



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH LAPISAN TIPIS TIMAH PUTIH PADA UJUNG
ELEKTRODA DALAM APLIKASI PENGELASAN TITIK**

SKRIPSI

**AULIA IRSYADI
0405040139**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JULI 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH LAPISAN TIPIS TIMAH PUTIH PADA UJUNG
ELEKTRODA DALAM APLIKASI PENGELASAN TITIK**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**AULIA IRSYADI
0405040139**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JULI 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

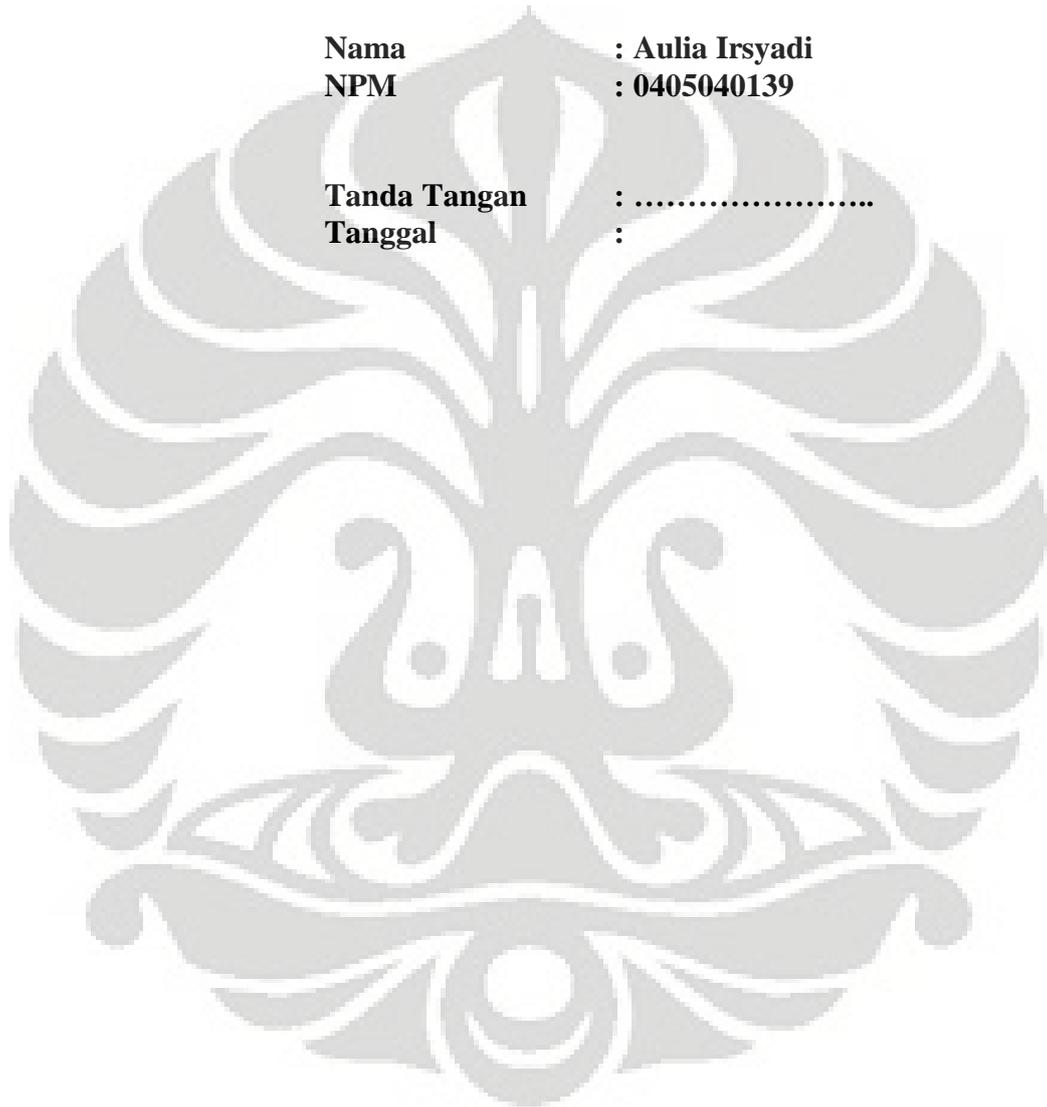
Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Aulia Irsyadi

NPM : 0405040139

Tanda Tangan :

Tanggal :



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Aulia Irsyadi
NPM : 0405040139
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengaruh Lapisan Tipis Timah Putih pada Ujung Elektroda dalam Aplikasi Pengelasan Titik

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Muhammad Anis, M.Met. ()

Penguji 1 : Dr. Ir. Winarto, M.Sc. ()

Penguji 2 : Dr. Ir. Donanta Dhaneswara, M.Si ()

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 14 Juli 2009

UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji bagi Allah SWT atas selesainya skripsi ini,
Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

Dr. Ir. Muhammad Anis, M.Met.

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



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

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

Nama : Aulia Irsyadi
NPM : 0405040139
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Metalurgi dan Material
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 :

**Pengaruh Lapisan Tipis Timah Putih pada Ujung Elektroda dalam Aplikasi
Pengelasan Titik**

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

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal :

Yang menyatakan

(.....)

ABSTRAK

Nama : Aulia Irsyadi
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Pengaruh Lapisan Tipis Timah Putih pada Ujung Elektroda dalam Aplikasi Pengelasan Titik

Pada proses pengelasan titik (*spot welding*), elektroda sangat berperan sebagai penghantar arus untuk menyambung material. Penelitian yang dilakukan ini bertujuan untuk melihat pengaruh lapisan tipis timah putih (Sn) pada elektroda dalam aplikasi pengelasan titik material baja galvanis. Lapisan tipis Sn ini akan membentuk lapisan intermetalik Cu_3Sn . Proses pembentukan lapisan intermetalik dilakukan menggunakan metode *hot-dip* dan dilanjutkan dengan pemanggangan pada temperatur 200°C dengan variasi waktu selama 15 menit, 45 menit, dan 125 menit. Dari hasil perhitungan secara matematis, variabel waktu meningkatkan ketebalan dari lapisan intermetalik. Untuk waktu tahan 15 menit adalah 5.42×10^{-7} m, untuk waktu tahan 45 menit adalah 9.39×10^{-7} m, dan untuk waktu tahan 125 menit diperoleh ketebalan sebesar 1.56×10^{-6} m. Dari hasil penelitian juga diperoleh kinerja (dinilai dari hasil kuat tarik geser dan distribusi diameter *nugget*) elektroda yang baik terjadi saat waktu pemanggangan selama 45 menit pada temperatur 200°C . Kinerja terburuk terjadi saat pemanggangan selama 125 menit. Pengaruh tebal lapisan intermetalik yang terbentuk terhadap nilai kuat tarik geser las titik adalah berbanding terbalik. Hal ini karena fasa intermetalik memiliki tahanan listrik yang besar, sehingga aliran arus untuk menyambung material menjadi kurang optimal. Hasil foto makro setelah 501 kali pengelasan, peningkatan ketebalan lapisan Cu_3Sn akan mengakibatkan peningkatan deformasi dan pengikisan permukaan kontak elektroda.

Kata kunci: Pengelasan Titik, Fasa Intermetalik, Kuat Tarik Geser, Distribusi diameter *nugget*.

ABSTRACT

Name : Aulia Irsyadi
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering
Judul : Effect of Tin Thin Film at Electrode Tip on Spot
Welding Application

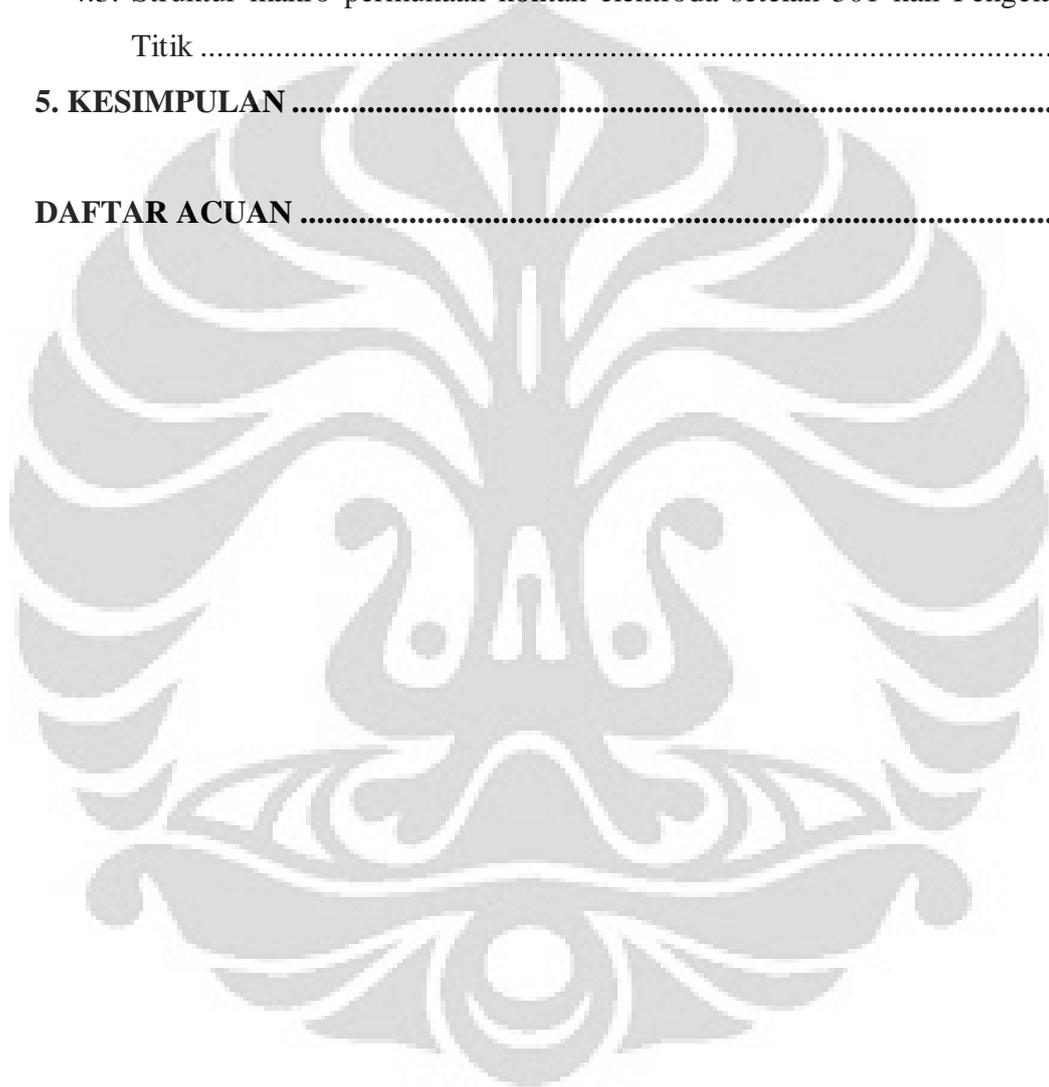
In spot welding process, electrode have important role to distribute welding current. This project will discuss the tin (Sn) thin film effect on electrode tip for application of spot welding galvanized steel sheet. By this thin film be expected of forming of intermetallic phase Cu_3Sn . Process to make these intermetallic phase is using hot dip method and it continue to baking process at 200°C with various holding time are 15 minutes, 45 minutes, 125 minutes. From calculation, various time will increase thickness of intermetallic phase. In addition, the result of calculation are 5.42×10^{-7} m for 15 minutes holding time, 9.39×10^{-7} m for 45 minutes holding time, and 1.56×10^{-6} m for 125 minutes. After the several welding process, the most stable electrode performance (which are voted from tensile shear test and distribution of nugget) is for coated electrode with 45 minutes holding time at 200°C . Effect of increasing intermetallic thickness compare with tensile shears test reulst of spot weld is proportionate inverted. This because, the resistivity also affected by thickness of its phase and it is making total current distribute is not convenience. From macrophoto results, increasing of intermetallic thickness, will made the electrode more susceptible to erosion and deformation. This is because a natural property of intermetallic phase is brittle.

Key words: Spot Welding, Intermetallic phase, Tensile Shear Strength, Distribution of nugget diameter.

