

**PENGARUH *FRICTION PRESSURE* DAN *ROTATION SPEED*
TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR
MIKRO PADA SAMBUNGAN Al-Cu DENGAN
METODE *FRICTION WELDING***

SKRIPSI

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



Oleh:

MOCH ROZAN WALIYYUDIN

3334180037

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA**

2024

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH *FRICTION PRESSURE* DAN *ROTATION SPEED*
TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR
MIKRO PADA SAMBUNGAN *Al-Cu* DENGAN
METODE *FRICTION WELDING***

SKRIPSI

Dibuat untuk memnuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari jurusan
Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Disetujui untuk Jurusan Teknik Metalurgi oleh

Pembimbing 1



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

Pembimbing 2



Dr. Ir. Kirman M.MT
196510291993011001

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH *FRICTION PRESSURE* DAN *ROTATION SPEED*
TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR
MIKRO PADA SAMBUNGAN *Al-Cu* DENGAN
METODE *FRICTION WELDING***

Disusun dan diajukan oleh
Moch Rozan Waliyyudin
3334180037

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal
5 Desember 2024

Susunan Dewan Penguji

Tanda Tangan

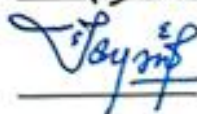
Penguji I : **Yeni Muriani Zulaida S.T., M.T**



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



Penguji III : **Suryana, S.T., M.Si**



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 *Friction Pressure* dan *Rotation Speed*
Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Pada
Sambungan *Al-Cu* Dengan Metode *Friction*
Welding

Nama Mahasiswa : Moch Rozan Waliyyudin
Nim : 3334180037
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 dipertanggungjawabkan. 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, 25 November 2024



Moch Rozan Waliyyudin
NIM. 3334180037

ABSTRAK

Pengaruh *Friction pressure* Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Pada Sambungan Al-Cu Dengan Metode *friction welding* bertujuan untuk menjelaskan bagaimana (*friction pressure*) mempengaruhi sifat mekanik dan struktur mikro pada sambungan antara aluminium 6063 (Al) dan tembaga (Cu) menggunakan teknik (*Friction welding*). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh *friction pressure*, *rotation speed*, dan bagaimana pengaruh yang terjadi saat proses *Friction welding* terhadap struktur mikro yang terdapat pada hasil las penelitian ini dimulai dengan tinjauan pustaka tentang sifat-sifat kimia dan fisika dari logam Al dan Cu, sedangkan prinsip-prinsip dasar (*friction welding*). Kemudian dilakukan eksperimen dengan menggunakan metode (*friction welding*) dengan variasi (*Friction pressure*) 18 MPa, 31 MPa dan 42 MPa dan *rotation speed* 2300 rpm, 2100 rpm dan 1900 rpm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *friction welding* signifikan mempengaruhi kekuatan tarik dan kekerasan sambungan pada hasil pengelasan Al-Cu untuk hasil kekuatan tarik pada penelitian ini memiliki nilai sebesar 113,7 MPa untuk kekuatan paling tinggi dan 67,8 MPa untuk kekuatan paling rendah sedangkan kekerasan sambungan menunjukan angka 70 HV untuk hasil sambungan yang paling keras dan 50 HV untuk sambungan yang paling rendah. Analisa struktur mikro juga menunjukkan perubahan yang signifikan pada struktur mikro setelah proses pengelasan gesek. Hal ini menandakan bahwa kontrol variabel *friction pressure* dalam *friction welding* perlu di teliti yang mencerminkan kualitas sambungan logam Al-Cu yang disambungkan menggunakan proses *friction welding*. Dengan demikian, Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam meningkatkan pemahaman tentang efektivitas penggunaan metode *friction welding* dalam menyambung logam paduan dan logam non paduan seperti Al-Cu, serta memberikan rekomendasi untuk meningkatkan kinerja sambungan logam dalam aplikasi *industri particular* seperti *electrical applications*.

