

**PENGARUH *FORGING PRESSURE* DAN KECEPATAN
PUTARAN TERHADAP SIFAT MEKANIK PADA
SAMBUNGAN *DISSIMILAR METAL* Al-Cu
DENGAN METODE *FRICTION*
*WELDING***

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari Jurusan
Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Oleh:

NIZZAR SUBARCAH
3334190080

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON - BANTEN
2024**

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH *FORGING PRESSURE* DAN KECEPATAN
PUTARAN TERHADAP SIFAT MEKANIK PADA
SAMBUNGAN *DISSIMILAR METAL* Al-Cu
DENGAN METODE *FRICTION*
*WELDING***

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari Jurusan
Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Disetujui untuk Jurusan Teknik Metalurgi oleh:

Pembimbing I



Yeni Muriani Zulaida S.T., M.T
NIP. 197401032005012001

Pembimbing II



Dr. Ir. Kirman M., MT
NIP. 196510291993011001

LEMBAR PERSETUJUAN

PENGARUH *FORGING PRESSURE* DAN KECEPATAN PUTARAN TERHADAP SIFAT MEKANIK PADA SAMBUNGAN *DISSIMILAR METAL* Al-Cu DENGAN METODE *FRICTION* *WELDING*

SKRIPSI

Disusun dan diajukan oleh:

Nizzar Subarkah

3334190080

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal
5 Desember 2024

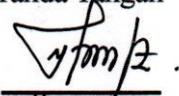
Susunan Dewan Penguji

Penguji I : **Yeni Muriani Zulaida S.T., M.T**

Penguji II : **Dr. Ir. Kirman M., MT**

Penguji III : **Suryana, ST., M.Si**

Tanda Tangan



Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar

Sarjana Teknik

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Metalurgi



Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D

NIP. 198003072005011002

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya sebagai penulis skripsi berikut:

Judul : Pengaruh *Forging Pressure* dan Kecepatan Putaran
terhadap Sifat Mekanik pada Sambungan *Dissimilar
Metal Al-Cu* dengan Metode *Friction welding*

Nama Mahasiswa : Nizzar Subarkah

NIM : 3334190080

Fakultas : Teknik

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi tersebut di atas adalah benar-benar hasil karya asli saya dan tidak memuat hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan yang benar dan dapat dipertanggung jawabkan. Apabila di kemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau seluruh karya ini bukan karya saya, maka saya bersedia dituntut melalui hukum yang berlaku. Saya juga bersedia menanggung segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang secara sadar dan sengaja saya nyatakan melalui lembar ini.

Cilegon, 5 Desember 2024



NIZZAR SUBARKAH
NIM. 3334190080

ABSTRAK

Pengelasan *friction welding* merupakan salah satu metode *solid state welding* yang digunakan untuk menyambungkan logam tanpa memerlukan peleburan penuh. Metode ini sangat cocok untuk mengatasi tantangan pengelasan aluminium (Al) dan tembaga (Cu), seperti retakan akibat difusi hidrogen dan resistansi termal pada sambungan yang dapat mengurangi efisiensi aliran listrik. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi tekanan tempa (*forging pressure*) dan kecepatan putaran terhadap sifat mekanik dan struktur mikro pada sambungan material aluminium 6063 dan tembaga dengan metode *friction welding*. Penelitian menggunakan parameter kecepatan putaran 1900 rpm, 2100 rpm, dan 2300 rpm, serta tekanan tempa 51 MPa, 68 MPa, dan 86 MPa. Proses *friction welding* dilakukan dengan tekanan gesek sebesar 19 MPa dan waktu gesek selama 7 detik dan waktu tempa selama 3 detik. Material hasil pengelasan diuji dengan uji tarik, uji kekerasan mikro *Vickers*, dan analisis struktur mikro menggunakan *optical microscope* (OM) untuk mengevaluasi sifat mekanik dan perubahan struktur mikro pada daerah sambungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi tekanan tempa dan kecepatan putaran secara signifikan memengaruhi sifat mekanik dan struktur mikro sambungan. Pada kecepatan putaran 2100 rpm dan tekanan tempa 86 MPa, *tensile strength* maksimum sebesar 123,7 MPa. Kekerasan pada zona sambungan meningkat hingga 88,2 HVN, lebih tinggi dibandingkan kekerasan aluminium 6063 sebesar 83 HVN, akibat pemanasan yang ditimbulkan pada kedua material. Analisis struktur mikro menunjukkan bahwa parameter yang optimal menghasilkan sambungan dengan struktur butir yang halus dan distribusi fasa yang merata, sedangkan kecepatan putaran yang terlalu tinggi menyebabkan pelebaran zona HAZ yang mengurangi sifat mekanik.

Kata Kunci: *Friction welding, Al 6063, Tembaga, Tekanan tempa, Mechanical properties*

ABSTRACT

Friction welding is one of the solid state welding methods used to join metals without requiring full melting. This method is particularly suitable for overcoming the challenges of welding aluminum (Al) and copper (Cu), such as cracks due to hydrogen diffusion and thermal resistance at the joint which can reduce the efficiency of electricity flow. This study was conducted to determine the effect of variations in forging pressure and rotation speed on the mechanical properties and microstructure of the connection of 6063 aluminum and copper materials using the friction welding method. The research used rotation speed parameters of 1900 rpm, 2100 rpm, and 2300 rpm, and forging pressures of 51 MPa, 68 MPa, and 86 MPa. The friction welding process was carried out with a friction pressure of 19 MPa and a friction time of 7 seconds and a forging time of 3 seconds. The welding materials were tested with tensile test, Vickers microhardness test, and microstructure analysis using optical microscope (OM) to evaluate the mechanical properties and microstructure changes at the joint area. The results showed that variations in forging pressure and rotation speed significantly affected the mechanical properties and microstructure of the joints. At a rotation speed of 2100 rpm and forging pressure of 86 MPa, the maximum tensile strength was 123,7 MPa. The hardness at the joint zone increased to 88,2 HVN, higher than the aluminum 6063 hardness of 83 HVN, due to the heating caused to both materials. Microstructure analysis showed that the optimal parameters resulted in joints with fine grain structure and even phase distribution, while too high rotation speed caused widening of the HAZ zone which reduced the mechanical properties.

Keywords: *Friction welding, Al 6063, Copper, Forging pressure, Mechanical properties*

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur Penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena atas segala rahmat yang karunia-Nya, Penulis dapat menyelesaikan laporan skripsi yang berjudul berjudul “Pengaruh *Forging Pressure* dan Kecepatan Putaran terhadap Sifat Mekannik pada Sambungan *Dissimilar Metal* Al-Cu dengan Metode *Friction Welding*”. Penulisan laporan skripsi ini bertujuan untuk memenuhi syarat dalam mencapai gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Metalurgi, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Penulis menyadari bahwa melibatkan berbagai pihak yang memberi bimbingan dan dukungan dapat menyelesaikan laporan skripsi ini. Oleh karena itu, Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Metalurgi, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
2. Ibu Andinnie Juniarsih, S.T., M.T. selaku Koordinator Skripsi Jurusan Teknik Metalurgi FT Untirta.
3. Ibu Yeni Muriani Zulaida, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I Skripsi.
4. Bapak Dr. Ir. Kirman M., M.T. selaku Dosen Pembimbing II Skripsi.
5. Kedua orang tua saya, Ajat Sudrajat dan Suhertiati yang selalu mendukung, memberi saran, motivasi dan mendoakan selama menjalani perkuliahan dan penyusunan skripsi saya.
6. Gina Nuraini selaku adik kandung saya yang selalu mendampingi

dalam menyelesaikan penyusunan skripsi ini.

7. Rekan-rekan teknik metalurgi angkatan 2019 yang selalu mendukung baik secara langsung maupun tidak langsung selama proses penyusunan skripsi saya.

Penulis mengharapkan kritik dan saran yang dapat membangun untuk perkembangan penelitian yang lebih baik. Semoga laporan skripsi ini dapat memberikan manfaat terhadap perkembangan ilmu pengetahuan.

Cilegon, 5 Desember 2024

Nizzar Subarkah

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar belakang.....	1
1.2 Rumusan masalah	5
1.3 Tujuan penelitian.....	5
1.4 Batasan masalah	5
1.5 Sistematika penulisan.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Aluminium	8

2.1.1	Aluminium murni.....	9
2.1.2	Aluminium paduan.....	10
2.1.3	Aluminium 6063	14
2.2	Tembaga	17
2.3	Pengelasan.....	19
2.4	<i>Friction welding</i>	22
2.5	<i>Rotary friction welding</i>	27
2.5.1	<i>Forging pressure</i> (Tekanan Tempa)	30
2.5.2	Kecepatan putaran.....	33
2.6	Pengujian tarik	35
2.7	Pengujian kekerasan.....	37
2.8	Analisis struktur mikro.....	38

BAB III METODE PENELITIAN

3.1	Diagram alir	41
3.2	Alat dan bahan.....	42
3.2.1	Alat-alat.....	42
3.2.2	Bahan-bahan.....	43
3.3	Prosedur percobaan	43
3.3.1	Preparasi sample.....	43
3.3.2	Proses friction welding.....	43

3.4	Pengujian material.....	44
3.4.1	Pengamatan visual.....	44
3.4.2	Pengujian tarik	46
3.4.3	Pengujian kekerasan.....	47
3.4.4	Analisa struktur mikro	48
3.5	Karakterisasi awal material	49

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Hasil pengamatan visual <i>friction welding</i>	52
4.2	Hasil uji tarik.....	56
4.3	Hasil uji kekerasan	60
4.4	Hasil pengamatan metalografi.....	65
4.5	Hasil karakterisasi SEM-EDS (<i>Scanning Electron Microscope</i>)	70
4.6	Pembahasan.....	75
4.6.1	Pengaruh variabel terhadap struktur mikro	75
4.6.2	Pengaruh variabel terhadap kuat tarik.....	78
4.6.3	Pengaruh variabel terhadap kekerasan	79

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	Kesimpulan	81
5.2	Saran.....	82

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

LAMPIRAN A	90
LAMPIRAN B	94
LAMPIRAN C	105

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1 Jenis Paduan Aluminium	12
Tabel 2.2 Komposisi Kimia Aluminium 6063	15
Tabel 2.3 Sifat Mekanik Aluminium 6063	16
Tabel 2.4 Sifat Mekanik Tembaga	17
Tabel 3.1 Komposisi Awal Material Aluminium 6063(wt%)	49
Tabel 3.2 Komposisi Awal Material Tembaga Murni(wt%).....	49
Tabel 3.3 Data Konversi Gaya Yang Digunakan Pada Alat <i>Friction Welding</i>	50
Tabel 3.4 Kekuatan Tarik Dasar Material.....	51
Tabel 4.1 Hasil Visual Lasan	52
Tabel 4.2 Hasil Uji Tarik	56
Tabel 4.3 Hasil Konsentrasi Unsur EDS	73

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Mekanisme Kerja <i>Friction Welding</i>	23
Gambar 2.2 <i>Rotary Friction Welding</i>	27
Gambar 2.3 Daerah Pengelasan <i>Rotary Friction Welding</i>	28
Gambar 2.4 Parameter <i>Rotary Friction Welding</i>	29
Gambar 2.5 Contoh Kurva Hasil Uji Tarik.....	35
Gambar 2.6 Uji Kekerasan <i>Microhardness Vickers</i>	38
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	42
Gambar 3.2 Parameter Penelitian	44
Gambar 3.3 Skema Sampel Uji Tarik	48
Gambar 4.1 Diagram <i>Burn Off Length</i> Spesimen.....	54
Gambar 4.2 Diagram <i>Flash</i> Spesimen.....	55
Gambar 4.3 Hasil Kuat Tarik terhadap <i>Forging pressure</i>	57
Gambar 4.4 Hasil Kuat Tarik terhadap Kecepatan Putar.....	58
Gambar 4.5 Hasil Uji Kekerasan Sampel 1900 rpm	61
Gambar 4.6 Hasil Uji Kekerasan Sampel 2100 rpm	62
Gambar 4.7 Hasil Uji Kekerasan Sampel 2300 rpm	63
Gambar 4.8 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Pada Sampel Dengan variasi <i>Forging pressure</i> 51 MPa dan Variasi Kecepatan Putaran (a) 1900 rpm, (b) 2100 rpm, dan (c) 2300 rpm.....	65
Gambar 4.9 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Pada Sampel Dengan variasi <i>Forging pressure</i> 68 MPa dan Variasi Kecepatan Putaran (a) 1900 rpm, (b) 2100 rpm, dan (c) 2300 rpm	67

Gambar 4.10 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Pada Sampel Dengan variasi <i>Forging pressure</i> 86 MPa dan Variasi Kecepatan Putaran (a) 1900 rpm, (b) 2100 rpm, dan (c) 2300 rpm	68
Gambar 4.11 Hasil SEM – EDX <i>Base Metal</i>	71
Gambar 4.12 Hasil SEM – EDX Daerah Sambungan	72

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Pengelasan didefinisikan oleh AWS (*American Welding Society*) sebagai proses penggabungan terlokalisasi pada logam atau non logam yang dihasilkan baik dengan menggunakan pemanasan bahan dengan temperatur pengelasan yang diperlukan baik dengan atau tanpa tekanan dan dengan atau menggunakan bahan pengisi. Pengelasan adalah sebuah proses penyambungan yang menghasilkan penyatuan material dengan memasukkannya hingga suhu pengelasan baik menggunakan atau tanpa tekanan dan dengan menggunakan atau tanpa logam pengisi [1].

Dalam proses pengelasan menggunakan material Al-Cu untuk aplikasi kelistrikan, beberapa masalah dapat muncul seperti retakan pada sambungan akibat difusi *hydrogen* pada logam las. Retakan ini disebabkan oleh adanya uap air yang diisap oleh fluks pada elektroda, yang kemudian dapat mengikat *hydrogen* pada logam las dan membuatnya rentan terhadap retakan [2]. Selain itu, sambungan pada Al-Cu juga rentan putus dan aliran listrik tidak dapat mengalir sepenuhnya. Untuk menyambungkan material Al-Cu, metode pengelasan yang umum digunakan adalah pengelasan *resistance welding*, *arc welding*, dan *solid state welding*. Pengelasan *resistance welding* dan *arc welding* menggunakan panas yang dihasilkan dari arus listrik untuk melelehkan logam dan menyambungkannya. Namun, pengelasan

dengan metode ini terdapat beberapa masalah retakan dan aliran listrik yang tidak optimal [3].

Salah satu metode *solid state welding* yang dapat digunakan untuk menyambungkan Al-Cu adalah *friction welding*. *Friction welding* merupakan metode pengelasan di mana material dipanaskan secara lokal melalui gesekan dan tekanan, tanpa memerlukan peleburan penuh. Hal ini mengurangi risiko terjadinya difusi *hydrogen* dan retakan pada sambungan Al-Cu. Selain itu, *friction welding* juga menghasilkan sambungan yang kuat dan tanpa cacat struktural [4].

Pada penelitian ini hal yang berpengaruh pada hasil *friction welding* adalah konduktivitas *thermal* dan komposisi kimia dari material yang akan disambung. Keuntungan pengelasan *friction welding* adalah ramah lingkungan karena tidak menghasilkan asap atau gas cocok untuk jumlah produksi yang banyak, meminimalisir terjadinya porositas dan inklusi terak, dapat menggabungkan dua material dengan karakteristik berbeda, memiliki kontrol yang akurat pada toleransi lasan dan tidak memerlukan *fluks* atau *filler* logam dan gas dapat mengurangi biaya produksi. Proses *friction welding* menghasilkan sambungan yang kuat melalui deformasi plastis material dan *interlocking atom*. [5].

Pada penelitian terdahulu yang dilakukan oleh agus sasmito parameter yang digunakan dalam proses pengelasan gesek menggunakan parameter seperti tekanan gesek sebesar 17 MPa, waktu gesek 10 detik, tekanan tempa 85 MPa, dan waktu tekan 4 detik. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tekanan tempa dan waktu tekan mempengaruhi sifat mekanik, struktur mikro, serta distribusi tegangan sisa pada sambungan las *friction welding* antara logam aluminium. Dalam tekanan

tempa 85 MPa yang optimal menghasilkan sambungan las dengan kekuatan tarik yang lebih tinggi dan struktur mikro yang lebih halus. Selain itu, tekanan tempa yang optimal juga dapat mengurangi porositas pada sambungan las [6]. Dalam penelitian yang telah dilakukan oleh Kimura, parameter dalam pengelasan gesek antara aluminium dan tembaga, yaitu parameter yang digunakan dalam penelitian ini meliputi variasi tekanan gesek 30 MPa, dan rentang waktu tekan dari 0,04 hingga 6,0 s, tekanan tempa 30 hingga 150 MPa, dan waktu tekan 6,0 s. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan tekanan tempa yang tinggi dapat meningkatkan efisiensi sambungan dan mengurangi daerah yang tidak terhubung pada sambungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi sambungan meningkat dengan meningkatnya tekanan tempa dan mencapai sekitar 80% pada tekanan tempa 90 MPa atau lebih tinggi. Namun, semua sambungan pada tekanan tempa 135 MPa atau lebih tinggi patah pada material Al [7].

Pada penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Setiawan proses pengelasan menggunakan parameter kecepatan putaran sebesar (1230, 1500, 2500 rpm), dari hasil dan pembahasan yang telah diolah, dapat disimpulkan bahwa kekuatan tarik yang didapatkan oleh sambungan las Al-Cu dengan menggunakan variasi kecepatan putar cenderung menurun seiring bertambahnya kecepatan putar [8].

Penelitian ini akan menggunakan parameter *friction pressure* (tekanan gesek) 19 MPa . Parameter *forging pressure* (tekanan tempa) yang digunakan (51, 68, dan 86 MPa) dengan waktu gesek selama 7 detik, waktu tekan selama 3 detik dengan kecepatan putar 1900 rpm, 2100 rpm, dan 2300 rpm secara konstan. Pada tahap ini material aluminium 6063 dan tembaga akan mengalami deformasi akibat tekanan

yang tinggi. Deformasi ini akan menghasilkan penggabungan lebih lanjut antara permukaan aluminium 6063 dan tembaga. Tekanan ini membuat material yang masih cair atau lembut dari tahap gesekan mengalami deformasi plastis, membentuk sambungan yang lebih erat. Tekanan ini diterapkan untuk memadatkan dan menggabungkan lapisan material yang leleh menjadi struktur padat yang homogen.

Alasan memilih parameter tersebut mengacu pada penelitian sebelumnya hasil penelitian menunjukkan bahwa tekanan tempa dan waktu tekan mempengaruhi sifat mekanik, mikrostruktur, dan distribusi tegangan sisa pada sambungan las *friction welding* Al-Cu. Tekanan tempa optimal menghasilkan sambungan las dengan kekuatan tarik tinggi dan struktur mikro halus, serta mengurangi porositas. Penggunaan tekanan tempa tinggi meningkatkan efisiensi sambungan dan mengurangi daerah yang tidak terhubung. Tekanan tempa, dan waktu tekan juga mempengaruhi kualitas sambungan dan kekuatan tarik. Kekuatan tarik sambungan *dissimilar* meningkat seiring dengan peningkatan tekanan tempa.

Pada penelitian ini memiliki potensi aplikasi yang luas, salah satunya adalah dalam pembuatan konektor elektrik atau sambungan skun bimetal. Konektor elektrik memiliki peranan vital dalam dunia elektromekanikal, berfungsi sebagai penghubung antara rangkaian elektronik yang berbeda atau menghubungkan perangkat dengan perangkat lainnya. Sambungan ini juga dapat diterapkan dalam komponen seperti *connecting rod* (batang penghubung) dan penangkal petir, yang menambah keberagaman aplikasi dari hasil penelitian ini [9].

1.2 Rumusan masalah

Rumusan masalah penelitian kali ini, antara lain:

1. Bagaimana pengaruh variasi tekanan tempa dan kecepatan putaran terhadap sifat mekanik pada sambungan material aluminium 6063 dan tembaga dengan metode *friction welding*?
2. Bagaimana pengaruh variasi tekanan tempa dan kecepatan putaran terhadap struktur mikro pada sambungan material aluminium 6063 dan tembaga dengan metode *friction welding*?

1.3 Tujuan penelitian

Adapun tujuan penelitian ini secara khusus, yaitu:

1. Menganalisa pengaruh variasi tekanan tempa dan kecepatan putaran terhadap sifat mekanik pada sambungan material aluminium 6063 dan tembaga dengan metode *friction welding*.
2. Menganalisa pengaruh variasi tekanan tempa dan kecepatan putaran terhadap hasil struktur mikro pada sambungan material aluminium 6063 dan tembaga dengan metode *friction welding*.

1.4 Batasan masalah

Batasan masalah penelitian kali ini adalah, sebagai berikut:

1. Material yang digunakan untuk penelitian adalah tembaga murni dan aluminium 6063.

2. Sampel yang digunakan berbentuk silinder dengan diameter 1,2 cm dengan masing masing panjang sampel aluminium 6063 dan tembaga 7 cm.
3. Kontak kedua benda kerja pada saat gesekan dan penempatan dianggap tidak terjadi *misalignment*.
4. Metode yang digunakan dalam penelitian adalah *friction welding* pada Aluminium 6063 dan Tembaga.
5. Data yang diperlukan dalam penelitian *friction welding* yaitu data uji tarik, uji kekerasan dan uji struktur mikro.
6. Variabel bebas yang diterapkan adalah tekanan tempa (51, 68, dan 86 MPa) dan variasi kecepatan putaran (1900, 2100, dan 2300 rpm) secara konstan. Variabel tetap yang diterapkan adalah *friction pressure, friction time, dan forging time*.
7. Penelitian berlangsung di Laboratorium Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa dan BRIN Serpong B2TKS.

1.5 Sistematika penulisan

Penulisan skripsi ini dibagi menjadi lima bab yang dilengkapi dengan daftar pustaka serta lampiran pendukung. Bab I pendahuluan menjelaskan mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan laporan penelitian. Bab II tinjauan pustaka menjelaskan mengenai dasar fundamental teori yang mendukung penelitian ini sebagai acuan dalam analisis dan pengolahan data serta pembahasan. Bab III metodologi penelitian menjelaskan

mengenai metode yang dilakukan dalam melaksanakan penelitian ini, prosedur, dan diagram alir. Bab IV hasil dan pembahasan menjelaskan mengenai hasil yang didapat dari penelitian serta analisis lanjut terkait data yang didapatkan. Bab V kesimpulan dan saran menjelaskan mengenai kesimpulan dari hasil yang didapat serta saran-saran untuk perbaikan dan aspek lainnya yang perlu ditingkatkan untuk penelitian selanjutnya. Daftar pustaka memuat mengenai referensi yang digunakan selama penelitian dan menjadi acuan dalam melakukan penelitian. Lampiran menjelaskan data hasil penelitian dan gambar alat serta bahan yang digunakan merupakan beberapa data sekunder pendukung dalam penelitian dan penulisan laporan penelitian ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Aluminium

Aluminium adalah logam *non-ferrous* yang paling banyak digunakan di dunia. Aluminium adalah logam ringan dengan berat jenis rendah, konduktivitas panas dan listrik yang baik, serta ketahanan korosi yang tinggi. Aluminium merupakan unsur yang paling banyak di alam setelah oksigen yaitu sekitar 7,45%. Aluminium memiliki nomor atom 13 dan berada di grup 13 tabel periodik memiliki berat atom sekitar 26,98 gram/mol dan massa jenis sekitar 2,7 gram/cm³. Aluminium memiliki titik leleh sekitar 660°C (1220°F) dan titik didih sekitar 2467°C (4473°F). Logam ini memiliki kekuatan yang baik meskipun memiliki berat yang rendah. Kekuatan aluminium dapat ditingkatkan melalui pengerasan dengan pemanasan atau dengan penggunaan paduan aluminium. Aluminium dan aluminium paduan merupakan logam yang cukup banyak digunakan di dunia industri setelah penggunaan baja dan besi cor. Aluminium merupakan logam yang ringan dan memiliki ketahanan korosi yang baik, hantaran listrik yang baik dan sifat-sifat lainnya. Umumnya aluminium dicampur dengan logam lainnya sehingga membentuk aluminium paduan. Material ini dimanfaatkan bukan saja untuk peralatan rumah tangga, tetapi juga dipakai untuk keperluan industri, konstruksi, dan lain sebagainya [10].

Aluminium memiliki beberapa kelebihan dalam pengelasan *rotary friction welding*. Aluminium memiliki konduktivitas termal yang tinggi, memungkinkan

penyebaran panas yang merata selama proses pengelasan. Hal ini mengurangi risiko deformasi atau distorsi pada bahan kerja. Aluminium adalah logam ringan, ia memiliki kekuatan yang baik setelah menjalani proses pengelasan. Pengelasan *rotary friction welding* dapat membentuk sambungan yang kuat, sehingga menghasilkan sambungan yang tahan terhadap beban mekanis. Aluminium memiliki ketahanan yang baik terhadap korosi berkat lapisan oksida alami yang terbentuk di permukaannya. Ini menjadikannya pilihan yang cocok untuk aplikasi yang menghadapi lingkungan yang keras atau korosif. Aluminium memiliki kompatibilitas yang baik dengan berbagai jenis logam dan bahan lain, memungkinkan pengelasan *rotary friction welding* antara aluminium dan logam lain. Ini memperluas pilihan dan fleksibilitas dalam penggunaan aluminium dalam berbagai kombinasi bahan. Pengelasan *rotary friction welding* dengan aluminium sering dikaitkan dengan efisiensi produksi yang tinggi karena sambungan yang kuat dapat terbentuk dalam waktu singkat [11].

2.1.1 Aluminium murni

Aluminium murni mengacu pada aluminium yang memiliki kemurnian tinggi, yaitu logam aluminium yang hampir bebas dari unsur-unsur lain. Aluminium murni umumnya memiliki kadar aluminium lebih dari 99%. yang didapatkan dari bauksit dengan cara elektrolisa mempunyai kemurnian antara 99% - 99,99%. Aluminium murni mempunyai sifat dasar yang lunak, tahan korosi, penghantar panas dan listrik yang baik. Aluminium 99% tanpa tambahan logam paduan apapun dan dicetak dalam keadaan biasa, hanya memiliki kekuatan tensil sebesar 90 MPa, terlalu

lunak untuk penggunaan yang luas sehingga sering kali aluminium dipadukan dengan logam lain [12].