DAFTAR ISI

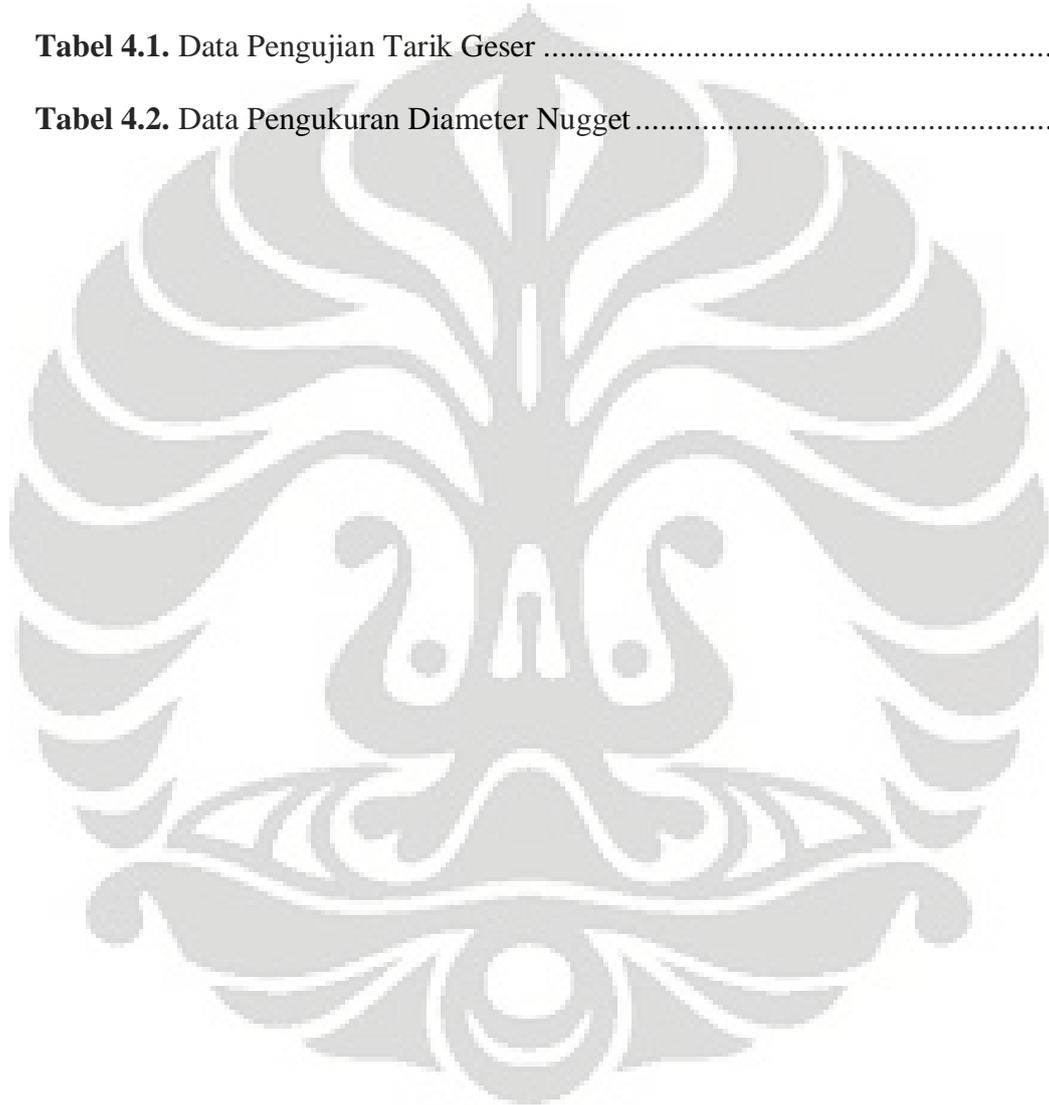
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	2
1.3. Batasan Penelitian	2
1.4. Sistematika Penulisan	3
2. DASAR TEORI	4
2.1. Pengelasan Titik	4
2.1.1. Panas Las	4
2.2. Pengaruh Diameter <i>Nugget</i> terhadap kuat tarik geser	7
2.3. Pelapisan logam timah putih (Sn) ke logam tembaga (Cu)	7
3. METODE PENELITIAN	16
3.1. Diagram Alir Penelitian	16
3.2. Alat dan Bahan	17
3.2.1 Alat	17
3.2.2 Bahan	17
3.3. Proses Pembuatan Sampel Las	17
3.4. Proses Pelapisan dan Pemanggangan Elektroda dengan timah putih	18
3.5. Proses Pengelasan Titik	18

3.6. Proses uji tarik geser	20
3.7. Pengukuran Diameter <i>nugget</i> yang terbentuk	21
3.8. Foto Struktur Makro Permukaan Elektroda setelah pengelasan	21
4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	22
4.1. Ketebalan lapisan intermetalik Cu_3Sn yang terbentuk.....	22
4.2. Kuat tarik geser dan diameter <i>nugget</i> yang terbentuk	25
4.3. Struktur makro permukaan kontak elektroda setelah 501 kali Pengelasan Titik	32
5. KESIMPULAN	35
DAFTAR ACUAN	36



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Spesifikasi elektroda las yang digunakan	6
Tabel 2.2 Komposisi baja karbon yang digunakan	7
Tabel 2.3. Beberapa fasa-fasa intermetalik pada kesetimbangan Cu-Sn	10
Tabel 4.1. Data Pengujian Tarik Geser	26
Tabel 4.2. Data Pengukuran Diameter Nugget	27



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Ilustrasi proses las titik	5
Gambar 2.2. Siklus las titik.....	6
Gambar 2.3. Hubungan antara besar diameter nugget terhadap kekuatan tarik geser untuk material baja SAE 1008.....	7
Gambar 2.4. Ilustrasi proses <i>hot-dip</i>	9
Gambar 2.5. Diagram kesetimbangan Cu-Sn	10
Gambar 2.6. Gambar mikrostruktur dari senyawa Cu_3Sn dan Cu_6Sn_5	11
Gambar 2.7. Laju pertumbuhan fasa intermetalik antara pelapis 60Sn-40Pb dengan logam tembaga pada variasi temperatur.....	12
Gambar 2.8. Perbandingan antara waktu tahan dengan ketebalan fasa intermetalik.....	13
Gambar 2.9. Urutan senyawa intermetalik Cu-Sn yang terbentuk.....	13
Gambar 2.10. Grafik jumlah kadar timah terlarut <i>versus</i> Kekuatan geser	14
Gambar 2.11. Hubungan antara kekuatan tarik dengan ketebalan dari senyawa intermetalik	15
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian	16
Gambar 3.2. menunjukkan bentuk joint material.....	19
Gambar 3.3. <i>Universal Testing Machine</i>	20
Gambar 3.4. Ilustrasi pembebanan tarik geser pada sampel uji.....	21
Gambar 4.1. Diagram hasil perhitungan ketebalan intermetalik	24
Gambar 4.2. Prediksi nilai kuat tarik berdasarkan ketebalan intermetalik yang terbentuk	25

Gambar 4.3. Diagram hubungan nilai kuat tarik geser dan diameter nugget untuk sampel lapis Sn dengan waktu tahan 15 menit	27
Gambar 4.4. Diagram hubungan nilai kuat tarik geser dan diameter nugget untuk sampel lapis Sn dengan waktu tahan 45 menit	28
Gambar 4.5. Diagram hubungan nilai kuat tarik geser dan diameter nugget untuk sampel lapis Sn dengan waktu tahan 125 menit	29
Gambar 4.6. Diagram perbandingan beda kekuatan seluruh elektroda.....	30
Gambar 4.7. Diagram perbandingan hasil uji tarik geser ketiga elektroda	31
Gambar 4.8. Foto makro elektroda lapis Sn ($t=125'$) setelah 501 kali pengelasan titik.....	32
Gambar 4.9. Foto makro elektroda lapis Sn ($t=45'$) setelah 501 kali pengelasan titik.....	33
Gambar 4.10. Foto makro elektroda lapis Sn ($t=15'$) setelah 501 kali pengelasan titik.....	33

BAB 1

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Pada industri manufaktur, pengelasan titik (*spot welding*) banyak diaplikasikan untuk menyambung antar material. Pengelasan ini menggunakan elektroda dari paduan tembaga (Cu). Pemilihan paduan tembaga dikarenakan sifat konduktivitas elektrik yang baik dibandingkan logam lain. Biasanya logam tembaga tersebut dipadukan dengan logam lain untuk meningkatkan kekuatan mekanisnya.

Di salah satu industri manufaktur di Indonesia, yang bergerak dalam produksi sepeda motor, pengelasan titik digunakan untuk melengkapi pembuatan tangki bahan bakar dari sepeda motor tersebut. Material yang digunakan untuk tangki tersebut adalah baja SPCC dengan pelapis Zn pada salah satu sisinya. Pengelasan titik dilakukan untuk penyatuan bagian kup dan drag tangki, sebelum dilanjutkan dengan proses pengelasan *seam*. Pada perusahaan tersebut, elektroda dari proses pengelasan titik adalah paduan tembaga dengan kromium (Cu-Cr) dari kelas RWMA II. Dari hasil diskusi dengan pihak perusahaan, diketahui bahwa kekuatan dari elektroda tersebut kurang memuaskan. Hal ini dapat berakibat pada hasil las yang berupa ukuran *nugget* yang terlalu besar karena ujung elektroda yang telah tumpul. Elektroda tersebut kemudian dilakukan pengikiran, pada umumnya setelah 40 kali pengelasan, sebagai upaya untuk mengembalikan ukuran *nugget* yang diinginkan.

Pada penelitian ini dilakukan suatu upaya untuk meningkatkan performa permukaan kontak elektroda las titik, sehingga diharapkan dapat meningkatkan produktifitas melalui peningkatan umur elektroda tersebut. Salah satu cara yang dapat ditempuh adalah dengan melakukan pelapisan permukaan kontak elektroda dengan logam timah (Sn) menggunakan metode *hot-dip*. Kemudian, dilakukan proses penahanan (*holding*) *iso-termal* pada temperatur 200°C. Hasil yang diharapkan dari proses *holding* ini adalah terbentuknya fasa intermetalik Cu₃Sn.

Dalam prose *holding* dilakukan variasi waktu tahan selama 15 menit, 45 menit, dan 125 menit. Setelah proses pelapisan dan *holding*, dilakukan proses pengelasan titik dengan parameter las yang konstan.

Dari sejumlah tertentu proses pengelasan, dilakukan pengambilan sampel, yang kemudian dilakukan pengujian secara mekanis untuk melihat kestabilan dari hasil las titik. Pengujian mekanis yang dilakukan berupa uji tarik untuk mengetahui kecenderungan dari hasil proses pengelasan, pengamatan struktur makro dari permukaan kontak elektroda setelah pengelasan.

Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh variabel waktu tahan difusi 15 menit, 45 menit, dan 125 menit terhadap pembentukan lapisan fasa intermetalik Cu_3Sn .
2. Membandingkan kinerja dari elektroda pengelasan titik yang telah dilapisi oleh timah putih (Sn) terhadap elektroda CuCr.

Batasan Penelitian

Batasan penelitian ini adalah:

1. Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:
 - a. Material elektroda paduan tembaga (Cu) dengan Kromium (Cr).
 - b. Logam timah putih (Sn) sebagai bahan pelapis untuk membentuk fasa intermetalik Cu_3Sn .
 - c. Lembaran baja SPCC dengan lapisan seng (Zn), pada salah satu sisi lembaran untuk pengujian pengelasan titik.
2. Proses pembentukan fasa intermetalik Cu_3Sn menggunakan metode *hot dip*, dimana logam timah putih dilebur kemudian bagian ujung dari elektroda CuCr dicelup ke dalam leburan timah putih.
3. Variabel yang digunakan adalah waktu tahan setelah proses hot-dip pada suhu 200°C dengan variasi waktu 15 menit, 45 menit dan 125 menit pada lingkungan atmosfer.
4. Perhitungan ketebalan dari fasa intermetalik dilakukan dengan model perhitungan secara matematis.
5. Variabel pengelasan seperti waktu, tekanan, dan kuat arus adalah tetap.

6. Dilakukan pengujian pengelasan titik pada tiap-tiap elektroda
7. Pengambilan sampel uji untuk setiap 50 kali pengelasan titik dilakukan.
8. Pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut:
 - a. Pengujian tarik untuk sampel pengelasan titik.
 - b. Pengamatan struktur makro elektroda setelah pengelasan titik.

Sistematika Penelitian

Skripsi ini disusun menjadi lima bab, yaitu pendahuluan, dasar teori, metodologi penelitian, hasil dan pembahasan, dan kesimpulan.

Bab 1 Pendahuluan, berisi mengenai latar belakang penelitian, tujuan penelitian, batasan penelitian, dan sistematika penulisan.

Bab 2 Dasar Teori, berisi teori yang mengacu pada penelitian, diantaranya tentang pengelasan titik, proses pelapisan metode hot-dip, laju difusi logam Sn kedalam matrik Cu untuk membentuk lapisan Cu_3Sn , pengaruh fasa intermetalik Cu_3Sn terhadap kekuatan mekanik dan elektrik.

Bab 3 Metodologi Penelitian, berisi diagram alir penelitian, peralatan, dan bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian, prosedur penelitian, dan prosedur pengujian yang dilakukan.

Bab 4 Hasil dan Pembahasan, berisi pengolahan data yang didapat dari hasil pengujian yang telah dilakukan, baik berupa angka, gambar maupun grafik serta pembahasan mengenai hasil pengujian dan membandingkan dengan teori serta hasil penelitian sebelumnya.

Bab 5 Kesimpulan, berisi kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Pengelasan Titik

Las titik (*spot welding*) sebagaimana yang diilustrasikan pada Gambar 2.1 termasuk las tahanan listrik, yaitu suatu cara penyambungan material dimana permukaan lembaran yang akan disambung ditekan satu dengan lainnya yang saling bertumpuk dan pada saat yang sama arus listrik dialirkan sehingga permukaan tersebut menjadi panas selanjutnya logam tersebut mencair, dan akhirnya tersambung. Sebelum, selama dan sesudah pemakaian arus, selalu digunakan gaya tekan (yang berasal dari elektroda) untuk mencegah terjadinya nyala pada bidang selain tempat (titik) yang akan dilas. Selain itu elektroda berfungsi sebagai pendistribusi arus listrik ke logam yang akan dilas.