Kata Kunci: *Friction welding*, Aluminium 6063, Tembaga, *Mechanical Properties*, *Microstuctural*

ABSTRACT

The Effect of Friction Pressure on Mechanical Properties and Microstructure of Al-Cu Joints Using the Friction Welding Method aims to explain how (friction pressure) affects the mechanical properties and microstructure of the joint between aluminum 6063 (Al) and copper (Cu) using the (Friction Welding) technique. This study aims to determine the effect of friction pressure, rotation speed, and how the effect occurs during the Friction Welding process on the microstructure contained in the welding results. This study began with a literature review of the chemical and physical properties of Al and Cu metals, while the basic principles of (friction welding). Then an experiment was carried out using the (friction welding) method with variations of (Friction pressure) 18 MPa, 31 MPa and 42 MPa and rotation speed 2300 rpm, 2100 rpm and 1900 rpm. The results of the study indicate that friction welding significantly affects the tensile strength and hardness of the Al-Cu welding results for the tensile strength results in this study have a value of 113.7 MPa for the highest strength and 67.8 MPa for the lowest strength while the hardness of the joint shows a figure of 70 HV for the hardest joint results and 50 HV for the lowest joint. Microstructure analysis also shows significant changes in the microstructure after the friction welding process. This indicates that the control of the friction pressure variable in friction welding needs to be studied which reflects the quality of the Al-Cu metal joint connected using the friction welding process. Thus, this study provides an important contribution in improving the understanding of the effectiveness of the use of the friction welding method in connecting alloy and non-alloy metals such as Al-Cu, as well as providing recommendations for improving the performance of metal joints in particular industrial applications such as electrical applications.

Keyword: *Friction welding, Aluminium 6063, Tembaga, Mechanical Properties, Microstuctural*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas berkat limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Penyusunan tugas akhir ini dilaksanakan guna memenuhi persyaratan mata kuliah wajib di jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Penulis sangat amat menyadari, bahwasanya tanpa adanya bantuan dari berbagai pihak sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik dan benar.

Pada kesempatan kali ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak-pihak yang telah membantu, memberikan semangat kepada penulis, antara lain:

1. Bapak Abdul Aziz, S.T.,M.T.,Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Metalurgi, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
2. Ibu Andinnie Juniarsih, ST., MT. 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., MT selaku Dosen Pembimbing II Skripsi.
5. Kedua Orang Tua Saya Jajang Saputra Dan Neneng Kartika Candara yang telah membimbing saya, memberi dukungan, memberi motivasi, saran dan do'a selama perkuliahan
6. Rekan-rekan Teknik Metalurgi angkatan 18, Dan Rekan-rekan Seperjuangan Yang Berada Dikontrakan Keserangan

Sekian dari Penulis, semoga tugas akhir skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca, khususnya di bidang penelitian pengelasan.

Cilegon, 25 November 2024

Moch Rozan Waliyyudin

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Tembaga	7
2.2 Aluminium	9
2.2.1 Aluminium Murni	10
2.2.2 Aluminium Paduan	11
2.2.3 Aluminium 6063	13

2.3	Pengelasan.....	14
2.4	<i>Friction welding</i>	16
2.5	Pengujian Tarik	22
2.6	Pengujian Kekerasan.....	23
2.7	Analisa Struktur Mikro	24

BAB III METODE PENELITIAN

3.1	Diagram Alir	25
3.2	Alat dan Bahan.....	26
3.2.1	Alat-alat.....	26
3.2.2	Bahan-bahan.....	27
3.3	Prosedur Percobaan.....	27
3.3.1	Preparasi sampel.....	27
3.3.2	Proses <i>friction welding</i>	28
3.4	Karakterisasi Material	29
3.4.1	Pengamatan visual hasil sambungan.....	29
3.4.2	Pengujian tarik	29
3.4.3	Pengujian kekerasan.....	31
3.4.4	Pengujian metalografi	33
3.5	Karakterisasi awal.....	34

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Hasil pengujian komposisi kimia <i>Base Metal</i>	36
4.2	Pengamatan visual hasil lasan <i>friction welding</i>	37
4.3	Kekuatan tarik sambungan <i>friction welding</i>	42

4.4	Kekerasan hasil <i>friction welding</i>	46
4.5	<i>Microstructure friction welding</i> Al-Cu	50

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	Kesimpulan	56
5.2	Saran.....	57