Aluminium murni mempunyai sifat dasar yang lunak, tahan korosi, penghantar panas dan listrik yang baik. Aluminium ringan berat jenisnya hanya $2,7 \text{ g/cm}^3$ dibandingkan dengan baja yang memiliki berat jenis $7,8 \text{ g/cm}^3$ dan tembaga yang memiliki berat jenis $8,8 \text{ g/cm}^3$. Aluminium memiliki konduktivitas listrik sekitar $3,5 \times 10^7 \text{ S/m}$. Aluminium memiliki konduktivitas panas tinggi, yaitu $2,09 \text{ J/cm.s.K}$ dibandingkan dengan baja yang hanya memiliki konduktivitas panas $0,67 \text{ J/cm.s.K}$. Aluminium memiliki titik lebur $933,47 \text{ K}$, titik didih $2792 \text{ K } ^\circ\text{C}$, kalor jenis (25°C) $24,2 \text{ J/mol K}$, resistansi listrik (20°C) $28,2 \text{ ohm}$, konduktivitas termal (300 K) 237 w/m K , pemuaian termal (25°C) $23,1 \text{ } \mu\text{m/m K}$, modulus young 70 GPa , modulus geser 26 GPa , *yield strength* 11 MPa , *poissons ratio* $0,35$, kekuatan lentur 100 MPa , kekerasan skala *Vickers* 40 HVN . Aluminium merupakan logam yang sangat reaktif terhadap oksigen di udara dan air serta hasil dari reaksinya membentuk suatu senyawa yang sangat stabil, sangat keras dan lapisan pelindung transparan yang sangat kuat yang disebut aluminium oksida (Al_2O_3), sehingga membuat aluminium tahan terhadap korosi, tahan terhadap asam tetapi kurang tahan terhadap alkali kuat [12].

2.1.2 Aluminium paduan

Paduan aluminium mengacu pada campuran aluminium dengan satu atau lebih unsur logam lainnya. Paduan ini dibuat untuk memperbaiki sifat-sifat aluminium murni dan memberikan karakteristik tertentu yang

diinginkan dalam berbagai aplikasi. Penambahan unsur logam lain pada aluminium dapat mengubah sifat-sifat mekanik, termal, dan kimianya. Beberapa contoh unsur logam yang sering ditambahkan dalam paduan aluminium meliputi tembaga (Cu), silikon (Si), magnesium (Mg), mangan (Mn), seng (Zn), nikel (Ni), dan banyak lagi. Setiap unsur logam ini memberikan kontribusi yang berbeda dalam meningkatkan kekuatan, kekerasan, ketahanan korosi, atau sifat lainnya pada aluminium. Berdasarkan unsur paduannya, dalam hal ini aluminium dibagi menjadi beberapa bagian yaitu [13].

1. Tembaga(Cu), menaikkan kekuatan dan kekerasan, namun menurunkan elongasi (pertambahan panjang pada saat ditarik). Kandungan Cu dalam aluminium yang paling optimal adalah antara 4-6%.
2. Seng (Zn), meningkatkan kekuatan tarik (tensile strength) aluminium
3. Mangan (Mn), menaikkan kekuatan dalam temperatur tinggi.
4. Magnesium (Mg), menaikkan kekuatan aluminium dan menurunkan nilai *ductility*-nya. Ketahanan korosi dan *weldability* juga baik.
5. Silikon (Si), menyebabkan paduan aluminium tersebut bisa diperlakukan panas untuk menaikkan kekerasannya.
6. Lithium (Li), ditambahkan untuk memperbaiki sifat tahan oksidasinya.

Pembagian paduan pada *aluminum alloy* adalah dengan menggunakan 4 digit kode nomor. Aluminium diklasifikasikan menjadi dua bagian yaitu satu untuk paduan aluminium tempa (*wrought aluminum*) dan lainnya untuk aluminium tuang (*cast aluminum*).

Tabel 2.1 Jenis Paduan Aluminium [13].

<i>Alloy Group</i>	<i>Wrought Code</i>	<i>Cast Code</i>
<i>Aluminium, 99.0% or higher purity</i>	1XXX	1XX.X
<i>Aluminium alloys, by major element(s):</i>		
<i>Copper</i>	2XXX	2XX.X
<i>Manganese</i>	3XXX	3XX.X
<i>Silicon + Copper and or magnesium</i>		
<i>Silicon</i>	4XXX	4XX.X
<i>Magnesium</i>	5XXX	5XX.X
<i>Magnesium and Silicon</i>	6XXX	
<i>Zinc</i>	7XXX	7XX.X
<i>Tin</i>		8XX.X
<i>Other</i>	8XXX	9XXX.X

Contoh paduan aluminium yang umum digunakan termasuk [13]

1. Paduan Aluminium Seri 1xxx mengandung aluminium murni dengan kadar kemurnian tinggi dan sedikit atau tanpa penambahan unsur lain. Memiliki konduktivitas termal dan listrik yang baik, serta ketahanan korosi yang tinggi. Paduan 1100 adalah contoh umum dari paduan seri ini.
2. Paduan Aluminium Seri 2xxx mengandung tembaga sebagai unsur utama dengan penambahan elemen paduan seperti magnesium. Karakteristik utama dari paduan seri 2xxx adalah kekuatan yang tinggi, tetapi memiliki ketahanan korosi yang rendah dibandingkan dengan paduan lainnya. Paduan utama dalam seri ini adalah paduan

aluminium 2024 yang sering digunakan dalam aplikasi pesawat terbang dan struktur pesawat lainnya. Paduan ini memiliki kekuatan yang sangat tinggi dan tahan terhadap kelelahan, membuatnya cocok untuk aplikasi yang membutuhkan sifat mekanis yang kuat.

3. Paduan Aluminium Seri 3xxx mengandung aluminium dengan penambahan sejumlah kecil mangan. Memiliki ketahanan korosi yang baik dan mudah dikerjakan secara dingin. Paduan 3003 dan 3004 adalah contoh yang umum dalam seri ini.
4. Paduan Aluminium Seri 4xxx mengandung silikon sebagai unsur utama dengan penambahan magnesium. Paduan utama dalam seri ini adalah paduan aluminium 4043 dan 4343. Paduan ini digunakan terutama dalam pengelasan karena memiliki sifat aliran yang baik dan kemampuan untuk mengikat logam basis dengan baik. Mereka digunakan dalam pengelasan aluminium dengan logam lain, seperti baja, untuk membentuk sambungan yang kuat.
5. Paduan Aluminium Seri 5xxx mengandung magnesium sebagai unsur utama dengan penambahan sejumlah kecil unsur lain seperti mangan. Karakteristik utama dari paduan seri 5xxx adalah kekuatan yang moderat, ketahanan korosi yang tinggi, dan kemampuan pengelasan yang baik. Paduan utama dalam seri ini adalah paduan aluminium 5052, 5083, dan 5754. Paduan ini sering digunakan dalam industri maritim, otomotif, dan konstruksi kapal karena kekuatan, ketahanan korosi, dan kemampuan pengelasannya.

6. Paduan Aluminium Seri 6xxx mengandung aluminium dengan penambahan silikon dan magnesium. Mereka memiliki kekuatan yang baik, serta kemampuan membentuk dan dilas dengan baik. Paduan 6061 dan 6063 adalah contoh yang umum dalam seri ini.
7. Paduan Aluminium Seri 7xxx mengandung aluminium dengan penambahan unsur logam seperti seng, tembaga, dan magnesium. Memiliki kekuatan dan kekerasan yang tinggi, serta ketahanan korosi yang baik. Paduan 7075 adalah contoh yang umum dalam seri ini.

2.1.3 Aluminium 6063

Aluminium 6063 adalah paduan aluminium dari seri 6xxx yang banyak digunakan dalam aplikasi konstruksi, terutama untuk profil aluminium seperti rangka jendela, pintu, dan sistem pemagaran. Aluminium batang tipe 6063 memiliki kekuatan sedang, yang menjadikannya pilihan yang baik untuk aplikasi di mana kekuatan struktural yang memadai diperlukan, tetapi tidak memerlukan kekuatan yang sangat tinggi. Paduan ini dapat memberikan kekuatan yang cukup untuk kebutuhan konstruksi dan arsitektur. Aluminium 6063 memiliki permukaan yang baik dan halus. Ini memungkinkan hasil akhir yang estetik dan memudahkan proses anodisasi. Permukaan yang baik juga memudahkan pemasangan, penyambungan, dan penggunaan paduan ini dalam konstruksi yang rumit. Aluminium 6063 memiliki ketahanan korosi yang tinggi, terutama karena adanya lapisan

oksida alami yang membentuk permukaan aluminium yang terpapar udara. Ini membuatnya cocok untuk digunakan dalam lingkungan yang menghadapi kelembaban atau kondisi korosif. Aluminium 6063 memiliki sifat yang baik untuk pengelasan. Ini memungkinkan penggunaan metode pengelasan seperti pengelasan untuk menggabungkan komponen dalam konstruksi atau arsitektur. Sifat pengelasan yang baik juga memudahkan proses produksi dan perakitan. Paduan aluminium 6063 mudah dianodisasi, yang berarti dapat membentuk lapisan oksida yang terkontrol dengan baik pada permukaannya. Ini memungkinkan pemberian lapisan perlindungan, perubahan warna, atau peningkatan estetika pada produk aluminium 6063. Aluminium 6063 umumnya tersedia dalam kondisi T6, yang mengalami proses penuaan (*aging*) setelah ekstrusi untuk meningkatkan kekuatan dan sifat mekaniknya. Komposisi kimia dari aluminium tipe 6063 dapat dilihat pada Tabel 2.2 di bawah ini .

Tabel 2.2 Komposisi Kimia Aluminium 6063 [14].

Unsur	Komposisi
Tembaga	0,10%
Besi	0,35%
Silika	0,20-0,60%
Mangan	0,10%
Magnesium	0,45-0,90%
Zinc	0,10%
Kromium	0,10%
Boron	0,06%
Aluminium	97,5%

Sedangkan sifat mekanik yang dimiliki dari Aluminium 6063, dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Sifat Mekanik Aluminium 6063 [14].

Sifat Mekanik	Nilai
Densitas pada 20°C	2,7 g/m ³
Konduktivitas minimal pada 20°C	200 W/m.K
Koefisien resistansi pada 20°C	0,33 x 10 ⁻⁶ Ω.m
Kekerasan <i>Brinnell</i>	73 HB
Kekerasan <i>Rockwell</i>	43 HRB
<i>Tensile strength</i>	241 MPa
<i>Yield strength</i>	214 MPa
Modulus Elastisitas	68,9 GPa
<i>Melting point</i>	654°C
<i>Thermal Expansion</i>	23,5 x 10 ⁻⁶ /K

Penggunaan aluminium 6063 dalam metode *friction welding* memiliki sejumlah kelebihan sifat mekanik yang signifikan. Bahan ini menawarkan kekuatan lentur yang baik, memungkinkannya untuk menahan beban lentur tanpa mengalami deformasi yang berarti. Kekerasan moderatnya memungkinkannya digunakan dalam berbagai aplikasi tanpa menjadi terlalu rapuh atau terlalu lunak, sehingga memberikan ketahanan terhadap abrasi dan deformasi. Kekuatan tarik yang baik, terutama dengan perlakuan panas yang sesuai, memungkinkan aluminium 6063 untuk menahan beban tarik dengan kegagalan minimal. Kemampuan untuk mengontrol struktur mikro melalui perlakuan panas dan pendinginan memungkinkan pencapaian sifat mekanik yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi, termasuk peningkatan kekuatan dan kekerasan.

2.2 Tembaga

Tembaga adalah logam mulia yang memiliki nomor atom 29 dalam tabel periodik. Tembaga ditemukan dalam keadaan murni atau sebagai komponen dalam berbagai bijih tembaga. Tembaga memiliki konduktivitas termal dan listrik yang sangat baik, serta daya tahan korosi yang tinggi. Sifat-sifat ini membuatnya menjadi bahan yang sangat berguna dalam berbagai aplikasi, terutama sebagai penghantar listrik dalam kabel dan peralatan listrik. Tembaga juga memiliki sifat-sifat mekanik yang baik, termasuk kekuatan, keuletan, dan kemampuan untuk diubah bentuk (*ductility*). Hal ini memungkinkan tembaga untuk digunakan dalam pembuatan berbagai produk, seperti pipa, kabel, peralatan rumah tangga, peralatan industri, dan komponen elektronik [15]. Sifat mekanik tembaga dapat dilihat pada Tabel 2.4 dibawah ini [16].

Tabel 2.4 Sifat Mekanik Tembaga [16].

Simbol Kimia	Cu
Nomor Atom	29
Berat Atom	63,54
Densitas	8,96 g/m ³
Titik Lebur	1356 K
Panas Spesifik cp (293K)	0,383 kJ kg ⁻³ K ⁻³
Konduktivitas Termal 20°C	394 W/m.K
Koefisien Ekspansi linear	16,5 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹
<i>Tensile Strength</i>	250 MPa
<i>Yield Strength</i>	220 MPa
Elastisitas Modulus <i>Young</i>	110 GPa
Struktur Kristal	<i>Face Centered Cubic (FCC)</i>

Tembaga memiliki konduktivitas listrik yang sangat baik, menjadikannya salah satu logam terbaik dalam hal penghantar listrik. Sifat ini membuat tembaga menjadi pilihan utama untuk kabel, kawat, dan komponen elektronik yang membutuhkan aliran listrik yang efisien [17]. Selain konduktivitas listrik, tembaga juga memiliki konduktivitas termal yang tinggi. Ini menjadikannya bahan yang baik untuk aplikasi yang membutuhkan transfer panas yang efisien, seperti dalam sistem pemanasan, pendinginan, dan peralatan industri [18]. Tembaga memiliki ketahanan korosi yang baik dalam berbagai lingkungan. Permukaannya membentuk lapisan oksida alami yang melindungi logam dari korosi. Hal ini membuat tembaga cocok untuk digunakan dalam aplikasi air, seperti pipa air dan sistem perpipaan [19]. Meskipun tembaga bukanlah logam dengan kekuatan yang sangat tinggi, ia memiliki kekuatan yang memadai untuk banyak aplikasi. Selain itu, tembaga juga sangat elastis dan memiliki keuletan yang tinggi, sehingga dapat diubah bentuk dan ditempa dengan mudah [20]. Tembaga memiliki penampilan yang menarik dengan warna kemerah-merahan yang khas. Oleh karena itu, tembaga sering digunakan dalam aplikasi arsitektur dan dekoratif untuk memberikan sentuhan estetika yang menarik [21].

Dalam produksi dan konsumsi, tembaga dan paduan menjadi salah satu kelompok logam komersial yang sering digunakan selain baja atau besi, dan aluminium. Tembaga banyak digunakan karena konduktivitas termal dan listrik yang baik, ketahanan korosi yang luar biasa, kemudahan fabrikasi, ketahanan lelah dan kekuatan yang baik. Tembaga umumnya *nonmagnetic* sehingga dapat dengan mudah disolder dan di *brazing*, dan banyak tembaga dan paduan tembaga dapat

dilas dengan berbagai metode gas, busur, dan resistansi. Paduan standar yang memiliki warna tertentu sudah tersedia untuk bagian dekoratif. Paduan tembaga dapat dipoles dan digosok hingga hampir semua tekstur dan kilau yang diinginkan. Paduan tembaga dapat dilapisi, dilapisi dengan bahan organik, atau diwarnai secara kimiawi untuk lebih memperluas variasi hasil akhir yang tersedia [16].

Tembaga adalah logam lunak yang berwarna coklat orange yang membuatnya populer sebagai logam pelapis yang bersifat dekoratif. Tembaga mempunyai sifat penghantar listrik dan panas yang baik dengan titik didih 1085°C. Pada titik didih tersebut tembaga sering dipilih sebagai bahan yang cocok untuk pembuatan kabel listrik, dan juga tembaga dapat disambungkan sehingga cocok untuk pembuatan pipa untuk *heating systems*. Tembaga termasuk pada logam yang jarang ditemui di alam, hanya sekitar 0,1% yang dapat ditemukan di kerak bumi [22]. Tembaga dan paduannya sering sekali digunakan pada abanyak aplikasi industri, seperti pada bidang kelautan, energi, transportasi dan lain-lain. Tembaga murni dapat digunakan untuk keperluan yang sangat luas, seperti kontak listrik, kabel dan kawat, dan berbagai macam aplikasi lain yang sering kita temukan untuk mengalirkan arus listrik [23].

2.3 Pengelasan

Pengelasan menurut DIN (*Deutsche Industrie Norman*) adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilakukan dalam keadaan atau cari. Pengelasan adalah sambungan setempat dari beberapa batang logam dengan menggunakan energi panas [24]. Mengelas adalah suatu aktifitas

menyambung dua bagian benda atau lebih dengan cara memanaskan atau menekan atau gabungan dari keduanya sehingga menyebabkan menyatu seperti benda utuh. Penyambungan dapat menggunakan atau tanpa bahan tambahan (*filler metal*) yang sama atau berbeda titik cair maupun strukturnya. Pengelasan dapat didefinisikan menjadi proses penyambungan dua buah logam sampai titik rekristalisasi logam, dengan atau tanpa menggunakan bahan tambah dan menggunakan energi panas sebagai pencair bahan yang akan dilas. Pengelasan dapat diartikan sebagai ikatan yang tetap dari benda atau logam yang dipanaskan. Mengelas tidak hanya untuk memanaskan dua bagian benda sampai mencair dan membiarkan membeku kembali, tetapi mengelas juga untuk membuat lasan yang utuh dengan cara memberikan bahan tambah atau elektroda pada waktu dipanaskan sehingga mempunyai kekuatan yang dikehendaki. Kekuatan pada sambungan las dipengaruhi oleh berbagai faktor, yaitu prosedur pengelasan, bahan, elektroda, dan jenis kampuh yang digunakan [25].

Pengelasan didefinisikan oleh AWS (*American Welding Society*) sebagai proses penggabungan terlokalisasi pada logam atau non logam yang dihasilkan baik dengan menggunakan pemanasan bahan dengan temperatur pengelasan yang diperlukan baik dengan atau tanpa tekanan dan dengan atau menggunakan bahan pengisi [1].

Berdasarkan cara kerjanya proses pengelasan dibagi menjadi 3 kelompok utama, yaitu pengelasan cair (*fusion welding*), pengelasan tekan (*solid state welding*), dan *soldering/brazing*. Pengelasan cair adalah cara pengelasan dimana proses penyambungan dipanaskan sampai mencair dengan suatu sumber panas.

Pengelasan tekan adalah teknik pengelasan dimana sambungan dipanaskan dan diberi tekanan tempa hingga dapat menyatu. *Soldering/brazing* adalah metode pengelasan dimana sambungan diikat dan disatukan dengan menggunakan paduan logam yang mempunyai titik cair rendah [26]. Pada proses pengelasan diperlukan suatu sumber panas yang dapat mencairkan atau memanaskan dan menekan kedua bagian logam yang ingin disambungkan. Sumber panas pada proses pengelasan didasarkan pada penggunaan energi listrik, energi bahan bakar gas, dan energi mekanik. Umumnya teknik pengelasan yang banyak digunakan pada masa ini adalah pengelasan cair dengan menggunakan bahan bakar gas [27].

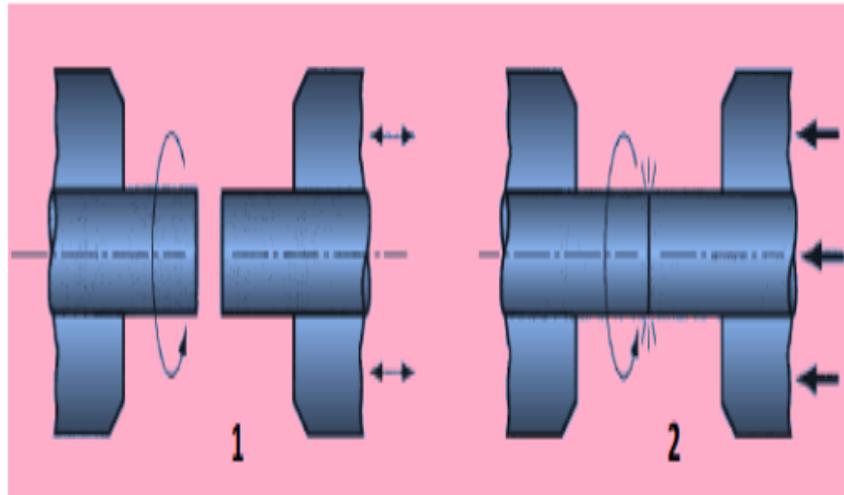
Walaupun pengelasan busur listrik mudah untuk diaplikasikan akan tetapi pengelasan busur listrik tidak dapat diaplikasikan dalam logam non-*ferrous*. Oleh karena itu untuk menyambungkan dua buah material yang beda jenis (*disimilar*) juga akan sulit. Selain sulit diaplikasikan untuk menyambung material non *ferrous* dan menyambung material yang berbeda. Pengelasan busur listrik juga sulit diaplikasikan untuk menyambungkan dua buah logam pejal dengan sempurna. Pengelasan busur listrik baru mampu menyambungkan dua buah plat logam atau mengelas bagian permukaan saja sedangkan pada sambungan dua buah logam pejal belum mampu menyambungkan secara sempurna. Pengelasan dengan elektroda terbungkus cocok digunakan untuk pengelasan permukaan plat-plat datar akan tetapi untuk menyambung benda pejal akan sangat sulit untuk dilakukan jika tetap dipaksakan maka hasilnya akan kurang baik [28]. Proses penyambungan dapat diselesaikan sangat cepat dengan cara pemanasan setempat dan bergerak sepanjang sambungan mengikuti material untuk melebur dan membeku, yang mana akan

disertai dengan berbagai problem. Salah satu metode pengelasan yang dapat memecahkan masalah adalah dengan pengelasan gesek (*friction welding*), pengelasan gesek merupakan penyambungan logam tanpa pencairan [29].

2.4 *Friction welding*

Teknologi las gesek (*friction welding*) merupakan salah satu metode atau proses pengelasan jenis *solid state welding*. Panas yang ditimbulkan terjadi karena dua logam yang bergesekan. Dengan mengkombinasikan panas dan diberi tekanan tekan maka dua buah logam akan tersambung. Semakin tinggi tekanan tekan semakin tinggi kekuatan sambungan, semakin tinggi pula kekuatan puntir sambungan, perubahan ini selaras perubahan nilai kekerasan pada logam las dan perubahan struktur mikro. Di era teknologi sekarang ini mulai banyak diperhatikan, karena proses operasinya cepat karena tidak memerlukan logam pengisi, mesin las gesek menyerupai mesin bubut dan hanya digunakan untuk memberikan panas dan tekanan tekan. Pengelasan cair ialah proses pengelasan yang dilakukan dengan cara memanaskan bagian yang akan disambung hingga mencair dengan sumber panas dari energi listrik atau api dari pembakaran gas baik menggunakan bahan tambah ataupun tanpa menggunakan bahan tambahan (*filler*/elektroda). Pengelasan padat ialah proses pengelasannya menggunakan panas atau tekanan akan tetapi tidak terjadi peleburan pada logam inti dan tanpa penambahan logam pengisi. Pengelasan padat diklasifikasikan menjadi beberapa metode diantaranya las tempa dan las gesek (*friction welding*). Dalam metode ini panas dihasilkan dari perubahan energi

mekanik kedalam energi panas pada bidang *interface* benda kerja karena adanya gesekan selama gerak putar di bawah tekanan dan gesekan [30].



Gambar 2.1 Mekanisme Kerja *Friction welding*

Pada Gambar 2.1 terlihat bahwa (1) logam sebelah kiri berputar (2) sedangkan benda kerja sebelah kanan didorong oleh hidrolis/pneumatik kedepan, sehingga mengenai logam yang berputar dan memungkinkan menghasilkan gesekan. Adanya gesekan ini sebagai sumber panas, sedangkan sumber panas ini tergantung dari besarnya putaran dan tekanan gesek. Setelah temperatur tercapai maka mesin las gesek dihentikan dan satu sisi diberi tekanan tempa sehingga terjadi proses penempaan. Berdasarkan bentuk kurva pada *friction welding* dibagi menjadi tiga fase yaitu:

1. Fase gesekan (*friction phase*) fase untuk meningkatkan temperatur, temperatur bisa panas karena dua buah logam yang saling bergesekan fase ini termasuk fase yang membutuhkan waktu lebih banyak daripada fase lainnya.

2. Fase pengereman (*breaking phase*) fase ini diharapkan putaran cepat berhenti agar panas yang dihasilkan tidak hilang.
3. Fase penempaan/upset (*forging phase*) fase ini melakukan penempaan/upset harus tepat pada temperaturnya karena jika tidak tepat temperaturnya hal ini bisa mempengaruhi hasil.

Daerah pengaruh panas (HAZ) pada logam yang disambung relatif sempit karena panas yang terjadi tidak sampai mencapai temperatur cair logam dan adanya tekanan tekan memungkinkan efek negatif panas logam akan tereliminasi. Namun teknologi ini belum banyak diterapkan pada industri menengah. *Friction welding* atau las gesek memiliki beberapa keuntungan dibanding dengan *fusion welding* diantaranya yaitu lebih menghemat material, dapat menyambung material bulat maupun tidak bulat, dapat menyambung material yang serupa maupun berbeda jenisnya. Tidak hanya aluminium, logam-logam lain seperti *stainless steel* atau bahkan aluminium dan *stainless steel* terbukti dapat dilas dengan metode *friction welding*. Las gesek (*friction welding*) dinilai lebih baik jika dibandingkan dengan las konvensional dalam hal adanya porositas, karena las gesek (*friction welding*) hanya mengandung sedikit porositas mikro pada sambungan las. Las gesek (*friction welding*) selain bertujuan untuk mempermudah dan meringankan proses pengerjaan juga bertujuan mendapatkan efisiensi maksimum pada proses pengelasan dimana dalam proses las gesek akan selalu menghasilkan pemendekan yang disebabkan munculnya *flash* yang berbentuk menyerupai cincin. Semakin banyak *flash* yang muncul akan menyebabkan semakin banyaknya material yang terbuang [31]. Sedangkan *burn off length* yaitu merupakan panjang spesimen yang berkurang

akibat adanya gesekan antara dua spesimen, lalu salah satu spesimen diberikan tekanan tempa sehingga akan menimbulkan panas pada dua spesimen tersebut dan mengakibatkan terjadinya deformasi plastis pada spesimen saat proses pengelasan berlangsung [6].