2.1.1. Panas Las

Panas las yang dihasilkan tergantung dai 3 faktor^[1] yaitu:

1. Besar dan waktu alir arus
2. Tahanan konduktor
3. Besar gaya tekan elektroda

Faktor-faktor tersebut dirumuskan sebagai^[1]:

$$Q = I^2 R t \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana:

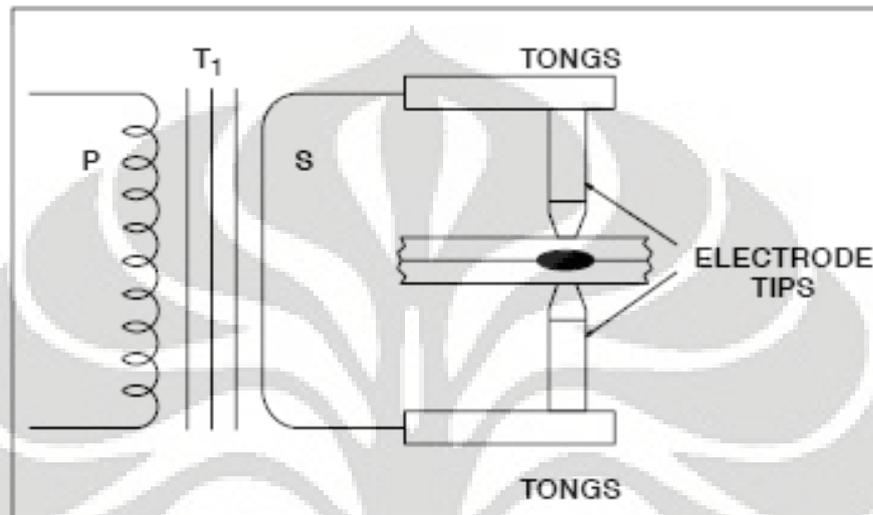
Q = Panas yang dihasilkan (Joule)

I = Arus (Ampere)

R = Tahanan listrik antara permukaan benda kerja (Ohm)

t = Waktu aliran (detik)

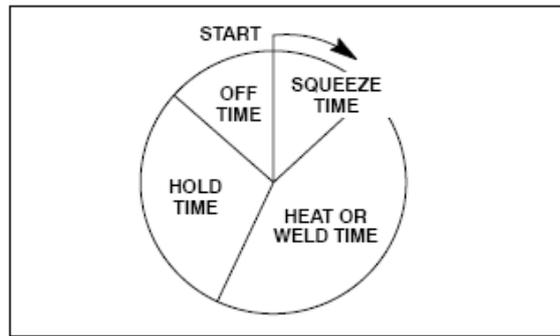
Karakteristik utama dari proses las titik adalah panas yang dihasilkan sangat cepat. Hal ini karena arus yang digunakan sangatlah besar dan tahanan yang dihasilkan juga besar sehingga dapat melebur benda kerja yang akan dilas. Walaupun waktu untuk proses ini sangatlah singkat namun tetap dapat melebur logam dan menyambung benda kerja tersebut.^[2]



Gambar 2.1. Ilustrasi proses las titik^[2]

Dalam pengelasan titik dikenal siklus las, pada Gambar 2.2 merupakan variabel waktu selama proses pengelasan. Pada las titik dikenal empat siklus^[2]:

1. *Squeeze Time*, selang waktu antara awal pemberian gaya (penekanan) pada logam dasar sampai pemberian arus.
2. *Weld Time*, selang waktu pemberian arus ke benda kerja dengan gaya elektroda konstan.
3. *Hold Time*, waktu pemberian gaya elektroda konstan pada titik hasil las (*nugget*) dimana arus sudah tidak mengalir. Saat ini *nugget* las membeku, sampai memiliki kekuatan yang cukup.
4. *Off Time*, waktu elektroda tidak bekerja pada logam induk dan siap pada lokasi las lainnya.



Gambar 2.2. Siklus las titik^[2]

Pada proses pengelasan titik, elektroda memiliki dua fungsi, yaitu fungsi sebagai media alir arus dan fungsi untuk memberikan gaya tekan pada lembaran yang disambung. Pada umumnya, bahan yang digunakan sebagai elektroda untuk pengelasan titik adalah yang berbahan dasar tembaga (Cu). Tembaga dipilih karena sifat konduktivitas listrik yang tinggi. Namun logam tembaga bersifat lunak, sehingga akan mengurangi mampu beban saat dilakukan pengelasan titik. Salah satu cara untuk meningkatkan kekuatan dari elektroda tanpa mengurangi konduktivitas listrik yang signifikan, biasanya logam tembaga akan dipadukan dengan logam lain. Umumnya, logam yang digunakan diantaranya kromium (Cr), zirkonium (Zr), wolfram (W), kobalt (Co), berilium (Be), dan nikel (Ni). Adapun elektroda yang digunakan pada penelitian ini adalah paduan tembaga (Cu) dengan kromium (Cr), dan spesifikasi dari elektroda tersebut terdapat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Spesifikasi elektroda las yang digunakan^[3]

Spesifikasi	Elektroda Cu-Cr
UTS (MPa)	350
Yield (MPa)	250
Densitas	8.9
Kekerasan, Rockwell	70B
Konduktivitas Elektrik	75-80% IACS

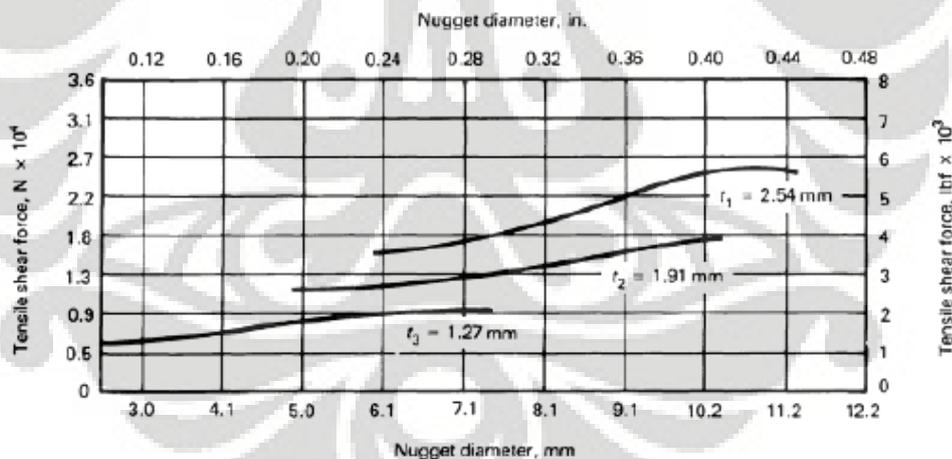
Pada penelitian ini material yang akan dilas adalah material baja SPCC dengan lapisan seng (Zn) disalah satu sisinya. Adapun komposisi dari baja karbon tersebut ditunjukkan dalam Tabel 2.2

Tabel 2.2 Komposisi baja karbon yang digunakan

%C	%Si	%Mn	%P	%S	Kandungan lapisan Zn	Tebal material
0.1	0	0.06	0.09	0.07	20 gr/m ²	0.8mm

Pengaruh diameter nugget terhadap kuat tarik geser

Pada pengelasan tahanan listrik jenis pengelasan titik, menghasilkan lasan yang disebut *nugget*. Dari nugget inilah akan diperoleh kekuatan las material. Pada proses pengelasan titik, besar ukuran nugget akan mempengaruhi nilai dari kekuatan tarik geser las. Gambar 2.3 menunjukkan hubungan antara diameter las (*nugget*) dengan nilai kuat tarik geser, pada material SAE 1008 dengan berbagai ketebalan.



Gambar 2.3. Hubungan antara besar diameter nugget terhadap kekuatan tarik geser untuk material baja SAE 1008^[4]

Pelapisan logam timah putih (Sn) ke logam tembaga (Cu)

Dalam penelitian ini elektroda las titik yang berbasis tembaga akan dilapis dengan logam timah putih. Hasil dari proses tersebut diharapkan akan membentuk lapisan senyawa intermetalik. Mekanisme yang terjadi terhadap fenomena ini adalah difusi. Difusi terjadi akibat struktur kristal dari logam yang

kurang memiliki cacat, seperti kekosongan atau *vacancy* maka memungkinkan untuk unsur lain masuk kedalam kristal logam tersebut^[5]. Jika semua atom-atom memiliki ukuran yang sama, atom yang memiliki kekosongan akan meninggalkan lubang (*hole*) atau kekosongan yang baru pula. Kekosongan ini dapat diisi oleh atom lain yang berasal dari tetangga mana saja. Sebagai hasil akhir dapat dikatakan bahwa atom melakukan gerak acak dalam kristal. Pada umumnya, dalam kristal sering dijumpai gradient konsentrasi. Gradient konsentrasi ini mengakibatkan perbedaan intensitas aliran gerak acak atom-atom unsur yang berpindah, ini lah yang menyebabkan terjadinya fluks aliran dari bagian dengan konsentrasi rendah ke bagian dengan konsentrasi tinggi, hasil bersih aliran atom-atom ini disebut *difusi*. Besarnya nilai fluks (*difusi*), J , (dinyatakan dalam atom/m².detik) sebanding dengan gradient konsentrasi $(C_2-C_1)/(x_2-x_1)$, yang dinyatakan dalam hukum I Fick's^[6]:

$$J = D \frac{dC}{dx} \dots\dots\dots(2.2)$$

Konstanta D disebut difusitas atau koefisien difusi. Berdasarkan hukum I Fick's gradient konsentrasi (dC) terhadap posisi (dx) bersifat linier. Namun pada umumnya hal tersebut sulitlah untuk terjadi. Dimana terdapat faktor waktu yang mempengaruhi pergerakan difusi dari material. Sehingga memberikan postulat hukum II Fick's yaitu^[6]:

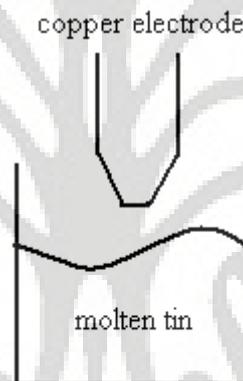
$$\frac{Cx - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \dots\dots\dots(2.3)$$

Dalam penelitian ini, elektroda yang berbasis tembaga akan dilapis dengan logam timah putih pada permukaan kontakannya. Difusi yang terjadi antara logam timah putih dengan logam tembaga adalah jenis difusi substitusi karena beda radius logam timah dan logam tembaga lebih besar dari 15%. Selain waktu yang mempengaruhi dari difusi logam timah dan logam tembaga, variabel temperatur juga mempengaruhi difusi dari logam tersebut. Pada temperatur tinggi, atom-atom logam akan bergerak lebih bebas, sehingga akan meningkatkan difusi material kedalam material lain, dalam hal ini logam timah ke logam tembaga. Temperatur

akan mempengaruhi besar nilai dari koefisien difusi material, sesuai dengan persamaan 4^[7]:

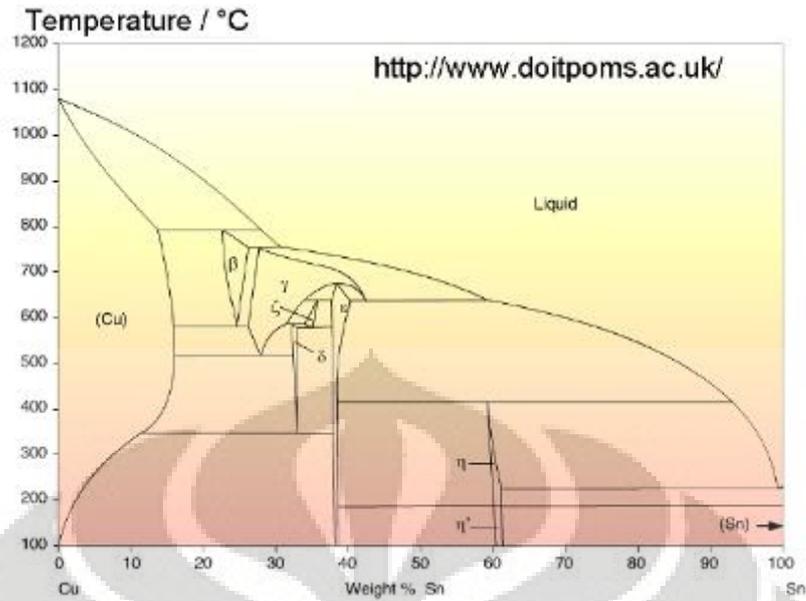
$$D = D_0 \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \dots\dots\dots (2.4)$$

Proses yang digunakan untuk membentuk lapisan timah putih pada substrat tembaga adalah melalui proses pencelupan *hot-dip*. Pada proses ini logam yang akan menjadi pelapis, dalam hal ini adalah timah putih (Sn) akan dilebur terlebih dahulu dalam dapur lebur. Kemudian logam yang akan menjadi penerima (*host*) decelupkan kedalam logam lebur tersebut. Gambar 2.4 memperlihatkan ilustrasi proses hot-dip yang dilakukan saat penelitian.



