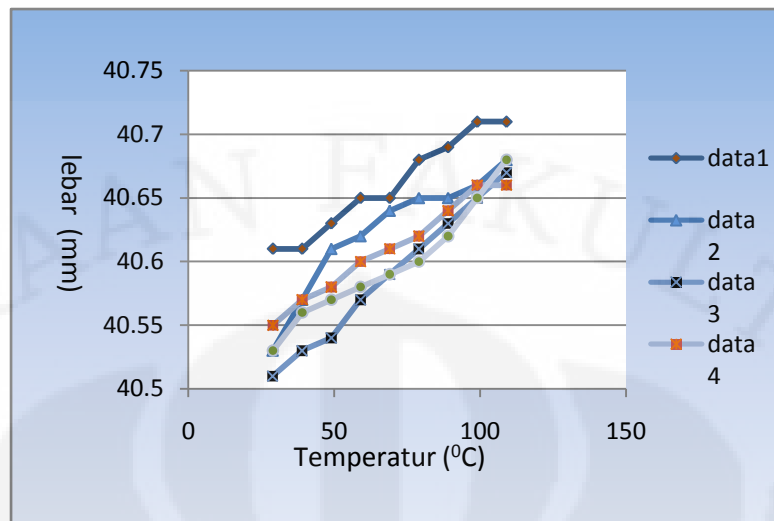
Tabel 4.9 Data pengujian pemuaian tebal aluminium

$T (^{\circ}\text{C})$	t (mm)				
	data 1	data 2	data 3	data 4	data 5
29	8.69	8.67	8.59	8.66	8.66
39	8.74	8.68	8.61	8.66	8.68
49	8.78	8.68	8.61	8.68	8.68
59	8.8	8.68	8.65	8.69	8.69
69	8.82	8.69	8.65	8.7	8.69
79	8.84	8.69	8.67	8.71	8.69
89	8.85	8.7	8.68	8.72	8.7
99	8.87	8.7	8.68	8.72	8.71
109	8.87	8.7	8.69	8.73	8.72

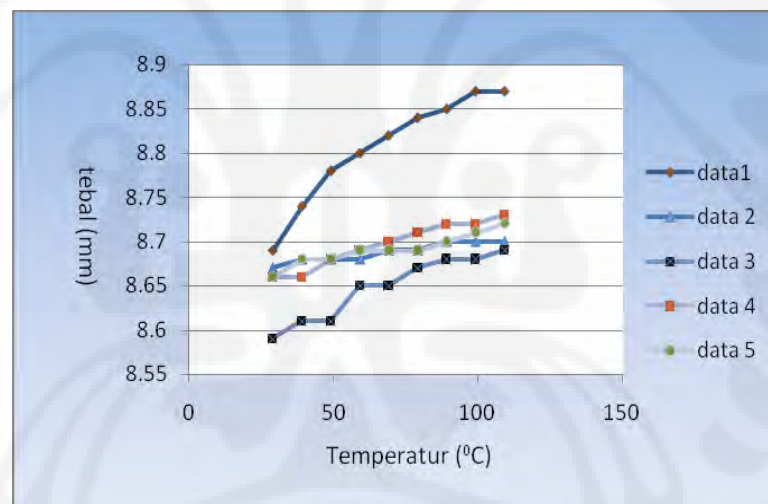
Dari data diatas, diperoleh grafik perubahan panjang, lebar dan tebal pada pengujian aluminium sebagai berikut :



Gambar 4.7 grafik pengujian pemuaian panjang aluminium



Gambar 4.8 grafik pengujian pemuai lebar tembaga



Gambar 4.9 grafik pengujian pemuai panjang tembaga

Pada data hasil pengujian aluminium ini juga dihitung rata-rata nilai perubahan panjang, lebar, dan tebal yang terjadi pada aluminium akibat perubahan temperatur. Dari nilai rata-rata ini diperoleh juga nilai volume dan pemuai rata-rata volumenya seperti tabel berikut:

Tabel 4.10 data nilai rata-rata pemuaian aluminium pada percobaan

T (°C)	p (mm)	l (mm)	t (mm)	V (mm ³)
29	170.7075	40.53	8.645	59812.81
39	170.75	40.5575	8.6575	59954.86
49	170.7975	40.575	8.6625	60032.07
59	170.855	40.5925	8.6775	60182.21
69	170.9025	40.6075	8.6825	60255.88
79	170.9325	40.62	8.69	60337.09
89	170.9925	40.635	8.7	60450.04
99	171.05	40.655	8.7025	60517.51
109	171.106	40.678	8.742	60846.5