Parameter proses yang penting untuk mendapatkan hasil yang maksimal dalam proses pengelasan gesek (*friction welding*) adalah waktu gesekan material, tekanan gesekan, durasi waktu pemberian tekanan tekan dan kecepatan putar motor penggerak. Faktor lain yang turut mempengaruhi hasil las gesek adalah sudut *chamfer*. Sudut *chamfer* merupakan sudut yang digunakan untuk menghilangkan sudut siku-siku pada benda kerja dimana penggunaan sudut *chamfer* yang sesuai pada spesimen pengelasan gesek (*friction welding*) akan memberikan peningkatan kekuatan tarik pada sambungan las dibandingkan dengan spesimen sambungan las tanpa sudut *chamfer*. Semakin besar nilai tekanan tempa akhir yang diberikan maka akan menurunkan persentase porositas, Persentase porositas yang besar akan menurunkan kekuatan tarik spesimen hasil pengelasan gesek begitu pula sebaliknya persentase porositas yang semakin kecil juga akan meningkatkan kekuatan tarik spesimen hasil pengelasan gesek [32].

Mekanisme kerja *friction welding* melibatkan pemanasan dan deformasi material melalui gesekan dan tekanan. Dalam kasus sambungan aluminium 6063 dan tembaga, parameter *friction pressure* (tekanan gesek) dan *forging pressure* (gaya penekan) memainkan peran penting dalam proses ini. Pada tahap *friction pressure*, permukaan aluminium 6063 dan tembaga bersentuhan dan digerakkan dengan tekanan tertentu, menghasilkan panas akibat gesekan. Panas ini

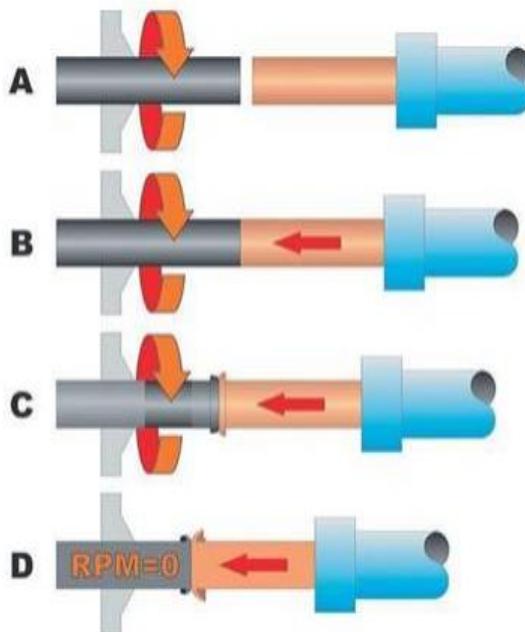
menyebabkan sebagian kecil permukaan-material mencair dan membentuk lapisan cair di antara mereka, menghasilkan penggabungan lokal. Ini berdampak pada sifat mekanik sambungan, dimana kekuatan tarik dapat meningkat karena adanya penggabungan material ditingkat atomistik, sementara kekerasan zona penggabungan dapat bervariasi bergantung pada struktur mikro yang terbentuk. Setelah itu, tahap *forging pressure* dimulai, di mana tekanan tempa diterapkan untuk menyatukan lebih lanjut material yang masih cair atau lembut dari zona penggabungan. Tekanan ini menyebabkan deformasi plastis lebih lanjut dan penggabungan yang lebih erat. Deformasi plastis saat tahap *forging pressure* dapat meningkatkan kekuatan tarik dan kekerasan sambungan, sambil mempertahankan kelenturan tertentu tergantung pada parameter yang digunakan. Hasil akhir dari sambungan *friction welding* dipengaruhi oleh tekanan gesek, tekanan tempa, suhu, dan kecepatan rotasi. Oleh karena itu, pemilihan parameter yang tepat dan karakterisasi yang cermat diperlukan untuk memastikan bahwa sambungan memiliki sifat mekanik yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi yang diinginkan.

Defect atau cacat pada *friction welding* adalah ke tidaksempurnaan yang terjadi selama atau setelah proses pengelasan yang memengaruhi kualitas dan kekuatan sambungan. Cacat yang umum terjadi pada *friction welding* adalah *crack* atau retak pada sambungan biasanya terjadi setelah pengelasan akibat tegangan sisa yang terlalu besar. Penyebabnya yaitu parameter proses yang tidak tepat, dan material dengan kompatibilitas yang buruk [33]. Adapun cacat porositas terjadi karena butiran tidak menghasilkan fusi sehingga logam tidak bersatu menyeluruh, hal ini disebabkan temperatur tidak mencapai yang dibutuhkan. Temperatur yang

tinggi dapat dihasilkan dari kecepatan yang semakin tinggi serta lamanya waktu benda bergesekan. Sehingga benda kerja yang dihasilkan memiliki nilai uji tarik yang baik dan cacat porositas dapat direduksi [34].

2.5 *Rotary friction welding*

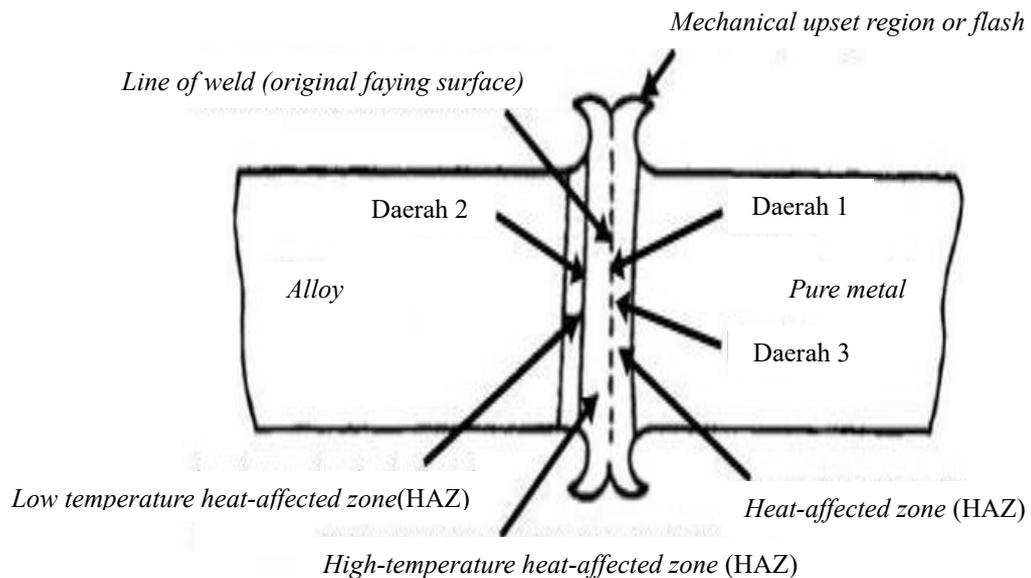
Rotary Friction welding adalah proses penyambungan material logam yang dilakukan dengan cara menggesekan kedua material logam yang akan dilakukan penyambungan sampai kedua logam tersebut mencapai keadaan yang memanas dan dilakukan penekanan tempa maka logam tersebut akan tersambung. Panas yang terjadi ditimbulkan dari ujung benda kerja yang saling digesekkan. Pengelasan gesek ini termasuk ke dalam jenis pengelasan *solid state* yang dapat dilihat pada Gambar 2.2 dibawah ini [35].



Gambar 2.2 *Rotary Friction Welding*

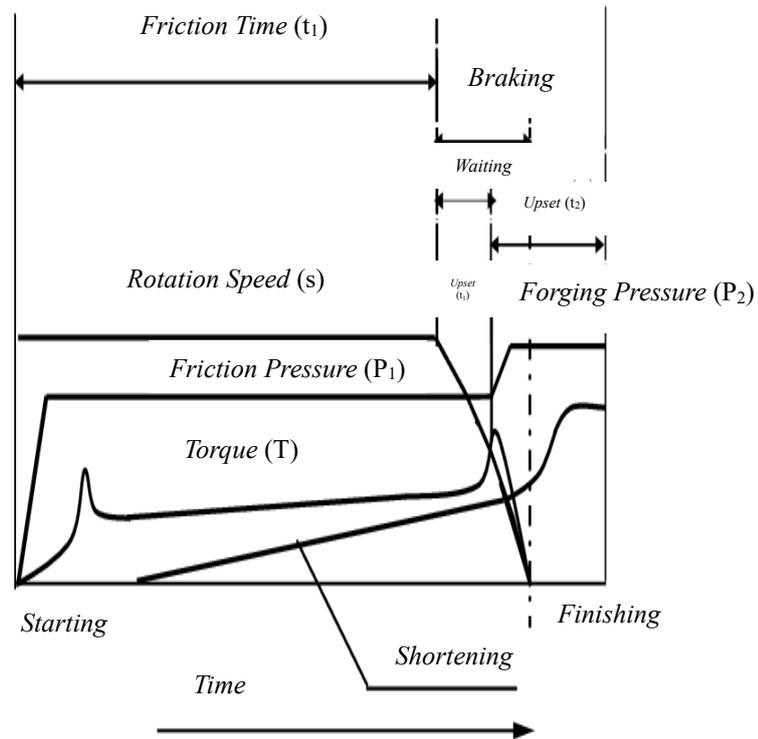
Teknologi las gesek ini mulai banyak diperhatikan, dikarenakan teknologi pengelasan gesek ini sangat mudah dioperasikan, proses operasinya

cepat, tidak memerlukan logam pengisi, dan hasil penyambungannya baik. Mesin pengelasan gesek ini menyerupai mesin bubut sehingga mudah dioperasikannya. Dalam keadaan tertentu mesin bubut juga dapat dilakukan proses pengelasan gesek ini namun hanya dapat melakukan pengelasan gesek ini dengan diameter tertentu.



Gambar 2.3 Daerah Pengelasan *Rotary Friction Welding*

Dapat dilihat pada Gambar 2.3 daerah pengelasan *rotary friction welding* terdapat 3 daerah. Daerah 1 adalah fase gesekan (*friction phase*) merupakan daerah dimana dua buah logam di gesekan untuk meningkatkan temperatur. Waktu yang di butuhkan cukup besar dibandingkan daerah lainnya. Daerah 2 adalah fase berhenti (*breaking phase*) dimana pada daerah ini durasi waktu harus secepat mungkin supaya temperatur panas tidak hilang. Daerah 3 adalah fase penempaan / tempa (*forging phase*) dimana pada daerah ini diberi gaya tertentu dan diberi waktu saat penempaan berlangsung [30]. Berikut Gambar 2.4 yang menunjukkan grafik parameter yang digunakan dalam melakukan *rotary friction welding*.



Gambar 2.4 Parameter *Rotary Friction welding*

Pada pengelasan *rotary friction welding* terjadi pembentukan *flash*. *Flash* adalah lelehan yang keluar dari pusat bidang gesekan dan tempaan. Kemudian terjadi juga area yang terkena panas dari pengelesan yang disebut *Heat Affected Zone (HAZ)*. *Heat Affected Zone (HAZ)* adalah daerah yang mengalami perubahan struktur mikro dan sifat-sifat mekaniknya akibat pengaruh dari panas yang dihasilkan pada daerah inti. Daerah HAZ merupakan daerah palingkritis dari sambungan las, karena selain berubah strukturnya juga terjadi perubahan sifat pada daerah tersebut. Parameter dalam *rotary friction welding* ini berpengaruh terhadap hasil yang didapat [36]. *Rotary Friction welding (RFW)* yang digunakan untuk melakukan sambungan silinder yang dilakukan tanpa adanya logam pengisi dan dapat dilakukan dengan mudah dan cepat, sudah mulai diterapkan dalam dunia

industri. RFW dalam dunia industri digunakan untuk menyambung komponen yang berbentuk silinder baik itu menggunakan logam sejenis atau berbeda jenis logamnya [11].

Pada *friction welding* antara aluminium 6063 dan tembaga, parameter *Forging pressure* memiliki pengaruh signifikan terhadap kualitas pengelasan. Berikut adalah penjelasan mengenai pengaruh *Forging pressure*:

2.5.1 *Forging pressure* (Tekanan Tempa)

Forging pressure adalah tekanan yang diberikan pada antarmuka material selama proses *friction welding*. Peningkatan *Forging pressure* meningkatkan kontak antara material, mempromosikan deformasi plastik, dan membantu dalam pembentukan ikatan yang lebih kuat antara aluminium dan tembaga. Namun, tekanan gesekan yang terlalu tinggi juga dapat menyebabkan deformasi berlebih, penurunan kekuatan material, atau bahkan cacat pengelasan. Diperlukan penyesuaian *Forging pressure* yang optimal untuk mencapai kualitas pengelasan yang diinginkan [37].

Penelitian yang dilakukan oleh Chapke pada tahun 2022 bertujuan untuk mencapai kekuatan tarik maksimum (UTS) untuk sambungan las gesek melalui optimasi parameter proses las gesek. Parameter yang digunakan seperti tekanan gesek 39, 48 MPa, tekanan tempa 80, 98 MPa. Studi tersebut menemukan bahwa waktu tekan, tekanan tempa, dan tekanan pengempaan adalah parameter proses yang dominan dan memiliki pengaruh lebih besar pada kekuatan las. Kekuatan sambungan las meningkat dengan peningkatan waktu tekan dan tekanan pengempaan hingga batas tertentu.

Waktu las yang tidak mencukupi menghasilkan sambungan las gesek yang lemah. Studi tersebut juga mengidentifikasi bahwa, tekanan tempa yang tinggi akan meningkatkan kekerasan sambungan, dan peningkatan nilai tekanan tempa menghasilkan peningkatan kekuatan tarik sambungan [38].

Penelitian yang dilakukan oleh Chapke pada tahun 2020 hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter-proses seperti tekanan gesek (FP), waktu gesek (FT), dan tekanan pengempaan (UP) memiliki pengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik sambungan las gesek putar antara AA6063 dan AISI4130 serta AA6063 dan tembaga. Berdasarkan analisis ANOVA, FP memiliki pengaruh paling signifikan terhadap kekuatan tarik, diikuti oleh FT, dan UP memiliki pengaruh paling kecil. Peningkatan nilai FP, FT, dan UP pada awalnya meningkatkan kekuatan tarik sambungan las, namun peningkatan nilai tersebut pada akhirnya menurunkan kekuatan tarik sambungan las. Selain itu, hasil penelitian juga menunjukkan bahwa tekanan pengempaan yang lebih tinggi dapat meningkatkan kekuatan tarik sambungan las antara AA6063 dan tembaga [39].

Penelitian yang dilakukan oleh Zhu pada tahun 2022 parameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai tekanan tempa primer 1,2 MPa, tekanan tempa sekunder: 1,5 MPa, tekanan tempa 2,2 MPa, waktu tekan primer 9 detik, waktu tekan sekunder 6 detik, waktu tekan: 3 detik, kecepatan rotasi 700-1200 rpm. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kecepatan rotasi yang berbeda pada sambungan las gesek (*friction welding*) tak seragam antara aluminium 6061-T6 dan batangan tembaga memiliki

pengaruh pada suhu puncak permukaan, struktur makro, struktur mikro, dan sifat mekanik dari sambungan las. Dalam penelitian ini, kecepatan rotasi yang optimal untuk mencapai kekuatan tarik tertinggi adalah 1000 rpm, dengan nilai kekuatan tarik sebesar 212 MPa dan efisiensi penyambungan sebesar 73,1% dari kekuatan bahan dasar aluminium 6061-T6 [40].

Penelitian yang dilakukan oleh Kimura pada tahun 2017 untuk menginvestigasi mekanisme penyambungan dan sifat mekanik dari sambungan gesek antara paduan aluminium dan baja tahan karat. Parameter yang digunakan kecepatan gesekan 27,5 s⁻¹ (1650 rpm), tekanan gesek 30 MPa, rentang waktu tekan dari 0,04 hingga 5,0 detik, rentang tekanan tempa dari 30 hingga 240 MPa, dan waktu tekanan tempa 6,0 detik. Hasil penelitian jurnal tersebut menunjukkan bahwa sambungan gesek antara paduan aluminium dan baja tahan karat dapat dicapai dengan menggunakan tekanan tempa yang tinggi dan waktu gesek yang tepat. Parameter yang digunakan dalam penelitian ini meliputi pengukuran torsi gesek, suhu, dan tekanan tempa, serta pengujian mekanik dan metalurgi pada sambungan yang dihasilkan. Dalam penelitian ini, ditemukan bahwa sambungan yang dihasilkan dengan tekanan tempa 240 MPa dan waktu tekan yang tepat memiliki kekuatan dan ketangguhan yang baik [41].

Dalam penelitian yang telah dilakukan oleh Romadhan pada tahun 2019 proses pengelasan menggunakan parameter tekanan gesek dengan parameter *friction pressure* 30, 35, dan 40 MPa. Putaran mesin tetap dijaga konstan yaitu 1000 rpm menggunakan tekanan tempa 80 MPa dengan

masing-masing waktu tempa dan gesek adalah 5 detik. Berdasarkan hasil penelitian pengelasan gesek *dissimilar* silinder pejal baja-tembaga dengan parameter tekanan gesek 30 MPa, 35MPa, 40 MPa dapat disimpulkan kekuatan tarik sambungan *dissimilar* meningkat seiring dengan meningkatnya tekanan gesek sampai dengan 35 MPa yaitu sebesar 96 MPa mencapai 80 % kemudian menurun pada tekanan gesek yang lebih tinggi. Sedangkan pada tekanan yang lebih tinggi, 35 MPa diperoleh kekuatan tarik tertinggi yaitu sebesar 96 MPa. Hal itu menunjukkan bahwa kemungkinan terbentuknya ikatan adhesi di *interface* sudah terjadi dalam pengamatan struktur mikro sebelumnya. Kekuatan tarik ini mencapai kurang lebih 80% dari kekuatan tarik dari material Al-Cu dan meningkatkan kekuatan kekerasan [42].

2.5.2 Kecepatan putaran

Dalam penelitian yang telah dilakukan oleh Setiawan pada tahun 2022 proses pengelasan menggunakan parameter kecepatan putaran sebesar kecepatan Putar (1230, 1500, 2500 rpm) kekasaran permukaan kontak (#100, #800, #1500). Dari hasil penelitian proses pengelasan dengan metode *friction welding* yang telah dilakukan variasi parameter kecepatan dan kekasaran permukaan yang berbeda, pada hal ini kecepatan putar yang paling memengaruhi dalam perubahan nilai kekerasan terhadap kedua material. Pada kecepatan putar 1230, jika dirata-ratakan mendapatkan nilai 54,2 HVN pada aluminium, dan 112,7 HVN tembaga. Kecepatan 1500 mendapatkan nilai 51,1 HVN pada aluminium dan 112,8 HVN pada tembaga. Kecepatan

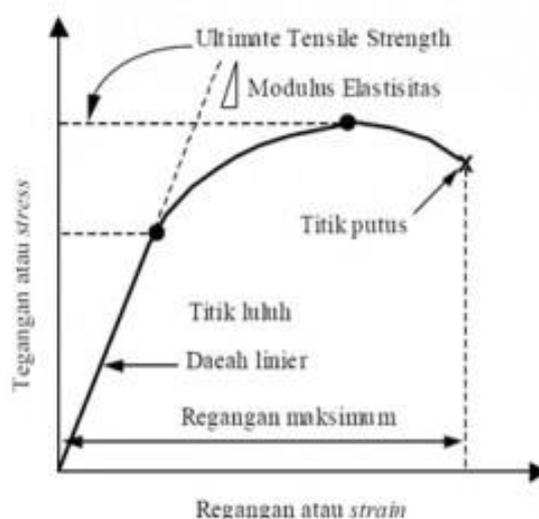
2500 mendapatkan nilai rata-rata 53,5 HVN pada aluminium dan 107,6 pada tembaga. Jika dilihat pada data yang telah didapatkan, nilai kekerasan dari variasi 1230 rpm adalah yang paling tinggi. Jika dilihat pada variasi kekasaran permukaan, hasil yang didapatkan adalah sebagai berikut: nilai kekerasan pada aluminium rata-rata kekasaran permukaan #100 adalah 51,27 HVN, kekasaran permukaan #800 53,28 HVN, dan kekasaran permukaan #1500 54,18 HVN. Sedangkan pada material tembaga, nilai kekerasan pada variabel kekasaran permukaan #100 adalah 107,54 HVN, kekasaran permukaan #800 113,26 HVN, kekasaran permukaan #1500 112,17 HVN. Maka nilai kekerasan yang paling tinggi adalah pada variasi kekasaran permukaan #1500 untuk material Aluminium dan kekasaran permukaan #800 untuk material tembaga. Dari hasil pengujian tarik yang telah dilakukan, didapatkan nilai kuat tarik pada variasi kecepatan putar 1230 rpm jika dirata-ratakan nilainya adalah $6,08 \text{ kg/mm}^2$ atau 59,6 MPa. Untuk variasi kecepatan putar 1500 rpm nilai rata-ratanya adalah $2,98 \text{ kg/mm}^2$ atau 29,2 MPa. Variasi kecepatan 2500 rpm nilai rata-ratanya adalah $4,1 \text{ kg/mm}^2$ atau 39,8 MPa. Untuk variasi kekasaran permukaan, kekasaran #100 mendapatkan nilai tertinggi, yang jika dirata-ratakan yaitu $5,36 \text{ kg/mm}^2$ atau 52,4 MPa. Sehingga, hasil pengujian tarik yang paling maksimal adalah dengan variasi kecepatan putar 1230 rpm dan kekasaran permukaan #100.

Dari hasil dan pembahasan yang telah diolah, dapat disimpulkan bahwa kekuatan tarik yang didapatkan oleh sambungan las Al-Cu dengan

menggunakan variasi kecepatan putar cenderung menurun seiring bertambahnya kecepatan putar sedangkan untuk pengamatan struktur mikro dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan pada bagian aluminium, butir hitam yang terlihat adalah Mg_2Si , dari *base metal* – HAZ butir hitam semakin lebar dan lebih banyak. Pada variasi kecepatan 1230 rpm struktur mikro lebih rapat dan halus dibandingkan dengan hasil dari variasi kecepatan 1500 dan 2500 rpm. Sedangkan untuk bagian tembaga, dari *base metal* – HAZ butiran mengecil dan cenderung menyebar [8].

2.6 Pengujian tarik

Pengujian tarik adalah metode yang digunakan untuk mengetahui kekuatan material dengan memberikan beban yang kuat. Alat yang dipakai dalam menguji spesimen uji adalah mesin uji tarik yaitu dengan menarik spesimen uji hingga putus. Hasil dari pengujian tarik adalah berupa fenomena hubungan yang terjadi antara tegangan dan regangan selama proses pengujian tarik [43].



Gambar 2.5 Contoh Kurva Hasil Uji Tarik

Selain diperoleh spesimen uji yang putus pasca proses penarikan, dalam proses ini juga dihasilkan kurva uji tarik dari spesimen uji. Kurva uji tarik ini adalah gambaran dari proses pembebanan yang terjadi pada spesimen kerja dari dimulainya awal penarikan hingga spesimen menjadi putus. Melalui kurva uji tarik pada Gambar 2.5 dapat diperoleh sifat mekanik suatu material. Beberapa sifat mekanik suatu material yakni mulai dari kekuatan tarik, keuletan dan elastisitas. Dengan persamaan tegangan dan regangan sebagai berikut:

$$\text{Tegangan } \sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dengan:

- σ : Tegangan (N/mm² atau Pa)
- F : Gaya tarik yang diterapkan (N)
- A : Luas penampang awal (mm²)

$$\text{Regangan } \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dengan:

- ε : Regangan
- ΔL : Penambahan panjang
- L_0 : Panjang awal

$$\text{Modulus Young } E = \sigma/\varepsilon \dots\dots\dots(2.3)$$

Dengan:

- E: Modulus Young (N/m²)
- σ : Tegangan (N/m²)
- ε : Regangan

ASTM E8/E8M-22 adalah standar uji tarik yang dikeluarkan oleh *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Standar ini digunakan untuk menguji sifat mekanik bahan logam dengan metode uji tarik. Dalam uji tarik ASTM E8/E8M-22, sampel bahan logam diuji dengan menerapkan gaya tarik secara aksial pada sampel. Tujuannya adalah untuk menentukan beberapa sifat mekanik penting, termasuk kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*), batas elastis (*yield strength*), regangan pecah (*elongation*), dan modulus elastisitas (*elastic modulus*) [45].

2.7 Pengujian kekerasan

Pengujian kekerasan (*hardness*) yaitu kemampuan material logam dalam menerima gaya berupa penetrasi dan kekuatan (*strength*) yaitu kemampuan material logam dalam menerima gaya berupa tegangan tanpa mengalami patah. Kedua sifat mekanik logam tersebut diatas merupakan sifat mekanik yang menyatakan kemampuan suatu logam atau material dalam menerima suatu beban atau gaya tanpa mengalami kerusakan pada logam tersebut [46]. Standar yang digunakan pada pengujian kekerasan *micro Vickers* yaitu ASTM E92-17 [47]. Menurut Fatha [11] kekerasan adalah ukuran ketahanan material terhadap deformasi plastis terlokalisasi. Saat ini metode yang digunakan untuk melakukan pengujian kekerasan yaitu metode *Vickers*.