Gambar 2.4. Ilustrasi proses *hot-dip*

Setelah dilakukan proses pencelupan, akan dilanjutkan dengan proses pemanggangan. Tujuannya adalah untuk mendifusikan logam Sn kedalam matrik logam tembaga (Cu) untuk membentuk lapisan fasa intermetalik Cu_3Sn . Fasa intermetalik merupakan suatu bentuk fasa yang bersifat: stabil, keras, rapuh, berikatan kovalen dengan komposisi dan struktur tertentu, dan secara relatif mempunyai titik lebur yang tinggi. Pada diagram kesetimbangan Cu-Sn (Gambar 2.5) terdapat empat fasa intermetalik yang mempunyai struktur kristal dan komposisi yang berbeda-beda, fasa η yang mempunyai struktur kristal heksagonal, fasa ϵ yang juga membentuk struktur kristal orthorhombic dan fasa β dengan struktur kristal kubus.



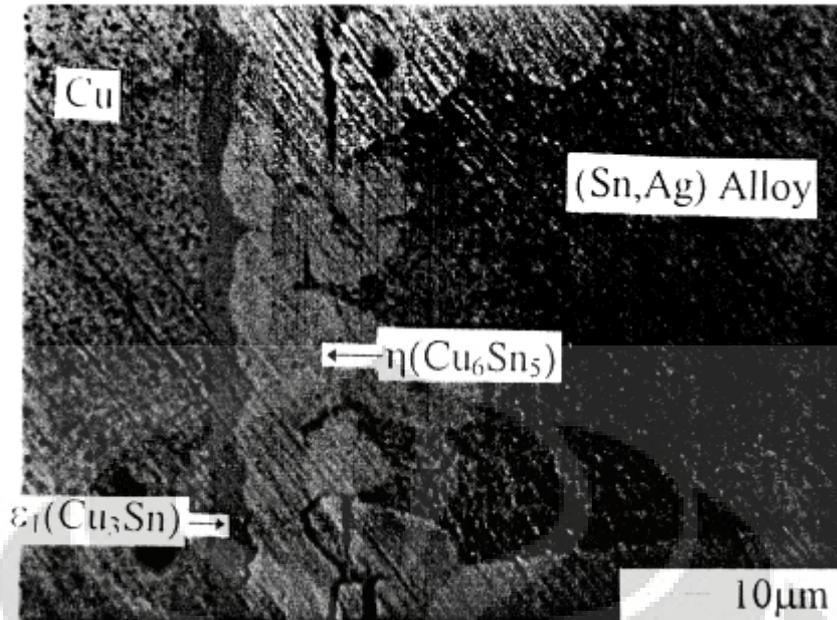
Gambar 2.5. Diagram kesetimbangan Cu-Sn^[8]

Adapun nilai koefisien difusi untuk senyawa Cu_3Sn dan Cu_6Sn_5 yang terbentuk dengan senyawa Sn murni berturut-turut adalah $0.290 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ dan $0.280 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$. Pada temperatur ruang, senyawa Cu_6Sn_5 akan terus terbentuk dengan koefisien hingga $0.0668 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$

Dari keempat fasa kristal intermetalik tersebut hanya fasa η dan fasa ϵ saja yang sifatnya stabil pada temperatur ruang atau temperatur pemakaian dilapangan. Secara rinci, fasa-fasa intermetalik yang terdapat pada kesetimbangan antara logam tembaga (Cu) dengan timah (Sn) dapat terlihat pada Tabel 2.3. Contoh gambar urutan mikrostruktur untuk senyawa Cu_3Sn dan Cu_6Sn_5 ditunjukkan pada Gambar 2.6.

Tabel 2.3. Beberapa fasa-fasa intermetalik pada kesetimbangan Cu-Sn^[5]

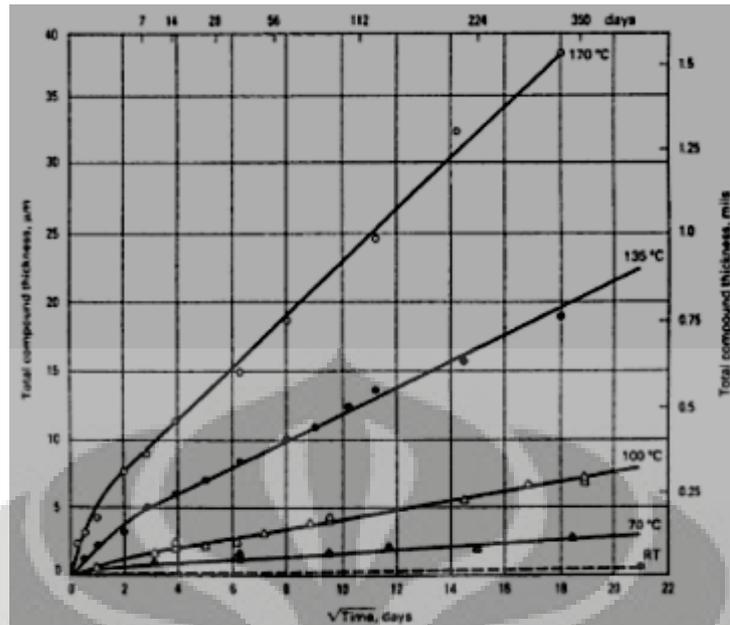
Fasa	Notasi (Komposisi Kimia)	Struktur Kristal
η	Cu_6Sn_5	Heksagonal
ϵ	Cu_3Sn	Orthorombic
β	Cu_5Sn	Kubus



Gambar 2.6. Gambar mikrostruktur dari senyawa Cu_3Sn dan Cu_6Sn_5 ^[9]

Fasa intermetalik Cu-Sn terjadi pada saat pelapisan atau penyolderan material tembaga (Cu) dengan timah putih (Sn). Pada saat padatan kontak dengan cairan, akan terjadi proses pembasahan dan pembentukan ikatan metalurgi sebagai hasil interaksi atom-atom yang melintasi daerah antar muka yang dikendalikan oleh gaya tarik-menarik satu sama lain. Dalam keadaan ini energi bebas yang ada menampakkan nilai terkecil (diminimumkan). Besarnya nilai energi minimum ini tergantung pada besarnya interaksi antar muka, dan interaksi minimum tergantung pada jenis ikatan yang terbentuk. Interaksi paling lemah terdapat pada ikatan *Van der Waals* dan interaksi terkuat terdapat pada ikatan kovalen.

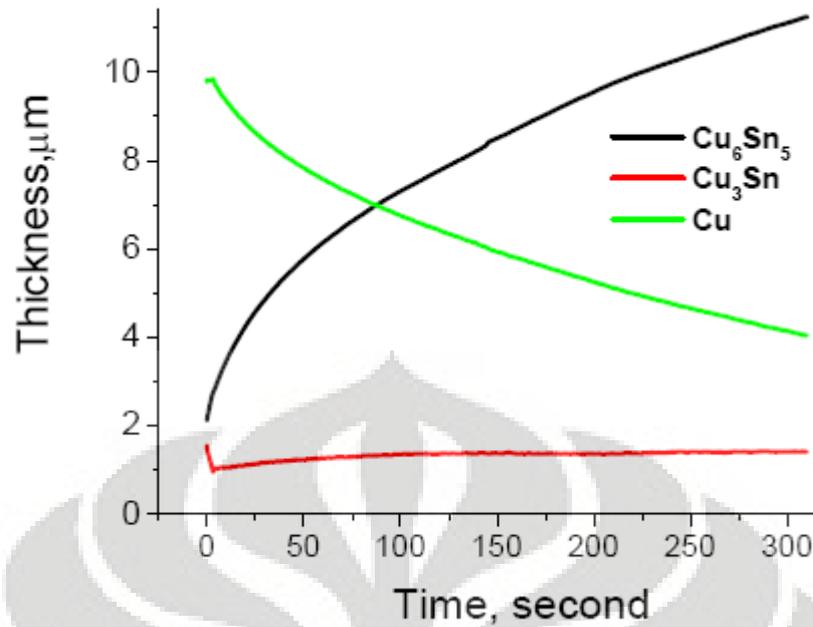
Pertumbuhan lapisan intermetalik adalah terus-menerus secara difusi dari timah (Sn) dan tembaga (Cu). Pertumbuhan lapisan akan terus terjadi, walaupun pada temperatur ruang pertumbuhan ini sangat lambat. Ketebalan fasa intermetalik yang terbentuk merupakan fungsi waktu dan temperatur. Semakin lama waktu dan semakin tinggi temperatur akan meningkatkan ketebalan lapisan intermetalik. Peningkatan ketebalan fasa intermetalik terhadap waktu dan temperatur dapat diilustrasikan seperti Gambar 2.7



Gambar 2.7. Laju pertumbuhan fasa intermetalik antara pelapis 60Sn-40Pb dengan logam tembaga pada variasi temperatur^[5]

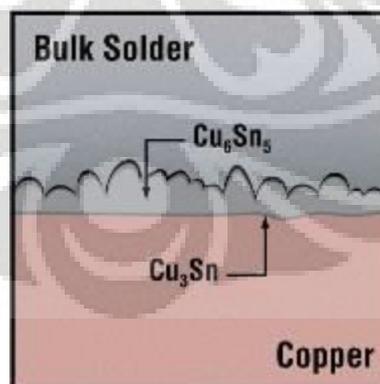
Pada kesetimbangan Cu-Sn akan terbentuk empat fasa intermetalik yang terbentuk empat fasa intermetalik, tetapi hanya fasa Cu_3Sn (ϵ) dan fasa Cu_6Sn_5 (η) saja yang bersifat stabil pada temperatur ruang dan temperatur yang lebih tinggi.

Setelah dilapisi dengan timah putih, dan saat pemanggangan, terjadi pertumbuhan fasa intermetalik diantara permukaan kontak antara logam tembaga dengan logam timah. Ketika dilakukan penahanan (*holding*) waktu saat pemanggangan, maka fasa intermetalik yang akan terbentuk dengan laju yang tinggi adalah fasa Cu_6Sn_5 . Sedangkan fasa intermetalik Cu_3Sn akan tumbuh dengan laju yang relatif stabil sehingga ketebalan yang akan dihasilkan juga akan berbeda. Gambar 2.8. menunjukkan perbandingan antara waktu tahan dengan ketebalan lapisan intermetalik.



Gambar 2.8. Perbandingan antara waktu tahan dengan ketebalan fasa intermetalik^[10]

Saat proses pemanggangan fasa intermetalik yang terbentuk dekat dengan substrat tembaga adalah senyawa Cu_3Sn sedangkan senyawa intermetalik yang terbentuk dengan material solder adalah senyawa Cu_6Sn_5 . Pada Gambar 2.9 menunjukkan urutan fasa intermetalik yang terbentuk. Laju fasa intermetalik Cu_6Sn_5 yang cepat disebabkan daerah ini dekat dengan logam solder timah, dan juga kecepatan yang tinggi ini karena valensi dari logam tembaga yang sudah lebih reaktif, karena sudah terbentuknya fasa intermetalik Cu_3Sn .



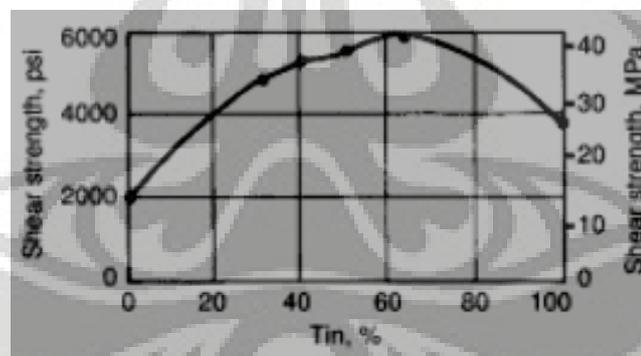
Gambar 2.9. Urutan senyawa intermetalik Cu-Sn yang terbentuk^[11]

Fasa intermetalik Cu_6Sn_5 merupakan salah satu bentuk hasil difusi antara logam tembaga dengan logam timah putih. Komposisinya terdiri dari 39,1%Cu dan 60,9%Sn, mempunyai struktur kristal heksagonal. Berat jenis dari senyawa

intermetalik ini sebesar $6,27 \text{ gr/cm}^3$, dan mempunyai temperatur lebur 415°C , memiliki nilai kekerasan 385 HV dan konduktifitas listriknya sebesar $17,5 \pm 0,1 \text{ micro Ohm-cm}$.

Fasa intermetalik Cu_3Sn memiliki kandungan atom tembaga (Cu) yang lebih besar dibandingkan yang terkandung pada intermetalik Cu_6Sn_5 , komposisinya terdiri atas $61,6 \text{ \%Cu}$ dan $38,4 \text{ \%Sn}$, memiliki struktur kristal orthorhombic dengan titik lebur yang lebih tinggi yaitu 676°C . Konduktifitas listriknya sebesar $8,93 \pm 0,1 \text{ micro Ohm-cm}$ sedangkan nilai kekerasan mencapai 438 HV .