Dari data rata-rata diatas,nilai koefisien muai termal panjang (linear) dapat kita lihat dari nilai perubahan panjang 0.3985 mm dan perubahan suhu 80⁰C yaitu:

$$\alpha_l = \frac{1}{p} \frac{dp}{dT} = \frac{1}{170.7075} \frac{0.3985}{80} \quad (\text{pada panjang})$$

$$\alpha_l = 29.18 \times 10^{-6} (^\circ\text{C})^{-1}$$

Dengan persamaan yang sama kita dapat menghitung besar koefisien muai termal linear lebar sehingga diperoleh:

$$\alpha_l = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT} = \frac{1}{40.53} \frac{0.148}{80} \quad (\text{pada lebar})$$

$$\alpha_l = 45.645 \times 10^{-6} (^\circ\text{C})^{-1}$$

Untuk koefisien muai luas dapat kita peroleh dengan menghitung luas rata-rata atau dengan cara menjumlahkan nilai koefisien muai termal linear panjang dan lebar tembaga yaitu :

$$\alpha_A \approx 29.18 \times 10^{-6} + 45.645 \times 10^{-6} = 74.825 \times 10^{-6} (^\circ\text{C})^{-1}$$

Koefisien muai termal linear pada tebal tembaga dihitung dengan persamaan:

$$\alpha_l = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT} = \frac{1}{8.645} \frac{0.097}{80}$$

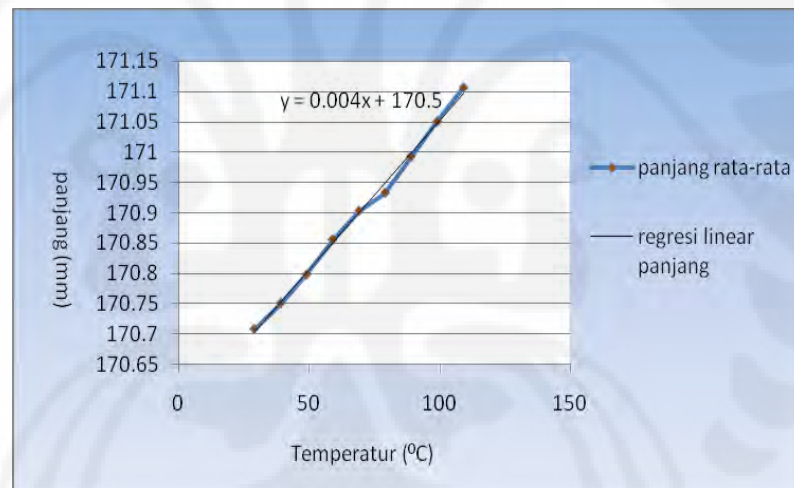
$$\alpha_l = 140 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$$

Untuk nilai koefisien muai volume percobaan dengan nilai perubahan volume 719.28 mm³ maka :

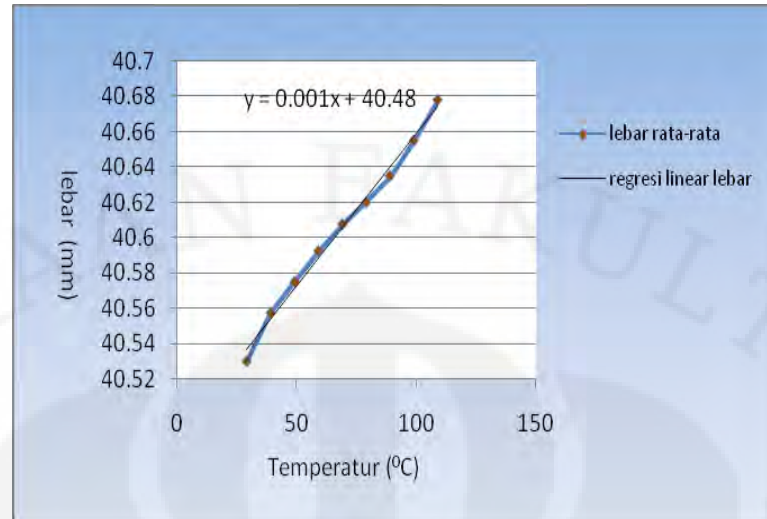
$$\alpha_v = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} = \frac{1}{59812.81} \frac{719.28}{80}$$