Pengujian kekerasan *Vickers* biasanya digunakan untuk material yang mempunyai tingkat kekerasan tinggi dan tidak dapat diukur dengan metode pengujian kekerasan dengan *brinell*. Indentornya adalah piramida intan yang

memiliki dasar berbentuk persegi dengan beban 1 – 120 kgf. Pembebanan dilakukan selama 10 – 15 detik dan jejak yang ditimbulkan dengan bentuk intan diukur kedua diameternya dalam mm [47]. Untuk nilai kekerasannya dapat digunakan persamaan 2.4 berikut ini .

$$Vickers\ Hardness = \frac{1,854 \times P}{d^2} \dots\dots\dots(2.4)$$

Di mana:

- P = beban indentasi (kgf)
- d = rata – rata diameter bekas indenter (mm)



Gambar 2.6 Uji Kekerasan *Microhardness Vickers*

2.8 Analisis struktur mikro

Mikroskop Optik (OM) adalah alat yang digunakan untuk memperbesar dan mengamati struktur mikro dari suatu material dengan menggunakan cahaya tampak. Dalam analisis mikrostruktur, OM sering digunakan untuk mengamati morfologi, distribusi fasa, ukuran butir, dan berbagai fitur lain dari material. OM memanfaatkan lensa untuk memfokuskan cahaya yang dipantulkan atau

ditransmisikan oleh sampel, sehingga menghasilkan gambar yang dapat diamati oleh mata atau didokumentasikan dengan kamera. Prinsip dasar mikroskop optik adalah sumber cahaya tampak digunakan sebagai sumber utama untuk menerangi sampel. Sistem lensa objektif dan okuler memperbesar gambar sampel. Resolusi yang erbatas pada panjang gelombang cahaya tampak (~200 nm). Dalam konteks metalurgi, OM sering digunakan untuk mempelajari mikrostruktur logam setelah melalui proses preparasi seperti pengamplasan, pemolesan, dan etsa. Preparasi ini dilakukan untuk memunculkan fitur struktur mikro seperti batas butir, fasa, dan inklusi yang ada di dalam logam.[48].

Analisis struktur mikro pada *friction welding* (pengelasan gesek) adalah proses penyambungan dua material dengan menggunakan panas yang dihasilkan oleh gesekan antara dua permukaan material yang saling ditekan dan digerakkan. Analisis struktur mikro pada *friction welding* (pengelasan gesek) adalah proses penyambungan dua material dengan menggunakan panas yang dihasilkan oleh gesekan antara dua permukaan material yang saling ditekan dan digerakkan. Pada proses ini, terdapat beberapa zona strutkur mikro yang terbentuk akibat termal dan mekanikal dari proses gesekan, yaitu *heat affected zone* (HAZ) yaitu wilayah di sekitar sambungan yang mengalami perubahan sifat struktur mikro akibat panas. *Weld zone* yaitu bagian inti dari sambungan, yang umumnya mengalami rekristalisasi. Menggunakan OM untuk mempelajari *friction welding* memungkinkan pengamatan langsung terhadap perubahan struktur mikro di berbagai zona. Pada *friction welding*, OM dapat membantu mengidentifikasi: ukuran butir yang mengalami rekristalisasi, homogenitas material dan distribusi

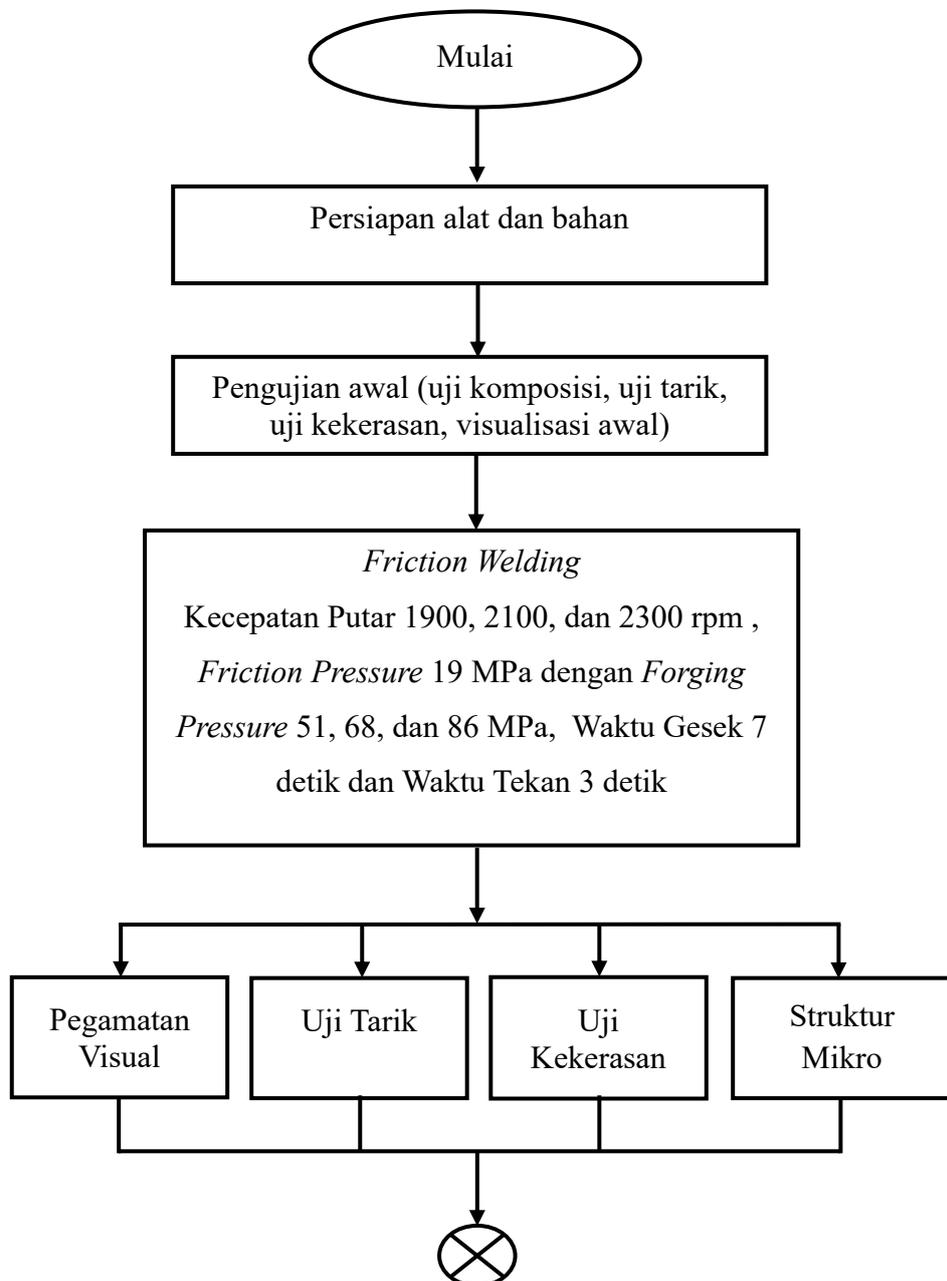
fasa di daerah sambungan. *Defect* yang mungkin muncul seperti porositas atau retakan mikro. Analisis struktur mikro ini dapat membantu dalam evaluasi kekuatan, kekerasan, kelarutan, dan performa mekanik keseluruhan dari hasil pengelasan *friction welding* [44].

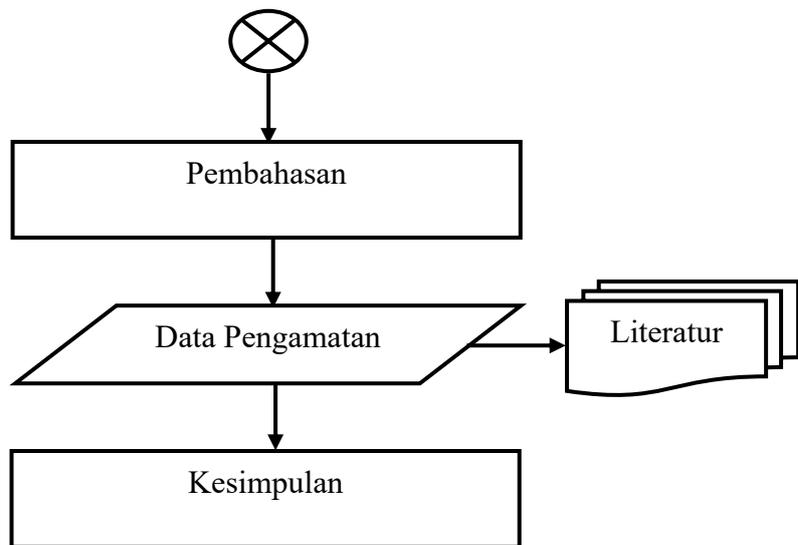
BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram alir

Berikut ini adalah diagram alir penelitian yang dapat dilihat pada gambar 3.1 dibawah ini





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan bahan

3.2.1 Alat-alat

Berikut adalah alat-alat yang digunakan dalam proses penelitian berlangsung yaitu

- 1) Mesin Bubut *Celtic*
- 2) *Drill Chuck*
- 3) *Load cell*
- 4) Gerinda tangan
- 5) Gerinda duduk
- 6) Ragum
- 7) *Thermometer gun*
- 8) Jangka Sorong
- 9) Mesin Uji Tarik
- 10) Mesin Uji Kekerasan
- 11) Mesin uji *bending*

- 12) Tachometer Digital
- 13) Alat uji *Optical microscop*
- 14) Cetakan resin

3.2.2 Bahan-bahan

- 1) Aluminium
- 2) Tembaga
- 3) Ampelas
- 4) Resin
- 5) Katalis
- 6) Kain *polish*
- 7) Larutan etsa
- 8) *Cutton bud*

3.3 Prosedur percobaan

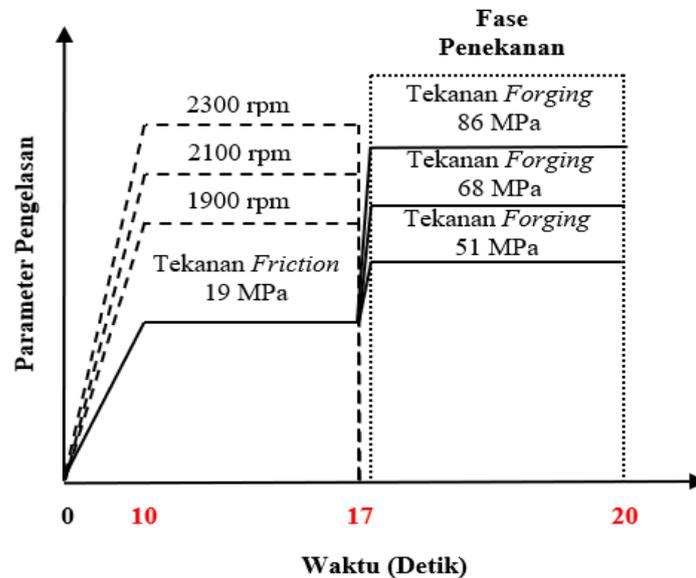
3.3.1 Preparasi sampel

- 1) Dilakukan pemotongan tembaga dan aluminium masing-masing dengan diameter 1,2 cm dan panjang sebesar 7 cm
- 2) Dilakukan perataan di permukaan kontak pada sampel
- 3) Sampel dilakukan pengujian awal yaitu pengujian komposisi, pengujian kekerasan, dan pengujian tarik

3.3.2 Proses *friction welding*

- 1) Sampel dilakukan proses *friction welding* dengan kecepatan putaran 1900, 2100, dan 2300 rpm dengan *friction pressure* 19

MPa selama 7 detik selanjutnya mesin diberhentikan lalu diberikan *forging pressure* 51, 68, dan 86 MPa selama 3 detik.



Gambar 3.2 Parameter Penelitian

3.4 Pengujian material

Adapun pengujian material yang dilakukan pada pengujian kali ini adalah melakukan proses karakterisasi mekanik menggunakan spectro analyse PMI-master pro, dan karakterisasi yang dilakukan pada penelitian kali ini, seperti uji tarik, uji kekerasan, dan uji struktur mikro

3.4.1 Pengamatan hasil visual

Hasil setelah proses *friction welding*, dilakukan pengamatan visual tujuan dari pengamatan visual ini ialah untuk melihat langsung terbentuknya *burn off length* dan *flash* dengan parameter *friction welding* yang telah ditentukan. Selain itu, diharapkan terjadi penempelan sempurna antara aluminium dan tembaga, sehingga terciptanya sambungan yang kuat dan

merata di seluruh area kontak. *Burn off length* merupakan hasil dari panjang spesimen yang berkurang pada saat proses *friction welding* berlangsung sedangkan *flash* adalah lelehan atau deformasi plastis yang terbentuk pada saat proses *friction welding*. Persamaan yang digunakan untuk mengetahui hasil *burn off length* dapat dilihat sebagai berikut.

$$L_0 - L_1 = \Delta L \dots \dots \dots (3.1)$$

Ket :

L_0 : Panjang awal

L_1 : Panjang akhir

ΔL : *Burn off length*

Sedangkan dikarenakan deformasi *flash* pada material aluminium 6063 yang tidak teratur maka pada penelitian ini untuk mendapatkan hasil perhitungan *flash* menggunakan formula volume tabung yang dimana persamaan yang digunakan sebagai berikut.

$$V = \pi r^2 \times \Delta L \dots \dots \dots (3.2)$$

Ket:

V : Volume tabung

π : Nilai 3,14

r : Jari jari lingkaran

ΔL : *Burn off length*

Hasil perhitungan *burn off length* dan *flash* dapat dilihat pada lampiran perhitungan A no 1 dan no 2.

3.4.2 Pengujian tarik

Pengujian Tarik adalah metode pengujian mekanik yang digunakan untuk menentukan kekuatan tarik atau kekuatan luluh suatu material. Standar ASTM D638-14 merupakan standar yang ditetapkan oleh *American Society for Testing and Materials* (ASTM) untuk pengujian tarik material logam dengan menggunakan mesin uji tarik. Untuk mendapatkan data pengujian tarik yang diinginkan pada penelitian ini ditunjukkan menggunakan persamaan 2.1. Setelah mendapatkan data dari kekuatan tarik maka diperlukan data untuk mencari efisiensi (%) dari hasil pengujian tarik, menentukan efisiensi sambungan yang merupakan rasio kekuatan sambungan las terhadap kekuatan logam dasar yang digunakan, dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$e (\%): \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_0} \right) \times 100\% \dots \dots \dots (3.3)$$

Ket :

σ_1 : Data hasil uji tarik

σ_0 : Data base metal uji tarik

Adapun langkah langkah dalam melakukan pengujian tarik adalah sebagai berikut :

- 1) Persiapan alat dan bahan meliputi mesin uji tarik dan sampel uji Tarik.
- 2) Pengukuran diameter sampel.
- 3) Sampel diletakkan pada pencekam.
- 4) Operasikan mesin uji tarik yang dilakukan oleh operator

- 5) Catat beban yang diterima sampel yang mengalami pengecilan diameter (*necking*)
- 6) Keluarkan sampel uji tarik dari mesin uji tarik.

3.4.3 Pengujian kekerasan

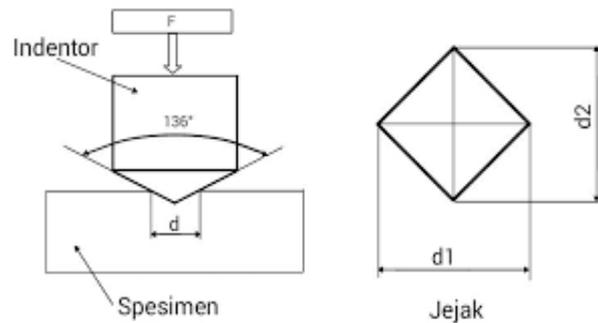
Pengujian kekerasan ini dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan suatu bahan uji yang telah dilakukan pengelasan. Pengujian kekerasan ini menggunakan metode kekerasan mikro *Vickers*, yang mana metode pengujian kekerasan mikro *Vickers* ini mempergunakan indenter berbentuk piramida intan. Pengujian kekerasan dengan metode *Vickers* ini dilakukan sebanyak 9 titik setiap bahan uji. 9 titik uji ini adalah 2 titik pada *base metal*, 4 titik pada daerah dekat sambungan dan 1 titik pada daerah las. Nilai yang didapat pada pengujian kekerasan dengan metode *Vickers* mempunyai satuan yaitu HVN (*Hardness Vickers Number*). Standar yang digunakan pada pengujian kekerasan *micro Vickers* yaitu ASTM E92-17. Lalu untuk hasil kekerasan didapat dengan menggunakan persamaan 2.4, Setelah mendapatkan data dari kekuatan tarik maka diperlukan data untuk mencari efisiensi (%) dari hasil pengujian tarik, menentukan efisiensi sambungan yang merupakan rasio kekuatan sambungan las terhadap kekuatan logam dasar yang digunakan, dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$e (\%): \left(\frac{HVN_1}{HVN_0} \right) \times 100\% \dots \dots \dots (3.4)$$

Ket :

HVN₁ : Data hasil uji kekerasan

HVN₀ : Data base metal uji kekerasan



Gambar 3.3 Skema Sampel Uji Kekerasan

Adapun langkah-langkah pada pengujian kekerasan adalah sebagai berikut

- 1) Persiapan alat dan bahan yang meliputi alat uji keras, dan sampel uji kekerasan.
- 2) Letakan sampel di *bed*.
- 3) Sampel di tekan indenter berbentuk piramida intan terbalik yang memiliki sudut puncak 136° . Indenter tersebut di tekan kan terhadap bahan uji yang diberikan beban sebesar 2 kgf
- 4) Keluarkan sampel uji kekerasan.
- 5) Ukur kedalaman yang terbentuk pada sampel.

3.4.4 Analisa struktur mikro

Setelah dilakukan percobaan *friction welding* untuk mengetahui sturktur mikro maka dilakukan analisa sturktur mikro dengan menggunakan *optical microscope* dan menggunakan standar uji ASTM E407 dengan tahapan sebagai berikut

- 1) Menyiapkan sampel
- 2) Mengamplas sampel hingga tidak terlihat goresan
- 3) Melakukan *polish* pada sampel hingga mengkilap

- 4) Melakukan etsa terhadap sampel dengan menggunakan larutan
 1. 3 ml HF
 2. 100 ml aquades,
 3. 1 gr FeCl₃ dan 50 ml HCl
- 5) Menyiapkan alat uji foto mikro
- 6) Merekam data yang tampil pada alat foto mikro

Adapun data hasil pengujian struktur mikro yang diinginkan merupakan data perubahan struktur mikro, dan foto struktur mikro perbesaran 100x yang selanjutnya dilakukan analisa pada hasil foto struktur mikro.

3.5 Karakterisasi awal material

Pada penelitian ini sebelum melakukan percobaan dilakukan terlebih dahulu karakterisasi material, material yang digunakan pada penelitian ini ialah aluminium 6063 dan tembaga murni. Berikut tabel komposisi dari aluminium 6063 dan tembaga murni dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan 3.2.

Tabel 3.1 Komposisi Awal Material Aluminium 6063(wt%)

Material	Al	Si	Mg	Fe	Zn	Bi	Sn	Ti
Aluminium 6063	98,5	0,53	0,52	0,18	0,03	0,03	0,02	0,01

Tabel 3.2 Komposisi Awal Material Tembaga Murni (wt%)

Material	Cu	Pb	Zn	As	Sn	Ni	Fe	Bi
Tembaga	99,7	0,2	0,04	0,03	0,02	0,01	0,009	0,009

Sebelum proses *friction welding* berlangsung konversi gaya diperlukan dikarenakan gaya yang diterima oleh sampel tidak bisa terbaca langsung pada alat *friction welding*. Alat ukur yang tersedia pada peralatan *friction welding* adalah *pressure gauge* yang mengukur tekanan hidrolik silinder aktuator (bar) yang mendorong sampel yang tidak berputar ke sampel yang berputar. Nilai gaya dorong sampel aluminium ke sampel tembaga dapat diketahui dengan melakukan proses kalibrasi dengan pengukuran gaya menggunakan *load cell*. Hasil kalibrasi tekanan hidrolik silinder aktuator (bar) ke gaya dorong antara dua sampel (N) dan kemudian dikonversi kesatuan tekanan tekan (MPa) dengan menggunakan rumus interpolasi pada tekanan 80 bar dan 100 bar didapatkan gaya tekan pada sampel, untuk perhitungan interpolasi dapat dilihat pada lampiran A no 4. Berikut tabel konversi gaya yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Data konversi Gaya Yang Digunakan Pada Alat *Friction Welding*

Tekanan Silinder Hidrolik (Bar)	Gaya Tekan Pada Sampel (N)	Tekanan Pada Sampel (Mpa)
30	2116	19
60	5749	51
80	7730	68
100	9710	86

Berikut untuk karakterisasi awal pengujian tarik pada material Al 6063 dan tembaga murni yang dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Kekuatan Tarik Dasar Material

Material	Maks <i>Stress</i> (Mpa)
Aluminium 6063	227
Cu	279

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil pengamatan visual *friction welding*

Dari hasil pengamatan visual *friction welding* yang telah dilakukan, diperoleh data sebagai berikut ini:

Tabel 4.1 Hasil Visual Lasan

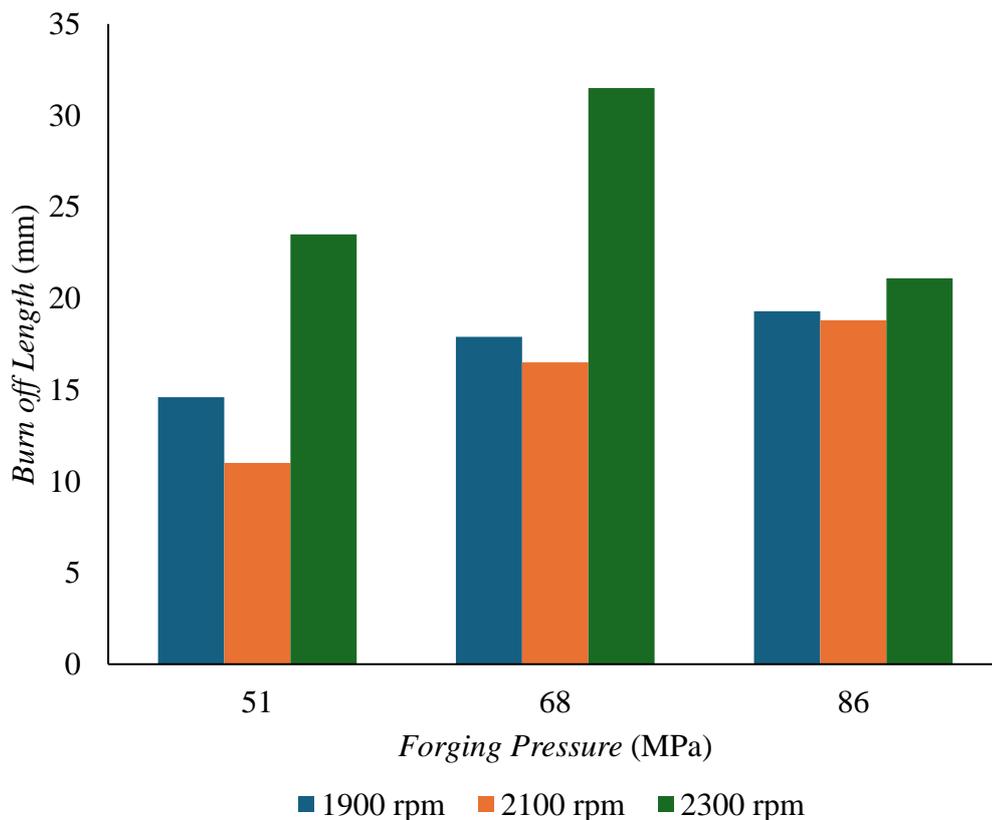
No	V (rpm)	P ₂ (MPa)	Panjang Akhir	<i>Burn Off Length</i> (mm)	Flash (mm ³)
1	1900	51		14,6	1650,38
2	1900	68		17,9	2023,42
3	1900	86		19,3	2181,67
4	2100	51		11	1243,44

5	2100	68		16,5	1865,16
6	2100	86		18,8	2125,15
7	2300	51		23,5	2656,44
8	2300	68		31,5	3560,76
9	2300	86		21,1	2385,14

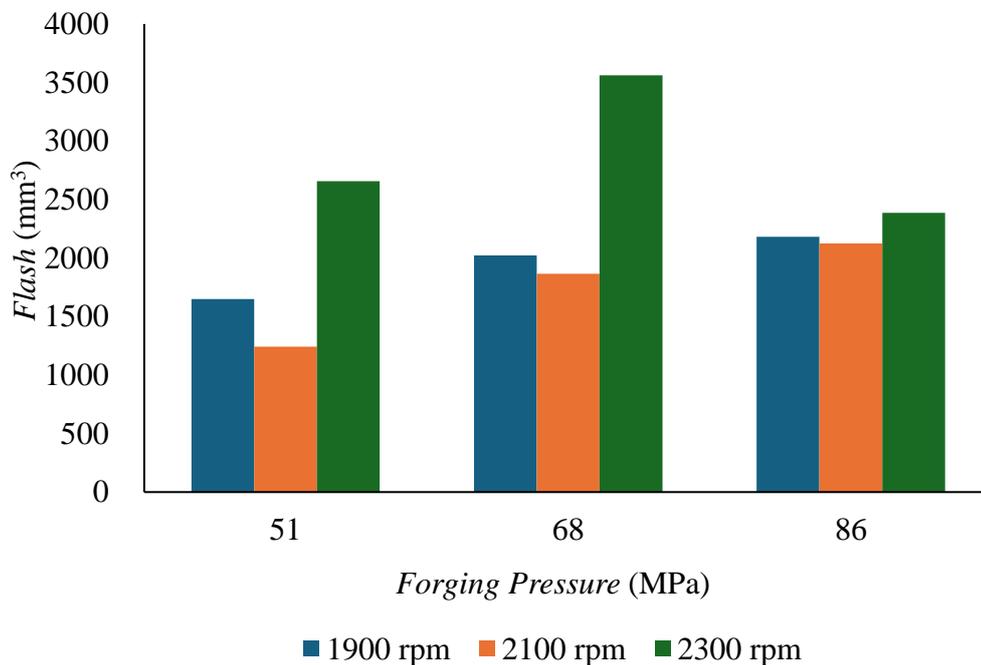
Dapat dilihat pada Table 4.1 merupakan hasil foto makro pada sambungan *dissimilar metal* Al – Cu dengan variasi kecepatan putaran dan *forging pressure*. Panjang total awal *specimen friction welding* adalah 140 mm. Pada tabel di atas terdapat istilah *burn off length* dan *flash*, *burn off length* adalah panjang spesimen yang berkurang akibat adanya gesekan antara dua spesimen, lalu salah satu spesimen diberikan tekanan gesek sehingga akan menimbulkan panas pada dua

spesimen tersebut dan mengakibatkan terjadinya deformasi plastis *pada* spesimen saat proses pengelasan berlangsung, sedangkan *flash* adalah lelehan atau deformasi plastis yang timbul di pusat bidang gesekan dan tempaan pada sampel saat proses pengelasan berlangsung.