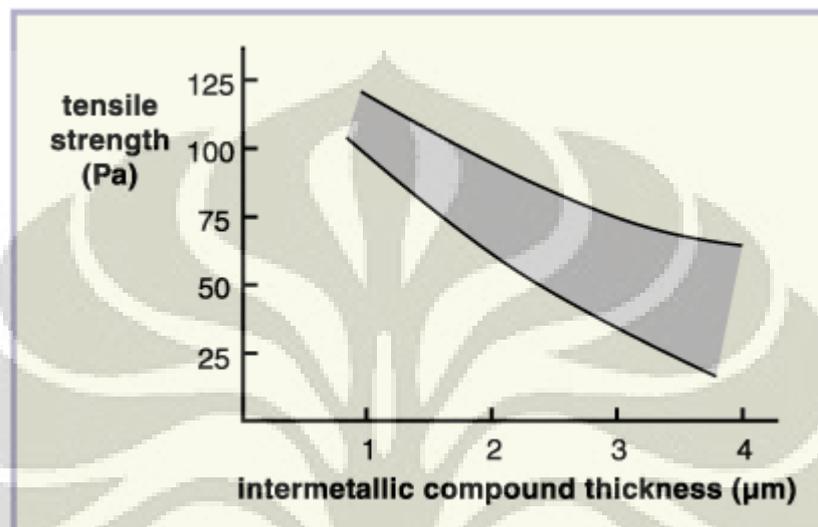
Ketika logam timah putih dengan logam tembaga membentuk suatu intermetalik, maka terjadi peningkatan kekuatan material. Peningkatan kadar timah yang terlarut dapat meningkatkan kekuatan, dalam hal ini kekuatan geser. Namun terjadi titik optimum kekuatan geser material pada kelarutan timah $\pm 65\%$. Kemudian akan terjadi penurunan kekuatan geser seiring peningkatan kelarutan karena jumlah timah yang sudah berlebih dalam *joint* tembaga. Gambar 2.10. menunjukkan jumlah kadar timah yang terlarut dalam *joint* tembaga terhadap nilai kekuatan geser.



Gambar 2.10. Grafik jumlah kadar timah terlarut *versus* Kekuatan geser^[12]

Karena senyawa intermetalik yang terbentuk bersifat getas, maka kenaikan ketebalan akan menurunkan nilai kuat tariknya. Hal ini karena senyawa ini akan mudah sekali pecah. Gambar 2.11 menunjukkan hubungan nilai kuat tarik terhadap ketebalan dari senyawa intermetalik yang terbentuk. Kaitannya dengan lama waktu tahan pemanggangan (pada Gambar 2.8) maka semakin lama waktu tahan maka kekuatan tariknya akan semakin rendah, walaupun sebenarnya nilai kekuatan (berasal dari nilai kekerasan) senyawa intermetalik lebih tinggi

dibandingkan logam dasar (substrat). Dalam aplikasi pelapisan timah pada tembaga untuk penggunaan elektroda las titik, perlu diperhitungkan ketebalan dari senyawa intermetalik yang akan terbentuk. Untuk itu perlu diperhatikan waktu tahan pemanggangan agar diperoleh hasil yang optimal. Pendekatan matematis (dari persamaan 3) dapat memberikan gambaran agar diperoleh hasil optimal.



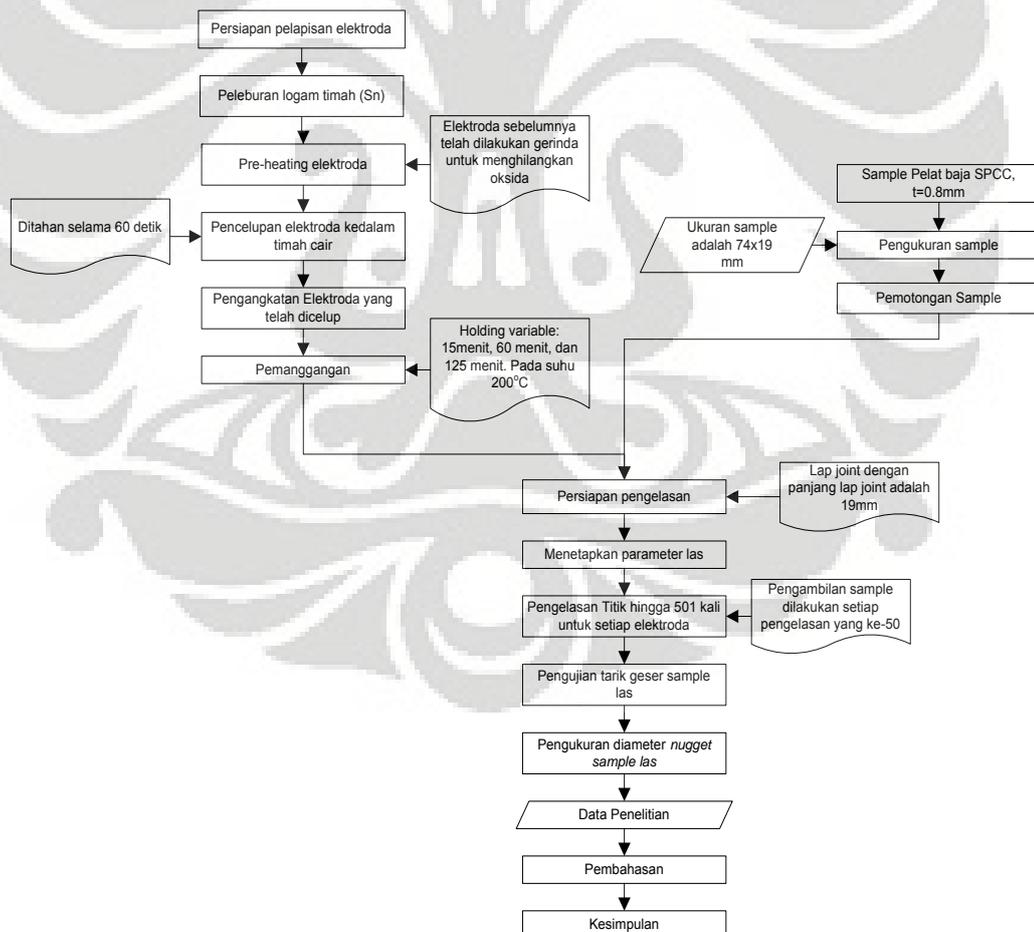
Gambar 2.11. Hubungan antara kekuatan tarik dengan ketebalan dari senyawa intermetalik^[13]

BAB 3

Metode Penelitian

3.1. Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian ini dibuat elektroda dengan lapisan tipis timah (Sn) di bagian ujung elektroda (permukaan kontak elektroda) yang kemudian diperlakukan *holding* pada suhu yang sama (200°C) dengan variasi waktu 15 menit, 45 menit, dan 125 menit. Selanjutnya, dilakukan proses las titik untuk material baja SPCC lapis seng (Zn) disalah satu sisinya sebanyak 501 kali untuk tiap elektroda. Secara umum, diagram alir dari penelitian dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

3.2. Alat dan Bahan

3.2.1. Alat

Peralatan yg digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Mesin Las titik
2. Alat potong
3. Penggaris
4. Oven untuk pemanggangan
5. Jangka sorong
6. Makroskop optik untuk foto makro elektroda
7. Mesin gerinda

3.2.2. Bahan

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini antara lain:

1. Lembaran baja SPCC galvanis satu sisi dengan ketebalan 0.8mm
2. Elektroda Cu-Cr
3. Logam timah Sn dengan kadar 99%
4. Kertas amplas
5. Alkohol sebagai media pembersih elektroda dan lembaran dari debu dan sisa oli

3.3. Proses Pembuatan Sampel Las

Proses pembuatan sampel menggunakan material baja galvanis (satu sisi) yang berasal dari *scrap* dari perusahaan produsen sepeda motor yang kemudian dipotong menurut ukuran 74 x 19 mm. Tahapan pembuatan sampel adalah sebagai berikut

1. Mempersiapkan dan membersihkan sampel *scrap* material.
2. Mengukur dimensi sampel yang akan digunakan dengan menggunakan penggaris rotring dan spidol.
3. Memotong sampel dengan bantuan alat potong besi.
4. Mengulangi proses inji hingga mendapatkan jumlah sampel sebanyak 66 buah.

3.4. Proses Pelapisan dan Pemanggangan Elektroda dengan timah putih (Sn)

Pada proses ini elektroda dilapiskan dengan timah putih menggunakan metode *hot-dip*, dengan tujuan untuk membentuk fasa intermetalik Cu_3Sn di bagian permukaan kontak elektroda. Berikut adalah tahapan proses pelapisan dan pemanggangan elektroda:

1. Membersihkan ujung elektroda dengan menggunakan amplas dan alumina.
2. Melebur timah putih (Sn) dalam dapur lebur.
3. Melakukan *pre-heating* elektroda, sesaat sebelum dicelup.
4. Mencelupkan ujung elektroda kedalam timah cair, dan ditahan selama 60 detik.
5. Mengangkat elektroda yang telah dicelup.
6. Memanggang elektroda dalam oven furnace pada temperatur 200 °C dengan lama waktu 15 menit.
7. Mengulang proses ini untuk 2 pasang elektroda lainnya dengan lama waktu pemanggangan masing-masing 60 menit dan 125 menit.

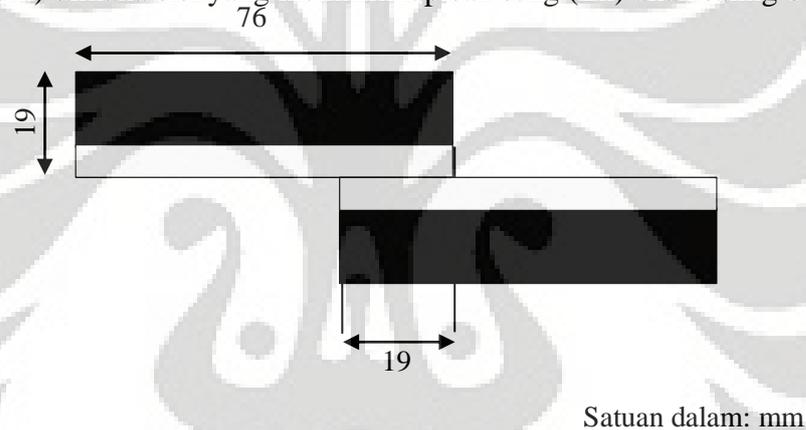
3.5. Proses Pengelasan Titik.

Proses ini dilakukan dengan mesin las titik merk WIM. Dalam penelitian ini parameter las dibuat tetap (konstan), baik parameter kuat arus, tegangan, besar tekanan, dan waktu seluruhnya dalam kondisi konstan untuk proses penelitian. Tahapan pengelasan titik adalah sebagai berikut:

1. Menetapkan parameter las yang digunakan.

Parameter las yang digunakan adalah:

- a. Besar kuat arus adalah 7000A
 - b. Lama waktu proses 0.5 detik
 - c. Besar tekanan yang diberikan 150 kgf
2. Menyambungkan material sampel dengan tipe *lap joint* (tumpang tindih), dengan panjang *joint* adalah 19 mm. Dikarenakan material las yang terdapat lapisan seng (Zn) disalah satu sisinya (bagian putih Gambar 3.2), maka proses pengelasan dilakukan dengan *lap joint* (sambungan tumpang tindih) dimana sisi yang memiliki lapisan seng (Zn) akan saling bertemu.



Gambar 3.2. menunjukkan bentuk sambungan material.

3. Gunakan elektroda yang telah dilapisi dengan timah dan telah di panggang selama 15 menit.
4. Melakukan proses las dengan 501 titik.
5. Mengambil sampel uji tarik geser untuk setiap proses las titik yang ke-50.
6. Proses ini diulang untuk elektroda yang telah dilapisi timah dan dipanggang selama 60 menit dan 125 menit.

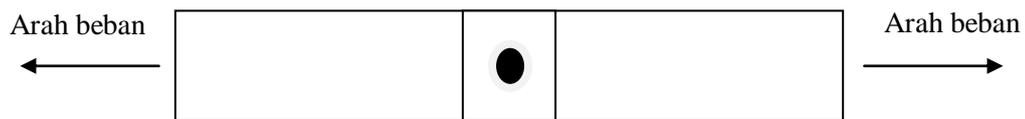
3.6. Proses uji tarik geser

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kekuatan logam las terhadap kerusakan akibat beban yang diberikan. Pada penelitian ini banyaknya sampel yang digunakan untuk pengujian tarik sebanyak 11 buah dari masing-masing elektroda yang telah dilapisi timah putih. Pengujian tarik ini dilakukan dengan menggunakan mesin tarik yang terdapat di Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia. Adapun beban tarik yang diberikan adalah 100 Kg. Dari hasil pengujian diperoleh grafik beban-perubahan panjang (P vs dL). Selanjutnya akan dilihat nilai dari kekuatan maksimum yang dimiliki (*ultimate tensile strength*).



Gambar 3.3. *Universal Testing Machine*

Secara skematis Gambar 3.4. memperlihatkan pergerakan beban pada sampel las titik saat pengujian tarik geser dengan *universal testing machine*.