$$\alpha_v = 216.026 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$$

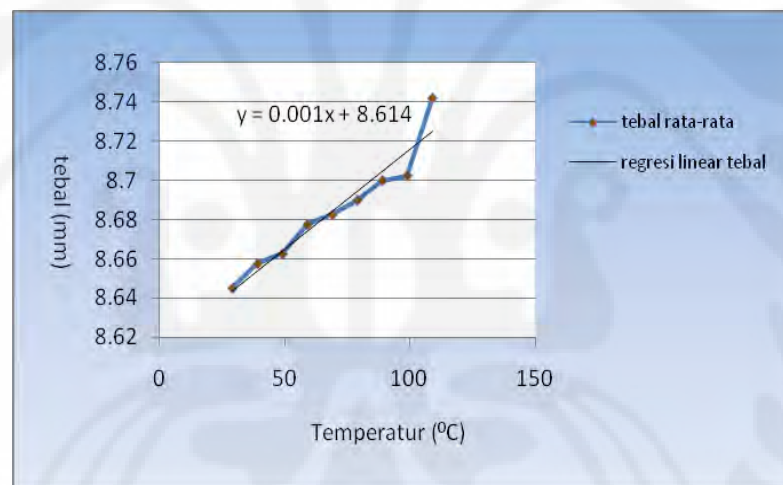
Berikut grafik dan persamaan regresi linear yang diperoleh dari data hasil pengujian untuk aluminium:



Gambar 4.10 grafik perubahan panjang rata-rata pada aluminium



Gambar 4.11 grafik perubahan lebar rata-rata pada aluminium



Gambar 4.12 grafik perubahan tebal rata-rata pada aluminium

Perubahan yang terjadi pada aluminium dengan kenaikan temperatur yang sama lebih besar dibandingkan perubahan yang terjadi pada tembaga. Hal ini disebabkan oleh perbedaan sifat muai termal kedua bahan.

Dari data yang telah diperoleh dapat kita lihat bahwa besar pemuaian tergantung pada dimensi bahan dan jenis bahan. Hal ini sesuai dengan persamaan pemuaian yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya.

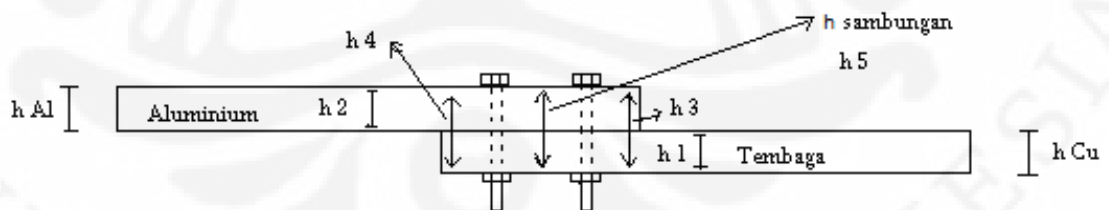
4.2 Pengujian dengan Sambungan

Pengujian dengan sambungan kedua bahan dilakukan dengan tujuan melihat besar pengaruh temperatur terhadap keadaan bahan yang mengalami tekanan.

Jika dua logam dengan jenis berbeda disambung sehingga keduanya saling menahan, maka satu logam akan mengganggu pemelaran logam lainnya dan mendapat menyebabkan tegangan sehingga terjadi proses kerusakan maupun patahan.

Aluminium dan tembaga akan mengalami deformasi seiring dengan naiknya suhu. Deformasi ini memberikan peluang terjadinya perubahan sifat- sifat logam tersebut seperti terbentuknya kristal baru (rekristalisasi) atau terjadinya pergelinciran (slip) yang nantinya dapat menjadi penyebab terjadinya retak atau bahkan patahan.

Pada percobaan, dilakukan pengukuran pada lima titik rangkaian. Titik pertama dan kedua yaitu h_1 , h_2 merupakan titik ketebalan masing-masing tembaga dan aluminium. Titik h_3, h_4 merupakan titik pada sambungan yang berada pada kedua bagian ujung sambungan. Dan titik h_5 merupakan titik tengah sambungan. Walaupun tekanan pada setiap sambungan dianggap merata, namun pemuaihan dan rongga yang dapat terbentuk pada sambungan dapat berbeda pada titik h_3 , h_4 , dan h_5