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A CONTOH PERHITUNGAN	64
LAMPIRAN B DATA HASIL PENELITIAN	67
LAMPIRAN C GAMBAR ALAT DAN BAHAN	78

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1 Sifat Mekanik Logam Tembaga.....	9
Tabel 2.2 Sifat-Sifat fisik aluminium.....	11
Tabel 2.3 Sifat-sifat mekanik Aluminium.....	11
Tabel 2.4 Sifat Mekanik Aluminium	14
Tabel 2.5 Komposisi Kimia Aluminium 6063	14
Tabel 3.1 Komposisi Awal Material	34
Tabel 3.2 Kekuatan Tarik dasar Material	34
Tabel 3.3 Data konversi gaya yang digunakan pada alat <i>friction welding</i>	35
Tabel 4.1 Sambungan hasil <i>Friction welding</i> Al-Cu	38
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Tarik	43

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Berbagai proses untuk <i>dissimilar metal welding</i>	15
Gambar 2.2 Tampilan skema peralatan <i>friction welding</i>	19
Gambar 2.3 Kurva waktu-beban tipikal yang digunakan selama proses <i>friction welding</i>	20
Gambar 2.4 Skematis langkah dasar dalam proses <i>friction welding</i>	20
Gambar 2.5 Skematis proses <i>friction welding</i>	21
Gambar 2.6 Skema peralatan yang digunakan dalam uji tarik	23
Gambar 2.7 Pengujian kekerasan dengan metode Vickers	24
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	26
Gambar 3.2 Bagan proses <i>friction welding</i>	28
Gambar 3.3 Pengujian kekerasan dengan metode Vickers	31
Gambar 4.1 Gambar diagram <i>burn off length</i>	41
Gambar 4.2 Gambar diagram <i>Flash (mm³)</i>	41
Gambar 4.3 Gambar grafik hasil uji tarik terhadap <i>friction force</i>	43
Gambar 4.4 Gambar grafik hasil uji tarik terhadap <i>rotation Speed</i>	44
Gambar 4.5 (a) Grafik hasil uji kekerasan pada parameter kecepatan 2300 rpm (b) Grafik hasil uji kekerasan pada parameter kecepatan 2100 rpm (c) Grafik hasil uji kekerasan pada parameter kecepatan 1900 rpm	49
Gambar 4.6 Mikrostruktur sambungan <i>friction welding</i> dengan tekanan <i>friction</i> 18 MPa (a) 2300 rpm (b) 2100 rpm (c) 1900 rpm	51

Gambar 4.7 Mikrostruktur sambungan <i>friction welding</i> dengan tekanan <i>friction</i> 31 MPa (a) 2300 rpm (b) 2100 rpm (c) 1900 rpm	52
Gambar 4.8 Mikrostruktur sambungan <i>friction welding</i> dengan tekanan <i>friction</i> 42 MPa (a) 2300 rpm (b) 2100 rpm (c) 1900 rpm	54
B.1 kekerasan <i>base metal</i> aluminium 6063	68
B.2 Komposisi Material Tembaga	69
B.3 Komposisi Material Aluminium 6063	70
B.4 Skema Penyambungan Sampel.....	71
B.5 Data Uji kekerasan	71
B.6 Data sebelum uji Tarik	72
B.7 Data Sesudah Uji Tarik	73
B.8 Data SEM (<i>scanning electron microscopy</i>).....	74
Gambar C.1 Bahan Aluminium dan Tembaga	78
Gambar C.2 Ampelas	78
Gambar C.3 Aquades	78
Gambar C.4 Etanol.....	78
Gambar C.5 Gelas beker	78
Gambar C.6 Gelas ukur	79
Gambar C.7 Gerinda	79
Gambar C.8 Kain <i>polish</i>	79
Gambar C.9 Mesin <i>grinding</i>	79
Gambar C.10 Mesin bubut	79
Gambar C.11 Mesin uji kekerasan	79

Gambar C.12 Mikroskop <i>optic</i>	80
Gambar C.13 Pasta <i>polish</i>	80
Gambar C.14 Pipet	80
Gambar C.15 Tisu	80

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tembaga merupakan logam lunak yang banyak digunakan sejak dahulu kala karena memiliki kemampuan yang baik, daya tahan korosi, konduktor listrik dan panas yang tinggi, tembaga mempunyai sifat konduktivitas yang tinggi yaitu sebesar ($59,6 \times 10^6$ S/m) dan karena itu tembaga mempunyai sifat termal tertinggi kedua di antara semua logam murni. Tembaga banyak digunakan sebagai material penghantar listrik/kawat listrik.