Gambar 3.4. Ilustrasi pembebanan tarik geser pada sampel uji

3.7. Pengukuran diameter *nugget* yang terbentuk.

Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui besar dimensi hasil las yang terbentuk setelah proses pengelasan dilakukan. Pengukuran diameter *nugget* dilakukan setelah pengujian tarik geser dilakukan. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan *capiler* ukur. Pengukuran diameter dilakukan sebanyak dua kali untuk setiap sampel dan kemudian dirata-rata untuk memperoleh dimensi diameter *nugget* (hasil las) yang terbentuk.

3.8. Foto Struktur Makro Permukaan Elektroda setelah pengelasan

Hal ini dilakukan dengan menggunakan mikroskop makro, untuk mengetahui bentuk permukaan kontak elektroda setelah pengelasan titik. Hal ini bertujuan untuk melihat kesimetrisan elektroda yang mempengaruhi hasil las (*nugget*). Pada foto ini akan dibandingkan masing-masing elektroda yang telah dilapisi dengan timah putih (Sn). Sebagai pembanding akan diberikan juga foto makro permukaan kontak elektroda yang tidak dilapisi dengan timah putih yang telah melalui proses pengelasan yang sama dengan parameter las yang konstan.

BAB 4

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Ketebalan lapisan intermetalik Cu₃Sn yang terbentuk

Pengukuran ketebalan lapisan timah putih pada permukaan kontak elektroda dilakukan secara matematis. Dari dasar teori, diperoleh bahwa koefisien difusi pembentukan Cu₃Sn adalah $2.15 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$ pada temperatur 200°C (473K). Berdasarkan persamaan 3, maka dapat diperhitungkan secara matematis hasil dari proses pelapisan tembaga (Cu) dengan timah (Sn). Data yang dimiliki untuk perhitungan ketebalan fasa intermetalik, sesuai yang dibutuhkan pada persamaan 3, antara lain

- Koefisien Difusi (D) adalah $2.15 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$
- T yang digunakan adalah 473K
- t divariasikan selama 900 detik, 2700 detik, dan 7200 detik
- Konsentrasi logam timah putih
 - Dipermukaan : 100%Sn
 - Diketebalan x : 38.4%Sn (%Sn dalam Cu₃Sn)
 - Didalam substrat (Cu) : 0%Sn

Maka sesuai persamaan (2.3), maka diperoleh ketebalan untuk tiap-tiap variable waktu adalah:

- a. Untuk variabel waktu selama 900 detik (15 menit), diperoleh ketebalan lapisan yang terbentuk secara matematis, adalah:

$$\frac{(38.4) - (0)}{(100) - (0)} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{((2.15 \cdot 10^{-16}) \cdot 900)}}\right)$$

$$\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{((2.15 \cdot 10^{-16}) \cdot 900)}}\right) = 0.616$$

$$\left(\frac{x}{2\sqrt{((2.15 * 10^{-16}) * 900)}} \right) = 0.605$$

$$x = 5.42 * 10^{-7} \text{ m}$$

- b. Untuk variabel waktu selama 2700 detik (45 menit), diperoleh ketebalan lapisan yang terbentuk secara matematis, adalah:

$$\frac{(38.4) - (0)}{(100) - (0)} = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{((2.15 * 10^{-16}) * 2700)}} \right)$$

$$\operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{((2.15 * 10^{-16}) * 2700)}} \right) = 0.616$$

$$\left(\frac{x}{2\sqrt{((2.15 * 10^{-16}) * 2700)}} \right) = 0.605$$

$$x = 9.39 * 10^{-7} \text{ m}$$

- c. Untuk variabel waktu selama 7200 detik (125 menit), diperoleh ketebalan lapisan yang terbentuk secara matematis, adalah:

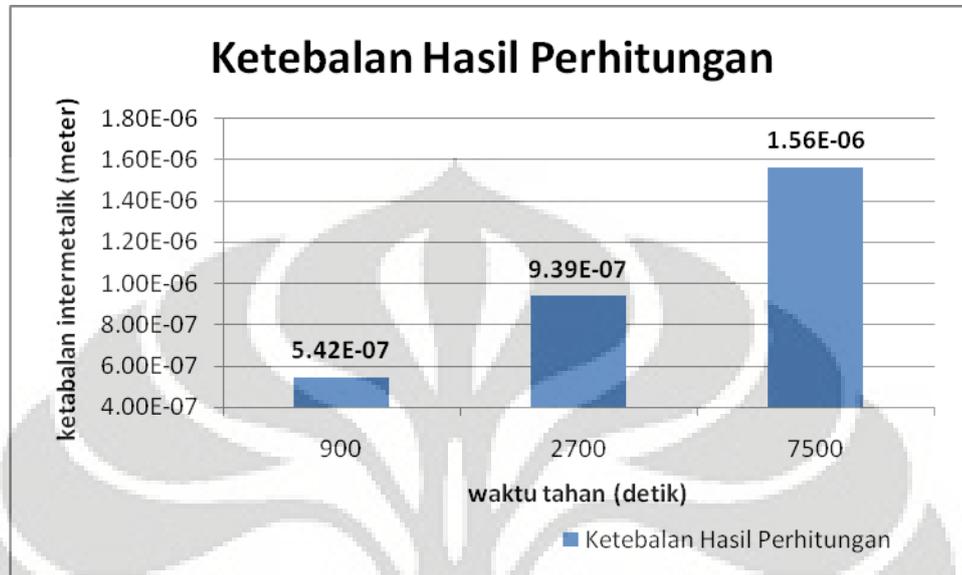
$$\frac{(38.4) - (0)}{(100) - (0)} = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{((2.15 * 10^{-16}) * 7200)}} \right)$$

$$\operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{((2.15 * 10^{-16}) * 7200)}} \right) = 0.616$$

$$\left(\frac{x}{2\sqrt{((2.15 * 10^{-16}) * 7200)}} \right) = 0.605$$

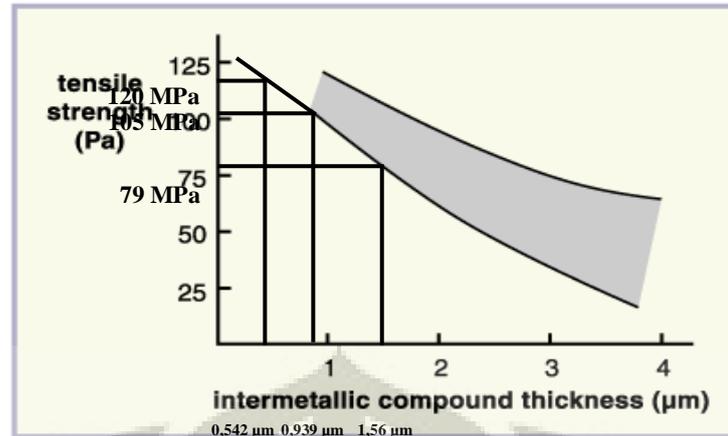
$$x = 1.56 * 10^{-6} \text{ m}$$

Dari hasil perhitungan tersebut, maka kemudian dibentuk diagram batang yang menunjukkan peningkatan ketebalan terhadap peningkatan waktu tahan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Diagram hasil perhitungan ketebalan intermetalik (satuan dalam meter)

Gambar 4.1. memberikan informasi bahwa terjadi peningkatan ketebalan dari fasa intermetalik yang terbentuk dengan meningkatnya waktu tahan. Bila disesuaikan dengan Gambar 2.6 yang mana pertumbuhan fasa intermetalik Cu_3Sn bersifat relatif konstan (lambat), peningkatan nilai ketebalan material tidak terlalu signifikan terhadap lamanya waktu pemanggangan (*holding time*). Dari Gambar 4.1 ini juga dapat diprediksi kekuatan tarik dari fasa intermetalik yang terbentuk. Dengan bantuan dari Gambar 2.8 diperoleh prediksi nilai kuat tarik terhadap ketebalan dari intermetalik yang terbentuk. Gambar 4.2 menunjukkan prediksi nilai kuat tarik yang diperoleh dari fasa intermetalik yang terbentuk.



Gambar 4.2. Prediksi nilai kuat tarik berdasarkan ketebalan intermetalik yang terbentuk^[13]

Dari Gambar 4.2 dapat diprediksi nilai kuat tarik dari tiap-tiap ketebalan masing-masing adalah ± 79 MPa untuk ketebalan intermetalik $1.56\mu\text{m}$, ± 105 MPa untuk ketebalan intermetalik $0.939\mu\text{m}$, dan ± 120 MPa untuk ketebalan $0.542\mu\text{m}$. Sehubungan dengan waktu tahan pemanggangan, nilai kuat tarik tertinggi, sebesar ± 120 MPa dari fasa intermetalik yang terbentuk terjadi pada saat waktu tahan pemanggangan selama 15 menit. Penurunan nilai kekuatan tarik dari fasa intermetalik yang berbanding terbalik dengan peningkatan ketebalan dari fasa intermetalik yang terbentuk akibat sifat dari senyawa intermetalik yang getas/rapuh. Karena keberadaan dari intermetalik ini berada diluar dari matrik *host*-nya (tembaga) sehingga hal inilah yang menyebabkan penurunan nilai kuat tarik terhadap peningkatan ketebalan intermetalik yang ada. Selain itu pula, ikatan yang terjadi antara lapisan intermetalik dengan material dasar adalah ikatan *van derwaals*. Dan juga ikatan yang terjadi didalam fasa intermetalik adalah ikatan kovalen^[5].

4.2. Kuat tarik geser dan diameter *nugget* yang terbentuk

Hasil pengujian kekuatan tarik geser dan pengukuran diameter *nugget* yang terbentuk dapat dilihat pada Tabel 4.1 sampai dengan Tabel 4.2 dan Gambar 4.3.

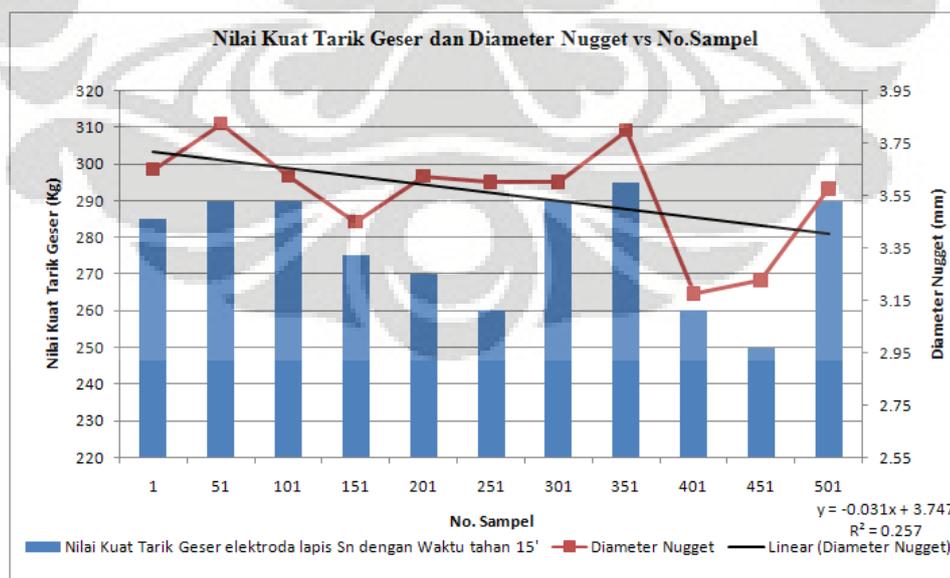
Tabel 4.1. Data Pengujian Tarik Geser (satuan dalam Kg)

No Sampel	Hasil dengan Elektroda lapis Sn (t=125')		Hasil dengan Elektroda lapis Sn (t=45')		Hasil dengan Elektroda lapis Sn (t=15')		Hasil dengan Elektroda tanpa lapis Sn	
	Nilai Kekuatan Tarik Geser (Kg)	Δ kekuatan	Nilai Kekuatan Tarik Geser (Kg)	Δ kekuatan	Nilai Kekuatan Tarik Geser (Kg)	Δ kekuatan	Nilai Kekuatan Tarik Geser (Kg)	Δ kekuatan
1	225	0	280	0	285	0	300	0
51	275	50	280	0	290	5	295	5
101	270	45	285	5	290	5	300	0
151	280	55	280	0	275	10	275	25
201	280	55	250	30	270	15	310	10
251	290	65	265	15	260	25	270	30
301	295	70	285	5	290	5	290	10
351	280	55	290	10	295	10	295	5
401	300	75	275	5	260	25	285	15
451	260	35	280	0	250	35	315	15
501	310	85	280	0	290	5	320	20

Tabel 4.2. Data Pengukuran Diameter Nugget (satuan dalam mm)

No. Sampel	Hasil dengan Elektroda lapis Sn (t=125')	Hasil dengan Elektroda lapis Sn (t=45')	Hasil dengan Elektroda lapis Sn (t=15')	Hasil dengan Elektroda tanpa lapis Sn
1	2.625	3.45	3.65	3.65
51	3.325	3.725	3.825	3.75
101	3.35	3.775	3.625	3.2
151	3.6	3.65	3.45	3.5
201	3.825	3.425	3.625	3.925
251	3.725	3.3	3.6	3.6
301	3.75	3.375	3.6	3.625
351	3.325	3.425	3.8	3.725
401	3.725	3.225	3.175	3.575
451	3	3.625	3.225	3.875
501	3.775	3.725	3.575	3.925