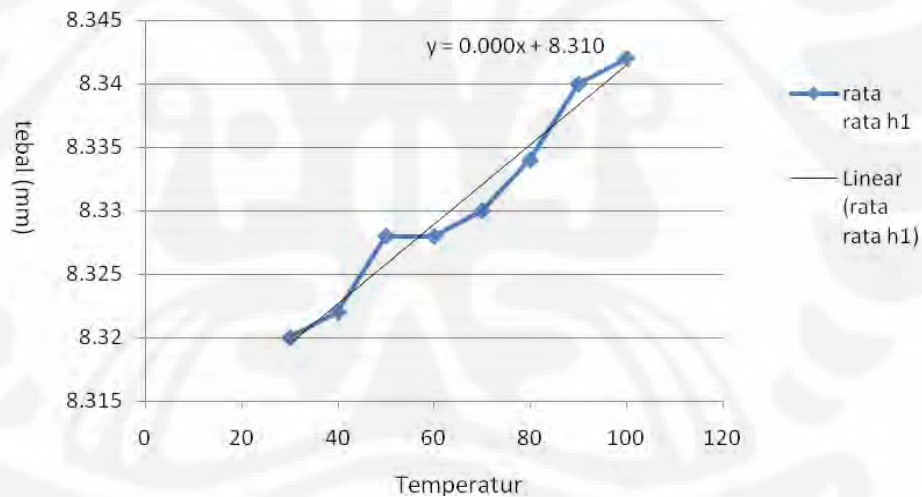
Gambar 4.13 Gambar titik pengukuran h_1, h_2, h_3, h_4, h_5

Dari lima percobaan yang telah dilakukan, dihitung nilai rata-rata perubahan pada kelima titik sehingga diperoleh data hasil pengujian sebagai berikut :

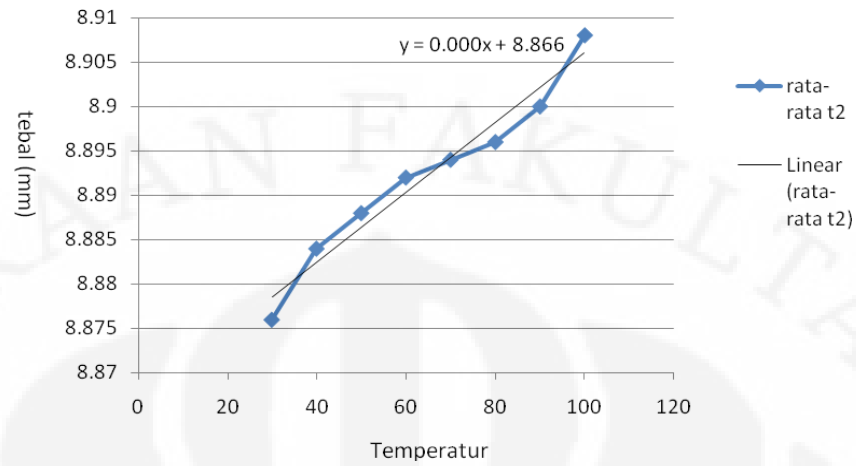
Tabel 4.11 Data rata-rata pemuaiian pada titik h1,h2,h3,h4,h5.

T (°C)	h Cu (h1) (mm)	h Al (h2) (mm)	h3(mm)	h4(mm)	h5(mm)
30	8.32	8.876	17.248	16.908	17.056
40	8.322	8.884	17.254	16.916	17.064
50	8.328	8.888	17.264	16.92	17.074
60	8.328	8.892	17.266	16.922	17.078
70	8.33	8.894	17.27	16.922	17.088
80	8.334	8.896	17.28	16.936	17.096
90	8.34	8.9	17.29	16.944	17.098
100	8.342	8.908	17.296	16.946	17.104

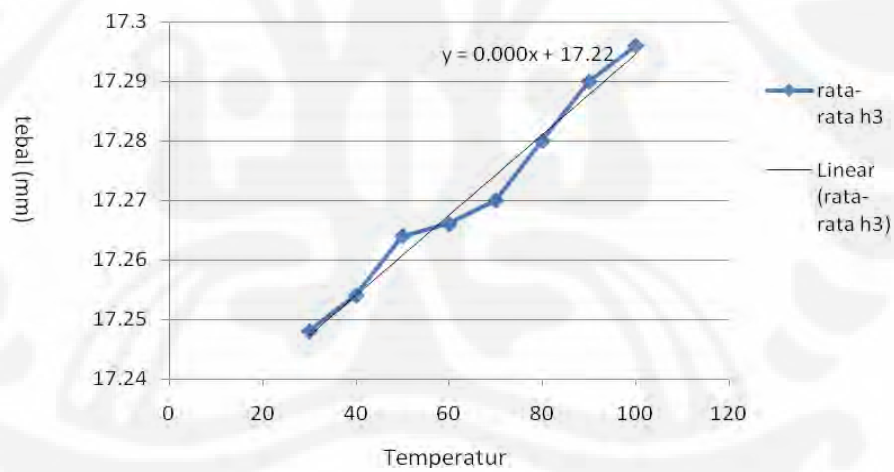
Dari data nilai, maka akan diperoleh rata-rata untuk tiap pengujian seperti diperlihatkan pada grafik berikut



