

**PENGARUH TEKANAN TERHADAP STRUKTUR MIKRO
DAN *BURN-OFF LENGTH* PADA PENGELASAN *ROTARY
FRICTION WELDING* ALUMINIUM DAN TEMBAGA**

SKRIPSI



Oleh:

Reynaldi Ramadhani Pratama

1803035081

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN INFORMATIKA
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH PROF. DR. HAMKA
JAKARTA
2024**

**PENGARUH TEKANAN TERHADAP STRUKTUR MIKRO
DAN *BURN-OFF LENGTH* PADA PENGELASAN *ROTARY
FRICTION WELDING* ALUMINIUM DAN TEMBAGA**

SKRIPSI

Disusun untuk Memenuhi Persyaratan Kelulusan Sarjana Teknik Mesin



Oleh:

Reynaldi Ramadhani Pratama

1803035081

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN INFORMATIKA
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH PROF. DR. HAMKA
JAKARTA
2024**

HALAMAN PERSETUJUAN

PENGARUH TEKANAN TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN BURN-OFF LENGTH PADA PENGELASAN *ROTARY FRICTION WELDING* ALUMINIUM DAN TEMBAGA

SKRIPSI

Dibuat untuk Memenuhi Persyaratan Kelulusan Sarjana Teknik Mesin

Oleh:
Reynaldi Ramadhani Pratama
1803035081

Telah diperiksa dan disetujui untuk diajukan ke Sidang Ujian Skripsi
Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Dan Informatika
Tanggal, 10 Juni 2024

Pembimbing



Riyan Ariyansah, S.T., M.T
NIDN. 0324069102

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Mesin



Riyan Ariyansah, S.T., M.T
NIDN. 0324069102

HALAMAN PENGESAHAN

PENGARUH TEKANAN TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN BURN-OFF LENGTH PADA PENGELASAN *ROTARY FRICTION WELDING* ALUMINIUM DAN TEMBAGA

SKRIPSI

Oleh:
Reynaldi Ramadhani Pratama
1803035081

Telah diuji dan dinyatakan lulus dalam Sidang Ujian Skripsi
Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Dan Informatika
UHAMKA
Tanggal 25 Juli 2024

Pembimbing



Riyan Ariyansah, S.T., M.T
NIDN. 0324069102

Penguji-1



Drs. Moh. Yusuf Djeli, M.M., M.T
NIDN. 0330016001

Penguji-2



Agus Fikri, S.T., M.M., M.T
NIDN. 0319087101

Mengesahkan,
Dekan
Fakultas Teknik UHAMKA



Mengetahui,
Ketua Program Studi
Teknik Mesin



Riyan Ariyansah, S.T., M.T
NIDN. 0324069102

PERNYATAAN KEASLIAN

Saya, yang membuat pernyataan

Nama : Reynaldi Ramadhani Pratama

NIM : 1803035081

Judul : PENGARUH TEKANAN TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN *BURN-OFF LENGTH* PADA PENGELASAN *ROTARY FRICTION WELDING* ALUMINIUM DAN TEMBAGA.

Menyatakan bahwa, skripsi ini merupakan karya saya sendiri (ASLI) dan isi dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademis di suatu institusi pendidikan tinggi mana pun, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis dan/atau diterbitkan oleh orang lain, KECUALI yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam Daftar Referensi.

Segala sesuatu yang terkait dengan naskah dan karya yang telah dibuat adalah menjadi tanggung jawab saya pribadi.

Jakarta, 10 Juni 2024



Reynaldi Ramadhani Pratama

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum wa rohmatullahi wa barokaatuh.

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas berkat dan rahmat-nya, sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Pengaruh Tekanan Terhadap Struktur Mikro Makro Dan *Burn-Off Length* Pada Pengelasan *Rotary Friction Welding* Aluminium Dan Tembaga ”** Adapun tujuan penyusunan skripsi ini yaitu untuk memenuhi prasyarat kurikulum yang berlaku di perguruan tinggi. Dapat tersusunya Skripsi ini berkat bantuan, dukungan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh sebab itu, dalam kesempatan ini ucapan terimakasih diberikan kepada:

1. Bapak Prabowo Setiabudi dan Ibu Ully Wuryani selaku kedua orang tua saya yang telah memberikan dukungan dan doa'nya sehingga meningkatkan motivasi bagi penulis untuk menyelesaikan apa yang sudah dimulai.
2. Bapak Riyan Ariyansah, S.T., M.T sebagai pembimbing dalam penulisan skripsi ini dan memberi arahan selama penelitian sehingga dapat terselesaikan dengan baik.
3. Bapak Riyan Ariyansah, S.T., M.T selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Prof.Dr.Hamka.
4. Bapak Dr. Dan Mugisidi, S.T., M.Si selaku Dekan Universitas Muhammadiyah Prof. DR. HAMKA.
5. Seluruh kawan-kawan Teknik Mesin UHAMKA khususnya angkatan 2018.