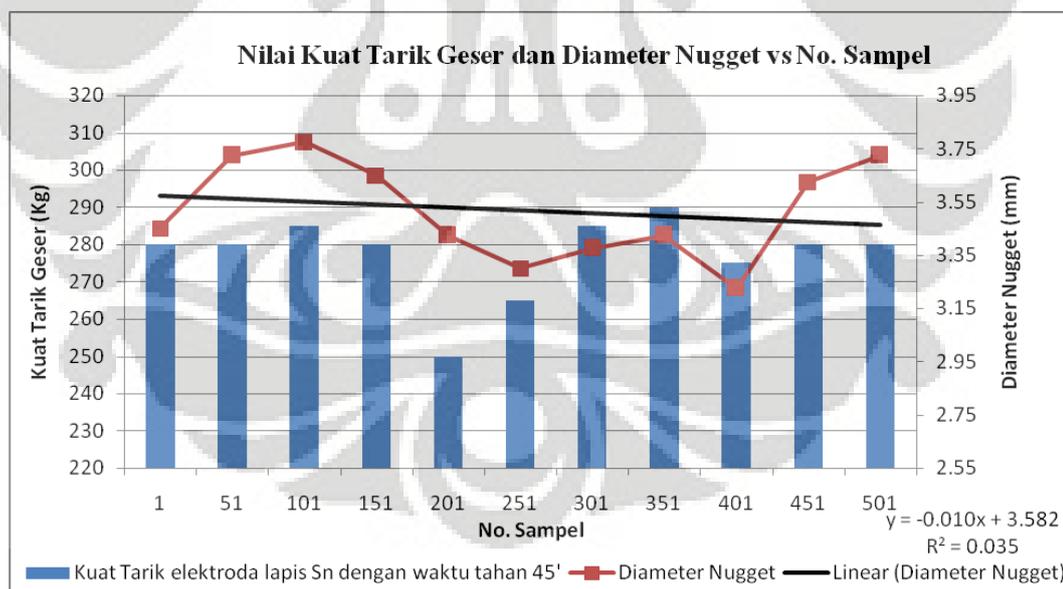
a. Hasil sampel elektroda lapis timah putih (Sn) dengan waktu tahan 15 menit



Gambar 4.3. Diagram hubungan nilai kuat tarik geser dan diameter nugget untuk sampel lapis Sn dengan waktu tahan 15 menit.

Pada Gambar 4.3 dimana elektroda yang digunakan adalah elektroda yang dilapis dengan timah dan dipanggang selama 15 menit, diketahui bahwa bila dibandingkan dengan elektroda yang lain ketika awal pengelasan nilai kuat tarik gesernya adalah yang tertinggi. Hal ini karena tebal lapisan intermetalik yang ada pada elektroda ini adalah yang tertipis dibanding elektroda lain. Kuat tarik geser mengalami penurunan mulai dari rentang sampel 101 sampai 251 dan 351 sampai 451. Pada rentang sampel 101 sampai 251 penurunan kuat tarik geser selain disebabkan akibat tahanan yang ada pada fasa intermetalik juga diakibatkan adanya penebalan lapisan lain (Cu-Fe) yang menyebabkan variasi dan peningkatan tahanan listrik pada elektroda. Sebagai akibatnya timbul percikan bunga api selama pengelasan. Namun karena beban tekan dari elektroda pada akhirnya lapisan ini terlepas pula (termasuk intermetalik dan paduan lain). Pada rentang sampel 351 sampai 451, akibat penumpukan lapisan Cu-Fe pada permukaan elektroda, nilai kuat tariknya turun walaupun terjadi kenaikan ukuran nugget (sampel 451).

b. Sampel elektroda lapis timah putih (Sn) dengan waktu tahan 45 menit

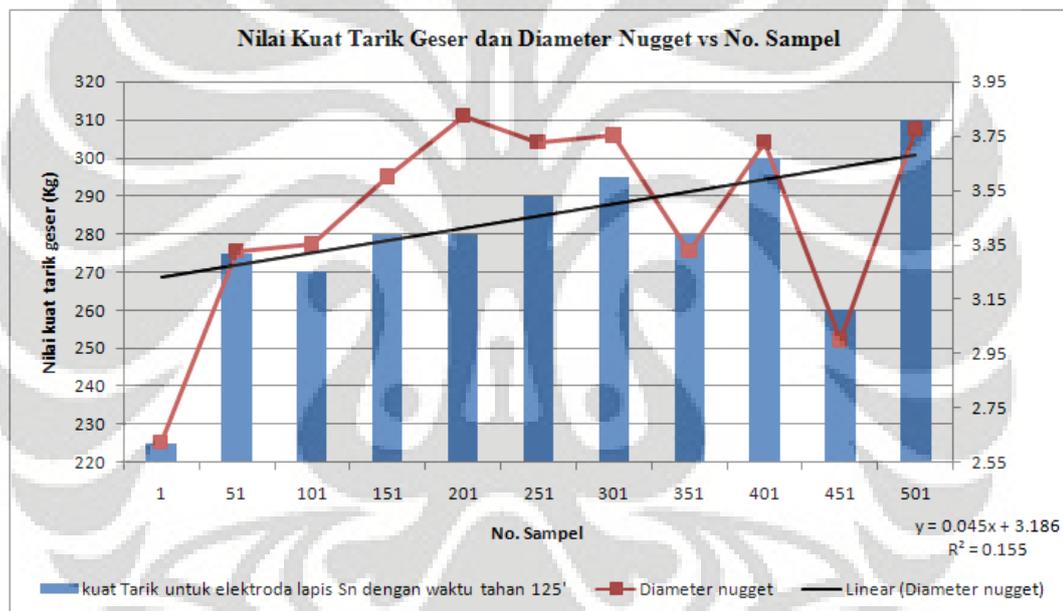


Gambar 4.4. Diagram hubungan nilai kuat tarik geser dan diameter nugget untuk sampel lapis Sn dengan waktu tahan 45 menit.

Pada Gambar 4.4, relatif sama seperti Gambar 4.3, pada saat awal pengelasan nilai kuat tarik gesernya hampir sama, hal ini karena perbedaan ketebalan dari lapisan intermetalik kedua kondisi tidak terlalu jauh. Ketika

pengambilan sampel ke 101 terjadi peningkatan nilai kekuatan, hal ini disebabkan karena ada lapisan intermetalik yang terlepas dari permukaan elektroda pada proses sebelumnya sehingga mengurangi nilai tahanan listrik pada elektroda. Walaupun terjadi penurunan kuat tarik geser untuk dua sampel selanjutnya ini lebih disebabkan peran serta pembentukan lapisan Fe yang menempel akibat resistansi yang terbentuk cukup untuk membentuk nugget yang sesuai. Setelah Fe terlepas dari elektroda kembali terjadi peningkatan nilai uji tarik geser material las.

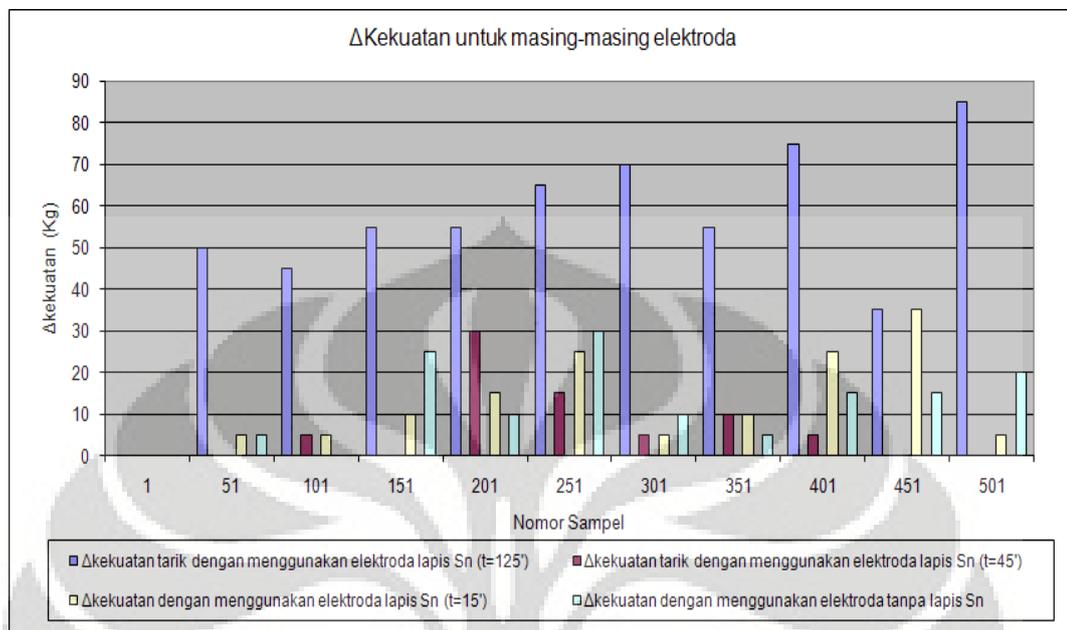
c. Sampel elektroda lapis timah putih (Sn) dengan waktu tahan 125 menit



Gambar 4.5. Diagram hubungan nilai kuat tarik geser dan diameter nugget untuk sampel lapis Sn dengan waktu tahan 125 menit.

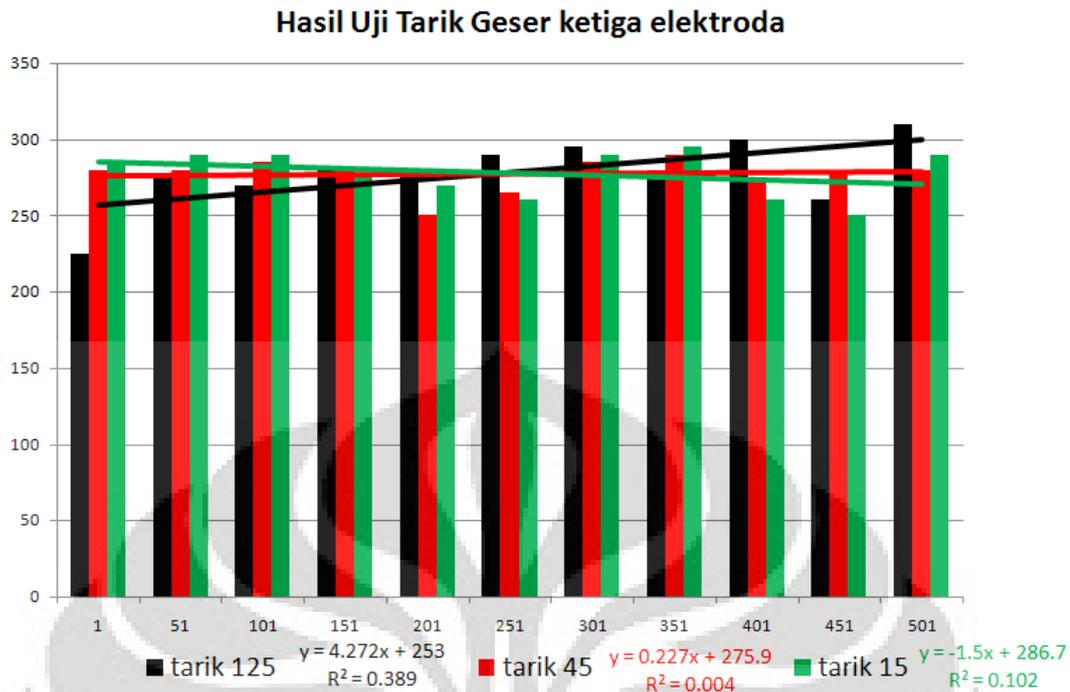
Pada Gambar 4.5 dimana logam elektroda dilapis dengan timah dan dipanggang selama 125 menit, pada saat awal pengelasan harga dari nilai uji tarik geser untuk elektroda yang dipanggang selama 125 menit adalah yang terendah dibanding elektroda lainnya. Hal ini disebabkan pada awal pengelasan, ketebalan fasa intermetalik yang ada sangatlah tebal. Namun karena fasa ini bersifat getas, maka lama-kelamaan fasa ini akan terlepas dari matrik induknya (elektroda), sehingga pada saat pengelasan selanjutnya terjadi peningkatan nilai kekuatan tarik dan ukuran diameter karena material las sudah mengalami kontak langsung

dengan matriks induk yang memiliki tahanan listrik yang rendah sehingga pada akhir pengelasan nilai kuat tarik gesernya adalah yang tertinggi.