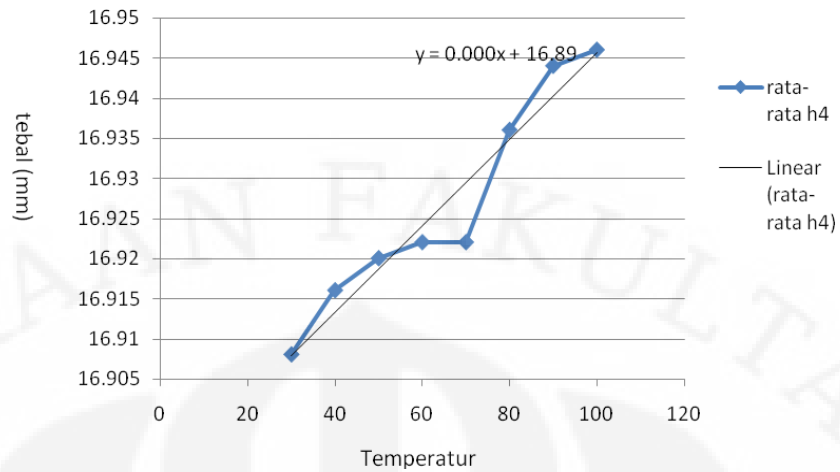
Gambar 4.14 Grafik rata-rata pemuaiian h1



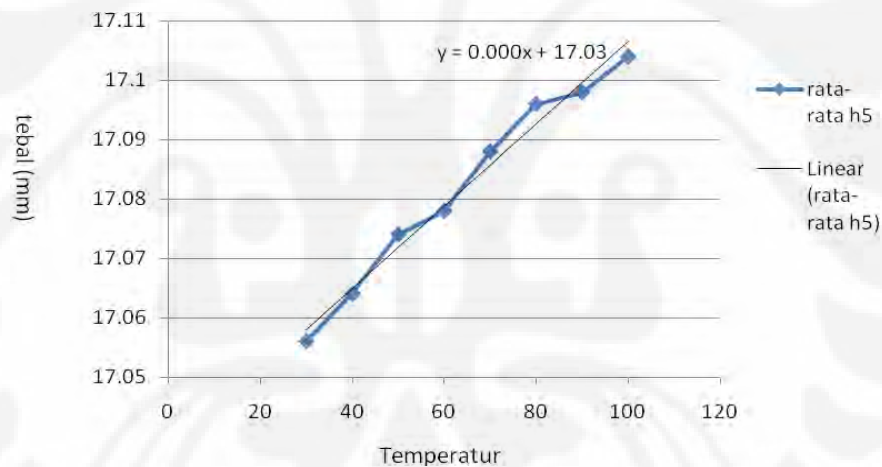
Gambar 4.15 Grafik rata-rata pemuai h2



Gambar 4.16 Grafik rata-rata pemuai h3



Gambar 4.17 Grafik rata-rata pemuaian h4



Gambar 4.18 Grafik rata-rata pemuaian h5

Pada bab landasan teori telah dijelaskan bahwa tegangan oleh temperatur pada material dapat terjadi pada material yang tertahan. Pada penyambungan, kedua logam dengan jenis berbeda dapat dilihat sebagai bimetal yang saling menahan pemuaian material satu dengan yang lain. Tegangan akibat temperatur yang timbul pada material yang tertahan dapat dianalisis sebagai berikut;

Sesuai dengan persamaan tegangan akibat pemuaian dengan kondisi ujung material ditahan yaitu :

$$\begin{aligned}\sigma &= E\alpha_1(T_0 - T_f) \\ &= E\alpha_1\Delta T\end{aligned}$$

$$\Delta T = \frac{\sigma}{E\alpha_1}$$

Untuk material aluminium dengan $\alpha_1 = 24 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$, dan $E = 69 \text{ GPa}$, maka diperoleh nilai tegangan :

$$\sigma = 24 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1} \times 69 \times 10^3 \text{ MPa} \times \Delta T (^{\circ}\text{C})$$

$$\sigma = 1,656 \Delta T \text{ MPa}$$

Jika terjadi perubahan suhu sebesar ΔT pada material baik oleh pengaruh suhu lingkungan atau pengaruh internal berupa arus, maka semakin besar nilai kenaikan suhu atau perubahan suhu maka semakin besar juga tegangan yang terjadi pada material tersebut (Aluminium).