Aluminium adalah logam yang ringan dengan berat jenis $2,7 \text{ gram/cm}^3$ setelah magnesium ($1,7 \text{ gram/cm}^3$) dan berilium ($1,85 \text{ gram/cm}^3$) atau sekitar $1/3$ dari berat jenis besi maupun tembaga. Konduktivitas listrik yang terdapat pada logam aluminium yaitu sebesar ($37,7 \times 10^6$ S/m). Selain itu juga aluminium memiliki sifat penghantar panas, memiliki sifat pantul sinar yang baik sehingga digunakan pula pada komponen mesin, alat penukar panas, cermin pantul, komponen industri kimia, komponen kelistrikan dll.

Pengelasan merupakan proses penyambungan antar logam dengan memanfaatkan tenaga listrik sebagai sumber panasnya. Ketika permukaan logam menjadi aktif, atom-atom dari logam secara alami melebur dengan atom-atom dari logam lainnya. Jika permukaan logam bersih dan rata, maka ketika logam didekatkan antara satu sama lain atau sampai bersentuhan, kedua logam tersebut

bisa tersambung karena tarik-menarik antara atom-atomnya tersebut. Akan tetapi dalam proses pengelasan dengan material Al-Cu untuk aplikasi kelistrikan terdapat beberapa masalah seperti sambungan yang mudah retak penyebab utama keretakan akibat terjadinya difusi hidrogen pada logam las, yang bisa terikat saat fluks mengisap uap air dari udara, akibatnya logam yang dilas dengan elektroda ini peka terhadap retak, sambungan pada Al-Cu yang mudah putus, dan aliran listrik tidak dapat mengalir sepenuhnya, pengelasan yang biasa digunakan untuk menyambung material Al-Cu adalah pengelasan seperti pengelasan *Resistance Welding* [1], *Arc Welding* [2], [3] dan *Solid State Welding* [3]. Salah satu metode dalam *Solid State Welding* adalah *Friction welding*.

Pengelasan gesek (*friction welding*) merupakan salah satu cara untuk memecahkan beberapa masalah di atas. *Friction welding* adalah penyambungan logam yang terjadi karena adanya panas yang ditimbulkan oleh tekanan atau gaya gesek akibat perputaran logam satu terhadap logam lain yang sesumbu [4]. Adapun kelebihan pada metode *friction welding* adalah sebagai berikut, kebersihan pada permukaan sambungan tidak diperlukan dikarenakan selama proses *friction welding* permukaan akan terkelupas dan terdeformasi ke bagian luar, tidak memerlukan logam pengisi, pelindung flux dan gas pelindung selama proses, tidak terdapat cacat akibat fenomena pencairan dan pembekuan, dimungkinkan untuk menyambung dua material logam yang berbeda. Selain itu juga *Friction welding* juga dapat menghemat material dan waktu untuk penyambungan dua material yang sama maupun berbeda [5].