Nilai *burn off length* di dapatkan dengan cara menghitung panjang awal dikurang dengan panjang akhir yang dimana hasil dari pengurangan tersebut didapatkan nilai *burn off length*. Sedangkan nilai *flash* didapatkan dengan cara menghitung menggunakan rumus volume yang dimana perhitungan hasil *burn off length* dan *flash* dapat dilihat pada lampiran A no 1 dan no 2. Untuk melihat grafik dari *burn off length* dan *flash* dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2.



Gambar 4.1 Diagram *burn off length* spesimen



Gambar 4.2 Diagram *flash* spesimen

Setelah dilakukan pengamatan pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 terdapat fenomena yang terjadi pada saat proses pengelasan berlangsung. Menurut Agus Sasmito mengacu dari panjang awal sampel terlihat adanya peningkatan *burn off length* yang menyebabkan panjang sampel berkurang karena kecepatan putaran dan *forging pressure* yang semakin besar, hal ini menyebabkan *burn off length* juga semakin meningkat [6]. Sedangkan menurut Hudiyo Firmanto semakin tinggi kecepatan putarannya proses pemanasan pada sampel juga akan lebih cepat yang dapat menyebabkan lebih banyaknya pengurangan panjang (*burn off-length*) pada sampel [53].

Pada penelitian kali ini dapat disimpulkan seiring dengan meningkatnya *burn off length*, maka pembentukan *flash* juga akan terjadi secara beriringan. Hal ini dapat dikarenakan adanya peningkatan *burn off length* maka akan terjadi

pelelehan yang terjadi pada material aluminium 6063 akibat adanya beban aksial dan juga *friction pressure*, sehingga pembentukan *flash* juga akan meningkat. Hal ini dibuktikan dengan grafik Gambar 4.2 yang merepresentasikan *flash* yang berbanding lurus dengan grafik *burn off length*.

4.2 Hasil uji tarik

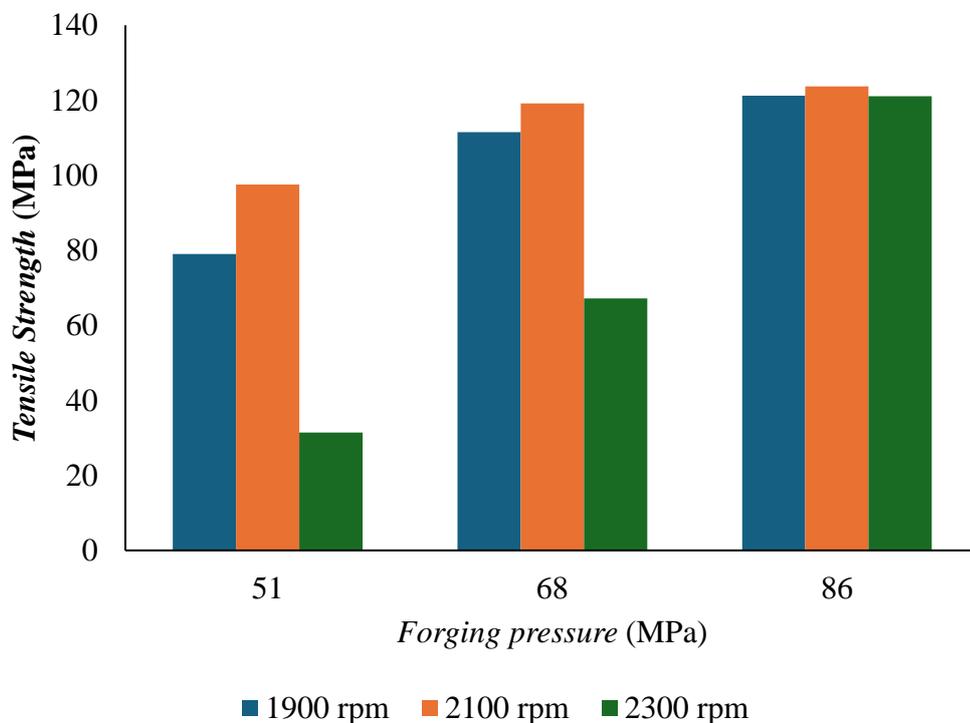
Pengujian Tarik pada penelitian ini dilakukan menggunakan mesin uji tarik *universal testing machine* (UTM). Dapat dilihat data uji tarik pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil Uji Tarik

No	V (rpm)	P2 (MPa)	<i>Tensile Strength</i> (MPa)
1	1900	51	79,0
2	1900	68	111,5
3	1900	86	121,2
4	2100	51	97,5
5	2100	68	119,2
6	2100	86	123,7
7	2300	51	31,4
8	2300	68	67,2
9	2300	86	121,1

Data hasil uji tarik ditampilkan dalam Tabel 4.2, yang mencakup pengaruh variasi kecepatan putaran (V), tekanan tempa (P2) dan kekuatan tarik (*tensile strength*) pada setiap sampel pengelasan rotary *friction welding* (RFW). Berdasarkan hasil uji tarik, dilakukan analisis perbandingan nilai tegangan

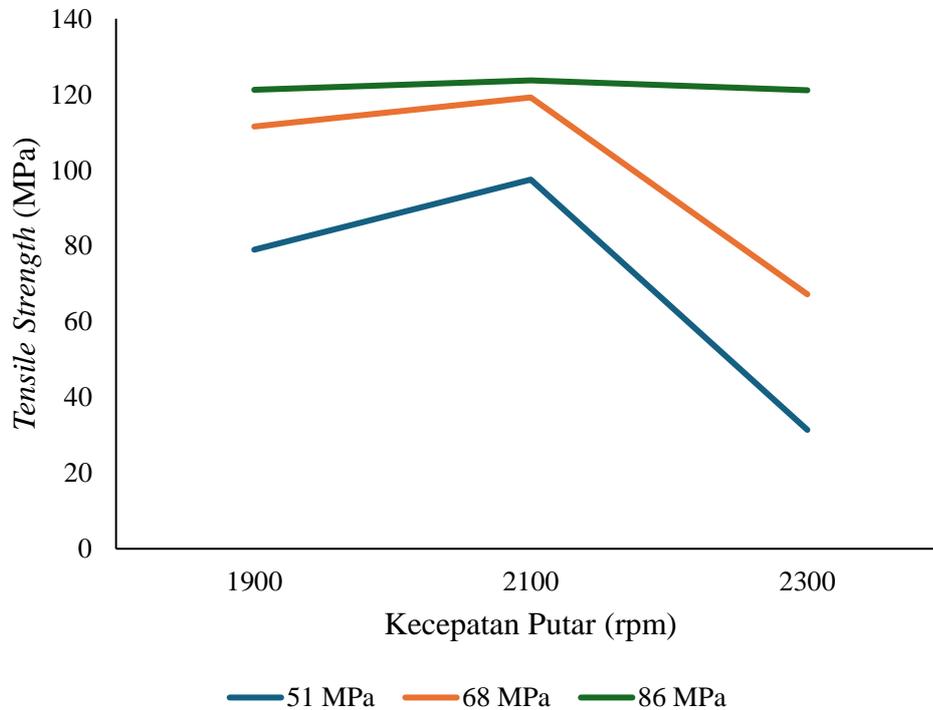
maksimal untuk setiap sampel, yang dipengaruhi oleh kombinasi kecepatan putaran dan tekanan tempa yang digunakan. Dari hasil yang didapat mengenai nilai kekuatan tarik (*tensile strength*) sampel pengelasan rotary *friction welding* (RFW) dibuatlah grafik perbandingan nilai tegangan dari masing masing sampel dengan variasi kecepatan putaran dan *forging pressure*. Grafik nilai tegangan terhadap *forging pressure* dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Hasil kuat tarik terhadap *forging pressure*

Dari hasil pengujian pada Gambar 4.3, diperoleh bahwa pada variasi kecepatan putar 1900 rpm, terjadi peningkatan kekuatan tarik dari 79 MPa pada 51 MPa menjadi 111,5 MPa pada 68 MPa, dan mencapai 121,2 MPa pada 86 MPa. Begitu pula pada sampel dengan kecepatan putar 2100 rpm, terjadi peningkatan kekuatan tarik dari 97,5 MPa pada 51 MPa menjadi 119,2 MPa pada 68 MPa, dan

123,7 MPa pada 86 MPa. Sementara itu, sampel dengan kecepatan putar 2300 rpm menunjukkan hasil peningkatan kekuatan tarik yang signifikan, dimulai dari 31,4 MPa pada 51 MPa, naik menjadi 67,2 MPa pada 68 MPa, dan mencapai 121 MPa pada 86 MPa. Semua sampel menunjukkan kecenderungan peningkatan kekuatan tarik seiring dengan meningkatnya tekanan tempa selama proses *rotary friction welding* (RFW). Fenomena ini sesuai dengan literatur yang disampaikan oleh Purwanto dkk., di mana dijelaskan bahwa semakin tinggi tekanan tempa yang diterapkan selama proses pengelasan, maka akan memperkuat ikatan antar atom pada material. Selain itu, peningkatan tekanan juga berkontribusi pada pengurangan porositas pada material dan menghasilkan kompaksi yang lebih baik, yang pada gilirannya meningkatkan kekuatan mekanik material [49].



Gambar 4.4 Hasil kuat tarik terhadap kecepatan putar

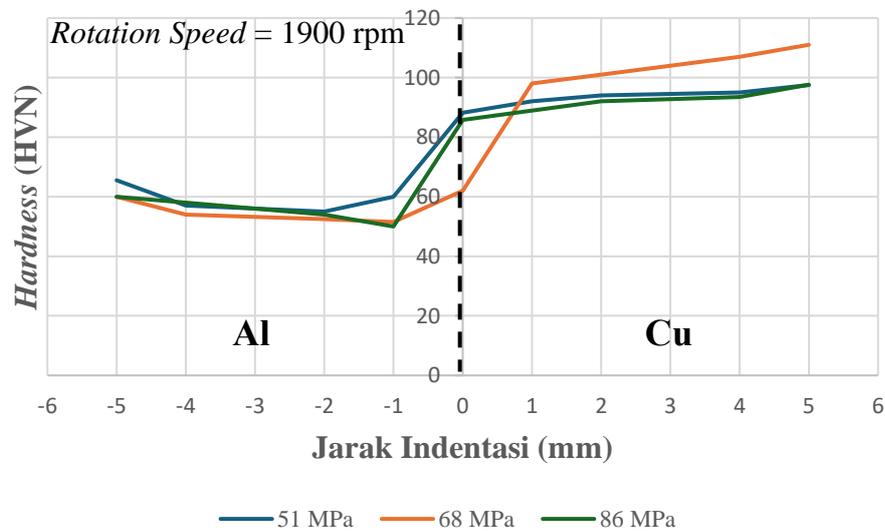
Sementara itu, jika ditinjau dari pengaruh kecepatan putaran terhadap nilai kekuatan tarik seperti pada Gambar 4.4, diketahui bahwa peningkatan kecepatan rotasi dari 1900 rpm menjadi 2100 rpm menghasilkan peningkatan kekuatan tarik pada sampel 51 MPa, dari 79 MPa menjadi 97,5 MPa. Namun, terjadi penurunan drastis saat kecepatan ditingkatkan lebih lanjut menjadi 2300 rpm, dengan kekuatan tarik menurun menjadi 31,4 MPa. Hal serupa juga diamati pada sampel dengan *forging pressure* 68 MPa dan 86 MPa, di mana kekuatan tarik meningkat saat kecepatan rotasi naik dari 1900 rpm ke 2100 rpm, namun kembali menurun ketika kecepatan mencapai 2300 rpm. Penurunan kekuatan tarik pada kecepatan 2300 rpm dapat dijelaskan melalui analisis efek *heat generation* (pembentukan panas) selama proses *friction welding* dengan kecepatan rotasi tinggi. Peningkatan kecepatan rotasi pada 2300 rpm menghasilkan panas yang lebih besar selama proses pengelasan, yang dapat menyebabkan degradasi mikrostruktur material, serta memperluas zona *heat affected zone* (HAZ). Zona HAZ yang lebih besar cenderung memiliki struktur mikro yang kurang optimal, seperti munculnya butiran yang kasar atau transformasi fasa yang tidak diinginkan, yang pada akhirnya mengurangi kekuatan mekanik sambungan [50].

Selain itu, tingginya deformasi plastis pada daerah sambungan akibat peningkatan panas dan tekanan juga dapat berkontribusi pada penurunan kekuatan tarik. Peningkatan suhu yang berlebihan dalam proses *welding* menyebabkan deformasi plastis yang tidak merata, serta berpotensi menyebabkan adanya konsentrasi tegangan (*stress concentration*) yang dapat memicu cacat lokal di daerah sambungan. Cacat-cacat ini dapat melemahkan sambungan secara

keseluruhan dan menurunkan kekuatan tarik. Dari analisis ini, dapat disimpulkan bahwa meskipun peningkatan kecepatan rotasi dan tekanan tempa secara umum dapat memperkuat sambungan dalam proses *friction welding*, ada batas optimal di mana efek peningkatan tersebut menjadi beerbanding terbalik. Kecepatan yang terlalu tinggi, seperti 2300 rpm dalam kasus ini, justru menghasilkan degradasi performa sambungan akibat efek termal dan deformasi yang tidak terkendali. Ini menunjukkan pentingnya optimasi parameter proses, terutama kecepatan rotasi, untuk mencapai kualitas sambungan yang maksimal tanpa mengorbankan sifat mekanik material. Dalam mencari nilai optimal, maka didapatkan tekanan yang tinggi dengan kecepatan rotasi yang berkisar di nilai 1900 rpm. Nilai ini menghasilkan kekuatan *tensile* yang cenderung tinggi. Kecepatan putar yang terlampau tinggi hingga 2300 rpm menghasilkan panas yang lebih tinggi dikarenakan kondisi gesek yang makin sering terjadi pada daerah *interface*. Panas ini dapat menyebar ke daerah lain dan mempengaruhi struktur mikro pada material sehingga dapat menurunkan sifat mekanik dari daerah yang terkena efek panas tersebut.

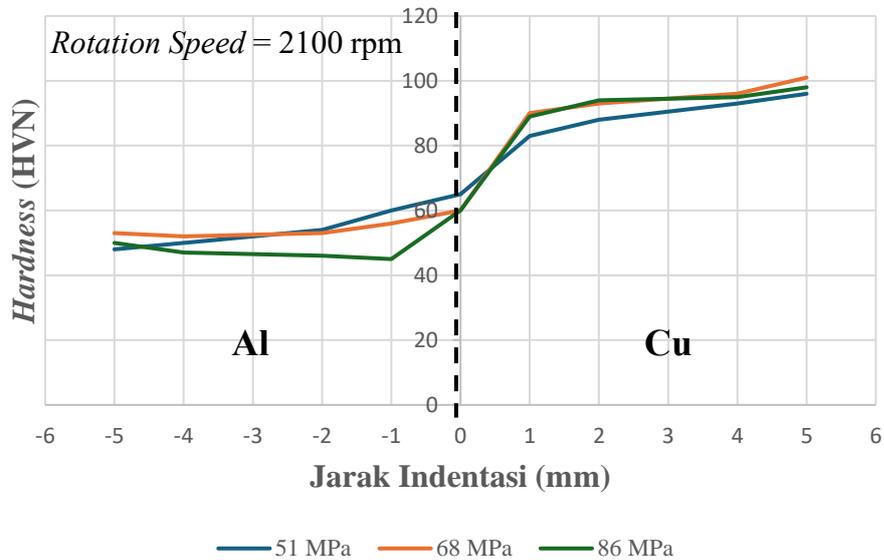
4.3 Hasil uji kekerasan

Pada penelitian ini pengambilan data uji kekerasan dilakukan pada 9 titik yang berbeda dengan beban 2 kgf dimana dilakukan pada 2 titik pada *base metal*, 1 titik daerah sambungan dan 4 titik daerah dekat sambungan, standar yang digunakan adalah ASTM E384. Hasil pengujian ditampilkan menjadi bentuk grafik garis pada gambar yang di tunjukan di bawah ini Gambar 4.5



Gambar 4.5 Hasil uji kekerasan kecepatan putaran 1900 rpm

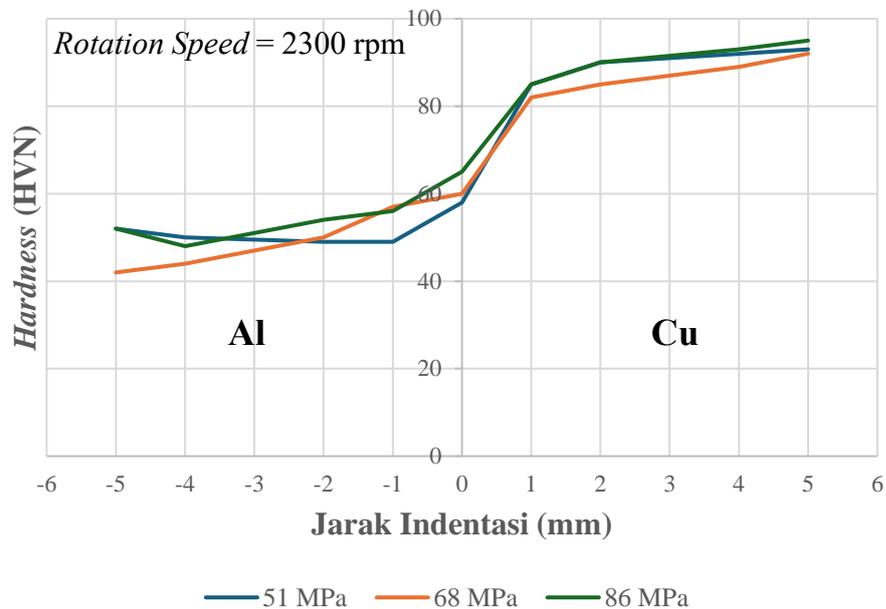
Berdasarkan data yang diperoleh dari hasil pengujian kekerasan dipaparkan dalam bentuk grafik garis yang terdapat pada Gambar 4.5 pada gambar tersebut parameter variasi kecepatan putaran yaitu 1900 rpm dengan variasi parameter *Forging pressure* 51, 68, dan 86 MPa. Dapat dilihat pada jarak 0mm yang merupakan daerah sambungan Al-Cu, yang dimana nilai tertinggi pada daerah sambungan didapatkan pada parameter *forging pressure* 51 MPa sebesar 88,2 HVN. Sedangkan nilai kekerasan terendah pada daerah sambungan atau pada parameter *forging pressure* 68 MPa sebesar 62 HVN. kecenderungan dari uji kekerasan aluminium 6063 pada variasi kecepatan putaran 1900 rpm dengan variasi parameter *forging pressure* 51, 68, dan 86 MPa pada daerah Al (jarak uji -5; -4; -2; -1mm) mengalami penurunan nilai kekerasan. Sedangkan pada variasi parameter *forging pressure* 51, 68, dan 86 MPa pada daerah Cu (jarak uji +5; +4; +2; +1mm) mengalami kecenderungan peningkatan nilai kekerasan.



Gambar 4.6 Hasil uji kekerasan kecepatan putaran 2100 rpm

Selanjutnya pada Gambar 4.6 dengan variasi kecepatan putaran 2100 Rpm dan variasi parameter *forging pressure* 51, 68, dan 86 MPa mengalami penurunan nilai kekerasan pada daerah sambungan las. Untuk variasi pada kecepatan putaran 2100 dengan parameter *forging pressure* 51 MPa mempunyai nilai kekerasan pada sambungan sebesar 65 HVN, nilai kekerasan logam induk aluminium 6063 pada jarak -5mm yaitu sebesar 48 HVN, sedangkan nilai kekerasan pada logam induk tembaga pada jarak +5 mm yaitu sebesar 96 HVN. Selanjutnya nilai kekerasan pada parameter *forging pressure* 68 MPa yaitu sebesar 60 HVN pada daerah sambungan, nilai kekerasan logam induk aluminium 6063 pada jarak -5mm yaitu sebesar 53 HVN sedangkan nilai kekerasan pada logam induk tembaga pada jarak +5mm yaitu sebesar 101 HVN. Selanjutnya nilai kekerasan pada parameter *forging pressure* 86 MPa yaitu sebesar 60 HVN pada sambungan, nilai kekerasan logam induk

aluminium 6063 pada jarak -5mm yaitu sebesar 50 HVN sedangkan nilai kekerasan pada logam induk tembaga pada jarak +5mm yaitu sebesar 98 HVN.



Gambar 4.7 Hasil uji kekerasan kecepatan putaran 2300 rpm

Selanjutnya pada Gambar 4.7 dengan variasi kecepatan putaran 2300 rpm dan variasi parameter *forging pressure* 51, 68, dan 86 MPa pada gambar diatas mengalami kenaikan kekerasan pada daerah sambungan las. Pada parameter variasi kecepatan 2300 Rpm dengan parameter *forging pressure* 51 MPa mempunyai nilai kekerasan sambungan sebesar 58 HVN, nilai kekerasan logam induk aluminium 6063 pada jarak -5mm yaitu sebesar 52 HVN, sedangkan nilai kekerasan pada logam induk tembaga pada jarak +5mm yaitu sebesar 93 HVN. Selanjutnya hasil nilai kekerasan pada parameter *forging pressure* 68 MPa mempunyai nilai kekerasan sambungan sebesar 60 HVN, dan nilai kekerasan logam induk aluminium 6063 pada jarak -5mm yaitu sebesar 42 HVN, sedangkan nilai kekerasan pada logam induk tembaga pada jarak +5mm yaitu sebesar 92 HVN. selanjutnya

hasil nilai kekerasan pada parameter *forging pressure* 86 MPa mempunyai nilai kekerasan sambungan sebesar 65 HVN, nilai kekerasan logam induk aluminium 6063 pada jarak -5mm yaitu sebesar 52 HVN dan nilai kekerasan pada logam induk tembaga pada jarak +5mm yaitu sebesar 95 HVN.

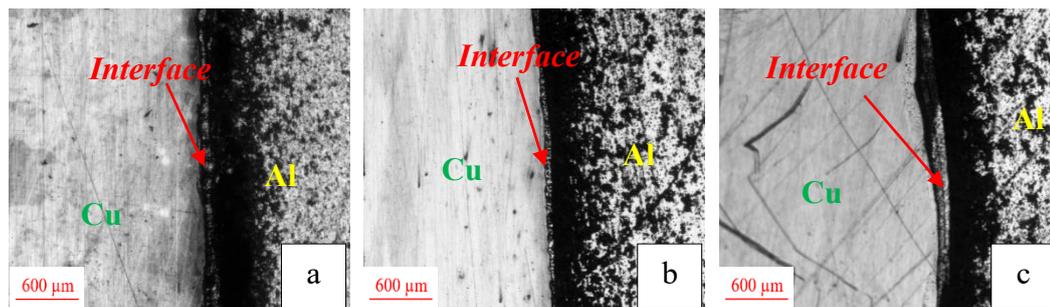
Rata-rata kekerasan dari masing-masing logam Al 6063 T6 dan Cu sebesar 83 HVN dan 98 HVN dimana Cu memiliki nilai lebih besar dalam hal kekerasan apabila dibandingkan dengan Al. Hasil uji kekerasan pada *fusion zone* atau *interface* tertinggi didapatkan dengan parameter kecepatan putaran 1900 rpm dan *forging pressure* 51 MPa yaitu sebesar 88,2 HVN dengan efisiensi kekerasan sambungan terhadap *base metal* Al sebesar 106,3%. Selanjutnya kekerasan pada *fusion zone* atau *interface* terendah didapatkan dengan parameter kecepatan putaran 2300 dan *forging pressure* 51 MPa yaitu sebesar 58 HVN dengan efisiensi kekerasan sambungan terhadap *base metal* Al sebesar 69,9%.

Dari hasil efisiensi kekerasan sambungan terhadap *base metal* Al dapat disimpulkan kecepatan putaran tidak terlalu berpengaruh terhadap kekerasan sambungan dimana pada kecepatan rendah (1900 rpm) memiliki nilai kekerasan yang melebihi *base metal* aluminium 6063 T6 yaitu sebesar 88,2 HVN dengan nilai efisiensi sebesar 106,3% sedangkan pada kecepatan tinggi (2300 rpm) memiliki nilai kekerasan yang rendah yaitu 58 HVN dengan efisiensi sebesar 69,9%, fenomena ini sesuai dengan literatur yang disampaikan oleh Agus Sasmito dimana kekerasan menurun seiring dengan meningkatnya kecepatan putaran [6]. Dari hasil kekerasan menandakan terjadinya perpaduan antara struktur Al dan Cu, dimana seiring dengan bertambahnya jarak dari titik lasan, maka kekerasan akan cenderung

sama seperti masing-masing *base metal*. Hal ini sesuai dengan literatur dimana pada daerah lasan, proses gesekan menghasilkan suhu tinggi yang menyebabkan deformasi plastis pada material. Deformasi ini dapat memperbaiki struktur mikro, menghasilkan penghalusan butir (*grain refinement*) yang meningkatkan kekuatan dan kekerasan material [51].