Jika nilai kuat luluh aluminium 6101-T6 yaitu nilai regangan yang dibutuhkan hingga terjadi deformasi dari elastis menjadi plastis adalah sebesar 193 Mpa, maka nilai ΔT yang dapat menyebabkan perubahan ini sebesar :

$$\Delta T = \frac{\sigma}{E\alpha_1}$$

$$\Delta T = 193/1,656 = 116,55^{\circ} \text{ C}$$

Saat terjadi deformasi ini, maka material konduktor akan mengalami perubahan sifat yang dapat mempengaruhi daya hantaran arus.

Setelah batas kuat luluh maka kita perlu melihat batas patah material (*Ultimate Tensile Strength*) yaitu nilai tegangan maksimum yang dapat ditahan material sebelum mengalami patahan. Nilai *ultimate strength* untuk aluminium sebesar 221 Mpa. Jika tegangan yang diperoleh adalah stress akibat suhu maka besar ΔT yang diperlukan sebagai awal kerusakan adalah :

$$\Delta T = \frac{\sigma}{E\alpha_1}$$

$$\Delta T = 221/1,656 = 133,45^{\circ} \text{C}$$

Untuk tembaga (copper 99,9% Cu) copper C11000, nilai tegangan yang diperoleh dari persamaan :

$$\sigma = E\alpha_1(T_0 - T_f) = E\alpha_1\Delta T$$

$\alpha_1 = 17 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$, dan $E = 17 \times 10^6 \text{ psi} = 117,13 \text{ GPa}$, maka diperoleh nilai tegangan :

$$\begin{aligned} \sigma &= 17 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1} \times 117,13 \times 10^3 \text{ MPa} \times \Delta T (^{\circ}\text{C}) \\ &= 1,991 \Delta T \text{ Mpa} \end{aligned}$$

Kuat luluh (*yield strength*) tembaga C11000 adalah 70 MPa, maka nilai

$$\Delta T = \frac{\sigma}{E\alpha_1}$$

$$\Delta T = 303,16/1,991 = 152,26^{\circ} \text{C}$$

Batas patah (*ultimate strength*) tembaga 99,9% Cu adalah 220 MPa, maka nilai

$$\Delta T = \frac{\sigma}{E\alpha_1}$$

$$\Delta T = 330,72/1,991 = 166,11^{\circ} \text{C}$$

Besar perubahan suhu yang dibutuhkan untuk mencapai batasan kuat luluh aluminium adalah sebesar $116,55^{\circ} \text{C}$, sementara untuk tembaga sebesar $152,26^{\circ} \text{C}$. Maka untuk penyambungan dua logam (bimetal), maka akan terjadi perubahan mekanik dari deformasi elastis ke deformasi plastis saat mencapai batasan suhu kuat luluh tersebut.

Pada aplikasi nyata konduktor aluminium dan tembaga maupun sambungan kedua konduktor ini sumber panas dapat terjadi dari dalam yaitu arus dan dari temperatur lingkungan. Temperatur lingkungan dapat meningkat akibat

terperangkapnya panas pada lingkungan sambungan baik oleh panas oleh cuaca dan panas sambungan oleh arus yang menyebabkan panas menjadi lebih besar.

Setelah melihat data yang telah diuraikan pada bab sebelumnya, kita dapat melihat bahwa kenaikan suhu pada logam mempengaruhi sifat-sifat dari logam tersebut. Kenaikan suhu dapat menyebabkan tegangan pada logam baik dalam kondisi ditahan maupun dalam kondisi bebas (tegangan gradien suhu). Tegangan (*stress*) ini dapat menjadi sebuah gangguan pada logam karena logam yang mendapatkan tegangan secara terus menerus akan mengalami kegagalan leleh bahkan menyebabkan patahan (*fracture*).

Seiring dengan meningkatnya suhu, nilai celah ini dapat bertambah besar akibat perbedaan kecepatan muai dan perbedaan deformasi yang terjadi antara dua bahan. Celah yang terjadi antara konduktor tentunya sedapat mungkin diperkecil karena dapat menjadi penyebab awal terjadinya kerusakan pada sambungan.