Adapun parameter pada proses *friction welding* meliputi *rotation speed*, waktu gesek, tekanan gesek, *friction pressure* dan jenis benda yang disambung, menurut penelitian yang telah dilakukan oleh Winiczenko [6] mengatakan bahwa pengaruh *friction pressure* terhadap kekuatan tarik las meningkatkan kekuatan tarik dan seiring meningkatnya *friction pressure*. adapun fenomena yang sama dengan menggunakan logam *mild steel*, karena panas yang dihasilkan di bawah *friction pressure* meningkat maka *friction welding* mirip seperti pada saat pengerjaan perlakuan panas area logam las telah berkurang saat kondisi tempa panas meningkat. Itu bisa meningkatkan fasa *austenite* di zona las oleh karena itu kekuatan tarik ditemukan menurun ketika *upset force* meningkat kemudian kekuatan tarik mulai meningkat terutama karena deformasi yang diinduksi oleh regangan. *friction pressure* dan *rotation speed* berpengaruh terhadap kekuatan tarik. Dengan meningkatnya *friction pressure* dan kecepatan, kekuatan tarik juga meningkat. Namun, awalnya, kekuatan tarik menurun namun dengan meningkatnya *friction pressure* dari 18 MPa dan seterusnya, oleh sebab itu parameter yang digunakan pada penelitian kali ini terdiri dari variabel bebas dan variabel terikat dimana variabel terikat yaitu *friction pressure* dan *rotation speed* dan variabel bebas meliputi alat dan bahan.

Penelitian ini akan mengamati pengaruh *friction pressure* dan *rotation speed* terhadap sifat mekanik pada sambungan Al-Cu dan struktur mikro pada sambungan Al-Cu dengan metode *friction welding*. Salah satu contoh penggunaan sambungan antara Al dan Cu adalah konektor listrik atau sambungan *skin bimetal*, *connecting rod*, dan penangkal petir. Konektor elektrik merupakan suatu komponen

elektromekanikal yang berfungsi untuk menghubungkan suatu rangkaian elektronik ke rangkaian elektronik lainnya ataupun untuk menghubungkan suatu perangkat dengan perangkat lainnya [4]

1.2 Rumusan Masalah

Adapun permasalahan yang diangkat pada penelitian kali ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh variasi *friction pressure* pada proses pengelasan *friction welding* terhadap sifat mekanik material Al-Cu
2. Bagaimana pengaruh variasi *rotation speed* (rpm) pada proses pengelasan *friction welding* terhadap sifat mekanik material Al-Cu
3. Bagaimana pengaruh yang terjadi saat proses *friction welding* terhadap struktur mikro yang terdapat pada hasil las

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan pada penelitian kali ini adalah

1. Untuk menganalisa pengaruh variasi *friction pressure* pada proses pengelasan *friction welding* terhadap sifat mekanik material Al-Cu
2. Untuk menganalisa pengaruh variasi *rotation speed* (rpm) pada proses pengelasan *friction welding* terhadap sifat mekanik material Al-Cu
3. Untuk menganalisa pengaruh *Friction welding* terhadap struktur mikro pada hasil las

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian ini dapat mencapai tujuan yang diinginkan maka Batasan masalah yang diberikan adalah sebagai berikut:

1. Material yang digunakan untuk penelitian adalah Tembaga murni dan aluminium 6063.
2. Sampel yang digunakan berbentuk silinder pejal dengan diameter 12 mm dengan panjang 75 mm.
3. Kontak kedua benda kerja pada saat gesekan dan penempatan dianggap tidak terjadi *misalignment*.
4. Data yang diperlukan dalam penelitian *Friction welding* yaitu data *visualisasi* hasil lasan, uji tarik, uji kekerasan, dan uji struktur mikro.
5. Parameter yang digunakan pada penelitian ini yaitu *Friction pressure* sebesar 18 MPa, 31 MPa, dan 42, MPa dan *rotation speed* di kecepatan 1900 rpm, 2100 rpm, dan 2300 rpm .

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. 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.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Ambroziak, A. Lange, P. Białucki, W. Derlukiewicz, and E. Szymczak, “Comparison of properties of Al-Cu soldered and resistance welded joints,” *Welding Technology Review*, Vol. 92, No. 2, pp. 25–32, Mar. 2020.
- [2] T. Coetsee and F. De Bruin, “Chemical Interaction of Cr-Al-Cu Metal Powders in Aluminum-Assisted Transfer of Chromium in Submerged Arc Welding of Carbon Steel,” *Processes*, Vol. 10, No. 2, Feb. 2022.
- [3] J. P. Bergmann, F. Petzoldt, R. Schürer, and S. Schneider, “Solid-state welding of aluminum to copper - Case studies,” *Welding in the World*, Vol. 57, No. 4, pp. 541–550, Jul. 2013.
- [4] Y. Firmansyah and K. Sekaran Gunungpati Semarang, “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 (Juli 2021) Hal. 9-15.
- [5] K. Anam, A. Syuhri, and H. Sutjahjono, “pengaruh waktu tempa dan tekanan tempa terhadap sifat mekanik aisi 1045 pada proses friction welding,” *Jurnal stator*, Vol. 1 No. 1, Januari 2018.
- [6] R. Winiczenko, “Effect of friction welding parameters on the tensile strength and microstructural properties of dissimilar AISI 1020-ASTM A536 joints,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 84, No. 5–8, pp. 941–955, May 2016,
- [7] Nuriadi, M. Napitupulu dan N. Rahman, “Analisis logam tembaga (Cu) pada buangan limbah tromol (tailing) pertambangan poboya”, *Jurnal Akademika Kimia*, Vol 2, No. 2, 2013: 90-96.