Gambar 4.6. Diagram perbandingan beda kekuatan seluruh elektroda

Pada Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa nilai beda kekuatan yang diambil dari tiap-tiap nilai uji tarik geser dikurangi dengan nilai uji tarik awal (sampel 1) terbesar terjadi pada elektroda yang dilapis Sn dengan lama pemanggangan 125 menit. Hal ini seperti yang dijelaskan sebelumnya adalah akibat dari peningkatan tahanan listrik karena tebal fasa intermetalik yang besar pada awal pengelasan, dan karena sifat intermetalik yang rapuh, dimana akhirnya lapisan ini terlepas dan terjadi peningkatan konduktivitas listrik elektroda, sehingga hasil las mengalami peningkatan kekuatan tarik gesernya. Sedangkan untuk elektroda yang hanya dipanggang selama 15 menit dan elektroda tanpa dilapisi oleh Sn, sifatnya relatif sama dengan elektroda yang dipanggang selama 125 menit. Namun faktor yang lebih mempengaruhi nilai beda kekuatan tarik geser ini lebih kepada adanya lapisan Fe yang menempel akibat resistansi yang kurang sempurna saat pengelasan. Konsekuensinya nilai beda kekuatan tariknya menjadi relatif besar. Sedangkan untuk elektroda yang dipanggang selama 45 menit, pada Gambar 4.6 memiliki nilai beda kekuatan yang relatif stabil.



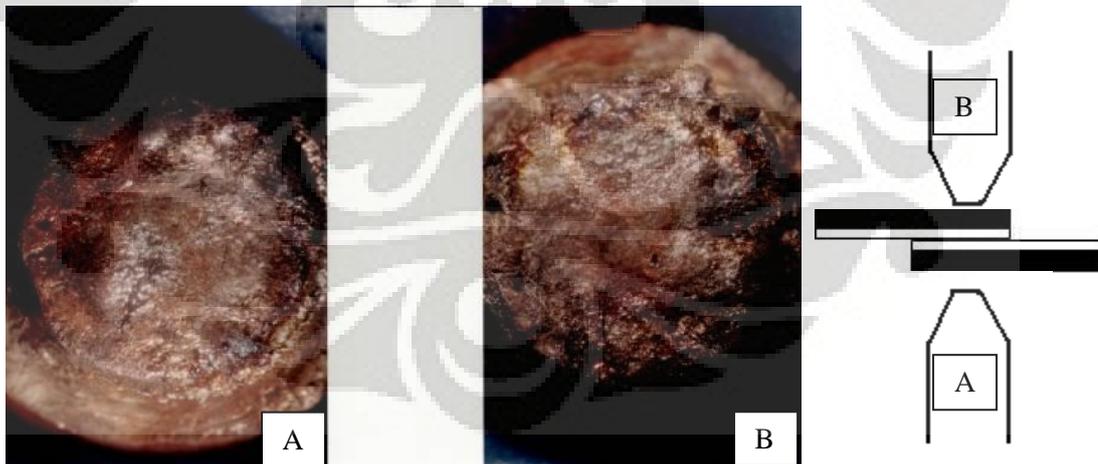
Gambar 4.7. Diagram perbandingan hasil uji tarik geser ketiga elektroda

Gambar 4.7. memperlihatkan perbandingan hasil kuat tarik geser dari masing-masing elektroda yang telah dilapisi dengan timah putih dan dipanggang dengan tiap-tiap variasi waktu. Dari hasil perbandingan tiap-tiap elektroda dapat dilihat bahwa kecenderungan hasil kuat tarik elektroda yang terlapis timah putih (Sn) dan dipanggang pada temperatur 200°C selama 125 menit adalah meningkat. Hal ini karena ketebalan lapisan intermetalik yang terbentuk merupakan yang terbesar tetapi memiliki nilai kuat tarik yang terendah. Akibatnya lapisan ini sangat rentan terjadi retak dan akan menyebabkan terlepasnya lapisan Cu_3Sn sehingga pada proses las titik selanjutnya permukaan kontak elektroda merupakan lapisan material dasar (Cu), yang memiliki tahanan listrik yang lebih rendah. Akhirnya setelah pengelasan sebanyak 501 kali permukaan elektroda yang dipanggang selama 125 menit mengalami deformasi yang sangat besar (Gambar 4.8) dibanding elektroda lain yang dilapis Sn dengan variasi waktu yang lain. Sedangkan pada elektroda dengan variasi waktu tahanan pemangangan yang lain (waktu 45 menit dan 15 menit), memiliki kecenderungan hasil kuat tarik geser yang menurun. Hal ini karena selain lapisan Cu_3Sn yang meningkatkan tahanan listrik permukaan kontak elektroda dengan material, juga terbentuk lapisan besi (Fe) yang menempel pada permukaan elektroda akibat tidak sempurnanya arus

yang mengalir untuk menyambung material. Namun hasil kuat tarik geser yang memiliki kestabilan adalah elektroda dengan variasi waktu selama 45 menit. Walaupun, setelah proses pengelasan sebanyak 501 kali, permukaan kontak elektroda yang dilapis dan dipanggang selama 45 menit mengalami deformasi yang lebih besar dibanding elektroda dengan waktu pemangangan selama 15 menit. Namun hal ini, juga lebih disebabkan karena nilai kuat tarik lapisan Cu_3Sn yang dipanggang selama 15 menit adalah yang terbesar sehingga nantinya lapisan ini akan lebih sulit untuk terjadi retak dan pecah dibanding elektroda yang dipanggang selama 45 menit. Dan karena hal tersebut, sehingga efek penempelan lapisan besi (Fe) pada permukaan elektroda yang dipanggang selama 15 menit menjadi lebih meningkat. Walaupun elektroda dengan waktu tahan pemangangan 45 menit memiliki tebal yang lebih besar, hanya saja nilai kuat tarik lapisan Cu_3Sn lebih rendah dibandingkan elektroda dengan variasi waktu pemangangan 15 menit.

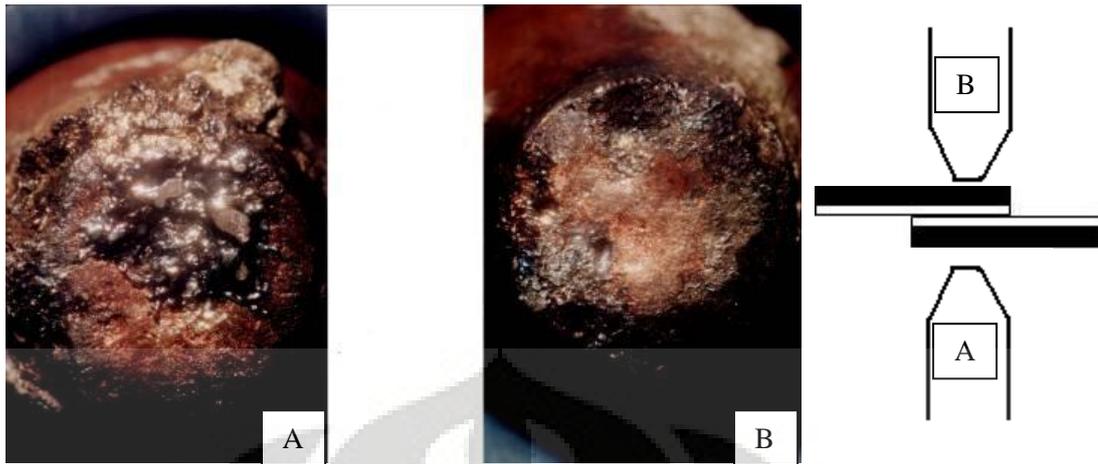
4.3. Struktur makro permukaan kontak elektroda setelah 501 kali Pengelasan Titik

a. Foto Makro elektroda dengan waktu tahan 125 menit



Gambar 4.8. Foto makro elektroda lapis Sn ($t=125'$) setelah 501 kali pengelasan titik

b. Foto Makro elektroda dengan waktu tahan 45 menit



Gambar 4.9. Foto makro elektroda lapis Sn ($t=45'$) setelah 501 kali pengelasan titik

c. Foto Makro elektroda dengan waktu tahan 15 menit



Gambar 4.10. Foto makro elektroda lapis Sn ($t=15'$) setelah 501 kali pengelasan titik

Dari hasil foto makro permukaan kontak elektroda setelah 501 kali pengelasan titik (Gambar 4.8–Gambar 4.10), dapat diketahui bahwa, untuk elektroda yang dipanggang selama 125 menit, bentuk *tip* (ujung) elektroda sudah mengalami deformasi dan degradasi yang signifikan. Hal ini disebabkan selama proses pengelasan titik elektroda yang ditahan paling lama memiliki lapisan intermetalik yang lebih tebal dibandingkan elektroda lainnya. Berdasarkan penjelasan di Bab II, dimana lapisan intermetalik Cu_3Sn bersifat rapuh dibandingkan dengan sifat dari logam induknya, maka material intermetalik ini akan terlepas dari logam induknya (matriks Cu). Hal ini akan sangat merugikan karena justru akan mempercepat degradasi permukaan kontak elektroda.

Untuk elektroda yang dipanggang selama 45 menit dan 15 menit, kerusakan pada bagian ujung elektroda tidak terlalu signifikan. Hal yang terdapat pada elektroda tersebut (b dan c) adalah penempelan dari logam las karena terjadi kenaikan tahanan listrik sehingga akan mengurangi keefektifan elektroda untuk mengalirkan arus.



BAB 5

KESIMPULAN

1. Berdasarkan hasil perhitungan secara matematis, variabel waktu akan meningkatkan ketebalan dari lapisan intermetalik. Dari perhitungan didapatkan tebal lapisan Cu_3Sn untuk waktu tahan 15 menit adalah 5.42×10^{-7} m, sedangkan untuk waktu tahan 45 menit adalah 9.39×10^{-7} m, dan untuk waktu tahan 125 menit diperoleh ketebalan sebesar 1.56×10^{-6} m.
2. Pengaruh tebal lapisan intermetalik yang terbentuk terhadap nilai kuat tarik geser adalah berbanding terbalik. Hal ini karena fasa intermetalik memiliki tahanan listrik yang besar, sehingga aliran arus untuk menyambung material menjadi kurang optimal.
3. Dari hasil foto makro setelah 501 kali pengelasan, peningkatan ketebalan lapisan Cu_3Sn akan mengakibatkan peningkatan deformasi dan pengikisan permukaan kontak elektroda.
4. Kinerja elektroda yang relatif stabil terjadi saat waktu pemanggangan selama 45 menit. Kinerja terburuk terjadi saat pemanggangan selama 125 menit sedangkan untuk elektroda standar (tidak dilapis Sn) relatif stabil.

DAFTAR ACUAN

- [1] Klas Wean, *Welding Process Handbook*, WOODHEAD PUBLISHING LIMITED, Cambridge:2003.
- [2] *Handbook for Resistance Spot Welding*, Miller. July 2005.
- [3] *Copper Alloy No. C18200*. Anchor Bronze & Metals, Inc. 2009. Diakses tanggal 12 Juni 2009 pukul 08.00am. <www.anchorbronze.com>
- [4] Tarkimin. *Studi Perbandingan Kinerja Elektroda Las Titik Komersial (Cu-Te) dengan Elektroda Las Titik Penguatan Terdispersi (Cu-Al₂O₃)*. Skripsi Departemen Teknik Metalurgi dan Material. Universitas Indonesia:1996.
- [5] Chistiana, Merry. *Studi Pengaruh Pertumbuhan Fasa Intermetalik Cu-Sn Terhadap Konduktifitas Listrik Kawat Penghantar Tembaga dengan Lapisan Tipis Timah Putih*. Skripsi Departemen Teknik Metalurgi dan Material. Universitas Indonesia:1994.
- [6] G.B. Brook, E.A. Brandes. *Smithells Metals Reference Book Seventh Edition*. A division of Reed Educational and Professional Publishing Ltd.London:1992.
- [7] William D. Callister, Jr (2003). *Introduction of Material Engineering* (6th ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [8] *Phase Diagram of Cu-Sn*. Diakses tanggal 12 Juni 2009 pukul 09.15pm. <<http://www.doitpoms.ac.uk/>>
- [9] http://www.ing.unitn.it/~colombo/brasature_senza_piombo/proprieta_file//image003.gif diakses tanggal 14 Juni 2009 pukul 03.34pm.
- [10] C-J. Huang¹, R. C. Thomson¹ and P. P. Conway², *Design Tools for the Manufacture and Implementation of Pb-Free Solder Joints: Materials Modelling Challenges*, Loughborough University:5th September 2007.
- [11] <http://www.pcbdesign007.com/pages/zone.cgi?a=21806> diakses tanggal 17 Juni 2009 pukul 2.45pm
- [12] *Intermetallic compounds* By Cecil Henry Desch
- [13] Martin Tarr. *Intermetallics*. Diakses tanggal 17 Juni 2009 pukul 2.48pm. <www.ami.ac.uk/courses/topics/0156_intm/index.html>
- [14] ASM Handbook volume 6. WELDING and BRAZING.

- [15] *PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF INTERMETALLIC COMPOUNDS COMMONLY FOUND IN SOLDER JOINTS*, R. J. Fields and S. R. Low, National Institute of Standards and Technology.
- [16] R.S. Timsit. *Electrical Contact Resistance: Review of Elementary Concepts*. Timron Advance Connection Technologies, A division of Timron Scientific Consulting, Inc. Toronto. Maret 2007. Diakses tanggal 19 Juni 2009.
<http://www.timron-inc.com/teknote_Mar2007.html>
- [17] Tadashi Nohetani, et al. *Electrode for Spot Welding*. Diterbitkan tanggal 2 Agustus 1994. Diakses Tanggal 19 Desember 2008 dari
<http://freepatentonline.com>
- [18] *Principles of soldering* Oleh Giles Humpston, David M. Jacobson