Setelah pendinginan hingga temperatur logam sambungan kembali ke temperatur awal, titik h_3 , h_4 , dan h_5 kembali diukur. Nilai yang diperoleh setelah pendinginan (h_{10}) berbeda dengan nilai awal sebelum kenaikan temperatur (h_0). Pada titik h_5 , ketebalan sebelum sambungan untuk Aluminium (h_{50Al}) = 8,68 mm. Ketebalan pada tembaga (h_{50Cu}) = 8,30. h_5 setelah sambungan = 17,05 mm. dari data ini, maka: h

$$h_{50} = (h_{50Al}) + (h_{50Cu}) + x$$

$$\text{maka } x = 17,05 - (8,30 + 8,68)$$

$$= 0,07 \text{ mm}$$

Dimana h_{50} adalah nilai ketebalan sambungan di titik h_5 sebelum kenaikan suhu.

x merupakan jarak celah yang ada diantara sambungan

Setelah sambungan dipanaskan dan mengalami kenaikan temperature hingga 100°C (h_{51}), logam kembali didinginkan hingga temperature kembali ke temperature awal. nilai h_5 pada keadaan ini (h_{510}) diukur kembali dan diperoleh nilai ketebalan 17,06. Jarak celah yang ada (x) menjadi 0,08.

Perubahan yang terjadi hanya dalam ukuran mikron. Namun dalam waktu yang relatif lama, celah yang terbentuk dapat menjadi semakin besar. Celah yang terbentuk di antara dua konduktor yang berbeda jenis ini dapat diisi oleh udara yang merupakan isolator.

Pada konduktor akan terjadi panas akibat adanya arus yang mengalir dan hambatan konduktor. Panas ini dapat mengionisasi udara pada celah sambungan. Ionisasi yang terjadi pada celah sambungan ini menyebabkan terjadinya loncatan muatan ke udara (*sparkover*) dan loncatan muatan antara logam melalui celah udara atau lebih dikenal dengan busur listrik. Busur listrik ini menghasilkan panas, dimana efek panas yang terjadi pada celah udara ini dapat dilihat seperti halnya busur listrik pada las listrik.

Las listrik memanfaatkan panas akibat busur listrik yang dihasilkan oleh hubung singkat dengan arus yang cukup besar namun tegangan yang aman. Besar kalori yang dihasilkan sesuai dengan persamaan :

$$H = E \times I \times t \quad (4.1)$$

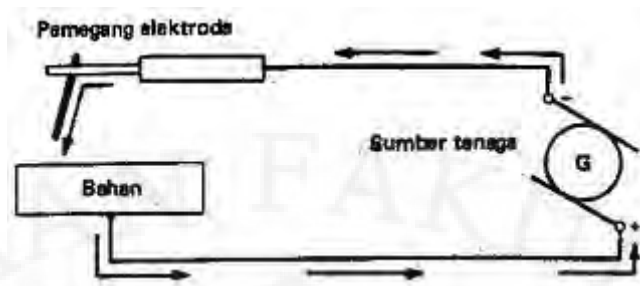
Dimana : H = Panas dalam satuan joule

E = Tegangan listrik dalam volt

I = Arus dalam ampere

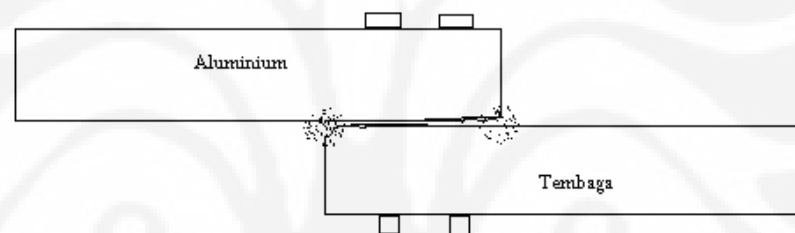
T = Waktu dalam detik

Arus yang dibangkitkan untuk las listrik konvensional sekitar 100 - 200 A, dengan tegangan 40 kV dan 18-40 kV saat beroperasi. Sementara pada sambungan konduktor seperti pada sambungan busbar atau sambungan lainnya di gardu tegangan menengah saja arus yang bekerja besarnya dapat mencapai 300 A. dengan tegangan 20 kV. Dengan daya sebesar ini, potensi terjadinya busur listrik pada celah sambungan semakin besar. Pada awalnya, busur listrik yang terjadi hanya dalam waktu sesaat saja. Namun jika telah terjadi kerusakan lebih lanjut pada sambungan maka busur akan bertahan lebih lama dan dapat mengakibatkan kerusakan total pada sambungan.