- [8] U. Sukanto, D. Probowati, and A. Sudiyanto, “Proses Pengolahan dan Pemurnian Bijih Tembaga dengan Cara Konvensional dan Biomining”. Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia ‘Kejuangan’ 18 Maret 2015, ISSN 1693-4393.
- [9] G. E. Dieter, “Metallic Materials Specification Handbook,” *International Metallurgical Reviews*, Vol. 18, No. 4, pp. 191–191, 1973,
- [10] B. Rina, A. Safitri, and D. Lintang Pratama, “analisis kandungan mineral tembaga (cu) yang terdapat pada struktur batu tambang dengan metode atomic absorption spectrofotometer (AAS)”, *Jurnal Ilmiah IKIP Mataram* Vol. 5. No.2 ISSN:2355-6358.
- [11] “copper casting alloys” Copper Development Association Inc., 260 Madison Avenue, New York, NY 10016. 1994.
- [12] F. Dalla Torre, R. Lapovok, J. Sandlin, P. F. Thomson, C. H. J. Davies, and E. V. Pereloma, “Microstructures and properties of copper processed by equal channel angular extrusion for 1-16 passes,” *Acta Mater*, Vol. 52, No. 16, pp. 4819–4832, Sep. 2004,
- [13] Perrin. Walker and W. H.Tarn, *Handbook of metal etchants*. CRC Press, Los Angeles, California, 1991.
- [14] T. Surdia, dan S. Saito “Pengetahuan Bahan Teknik”, PT. Pradnya Paramita, Jakarta 13140.
- [15] Mardjuki, “Sifat kekerasan paduan Al-Cu dari hasil proses perlakuan panas penuaan (Aging)”, *Transmisi*, Vol.6 Edisi 1 Hal. 549 – 556.
- [16] M. S. Tahat, N. A. Emira, and H. T. Mohamad, “Study of the Mechanical Properties of Heat Treated 6063 Aluminum Alloy,” *Recent Patents on Mechanical Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 145–148, Jun. 2010,

- [17] Md. Abdul Karim and Y.-D. Park, "A Review on Welding of Dissimilar Metals in Car Body Manufacturing," *Journal of Welding and Joining*, Vol. 38, No. 1, pp. 8–23, Feb. 2020,
- [18] E. Akca and A. Gürsel, "Solid State Welding and Application in Aeronautical Industry," *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, Vol. 4, No. 1, Feb. 2016,
- [19] M.R. Gita Firmansyah, Solichin, dan Rr. Poppy 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, Hal 1-5 Des 2018
- [20] B. S. Yilba A, A. Z. Ahin, N. Kahraman, and A. Z. A1-Garni, "Friction welding of St-A1 and A1-Cu materials" *Journal of Materials Processing Technology* 49 (1995) 431-443, 1995.
- [21] S. Deokar, "A Review Paper on Rotary Friction Welding Design and Analysis of Solar Structural and Mountings for Solar Panel View project Design And Structural Analysis Of Heavy Duty Industrial Blower Casing Using FEA View project," *International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering*, Vol 5 Issue 6, 2017.
- [22] M. Maalekian, "Friction welding - Critical assessment of literature", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol.12 No.8, Nov. 2007.
- [23] H. Ghari, A. Taherizadeh, B. Sadeghian, B. Sadeghi, and P. Cavaliere, "Metallurgical characteristics of aluminum-steel joints manufactured by rotary friction welding: A review and statistical analysis," *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 30, pp. 2520–2550, May 2024.