4.4 Hasil pengamatan metalografi

Pengujian metalografi dilakukan dengan menggunakan mikroskop optic dengan pembesaran 100 kali, pengambilan data hasil pengujian metalografi mikro pengelasan dilakukan pada daerah las. Variasi kecepatan putaran terdapat 3 yaitu 1900, 2100, dan 2300, sedangkan untuk variasi *forging pressure* terdapat 3 yaitu 51 MPa, 68 MPa, dan 86 MPa. Sehingga pengambilan data mengenai pengujian metalografi ini sebanyak 9 kali. Data hasil pengujian metalografi ini dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

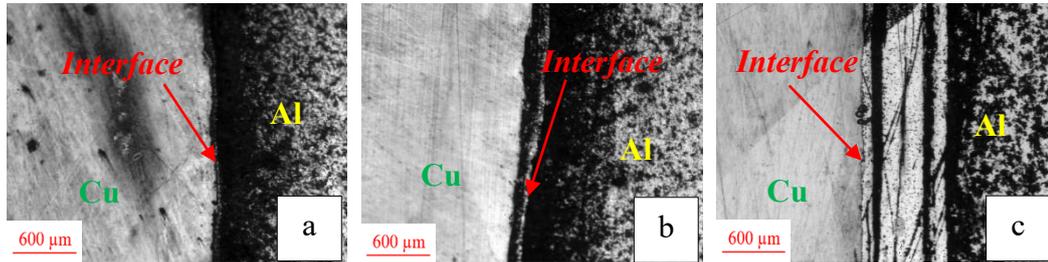


Gambar 4.8 Hasil pengamatan struktur mikro pada sampel dengan variasi *forging pressure* 51 MPa dan variasi kecepatan putaran (a) 1900 rpm, (b) 2100 rpm, dan (c) 2300 rpm

Hasil pengamatan struktur mikro pada material silinder pejal jenis material aluminium. Pada struktur mikro logam induk, material yang digunakan sebagai

bahan penelitian pada metode *friction welding* dengan pembesaran optik 100 kali. Pada Gambar 4.8a. variasi *forging pressure* 51 MPa dan variasi kecepatan putaran 1900 rpm struktur partikel mengalami perubahan mengecil dan tersebar, disebabkan tingginya panas karena gesekan yang ditimbulkan dari putaran torsi dan tekanan yang terjadi. Gambar 4.8b. variasi *forging pressure* 51 MPa dan variasi kecepatan putaran 2100 rpm menunjukkan struktur aluminium mengalami perubahan struktur partikel melebar akibat panas disebabkan gesekan yang ditimbulkan dari kecepatan putar dan tekanan yang terjadi. Gambar 4.8c. variasi *forging pressure* 51 MPa dan variasi kecepatan putaran 2300 rpm struktur aluminium perubahan struktur butiran, disebabkan panas yang tinggi karena kecepatan putar menjadikan torsi meningkat dan gesekan dengan cepat.

Hasil pengamatan struktur mikro pada daerah logam induk tembaga, daerah terkena panas atau *heat affective zone*. Pada Struktur mikro logam induk, material yang digunakan sebagai bahan penelitian pada metode las gesek dengan pembesaran optik 100x dan seperti yang di tunjukan pada Gambar 4.8a. variasi *forging pressure* 51 MPa dan variasi kecepatan putaran 1900 rpm menunjukkan perubahan struktur butiran mengecil akibat terkena panas, karena gesekan yang ditimbulkan dari putaran torsi dan tekanan yang terjadi. Gambar 4.8b. variasi *forging pressure* 51 MPa dan variasi kecepatan putaran 1900 rpm struktur partikel melebar akibat panas disebabkan gesekan yang ditimbulkan dari kecepatan putar dan tekanan yang terjadi. Gambar 4.8c. variasi *forging pressure* 51 MPa dan variasi kecepatan putaran 2300 rpm struktur tembaga semakin melebar disebabkan panas yang tinggi akibat panas yang ditimbulkan dari kecepatan putar dan tekanan.

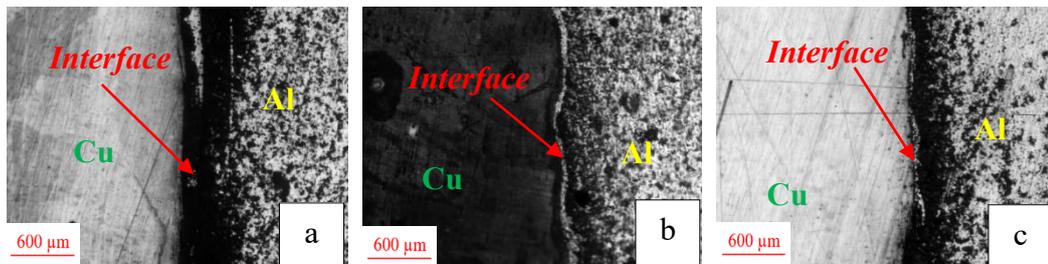


Gambar 4.9 Hasil pengamatan struktur mikro pada sampel dengan variasi *forging pressure* 68 MPa dan variasi kecepatan putaran (a) 1900 rpm, (b) 2100 rpm, dan (c) 2300 rpm

Hasil pengamatan struktur mikro pada material silinder pejal berbahan aluminium menunjukkan perubahan signifikan akibat proses las gesek. Struktur mikro pada logam induk diamati dengan pembesaran optik 100 kali, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9. Selanjutnya pada Gambar 4.9a variasi *forging pressure* 68 MPa dan variasi kecepatan putaran 1900 rpm partikel-partikel mengalami perubahan menjadi lebih kecil dan tersebar, yang disebabkan oleh tingginya panas akibat gesekan dari putaran torsi dan tekanan. Gambar 4.9b. variasi *forging pressure* 68 MPa dan variasi kecepatan putaran 2100 rpm menunjukkan bahwa partikel-partikel aluminium melebar karena panas yang dihasilkan dari gesekan, dipengaruhi oleh kecepatan putar dan tekanan selama proses. Sementara itu, pada Gambar 4.9c. variasi *forging pressure* 68 MPa dan variasi kecepatan putaran 2300 rpm struktur aluminium tidak mengalami perubahan signifikan karena panas yang dihasilkan lebih rendah. Hal ini disebabkan oleh tingginya kecepatan putar yang menurunkan torsi dan memperlambat gesekan.

Pengamatan struktur mikro pada logam tembaga, khususnya di daerah terkena panas atau *heat-affected zone* (HAZ), juga menunjukkan perubahan. Dengan pembesaran optik 100 kali, pada Gambar 4.9a. variasi *forging pressure* 68

MPa dan variasi kecepatan putaran 1900 rpm terlihat bahwa butiran-butiran tembaga mengecil akibat panas yang dihasilkan oleh gesekan dari putaran torsi dan tekanan. Gambar 4.9b. variasi *forging pressure* 68 MPa dan variasi kecepatan putaran 2100 rpm memperlihatkan pelebaran partikel tembaga karena panas yang dihasilkan dari gesekan pada kecepatan putar dan tekanan tertentu. Gambar 4.9c. variasi *forging pressure* 68 MPa dan variasi kecepatan putaran 2300 rpm menunjukkan struktur tembaga yang semakin melebar, disebabkan oleh panas tinggi yang dihasilkan dari kecepatan putar dan tekanan selama proses las gesek.



Gambar 4.10 Hasil pengamatan struktur mikro pada sampel dengan variasi *forging pressure* 86 MPa dan variasi kecepatan putaran (a) 1900 rpm, (b) 2100 rpm, dan (c) 2300 rpm

Pengamatan struktur mikro pada material silinder pejal berbahan aluminium menunjukkan perubahan yang jelas akibat proses las gesek. Struktur mikro pada logam induk diperiksa menggunakan pembesaran optik 100 kali, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4.10. Dapat dilihat pada Gambar 4.10a. variasi *forging pressure* 86 MPa dan variasi kecepatan putaran 1900 rpm struktur partikel aluminium terlihat mengecil dan menyebar akibat panas yang dihasilkan dari gesekan selama putaran dan tekanan. Pada Gambar 4.10b. variasi *forging pressure* 86 MPa dan variasi kecepatan putaran 2100 rpm partikel aluminium melebar karena panas yang dihasilkan dari gesekan yang lebih kuat. Sedangkan pada Gambar 4.10c.

variasi *forging pressure* 86 MPa dan variasi kecepatan putaran 2300 rpm tidak ada perubahan besar pada struktur partikel karena panas yang dihasilkan lebih rendah, akibat kecepatan putar yang tinggi membuat torsi menurun dan mengurangi gesekan.

Pengamatan struktur mikro pada daerah logam induk tembaga, khususnya di zona yang terkena panas (*heat-affected zone* atau HAZ) menunjukkan perubahan signifikan akibat proses las gesek. Dengan menggunakan pembesaran optik 100x, seperti yang ditunjukkan, terlihat bahwa struktur butiran tembaga mengalami pengecilan dan pelebaran. Hal ini disebabkan oleh panas yang dihasilkan dari gesekan selama proses las gesek, yang dapat menyebabkan deformasi dan rekristalisasi pada mikrostruktur tembaga. Pada Gambar 4.10a. variasi *Forging pressure* 86 MPa dan variasi kecepatan putaran 1900 rpm butiran tembaga mengecil karena panas dari gesekan yang terjadi. Pada Gambar 4.10b. variasi *Forging pressure* 86 MPa dan variasi kecepatan putaran 2100 rpm partikel tembaga melebar karena panas dari gesekan yang lebih besar, dan di Gambar 4.10c. variasi *Forging pressure* 86 MPa dan variasi kecepatan putaran 2300 rpm butiran tembaga semakin melebar karena suhu yang sangat tinggi yang dihasilkan oleh gesekan pada kecepatan putar dan tekanan yang lebih tinggi.

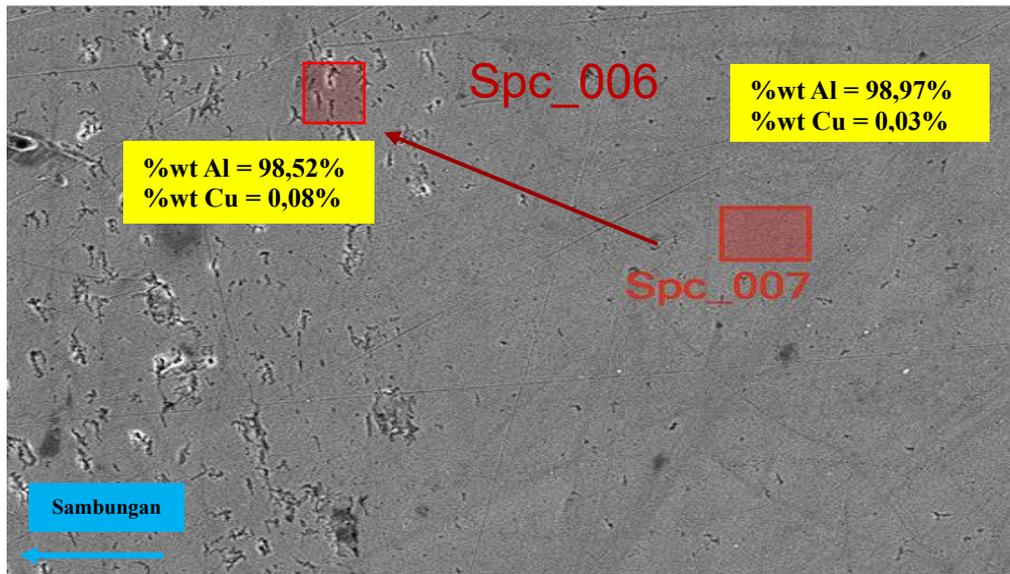
Hasil pengamatan struktur mikro daerah HAZ tembaga pada Variasi kecepatan putaran terdapat 3 yaitu 1900, 2100, dan 2300, sedangkan untuk variasi *forging pressure* terdapat 3 yaitu 51 MPa, 68 MPa, dan 86 MPa. dengan per besaran lensa 100 kali struktur mikro mengalami pengasaran dan pembesaran butiran dikarenakan pengaruh panas yang berlangsung saat pengelasan. Struktur mikro

memiliki ukuran agak berjauhan dan memanjang persebaran butiran agak berjauhan. Struktur mikro memiliki jarak berjauhan dan memanjang mengecil sebaran partikelnya berjauhan.

Struktur mikro pada aluminium mengecil dan menempel pada tembaga, sedangkan tembaga tidak meleleh dikarenakan mempunyai titik leleh yang tinggi daripada Aluminium. Struktur mikro hasil pengelasan terlihat bahwa setiap variasi putaran gesekan berbeda pada daerah sambungan (*interface*). Pada sambungan las gesek dengan variasi *forging pressure* 86 MPa, sambungan terlihat rapi lurus yang disebabkan adanya tekanan yang besar sehingga susunan partikelnya menjadi sangat padat. Secara literatur, titik leleh tembaga dan aluminium masing-masing adalah 1200 dan 660 °C. Melihat dari sambungan yang terjadi, dapat dilihat bahwa daerah sambungan telah mencapai suhu deformasi plastis dengan temperatur berkisar 200 °C, nilai ini telah dilampaui selama proses *friction welding* dan dapat dilihat bahwa aluminium mengalami paling banyak pembentukan butir yang dapat dilihat pada beberapa gambar sebelumnya.

4.5 Hasil karakterisasi SEM-EDS (*Scanning Electron Microscope*)

Pada sub bab ini sampel yang digunakan adalah sampel nomor 8 dengan parameter 2300 *friction pressure* 19 MPa dan *forging pressure* 68 MPa. Dilakukan karakterisasi material menggunakan *scanning electron microscope* dengan bantuan *energy dispersive spectroscopy* untuk mengetahui kemungkinan fasa terbentuk pada beberapa bagian dari sampel. Diperoleh hasil pengujian SEM pada *base metal* aluminium adalah sebagai mana pada Gambar 4.11.



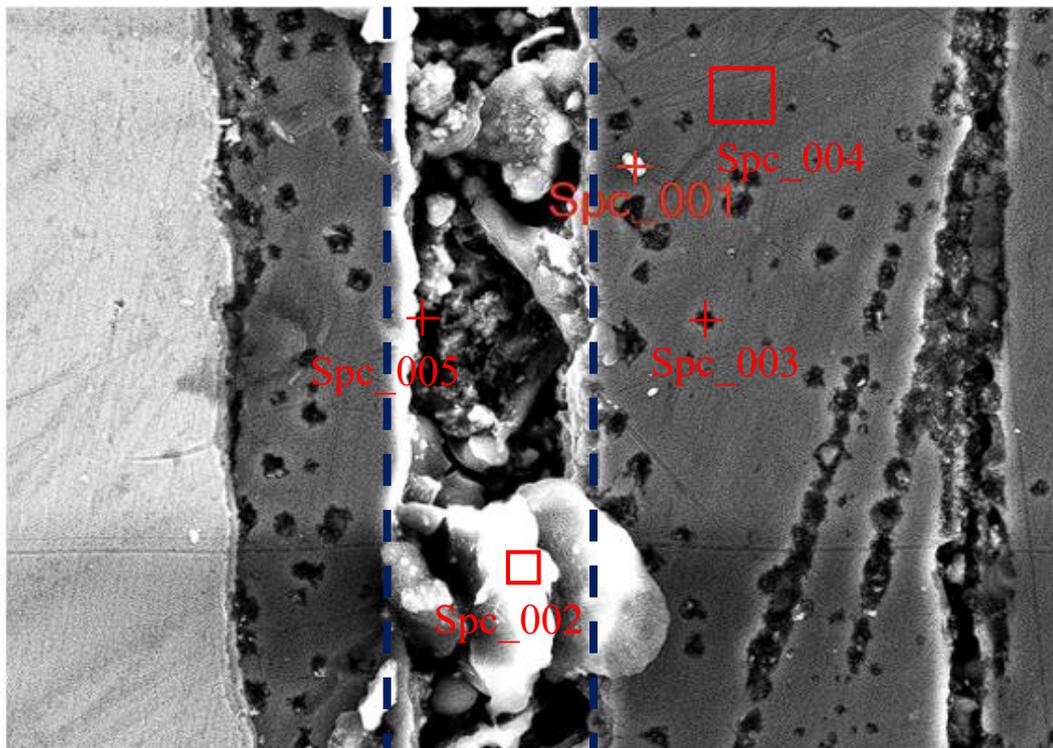
Gambar 4.11 Hasil SEM – EDX *base metal*

Pada Gambar 4.11 didapatkan hasil analisa SEM pada titik base metal aluminium. Secara visual, didapatkan hasil yang berbeda secara signifikan antara daerah Spc_007 dengan Spc_006 dimana daerah Spc_007 cenderung memiliki topologi yang rata, sedangkan daerah Spc_006 bersifat sebaliknya. Hal ini dikarenakan terdapat perbedaan suhu pada daerah Spc_007 dan Spc_006, kondisi ini mengakibatkan retak pada aluminium pada saat pendinginan. Selain itu, kondisi retak ini juga dapat diakibatkan oleh suhu tinggi selama pengelasan yang dapat mengubah struktur mikro di daerah Spc_006 dikarenakan berdekatan dengan sambungan, seperti adanya pembesaran butir yang menghasilkan retakan [52].

Meninjau dari sisi hasil konsentrasi unsur, dapat dilihat bahwa komposisi aluminium sedikit menurun di Spc_006 dibandingkan Spc_007, yang jauh dengan daerah sambungan. Selain itu, peningkatan kecil kandungan tembaga di Spc_006 dapat disebabkan oleh adanya migrasi tembaga dari daerah sambungan atau presipitasi lokal akibat pemanasan. Sementara itu, komposisi di Spc_007 tetap

stabil karena jauh dari daerah sambungan yang tidak terpengaruh signifikan oleh panas, yang menunjukkan bahwa adanya perubahan komposisi. Hal ini mengindikasikan dimana aluminium bermigrasi dari daerah yang lebih panas menuju daerah yang lebih dingin.

Untuk tahap selanjutnya, dilakukan pengujian SEM pada daerah dekat sambungan. Didapatkan hasil yang dapat dilihat pada Gambar 4.12 dibawah ini diperoleh hasil SEM dan EDX pada daerah sambungan lasan, pengujian dilakukan dengan 3 titik uji dimana tanda kotak menandakan pengujian dalam lingkup *square* atau *area* (Spc_002; Spc_004), tanda plus menandakan pengujian dalam bentuk titik atau *spot* (Spc_001; Spc_003; dan Spc_005).



Gambar 4.12 Hasil SEM – EDX daerah dekat sambungan

Melalui Gambar 4.12 di atas, Adapun diperoleh data hasil konsentrasi dari masing masing titik disajikan pada Tabel 4.3 sebagai berikut:

Tabel 4.3 Hasil Konsentrasi Unsur EDS

Unsur	Konsentrasi Unsur (wt%)				
	Spc_001	Spc_002	Spc_003	Spc_004	Spc_005
C	55,74	79,55	45,94	0	70,12
O	3,84	18,17	5,09	1,26	5,01
Mg	0,21	0,06	0,25	0,45	0,1
Al	39,04	0,94	47,09	96,4	22,66
Si	0,46	0,04	0,2	0,54	0,14
Ti	0	0,65	0	0	0,77
Fe	0,29	0,3	0,09	0,2	0,79
Cu	0,44	0,29	1,34	1,14	0,4
Total	100	100	100	100	100

Tabel 4.3 menjelaskan mengenai distribusi dari masing-masing titik yang diuji dimana terdapat variasi dari konsentrasi Al dan Cu pada masing-masing titik. Pada titik Spc_001, diketahui bahwa daerah ini memiliki konsentrasi utama C (55,74%), Al (39,04%), dan O (3,84%) yang mengindikasikan bahwa daerah ini merupakan bagian dominan dari logam Al (aluminium) *base metal*. Dikarenakan daerah ini masih tergolong *heat affected zone* maka terjadi kemungkinan deteksi fasa oksida yang menunjukkan adanya kemungkinan pembentukan oksida aluminium (Al_2O_3), yang terbentuk akibat paparan panas dan oksidasi selama proses pengelasan.

Pada titik Spc_002, dominasi karbon dan oksigen C (79,55%), O (18,17%), dan Al (0,94%) Konsentrasi aluminium sangat rendah pada titik ini, hal ini menunjukkan bahwa lapisan ini berada di permukaan dan tidak berasal langsung

dari base metal aluminium. Selain itu, pada daerah ini, kemungkinan terjadinya difusi sangatlah sedikit dikarenakan keterlibatan unsur lain seperti Cu, Mg, dan Fe sangat kecil yang mengindikasikan pemaduan minimal dari bahan Cu-Al di area ini.

Pada titik Spc_003, daerah hitam Al (47,09%), C (45,94%), dan O (5,09%).menandakan tingginya konsentrasi aluminium dengan karbon, yang menunjukkan bahwa area ini lebih mendekati material Al daripada material Cu. Kandungan oksigen menunjukkan adanya lapisan oksida, tetapi tidak sebanyak di area lain. Kehadiran Cu (1,34%) mengindikasikan bahwa ini adalah area peralihan (*intermediate zone*) antara material Cu dan Al.

Selanjutnya, diketahui pada titik Spc_004 yang merupakan daerah terjauh dari zona sambungan, diperoleh data bahwa Hampir seluruh area ini terdiri dari aluminium Al (96,4%), Si (0,54%), dan O (1,26%), menunjukkan bahwa ini adalah bagian dominan dari material aluminium tanpa banyak kontaminasi. Konsentrasi oksigen rendah menunjukkan sedikit atau tidak ada oksidasi yang signifikan di area ini. Unsur Cu hampir tidak ditemukan, sehingga kemungkinan besar ini adalah sisi aluminium yang jauh dari *interface*.

Dan pada titik Spc_005, didapatkan bahwa seiring dengan menjauhnya lokasi pengujian dari daerah sambungan menuju *base metal* Cu, tetap didapatkan komposisi karbon dengan sebagian besar aluminium C (70,12%), Al (22,66%), dan O (5,01%) yang menunjukkan adanya kontaminasi karbon, tetapi lebih sedikit dibandingkan Spc_002. Tingginya nilai konsentrasi Al di sini menunjukkan kemungkinan lapisan Al bercampur dengan karbon, terjadi akibat proses

pengelasan gesek yang menimbulkan residu. Sementara itu unsur lain seperti Fe dan Cu hadir dalam jumlah kecil, menunjukkan sedikit pengaruh dari material Cu.

4.6 Pembahasan

Setelah melihat, mengolah dan menganalisa data yang diperoleh, maka dilakukan korelasi antara data yang didapat dengan hasil yang diharapkan pada sampel.

4.6.1 Pengaruh variabel terhadap struktur mikro

Pada penelitian ini, pengamatan hasil visual spesimen *friction welding* meliputi *burn off length* dan *flash* yang dihasilkan pada proses pengelasan dengan variasi kecepatan putaran dan tekanan tempa. Berdasarkan Tabel 4.1, terlihat bahwa parameter proses, yaitu kecepatan putaran (rpm) dan tekanan (*forging pressure*), berpengaruh signifikan terhadap nilai *burn off length* dan *volume flash*. Pada kecepatan 1900 rpm, *burn off length* berkisar antara 14,6 mm hingga 19,3 mm, sementara pada kecepatan 2300 rpm, nilai ini meningkat dari 23,5 mm hingga 31,5 mm. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh meningkatnya panas yang dihasilkan dari gesekan dengan kecepatan putaran yang lebih tinggi. Panas ini menyebabkan deformasi plastis pada material sehingga terjadi pengurangan panjang spesimen. Selain itu, tekanan tempa yang lebih besar memberikan kontribusi pada peningkatan deformasi plastis, menghasilkan nilai *burn off length* yang lebih tinggi. Hal ini sejalan dengan penelitian Hudiyo Firmanto [53] yang menyatakan bahwa semakin cepat kecepatan putar, maka semakin besar pengurangan panjang spesimen akibat pemanasan yang cepat dan

intens. Sementara itu, *flash*, yaitu deformasi plastis yang terjadi di sekitar bidang gesekan, juga menunjukkan tren peningkatan dengan naiknya parameter proses. Pada kecepatan 1900 rpm, volume *flash* meningkat dari 1650,38 mm³ pada tekanan 51 MPa menjadi 2181,67 mm³ pada tekanan 86 MPa. Kejadian serupa juga diamati pada kecepatan 2300 rpm, dengan nilai *flash* tertinggi mencapai 3560,76 mm³ pada tekanan 68 MPa. Pembentukan *flash* yang lebih besar dapat dijelaskan oleh peningkatan *burn off length*, yang berkontribusi langsung terhadap jumlah material yang meleleh dan terdorong keluar dari daerah sambungan. Selain itu, gesekan yang lebih intens menghasilkan deformasi yang lebih besar, terutama pada material aluminium, yang memiliki titik leleh lebih rendah dibandingkan tembaga. Hal ini sesuai dengan literatur dari Agus Sasmito [6], yang menyatakan bahwa peningkatan kecepatan putaran dan tekanan tempa menghasilkan pembentukan *flash* yang lebih banyak pada material aluminium.

Hasil pengamatan struktur mikro pada daerah sambungan aluminium 6063 dan tembaga menunjukkan perubahan signifikan akibat parameter proses *friction welding*, yaitu kecepatan putaran dan *forging pressure*. Pengamatan ini dilakukan untuk memahami hubungan antara struktur mikro dengan sifat mekanik sambungan, serta menjelaskan fenomena yang terjadi pada daerah *Heat affected zone* (HAZ) dan weld zone. Dari hasil struktur mikro menggunakan OM, struktur mikro di zona *interface* menunjukkan perubahan ukuran dan bentuk butir. Pada parameter kecepatan putaran rendah (1900 rpm) dengan tekanan tempa rendah (51

MPa), struktur butir cenderung lebih kecil dan terdistribusi rapat. Hal ini disebabkan oleh deformasi plastis yang sedang serta panas yang cukup untuk menginisiasi terjadinya rekristalisasi butir. Sebaliknya, pada kecepatan putaran tinggi (2300 rpm) dan tekanan tempa tinggi (86 MPa), struktur butir terlihat lebih kasar dan tidak merata, yang diakibatkan oleh panas berlebih yang dapat memperluas zona rekristalisasi seperti yang dijelaskan pada Gambar 4.10c. Perubahan struktur mikro ini dapat dikaitkan dengan deformasi plastis antar logam aluminium pada tembaga pada zona *interface*. Pada parameter maksimumn (2300 rpm, 51 MPa), deformasi plastis yang berlebihan dapat menyebabkan pembentukan butir kasar yang mengurangi kekuatan sambungan akibat adanya konsentrasi tegangan di zona HAZ [41].