Gambar 4.19 Rangkaian las listrik

Pada rangkaian, bahan dan elektroda di hubung singkat untuk menghasilkan busur listrik dan perlahan dipisahkan pada proses pengelasan. Sementara pada sambungan, terjadi busur akibat celah diantara sambungan logam dengan jenis yang berbeda (aluminium dan tembaga)



Gambar 4.20 sambungan saat terjadi *sparkover*

Selain pada masalah sambungan, kekuatan kekencangan mur juga dapat menurun. Kebanyakan kasus mengendur mur/baut dikarenakan seringnya mendapat tekanan/kekuatan dari luar (contohnya getaran) hal ini akan mengurangi kekuatan putar dari skrup. Pada aplikasi sambungan, getaran dapat dihasilkan arus yang mengalir sambungan dan dapat menjadi salah satu faktor penyebab kenduran dan kegagalan sambungan.

BAB 5

KESIMPULAN

1. Pada pengujian kenaikan temperatur konduktor tembaga diperoleh α_1 tembaga uji sebesar $20.007 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$ dan aluminium uji dengan nilai α_1 sebesar $29.18 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$.
2. Pengujian kenaikan temperatur dengan logam uji yang disambungkan menggunakan sambungan mur dapat menyebabkan tekanan pada daerah sambungan akibat pemuaian yang tertahan oleh perbedaan kecepatan muai masing-masing logam.
3. Dengan perhitungan pada material yang tertahan, mekanisme deformasi plastis mulai terjadi pada tembaga C11000 saat kenaikan suhu (ΔT) sebesar $116,55^{\circ}\text{C}$ dari temperatur ruang (25°C). Pada aluminium 6101-T6 terjadi pada saat kenaikan suhu (ΔT) sebesar $152,26^{\circ}\text{C}$. Sedangkan mekanisme perpatahan pada tembaga C11000 terjadi pada saat kenaikan temperatur (ΔT) sebesar $133,45^{\circ}\text{C}$ dan aluminium 6101-T6 pada saat kenaikan temperatur (ΔT) sebesar $166,11^{\circ}\text{C}$.
4. Terjadinya deformasi plastis pada material ini merupakan kerusakan awal pada material dan pada sambungan konduktor. Dengan tekanan yang cukup oleh kenaikan temperatur yang semakin tinggi, sambungan dapat mengalami kerusakan seperti munculnya *sparkover* pada celah diantara kedua sambungan konduktor atau bahkan kerusakan fatal berupa ledakan pada sambungan.

DAFTAR ACUAN

- [1] Callister., William D. *Material science and engineering : an introduction*. John Wiley & sons.Inc, 1997.
- [2] Vlack, Lawrence H. Van. *Ilmu dan teknologi bahan (ilmu logam dan bukan logam)*. Erlangga: Jakarta, 1992
- [3] Vlack, Lawrence H. Van . *Ilmu dan teknologi bahan (ilmu logam dan bukan logam)*. 1992. Erlangga: jakarta.
- [4] E.Dieter George. *Metalurgi mekanik*. 1988. Erlangga: Jakarta.
- [5] E.Dieter George. *Metalurgi mekanik*. 1988. Erlangga: Jakarta.
- [6] Avner, 1974, Introduction to Physical Metallurgy, 2nd Edition, McGraw-Hill Book, Singapore.
- [7] Vlack, Lawrence H. Van . *Ilmu dan teknologi bahan (ilmu logam dan bukan logam)*. 1992. Erlangga jakarta.
- [8] M.f. Ashby,C. Gandhi, dan D.M.R. Taplin. *Acta Met.*, jilid 27, hal 699 – 729, 1979
- [9] E.Dieter George. *Metalurgi mekanik*. 1988. Erlangga: Jakarta.
- [10] Callister., William D. *Material science and engineering : an introduction*. John Wiley & sons.Inc, 1997.
- [11] NDT-Resource Centre. *Elastic/Plastic Deformation*. <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Structure/deformation.htm>
- [12] Dekker, Adrianus J. *Electrical Engineering Materials*. 1959. Prentice hall, Inc: Englewood Cliffs, N.J.
- [13] suhariyani. “Aluminium” Gabungan teknik. Diakses 19 desember 2009 dari <http://gabunganteknik.wordpress.com/2008/04/13/aluminium/>
- [14] MatWeb Material Property Data. Aluminium 6101 - T6. Diakses 8 Mei 2010 dari

<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=4303c5b908ff4cbd91a02fed7d4e8202&ckck=1>

[15] Lambert, mark. 1988. *Copper* . Rourke Enterprises

[16] Anchor Bronze & Metal Inc. Copper No. C11000. Diakses 8 Mei 2010 dari <http://www.anchorbronze.com/c11000.htm>