- [24] A. Purnomo, “struktur mikro sambungan friction welding antara bahan paduan tembaga dan paduan aluminium akibat waktu tekanan berbeda”, *Mechanical Engineering Department*, Vol.10 No.3, 2015
- [25] R. Denti Salindeho, J. Soukota, R. Poeng, J. Teknik, M. Universitas, and S. Ratulangi, “pemodelan pengujian tarik untuk menganalisis sifat mekanik material.” *Jurnal poros teknik mesin*, Vol.2 NO.2. 2013
- [26] E. Koswara and H. Budiman, “perancangan mesin uji tarik untuk spesimen aluminium dengan kapasitas 5 ton”, *Jurnal J-Ensitem: Vol 02|No. 02, Mei 2016.*
- [27] F.A.Rauf, F.P. Sappu, A.M.A. Lakat “Uji kekrasan dengan menggunakan alat microhardness vicker pada berbagai jenis material teknik”, *Jurnal tekno mesin*, Vol.5 No.1 Okt 2018
- [28] M. Feby Kumayasari, “Studi Uji Kekerasan Rockwell Superficial VS Micro Vickers Comparison Study Of Hardness Testing By Using Rockwell Superficial VS Microvickers”, *jurnal teknologi proses dan inovasi industri*, Vol. 2, No. 2, november 2017.
- [29] A. Sasmito, M. N. Ilman, 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 (Basel)*, Vol. 12, No. 1, Jan. 2022,
- [30] M. A. Marir, E. L. Sheng, I. O. Bachi, and M. R. Isa, “Tensile efficiency and fatigue life of similar and dissimilar carbon steel joints subjected to rotary friction welding,” *Journal of Advanced Joining Processes*, Vol. 8, Nov. 2023,

- [31] Ahmadil Amin “pengaruh variasi beban gesek terhadap struktur mikro axle shaft hasil sambungan friction welding”, *Jurnal Teknik Mesin uniska* Vol. 03 No. 01 November 2017

- [32] B. Margono, H. Indra Atmaja, J. Wibowo, J. Teknik Mesin, and A. Teknologi Warga Surakarta, “Pengaruh Tekanan dan Waktu Pengelasan pada Pengelasan Gesek (Friction Welding) terhadap Sifat Fisik dan Mekanik Sambungan Logam Tak Sejenis antara AISI 316 dan AISI 4140,” *Prosiding SNTM Re-ACT*. 2019, | eISSN 2720-9547.

- [33] B. Margono, A. Alfayed, R. Faisal Rananto, J. Teknik Mesin, A. “Investigasi Sifat Fisik Dan Mekanik Sambungan Las Logam Tak Sejenis Antara Baja Tahan Karat Aisi 316 Dengan Baja Paduan Aisi 4340 menggunakan Rotary Friction Welding” *Prosiding IENACO*, 2020, ISSN : 2337 – 4349

- [34] Y. Ono, S. Ogawa, and Y. Tachi, “Evaluation of Torsional Characteristics of 6061-T6 Aluminum Alloy Friction-welded Butt Joints using Digital Image Correlation”, *Advanced experimental mechanics*, Vol.5, 2020, 103-109.

- [35] H. Santoso, S. Surahto, F. D. Ekawati “Jurnal Asimetri: Jurnal Ilmiah Rekayasa Dan Inovasi The Effect of Rotation Speed on the Quality of Friction Welding Joints in Aluminum and Copper Article information,” *Jurnal asimetri: jurnal ilmiah rekayasa dan inovasi*, Vol.6 No.2, Hal 309-318, Jul 2024.

- [36] B. L. Sanyoto, N. Husodo, B. Setyawati, and M. Mursid, “Penerapan Teknologi Las Gesek (Friction Welding) Dalam Proses Penyambungan Dua Buah Pipa Logam Baja Karbon Rendah”, *Jurnal Energi dan Manufaktur* Vol.5, No.1, Oktober 2012: 1-97.