Distribusi elemen dan identifikasi fasa yang terbentuk dikarakterisasi menggunakan SEM-EDS. Pada daerah (titik Spc_004), ditemukan bahwa kandungan aluminium mencapai 96,4%, mengindikasikan kemurnian material yang relatif terjaga. Sebaliknya, pada daerah (titik Spc_003), ditemukan peningkatan kandungan Cu hingga 1,34%, yang dapat diasumsikan bahwa adanya difusi tembaga ke dalam aluminium akibat panas dan tekanan selama proses pengelasan. Distribusi oksigen juga terjadi di beberapa titik, terutama pada Spc_002 dimana menunjukkan peningkatan konsentrasi akibat pembentukan lapisan oksida (Al_2O_3) selama proses pengelasan. Lapisan oksida ini, meskipun tipis, berfungsi sebagai pelindung alami dari korosi, seperti yang telah dijelaskan

dalam Bab II mengenai sifat aluminium yang tahan korosi karena pembentukan oksida alami [12]. Namun, keberadaan oksigen yang berlebihan juga dapat mengindikasikan adanya cacat oksida, yang berpotensi melemahkan sambungan mekanik.

4.6.2 Pengaruh variabel terhadap kuat tarik

Hasil uji tarik menunjukkan hubungan yang kuat antara parameter proses *friction welding*, perubahan struktur mikro, hasil karakterisasi SEM-EDS, dan sifat mekanik sambungan, terutama *tensile strength*. Data menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan putaran dan *forging pressure* memengaruhi kekuatan tarik secara signifikan, tetapi hasil terbaik hanya dapat dicapai dalam kondisi parameter yang optimal. Deformasi plastis menciptakan sambungan kuat dengan *burn off length* yang moderat dan *flash* yang proporsional. Namun, pada kecepatan 2300 rpm, volume *flash* yang berlebihan menunjukkan deformasi plastis yang tidak terkendali, yang mengakibatkan pembentukan zona lemah di sambungan dan menurunkan kekuatan tarik [41]. Pada kecepatan putaran sedang (2100 rpm) dan tekanan tinggi (86 MPa), struktur mikro yang terbentuk cenderung halus dan merata karena menghasilkan panas yang cukup tanpa menyebabkan *overheatnig*. Hal ini sesuai dengan hasil uji tarik, di mana *tensile strength* mencapai nilai maksimum 123,7 MPa. Sebaliknya, pada kecepatan putaran tinggi (2300 rpm), panas berlebih menghasilkan butir kasar pada zona *interface* dan HAZ, yang mengurangi kekuatan tarik hingga 31,4 MPa akibat degradasi mikrostruktur dan pelebaran zona HAZ [41].

Zona HAZ, seperti yang diidentifikasi memengaruhi sifat mekanik sambungan, pada parameter yang terbaik, zona HAZ relatif sempit dengan struktur mikro yang stabil, mendukung kekuatan tarik yang tinggi. Namun, pada parameter kecepatan putaran tinggi (2300 rpm), pelebaran zona HAZ dengan butir kasar dan transformasi fasa yang tidak diinginkan mengurangi *tensile strength* [41]. Kecepatan putaran rendah hingga sedang (1900-2100 rpm) dan tekanan tempa tinggi (86 MPa) menjadi kombinasi yang menghasilkan kekuatan tarik (*tensile strength*) tertinggi. Cacat struktur mikro atau distribusi fasa yang buruk, seperti yang terlihat pada kecepatan putaran tinggi, secara drastis menurunkan kekuatan tarik sambungan. Dari data kekuatan tarik pada semua sampel, dihasilkan bahwa efisiensi sambungan yang paling tinggi didapatkan dengan parameter kecepatan putaran (2100 rpm) dan tekanan tempa (86 MPa) dengan efisiensi sebesar 54,47% dari kekuatan tarik *base metal* aluminium 6063 dan hasil efisiensi sambungan yang paling rendah didapatkan dengan parameter kecepatan putaran (2300) dan tekanan tempa (51 MPa) dengan efisiensi sebesar 13,8% dari kekuatan tarik *base metal* aluminium 6063.

4.6.3 Pengaruh variabel terhadap kekerasan

Pada penelitian ini pengamatan hasil uji kekerasan menunjukkan bahwa nilai kekerasan pada daerah sambungan *friction welding* mengalami peningkatan yang relatif tinggi dengan kekerasan awal *base metal* aluminium 6063 T6 sebesar 83 HVN. Berdasarkan Gambar 4.5 terlihat pada

parameter kecepatan rendah yaitu 1900 rpm dengan *forging pressure* 51 MPa mendapatkan nilai kekerasan tertinggi yaitu sebesar 88,2 HVN dengan efisiensi sambungan terhadap kekerasan awal *base metal* aluminium yaitu sebesar 106,3%, sedangkan pada Gambar 4.7 terlihat pada parameter kecepatan tinggi yaitu 2300 dengan *forging pressure* 51 MPa mendapatkan nilai kekerasan paling rendah yaitu sebesar 58 HVN dengan efisiensi sambungan terhadap kekerasan awal *base metal* aluminium yaitu sebesar 69,9%. Fenomena ini dapat dijelaskan karena pada kecepatan putaran yang terlalu tinggi cenderung menurunkan kekerasan akibat pelebaran butir dan panas berlebih, hal ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh agus sasmito dimana kekerasan menurun seiring dengan meningkatnya kecepatan putaran [6]. Peningkatan kekerasan di zona sambungan dibandingkan base metal Al terjadi karena faktor material aluminium 6063 yang sudah mengalami deformasi plastis selama proses pengelasan yang dapat meningkatkan densitas material. Secara keseluruhan, kombinasi kecepatan putaran 1900 rpm menghasilkan peningkatan kekerasan yang optimal, memastikan sambungan yang tinggi melewati nilai kekerasan *base metal* aluminium 6063 T6.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah melakukan penelitian, didapatkan beberapa kesimpulan yang dapat ditarik pada penelitian ini. Kesimpulan tersebut antara lain adalah:

1. Pengaruh variasi tekanan tempa (*forging pressure*) terhadap sifat mekanik kekuatan tarik, dimana pada tekanan tempa 51 MPa mendapatkan kekuatan tarik sebesar 97,5 MPa dengan efisiensi 42,9%, pada tekanan tempa 68 MPa mendapatkan kekuatan tarik sebesar 119,2 MPa dengan efisiensi 52,5% dan pada tekanan tempa 86 MPa mendapatkan kekuatan tarik sebesar 123,7 MPa dengan efisiensi 54,5% dengan kesimpulan semakin tinggi tekanan tempa maka semakin meningkat hasil kekuatan tarik dan efisiensinya . Sedangkan pengaruh kecepatan putaran terhadap sifat mekanik kekuatan tarik, dimana pada kecepatan putaran 1900 mendapatkan kekuatan tarik sebesar 121,2 MPa dengan efisiensi 53,4%, pada kecepatan putaran 2100 mendapatkan kekuatan tarik sebesar 123,7 MPa dengan efisiensi 54,5%, dan pada kecepatan putaran 2300 mendapatkan kekuatan tarik sebesar 121,1 MPa dengan efisiensi sebesar 53,3% dengan kesimpulan semakin tinggi kecepatan putaran maka semakin menurun kekuatan tarik dan efisiensinya.
2. Pengaruh variasi tekanan tempa (*forging pressure*) terhadap sifat mekanik kekerasan, dimana pada tekanan tempa 51 MPa mendapatkan kekerasan

sebesar 88,2 HVN dengan efisiensi 106,3%, pada tekanan tempa 68 MPa mendapatkan kekerasan sebesar 62 HVN dengan efisiensi 74,7% dan pada tekanan tempa 86 MPa mendapatkan kekerasan sebesar 85,8 HVN dengan efisiensi 103,4% dengan kesimpulan semakin tinggi tekanan tempa maka semakin rendah hasil kekerasannya atau semakin menurun efisiensinya. Sedangkan pengaruh kecepatan putaran terhadap sifat mekanik kekerasan, dimana pada kecepatan putaran 1900 mendapatkan kekerasan 88,2 HVN dengan efisiensi 106,3%, pada kecepatan putaran 2100 mendapatkan kekerasan sebesar 65 HVN dengan efisiensi 78,3%, dan pada kecepatan putaran 2300 mendapatkan kekerasan sebesar 65 HVN dengan efisiensi sebesar 78,3% dengan kesimpulan semakin tinggi kecepatan putaran maka semakin rendah hasil kekerasannya atau semakin menurun efisiensinya.

3. Pengaruh variasi parameter pada struktur mikro sambungan menunjukkan bahwa parameter optimal menghasilkan struktur mikro dengan distribusi fasa yang merata, sedangkan kecepatan putaran terlalu tinggi menyebabkan pelebaran zona HAZ yang dapat mengurangi kualitas mekanik pada sambungan.

5.2 Saran

Dalam penelitian yang dilakukan, didapatkan beberapa saran yang dapat diberikan oleh penulis adalah :

1. Melakukan analisa XRD untuk mengetahui pembentukan fasa pada daerah HAZ dan sambungan las
2. Melakukan analisa SEM EDX pada daerah sambungan untuk mengetahui presentase komposisi kimia

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Larry Jeffus, “Welding Principles and Applications”, Edisi Kedelapan, Cengage Learning, U.S, 2015.
- [2] I. Khoirofik, “Analisa Teknis Pengelasan Dissimilar Material Antara AA 6063 dan AA 5083 Ditinjau Dari Aspek Mekanik dan Metalurgi Pada Bangunan Kapal,” *Thesis*, 2016. [Online]. Available: <https://repository.its.ac.id/48704/>
- [3] Press, U. G. M., “Pengelasan Paduan Aluminium”. Ugm Press, 2020.
- [4] S. Abdulloh, “Analisa Pengaruh Variasi Bentuk Probe/Pin Terhadap Sifat Mekanis Hasil Pengelasan Aluminium Dengan Tembaga Pada Proses Friction Stir Welding,” *Thesis*, 2019. [Online]. Available: <https://Eprints.Itn.Ac.Id/2776/1/Jurnal.Pdf>
- [5] Y. Purwaningrum, A. D. Pratama, dan F. Fatha, “Optimasi Sambungan Rotary Friction Welding (RFW) Pada Aluminium Dengan Variasi Ukuran Diameter,” *Poros*, vol. 18, no. 1, pp. 33–38, Mar. 2023, doi: 10.24912/poros.v18i1.23291.
- [6] A. Sasmito, M. N. Iman, P. T. Iswanto, and R. Muslih, “Effect of Rotational Speed on Static and Fatigue Properties of Rotary Friction Welded Dissimilar AA7075/AA5083 Aluminium Alloy Joints,” *Metals*, vol. 12, no. 1, p. 99, Jan. 2022, doi: 10.3390/met12010099.
- [7] M. Kimura, Y. Inui, M. Kusaka, K. Kaizu, and A. Fuji, “Joining Phenomena and Tensile Strength Of Friction Welded Joint Between Pure Aluminum and Pure Copper,” *Mechanical Engineering Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 14-00328-14–00328, 2015, doi: 10.1299/mej.14-00328.
- [8] I.- Saefuloh, I. Setiawan, S. Sunardi, R. Lusiani, and S. Suryana, “Karakteristik Sifat Mekanik Hasil Pengelasan Gesek Aluminium dengan Tembaga Menggunakan Variasi Kecepatan Putar dan Kekasaran Permukaan Kontak,” *Malikussaleh Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 6, no. 3, p. 28, Feb. 2023, doi: 10.29103/mjmst.v6i3.10301.
- [9] Y. Firmansyah, “Analisis Kekuatan Tarik Sambungan Aluminium (Al) dan Tembaga Cu) Pada Pengelasan Gesek (Friction Welding) Dengan Variasi Waktu Gesek dan Tempa,” *ROTASI*, vol. 23, no. 3, pp. 9–15, Sep. 2021, doi: 10.14710/rotasi.23.3.

- [10] Surdia, T., & Saito, S, “Pengetahuan Bahan Teknik,” Jakarta : Pt Pradnya Paramita, 1992.
- [11] Y. Purwaningrum, F. Fatha, A. D. Pratama, dan Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia, “Optimasi Sambungan Rotary Friction Welding (RFW) Pada Aluminium 4017 Dengan Variasi Bentuk Profil Sambungan,” *Prosiding Simposium Nasional Rekayasa Aplikasi Perancangan dan Industri*, pp. 165–170, 2022. [Online]. Available: <https://Proceedings.Ums.Ac.Id/Rapi/Article/View/2616/2571>
- [12] Surdia, T., & Saito, S, “Pengetahuan Bahan Teknik,” Jakarta: Pt Pradnya Paramita, 1995.
- [13] Mikell, P. Groover, “Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems,” John Wiley, 2019.
- [14] W. Chrominski, M. Kulczyk, M. Siwek, and M. Lewandowska, “Tailoring Microstructure and Mechanical Properties of 6063 Aluminium Alloy for Lightweight Structural Parts,” *Materials Science Forum*, vol. 765, pp. 388–392, Jul. 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.765.388.
- [15] Sudha, G., Rajendran, R., & Murugan, N, “Copper And Its Alloys: A Review On Recent Advances. International Journal Of Advanced Research In Electrical,” *Electronics And Instrumentation Engineering*, vol. 4, no. 6, pp. 4769-4777, 2015.
- [16] J. R. Davis, “Copper and Copper alloys,” ASM International, 2001.
- [17] D. R. Gaskell and D. E. Laughlin, “Introduction to the thermodynamics of materials,” CRC Press, 2017.
- [18] Abbaschian, Reza, Lara Abbaschian, and Robert E. Reed-Hill, “Physical Metallurgy Principles,” vol. 200. Stamford: Cengage Learning, 2010.
- [19] Shreir, L. L, “Corrosion: Volume 1,” Butterworth-Heinemann, 1994.
- [20] Smith, W. F., Hashemi, J., & Presuel-Moreno, F, *Foundations Of Materials Science and Engineering*,” vol. 509,” New York: Mcgraw-Hill, 2006.
- [21] L. H. Van Vlack, “Materials courses for student engineers in the 1990s,” *The Journal of The Minerals*, vol. 42, no. 1, pp. 6–8, Jan. 1990, doi: 10.1007/bf03220513.
- [22] Richard, A. M, “Copper, Its Trade, Manufacture, Use, and Environmental Status,” Crc Press. 2021.

- [23] Goyal, S., et al. "Copper and Its Alloys: Usage In Everyday Life," *Advanced Materials Research*, no. 1130, pp. 147-150, 2016.
- [24] A. Aditia, N. Nurdin, and A. S. Ismy, "Analisa kekuatan sambungan material AISI 1050 dengan ASTM A36 dengan variasi arus pada proses pengelasan SMAW," *Journal of Welding Technology*, vol. 1, no. 1, Jun. 2019, doi: 10.30811/jowt.v1i1.1129.
- [25] A. Azwinur, A. S. Ismy, R. Nanda, and F. Ferdiansyah, "Pengaruh arus pengelasan SMAW terhadap kekuatan sambungan las double lap joint pada material AISI 1050," *Journal of Welding Technology*, vol. 2, no. 01, Jun. 2020, doi: 10.30811/jowt.v2i1.1833.
- [26] Wiryosumarto, Harsono, and Toshie Okumura. "Teknologi Pengelasan Logam," Jakarta: Pt Pradnya Paramita, 2000.
- [27] Sonawan, Hery, and Rochim Suratman. "Pengantar untuk memahami proses pengelasan logam," Bandung: Alfabeta, 2006.
- [28] M. R. G. Firmansyah, S. Solichin, and R. P. Puspitasari, "Analisis Kecepatan Putar, Durasi Gesek dan Tekanan terhadap Kekuatan Tarik Hasil Pengelasan Gesek (Friction Welding)," *Jurnal Teknik Mesin Dan Pembelajaran*, vol. 1, no. 2, p. 1, Feb. 2019, doi: 10.17977/um054v1i2p1-5.
- [29] I. Sukmana 2 and Teknik Mesin Universitas Udayana, "Pengaruh waktu kontak terhadap kualitas sambungan hasil las gesek (Friction Welding) Magnesium AZ-31," *Jurnal Energi Dan Manufaktur*, pp. 4–7, Mar. 2017, [Online]. Available: <http://ojs.unud.ac.id/index.php/jem>
- [30] B. Luwar Sanyoto, N. Husodo, S. B. Setyawati, M. Mursid, and Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya-Indonesia, "Penerapan Teknologi Las Gesek (Friction Welding) Dalam Proses Penyambungan Dua Buah Pipa Logam Baja Karbon Rendah," *Jurnal Energi Dan Manufaktur*, vol. Vol.5, no. No.1, pp. 1–97, Oct. 2012.
- [31] N. Husodo, B. L. Sanyoto, S. B. Setyawati, and M. Mursid, "Penerapan Teknologi Las Gesek (Friction Welding) dalam Rangka Penyambungan Dua Buah Logam Baja Karbon St41 pada Produk Back Spring Pin," *Jurnal Energi Dan Manufaktur*, vol. Vol.6, no. No.1, pp. 1–94, Apr. 2013.
- [32] E. B. Santoso, Y. S. Irawan, and E. Sutikno, "Pengaruh Sudut Chamfer Dan Gaya Tekan Akhir terhadap Kekuatan Tarik Dan Porositas Sambungan Las Gesek Pada Paduan Al-Mg-Si.," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 3, no. 1, pp. 293–298, Jan. 2012, [Online]. Available: <https://rekayasamesin.ub.ac.id/index.php/rm/article/download/152/148>

- [33] M. Nasoha, Imran, and P3M Politeknik Negeri Bengkalis, “Pengaruh Variasi Tekanan Torsi terhadap Uji Kekerasan Brinell Dan Uji Mikrostruktur Pada Aluminium 6061 Menggunakan Metode Friction Welding,” *Jurnal Inovtek Seri Mesin*, vol. 1–1, pp. 27–31, Jul. 2024, [Online]. Available: <http://ejournal.polbeng.ac.id/index.php/ISM>
- [34] D. P. Kosasih, H. D. Nugraha, and H. Susanto, “Analisis Kekuatan Tarik dan Cacat Porositas pada Friction Welding Logam (FE, AL & FE-AL),” *Jurnal Mettek: Jurnal Ilmiah Nasional dalam Bidang Ilmu Teknik Mesin*, vol. 6, no. 2, p. 93, Nov. 2020, doi: 10.24843/mettek.2020.v06.i02.p03.
- [35] L. M. Alves, C. M. A. Silva, and P. A. F. Martins, “End-to-end joining of tubes by plastic instability,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 214, no. 9, pp. 1954–1961, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.04.011.
- [36] M. Sahin, H. E. Akata, and K. Ozel, “An experimental study on joining of severe plastic deformed aluminium materials with friction welding method,” *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 29, no. 1, pp. 265–274, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.matdes.2006.11.004.
- [37] P. Sammaiah, A. Suresh, and G. R. N. Tagore, “Mechanical properties of friction welded 6063 aluminum alloy and austenitic stainless steel,” *Journal of Materials Science*, vol. 45, no. 20, pp. 5512–5521, May 2010, doi: 10.1007/s10853-010-4609-y.
- [38] Y. Chapke and D. N. Kamble, “Effect of friction-welding parameters on the tensile strength of AA6063 with dissimilar joints,” *Frattura Ed Integrità Strutturale*, vol. 16, no. 62, pp. 573–584, Sep. 2022, doi: 10.3221/igf-esis.62.39.
- [39] Y. Chapke, D. Kamble, and S. Md. S. Shaikh, “Friction welding of Aluminium Alloy 6063 with copper,” *E3S Web of Conferences*, vol. 170, p. 02004, Jan. 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202017002004.
- [40] X. Zhu *et al.*, “Effect of Rotation Speed on Microstructure and Mechanical Properties of Continuous Drive Friction Welded Dissimilar Joints of 6061-T6 Al and Copper,” *Metals*, vol. 12, no. 7, p. 1173, Jul. 2022, doi: 10.3390/met12071173.
- [41] M. Kimura, K. Suzuki, M. Kusaka, and K. Kaizu, “Effect of friction welding condition on joining phenomena and mechanical properties of friction welded joint between 6063 aluminium alloy and AISI 304 stainless steel,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 26, pp. 178–187, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.jmapro.2017.02.008.

- [42] A. R. Romadhan, A. W. Nugroho, T. Suwanda, and R. Wilza, “Sifat Tarik dan Struktur Mikro Sambungan Las Gesek Tak Sejenis Baja-Tembaga,” *JMPM (Jurnal Material Dan Proses Manufaktur)*, vol. 3, no. 1, Jan. 2019, doi: 10.18196/jmpm.3133.
- [43] N. A. Sutisna, “Rancang Bangun Mesin Uji Universal Untuk Pengujian Tarik dan Tekuk Bertenaga Hidrolik,” *Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics*, vol. 6, no. 1, p. 32, Apr. 2021, doi: 10.33021/jmem.v6i1.1481.
- [44] R. S. Chandel, et al., “Friction welding of Metals, *Journal of Materials Processing Technology*,” vol. 72, Issues 1–3, pp. 101-109, 1997.
- [45] ASTM E8-E8M, “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials,” ASTM International, 2022.
- [46] Jurusan Teknik Mesin Universitas Sam Ratulangi Manado, “Uji Kekerasan Dengan Menggunakan Alat Microhardness Vickers Pada Berbagai Jenis Material Teknik,” *Jurnal Tekno Mesin*, vol. 5, no. 1, pp. 21–23, Oct. 2018.
- [47] ASTM E92-17, ‘Standard Test Methods for Vickers Hardness and knoop Harndess of Metallic Materials,’ ASTM International, 2017.
- [48] ASM Handbook, “Volume 9: Metallography and Microstructures, ASM International,” ISBN: 978-0871707062. Dec. 2004.
- [49] H. Purwanto, M. Dzulfikar, I. Syafaat, S. Imanu, and N. Kholis, “Effects Of Pressure In Continuous Drive Friction Welding On Aisi 304 and A36,” *MM Science Journal*, vol. 2020, no. 4, pp. 4138–4142, Nov. 2020, doi: 10.17973/mmsj.2020_11_2020054.
- [50] P. Neeraja, A. K. Senapati, S. Moora, N. D. Borra, and R. K. Kottala, “Experimental analysis and optimization of friction welding parameters for joining dissimilar materials through design of experiments,” *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, Apr. 2024, doi: 10.1007/s12008-024-01823-0.
- [51] V. Milašinović *et al.*, “Continuous Drive Friction Welded Al/Cu Joints Produced Using Short Welding Time, Elevated Rotational Speed, and High Welding Pressures,” *Materials*, vol. 17, no. 13, p. 3284, Jul. 2024, doi: 10.3390/ma17133284.
- [52] A. Purnomo, J. T. Mesin, and P. N. Semarang, “Struktur Mikro Sambungan *Friction Welding* Antara Bahan Paduan Tembaga Dan Paduan Aluminium Akibat Waktu Tekanan Berbeda,” *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 10, no. 3, Apr. 2016, doi: 10.32497/rm.v10i3.205.

- [53] H. Firmanto, S. Candra, and M. A. Hadiyat, "Rotary friction welding of 304 stainless steel: parametric study, mechanical properties, and microstructure of the joint," *Jurnal POLIMESIN*, vol. 22, no. 2, p. 191, Apr. 2024, doi: 10.30811/jpl.v22i2.4978.

LAMPIRAN A
PERHITUNGAN

Lampiran A. Contoh Perhitungan

1. Burn Off Length (ΔL)

$$L_0 - L_1 = \Delta L$$

Ket :

L_0 : Panjang Awal

L_1 : Panjang Akhir

ΔL : Burn Off Length

Contoh Perhitungan:

Sample pada Tabel 4.1 no 1 : 140 mm – 125,4 mm : 14,6 mm

2. Flash (V)

$$V = \pi r^2 \times \Delta L$$

Ket:

V : Volume tabung

π : nilai 3,14

r : jari jari lingkaran

ΔL : burn off length

Contoh perhitungan:

$$V = 3,14 \times 6^2 \times 14,6$$

$$V = 1650,38 \text{ mm}^3$$

3. Kekuatan Tarik (MPa)

a.
$$\sigma = \frac{F}{A}$$

b.
$$A = \pi \times (D_0 \div 2)^2$$

Ket:

F = Gaya yang diterima (dapat dilihat pada lampiran B.6)

A = Alas pada sampel (dapat dilihat pada lampiran B.5)

π = nilai 3,14

D_0 = Diameter awal sampel

Contoh perhitungan:

$$A = 3,14 \times (11,91 \div 2)^2$$

$$A=111,351 \text{ mm}^2$$

$$\text{MPa}=\frac{8,8 \times 1000}{111,351}$$

$$\text{MPa}= 79,0$$

4. Kalibrasi bar ke *newton*

a. Interpolasi

$$y(n_x)= n_1 + \frac{(n_x-n_1)}{(n_2 -n_1)} \times (n_2 - n_1)$$

ket :

n_1 dan n_2 : titik data yang diketahui

n_x : nilai yang ingin diinterpolasi

y : hasil interpolasi

Contoh perhitungan

$$y(80)=435,5+ \frac{(80-15)}{(30-15)} \times (2116,7- 435,5)$$

$$80 \text{ bar} = 7730 \text{ N}$$

$$y(100)=435,5+ \frac{(100-15)}{(30-15)} \times (2116,7- 435,5)$$

$$100 \text{ bar} = 9710 \text{ N}$$

5. Kalibrasi *newton* ke Mpa \approx (P)

$$P= \frac{F}{A}$$

Ket

P = Tekanan yang dihasilkan

F = Gaya hasil ekstrapolasi

A = Diameter batang hidrolik (113,0972 mm²)

Contoh perhitungan

$$P= \frac{2116,7500}{113,0972}$$

$$P = 18,7161 \text{ (19 MPa)}$$

6. Rumus presentase efisiensi kekuatan tarik

$$e (\%): \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_0} \right) \times 100\%$$

Ket

σ_1 = Data hasil uji tarik

σ_0 = Data base metal uji tarik

Contoh perhitungan :

- a. Efisiensi nilai tertinggi dari pengujian tarik

$$e \% = \frac{123,7 \text{ MPa}}{227 \text{ MPa}} \times 100\%$$

$$= 54,47 \%$$

7. Rumus presentase efesiensi kekuatan tarik

$$e (\%): \left(\frac{HVN_1}{HVN_0} \right) \times 100\%$$

Ket

HVN_1 = Data hasil uji kekerasan

HVN_0 = Data base metal uji kekerasan

Contoh perhitungan :

- a. Efisiensi nilai tertinggi dari pengujian kekerasan

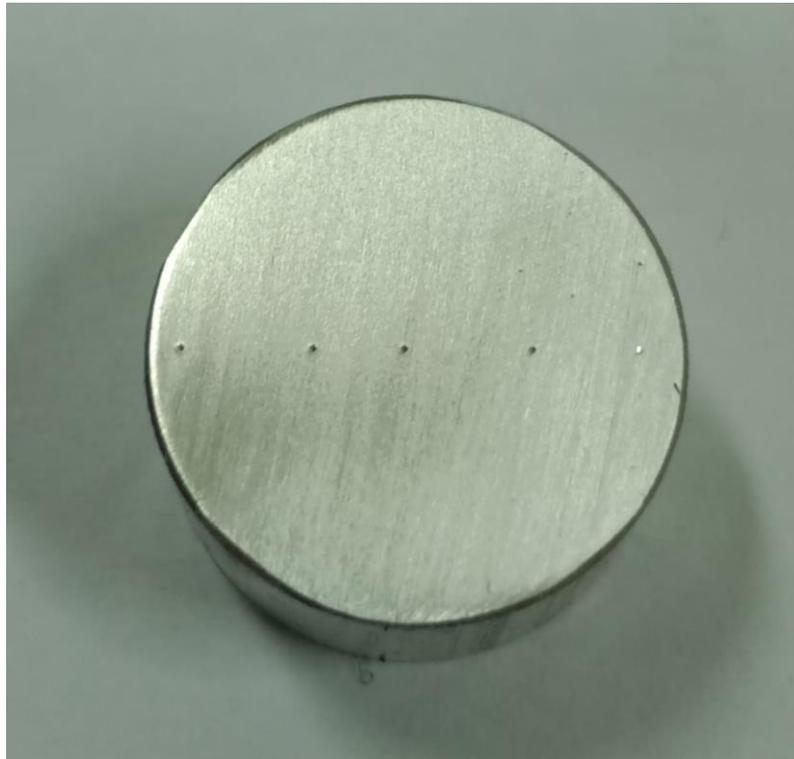
$$e \% = \frac{88,2 \text{ HVN}}{83 \text{ HVN}} \times 100\%$$

$$= 106,27 \%$$

LAMPIRAN B
DATA PENELITIAN

Lampiran B. Data Penelitian

B.1 Kekerasan *Base Material* Aluminium 6063



Frank findest
HV 3 kgf



NO.

1.	84,1
2.	82,8
3.	84,1
4.	83,5
5.	80,3
	<hr/>
	82,96

B.2 Komposisi Material Tembaga



LABORATORIUM TEKNOLOGI KEKUATAN STRUKTUR
BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL
 Kawasan Puspiptek Gd. 220, Setu, Tangerang Selatan 15314,
 web: www.brin.go.id

Chemical Result

Probe Nr. / sample ID : round bar Cu Grundwerkstoff / material :

Kunde / customer : Agus Suhartono Abmessung / dimension :

Kom.-Nr. / commission : Zusatzwerkstoff / filler metals :

Labor Nr. / lab-no. : Wärmebehandlung / heat treatment :

PTQ-Nr. / PTQ-no. : Schmelze-Nr. / heat-no. :

Spektralanalyse PMI-MASTER-Pro Werkstoff / grade :

	Cu	Zn	Pb	Sn	Mn	Fe	Ni	Si
1	99.8	0.0527	< 0.200	0.0235	0.0070	0.0089	0.0126	< 0.0040
2	99.7	0.0449	< 0.200	0.0209	0.0067	0.0080	0.0145	0.0057
3	99.7	0.0357	< 0.200	0.0242	0.0064	0.0110	0.0172	0.0051
Ave	99.7	0.0444	< 0.200	0.0229	0.0067	0.0093	0.0147	0.0040

	Mg	Cr	Al	As	Be	Ag	Co	Bi
1	< 0.0005	0.0020	< 0.0010	0.0278	< 0.0010	0.0048	< 0.0020	0.0097
2	< 0.0005	0.0016	0.0013	0.0318	< 0.0010	0.0052	0.0037	0.0087
3	< 0.0005	0.0015	0.0033	0.0317	< 0.0010	0.0052	< 0.0020	0.0103
Ave	< 0.0005	0.0017	0.0018	0.0304	< 0.0010	0.0051	< 0.0020	0.0096

	Cd	Zr	Se	Ti
1	< 0.0020	< 0.0010	0.0092	< 0.0010
2	< 0.0020	< 0.0010	0.0078	< 0.0010
3	< 0.0020	< 0.0010	0.0104	< 0.0010
Ave	< 0.0020	< 0.0010	0.0091	< 0.0010

Ort / town

Datum / date
2/29/2024

Prüfer / tester
Aswandi

Sachverständiger / engineer
Tirta

B.3 Komposisi Material Aluminium 6063



LABORATORIUM TEKNOLOGI KEKUATAN STRUKTUR
BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL
 Kawasan Puspiptek Gd. 220, Setu, Tangerang Selatan 15314,
 web: www.brin.go.id

Chemical Result

Probe Nr. / sample ID : patahan Al uji tarik	Grundwerkstoff / material : Al alloy
Kunde / customer : Khotib	Abmessung / dimension :
Kom.-Nr. / commision :	Zusatzwerkstoff / filler metals :
Labor Nr. / lab-no. :	Wärmebehandlung / heat treatment :
PTQ-Nr. / PTQ-no. :	Schmelze-Nr. / heat-no. :

Spektralanalyse PMI-MASTER-Pro Werkstoff / grade :

	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr
1	98.7	0.521	0.173	0.0072	0.0024	0.524	< 0.0150	0.0069
2	98.3	0.576	0.199	0.0091	0.0093	0.517	0.0601	0.0135
3	98.6	0.502	0.186	0.0051	0.0022	0.543	0.0483	0.0012
Ave	98.5	0.533	0.186	0.0071	0.0046	0.528	0.0361	0.0072

	Ni	Ti	Be	Ca	Pb	Sn	Sr	V
1	< 0.0050	0.0187	< 0.0010	< 0.0010	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0010	0.0098
2	0.0211	0.0189	< 0.0010	< 0.0010	0.0082	0.0700	< 0.0010	0.0126
3	0.0096	0.0144	< 0.0010	< 0.0010	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0010	0.0074
Ave	0.0113	0.0174	< 0.0010	< 0.0010	< 0.0050	0.0244	< 0.0010	0.0099

	Bi	Zr	B	Ga	Cd	Co	Ag	In
1	0.0180	0.0023	0.0052	0.0100	0.0097	0.0034	0.0039	< 0.0050
2	0.0632	0.0035	0.0055	0.0123	0.0203	0.0262	0.0082	< 0.0050
3	0.0318	< 0.0020	0.0050	0.0089	0.0111	0.0101	0.0041	< 0.0050
Ave	0.0377	< 0.0020	0.0052	0.0104	0.0137	0.0133	0.0054	< 0.0050

	Ce	Hg	La
1	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050
2	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050
3	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050
Ave	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050

Ort / town

Datum / date
8/30/2023

Prüfer / tester
Aswandi

Sachverständiger / engineer

B.4 Data Uji kekerasan

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	65,5	60	60	48	53	50	52	42	52
2	57	54	58	50	52	47	50	44	48
3	55	52,5	54	54	53	46	49	56	54
4	60	51,5	50	60	56	45	49	57	56
5	88,2	62	85,8	65	60	60	58	60	65
6	92	98	88,9	83	90	89	85	82	85
7	94	101	92	88	93	94	90	85	90
8	95	107	93,5	93	96	95	92	89	93
9	97,5	111	97,6	96	101	98	93	92	95

Alat: Furnace 1200°C
 Kulkas: 835 840 843
 Kalibrasi: 842 HV
 Bahan: 248A
 NIZAR



Hasil Sampel

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	65,5	60	60	48	53	50	52	42	52
2.	57	54	58	50	52	47	50	44	48
3.	55	52,5	54	54	53	46	49	56	54
4.	60	51,5	50	60	56	45	49	57	56
5.	88,2	62	85,8	65	60	60	58	60	65
6.	92	98	88,9	83	90	89	85	82	85
7.	94	101	92	88	93	94	90	85	90
8.	95	107	93,5	93	96	95	92	89	93
9.	97,5	111	97,6	96	101	98	93	92	95

B.5 Data Sebelum Uji Tarik



BRIN
BADAN RISET
DAN INOVASI NASIONAL

BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL
KEDEPUTIAN BIDANG INFRASTRUKTUR RISET DAN INOVASI
DIREKTORAT PENGELOLAAN LABORATORIUM, FASILITAS RISET,
DAN KAWASAN SAINS TEKNOLOGI
LABORATORIUM KEKUATAN STRUKTUR
KAWASAN PUSPIPTEK Gd. 220 SETU - TANGERANG SELATAN 15314 BANTEN
Telp. 08159085404 Email : lab.tks@brin.go.id

FORMULIR PENGUJIAN TARIK
TANGGAL :

No.	NAMA BENDA UJI	DIMENSI			PANJANG AWAL Lo (mm)	PERUBAHAN PANJANG ΔL (mm)	GAYA YIELD Fy (kgf/N/kN)*	GAYA MAKSIMUM Fm (kgf/N/kN)*	KODE / MEREK	KETERANGAN
		1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)						
1	A1-CU 1	11,51								30-60-1900
2	" 2	11,71								30-80-1900
3	" 3	11,87								30-100-1900
4	" 4	11,77								30-60-2100
5	" 5	11,83								30-80-2100
6	" 6	11,88								30-100-2100
7	" 7	11,75								30-60-2300
8	" 8	11,84								30-80-2300
9	" 9	11,83								30-100-2300
10	" 10	11,87								

*) Coret yang tidak perlu

PERALATAN UJI :

PELAKSANA :

1.

2.

CUSTOMER : NIZZAR, S

NO. ID :

STANDAR :

TEMPERATUR :

SAKSI :

1.

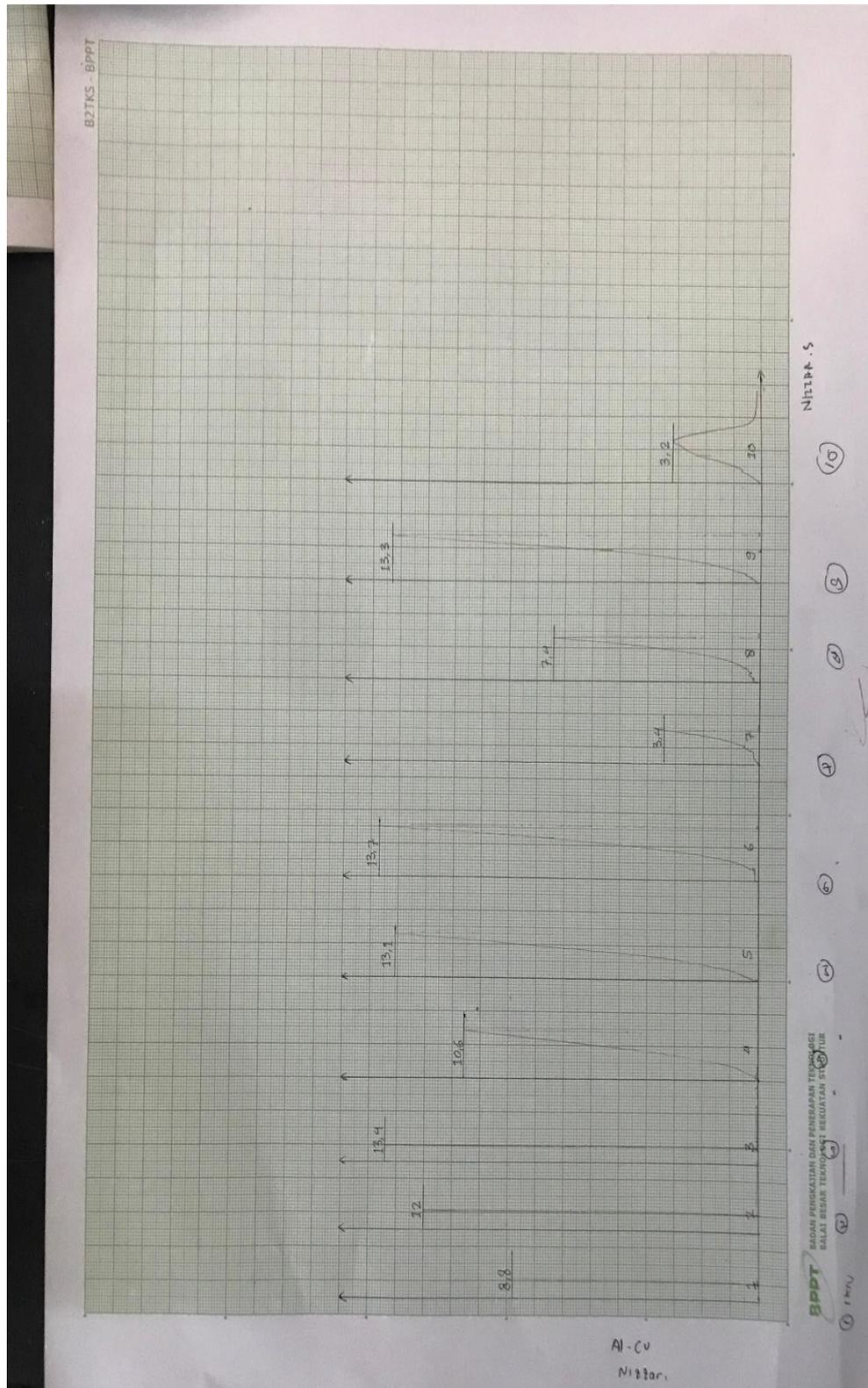
2.

3.

Hasil uji ini hanya representatif dari spesimen yang diuji, di luar spesimen tersebut bukan tanggung jawab Laboratorium Kekuatan Struktur.

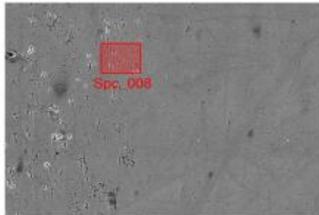
F-TKS-LP-14

B.6 Data Sesudah Uji Tarik

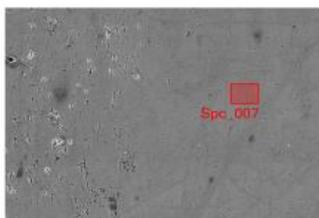
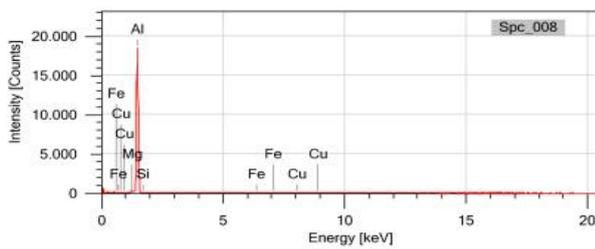


B.7 Data SEM (scanning electron microscopy)

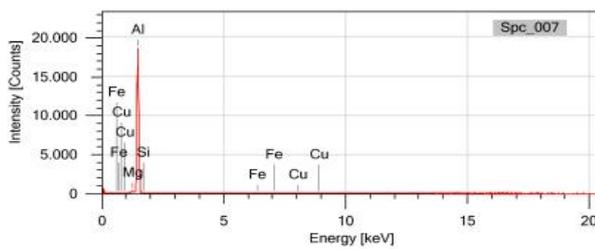
JSM IT – 200 LA JEOL

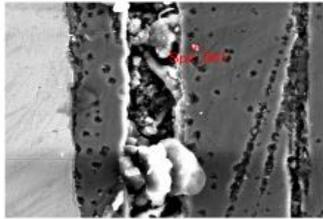


ElementLine	Mass%	Atom%
Mg K	0.55±0.03	0.61±0.04
Al K	98.52±0.36	98.66±0.36
Si K	0.60±0.06	0.57±0.06
Fe K	0.26±0.04	0.12±0.02
Cu K	0.08±0.05	0.03±0.02
Total	100.00	100.00
Spc_008	Fitting ratio 0,0621	

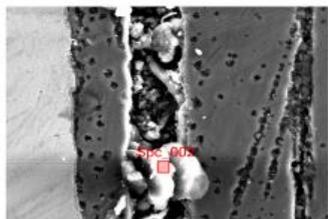
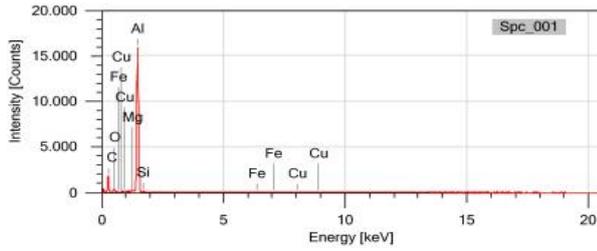


ElementLine	Mass%	Atom%
Mg K	0.55±0.03	0.61±0.04
Al K	98.97±0.36	99.01±0.36
Si K	0.33±0.05	0.31±0.05
Fe K	0.12±0.04	0.06±0.02
Cu K	0.03±0.05	0.01±0.02
Total	100.00	100.00
Spc_007	Fitting ratio 0,0567	

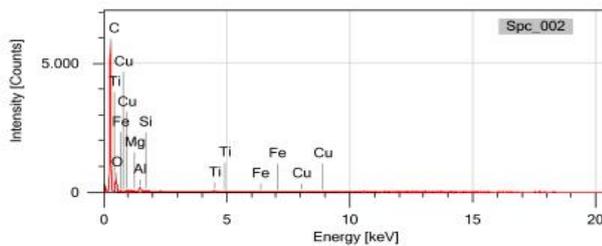


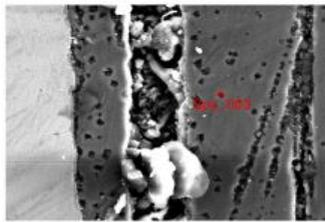


ElementLine	Mass%	Atom%
C K	55,74±0,30	72,92±0,39
O K	3,84±0,11	3,77±0,10
Mg K	0,21±0,02	0,13±0,01
Al K	39,04±0,15	22,74±0,09
Si K	0,46±0,02	0,25±0,01
Fe K	0,29±0,02	0,08±0,01
Cu K	0,44±0,04	0,11±0,01
Total	100,00	100,00
Spc_001	Fitting ratio 0,0399	

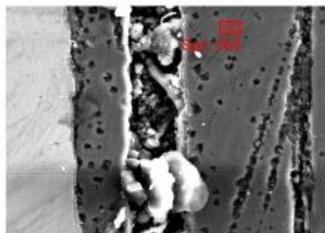
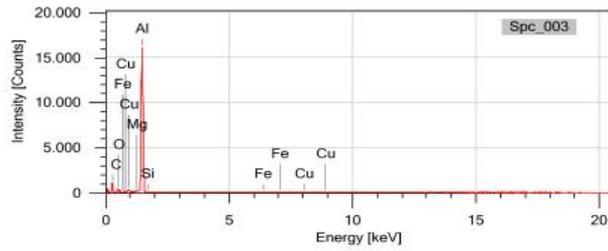


ElementLine	Mass%	Atom%
C K	79,55±0,24	84,68±0,26
O K	18,17±0,37	14,52±0,30
Mg K	0,06±0,02	0,03±0,01
Al K	0,94±0,04	0,45±0,02
Si K	0,04±0,02	0,02±0,01
Ti K	0,65±0,04	0,17±0,01
Fe K	0,30±0,04	0,07±0,01
Cu K	0,29±0,05	0,06±0,01
Total	100,00	100,00
Spc_002	Fitting ratio 0,0456	

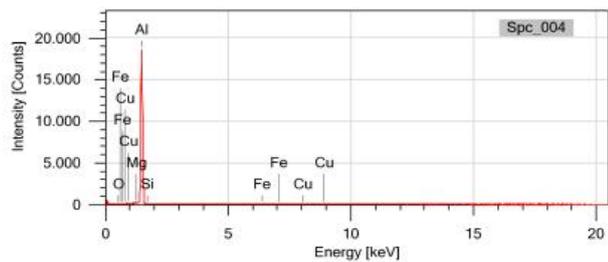


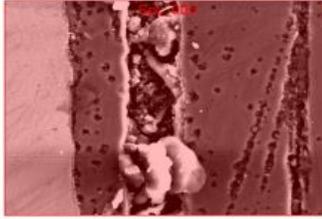


Element	Line	Mass%	Atom%
C	K	45.94±0.32	64.52±0.45
O	K	5.09±0.12	5.37±0.13
Mg	K	0.25±0.02	0.17±0.01
Al	K	47.09±0.18	29.44±0.11
Si	K	0.20±0.02	0.12±0.01
Fe	K	0.09±0.02	0.03±0.01
Cu	K	1.34±0.07	0.36±0.02
Total		100,00	100,00
Spc_003		Fitting ratio 0,0411	

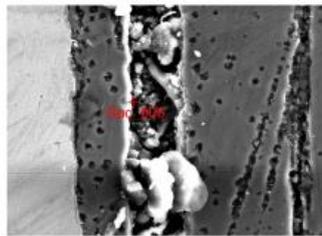
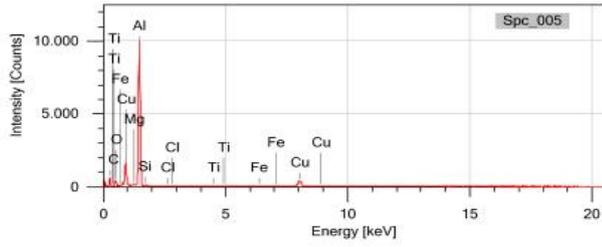


Element	Line	Mass%	Atom%
O	K	1.26±0.07	2.12±0.11
Mg	K	0.45±0.03	0.50±0.04
Al	K	96.40±0.35	96.27±0.35
Si	K	0.54±0.06	0.52±0.05
Fe	K	0.20±0.04	0.10±0.02
Cu	K	1.14±0.10	0.48±0.04
Total		100,00	100,00
Spc_004		Fitting ratio 0,0518	

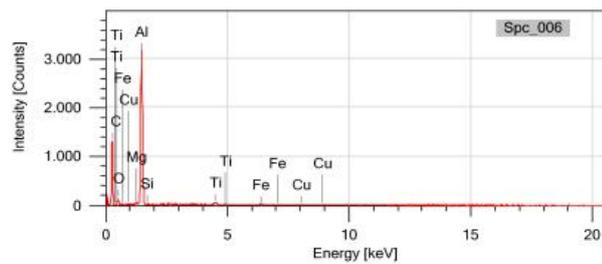




ElementLine	Mass%	Atom%
C	33,41±0,32	54,81±0,53
O	5,28±0,13	6,50±0,16
Mg	0,28±0,03	0,23±0,02
Al	45,70±0,23	33,38±0,17
Si	0,60±0,04	0,42±0,03
Cl	0,22±0,02	0,12±0,01
Ti	0,22±0,02	0,09±0,01
Fe	0,37±0,04	0,13±0,01
Cu	13,93±0,25	4,32±0,08
Total	100,00	100,00
Spc_005		Fitting ratio 0,0446



ElementLine	Mass%	Atom%
C	70,12±0,43	82,96±0,51
O	5,01±0,22	4,45±0,19
Mg	0,10±0,02	0,06±0,01
Al	22,66±0,20	11,94±0,10
Si	0,14±0,03	0,07±0,01
Ti	0,77±0,05	0,23±0,02
Fe	0,79±0,07	0,20±0,02
Cu	0,40±0,07	0,09±0,02
Total	100,00	100,00
Spc_006		Fitting ratio 0,0721



LAMPIRAN C
GAMBAR ALAT DAN BAHAN

LAMPIRAN C. Gambar Alat dan Bahan



Gambar C.1 Bahan Aluminium dan Tembaga



Gambar C.2 Ampelas



Gambar C.3 Aquades



Gambar C.4 Etanol



Gambar C.5 gelas beker



Gambar C.6 Gelas ukur



Gambar C.7 Gerinda



Gambar C.8 Kain *Polish*



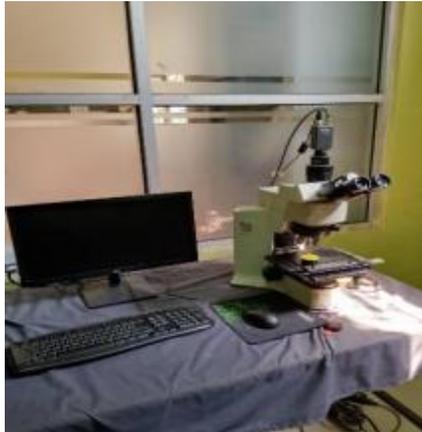
Gambar C.9 Mesin *Grinding*



Gambar C.10 mesin bubut



Gambar C.11 Mesin Uji Kekerasan



Gambar C.12 Mikroskop Optik



Gambar C.13 Pasta *Polish*



Gambar C.14 Pipet



Gambar C.15 Tisu



Gambar C.16 Alat *friction welding*



Gambar C.17 Alat uji tarik