Kritik dan saran pembaca diperlukan untuk evaluasi kedepan. Akhir kata,semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua yang membacanya.

wassalamu'alaikum wa rohmatullahi wa barokaatuh

Jakarta, 10 Juni 2024



Reynaldi Ramadhani Pratama

PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademika Universitas Muhammadiyah Prof. DR. HAMKA (UHAMKA), saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Reynaldi Ramadhani Pratama

NIM : 1803035081

Program Studi : Teknik Mesin

Menyetujui, memberikan Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*non-exclusive royalty free right*) kepada Universitas Muhammadiyah Prof. DR. HAMKA (UHAMKA) atas karya ilmiah saya beserta perangkat yang ada (jika diperlukan) yang berjudul:

PENGARUH TEKANAN TERHADAP STRUKTUR

MIKRO DAN *BURN-OFF LENGTH* PADA PENGELASAN

ROTARY FRICTION WELDING ALUMINIUM DAN TEMBAGA

Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Muhammadiyah Prof. DR. HAMKA berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Segala sesuatu yang terkait dengan naskah dan karya yang telah dibuat adalah menjadi tanggung jawab saya pribadi.

Jakarta, 10 Juni 2024



Reynaldi Ramadhani Pratama

ABSTRAK

Pengaruh Tekanan Terhadap Struktur Mikro Dan *Burn-Off Length* Pada Pengelasan *Rotary Friction Welding* Aluminium Dan Tembaga

Reynaldi Ramadhani Pratama

Telah dikembangkan proses pengelasan keadaan lumer seperti teknik *Rotary Friction Welding*, upaya ini dilakukan untuk menghindari sulitnya proses pengelasan dua material berbeda yang mengakibatkan terjadinya keretakan panas dan porositas. Proses *Rotary Friction Welding (RFW)* merupakan teknik pengelasan material dalam kondisi lumer, Prosesnya material dijepit agar tidak terlempar, sebuah material berputar diarahkan bertemu material yang disambung, dan pertemuan dua sisi material karena adanya penekanan. Tulisan ini meneliti pengaruh tekanan 20 kg, 30 kg, dan 40 kg logam yang berbeda, antara aluminium dan tembaga terhadap stuktur mikro makro dan pengukuran *burn-off length* pada sambungan las. Proses pengelasan menggunakan mesin bubut yang dilengkapi mekanisme pembebanan hidrolik. Hasil penelitian menunjukkan perubahan ukuran butir terbesar pada tekanan 40 kg di daerah sambungan pengelasan. Dan adanya pengurangan panjang *Burn-Off Length* sebesar 29mm pada tekanan 40 kg.

Kata Kunci: *rotary friction welding*, tembaga dan aluminium, berputar, panas, tekanan

The Effect of Pressure on Micro Structure and Burn-Off Length in Rotary Friction Welding Aluminum and Copper

Reynaldi Ramadhani Pratama

A melted welding process has been developed, such as the Rotary Friction Welding technique, this effort was made to avoid the difficulty of welding two different materials which results in hot cracks and porosity. The Rotary Friction Welding (RFW) process is a technique for welding materials in a melted condition. The process involves clamping the material so that it does not throw, a rotating material is directed towards meeting the material being joined, and two sides of the material meet due to pressure. This paper examines the effect of pressure of 20 kg, 30 kg, and 40 kg of different metals, between aluminum and copper, on the micro-macro structure and burn-off length measurements in welded joints. The welding process uses a lathe equipped with a hydraulic loading mechanism. The results showed the largest change in grain size at a pressure of 40 kg in the welding joint area. And there is a reduction in the Burn-Off Length of 29mm at a pressure of 40 kg.

Keywords: *rotary friction welding, copper with aluminum, rotating, hot, pressure.*

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSETUJUAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN	iv
KATA PENGANTAR.....	v
PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR NOTASI	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB 2. DASAR TEORI	5
2.1 Pengelasan	5
2.3 Pengelasan Gesek (<i>FW</i>).....	7
2.3.1 <i>Friction Stir Welding (FSW)</i>	8
2.3.2 <i>Linear Friction Welding (LFW)</i>	9
2.3.3 <i>Rotary Friction Welding (RFW)</i>	10
2.4 Daerah Pengelasan	11
2.5 <i>Rotary Friction Welding (RFW)</i>	12
2.6 Logam Aluminium (Al).....	13

2.6.1	Klasifikasi Aluminium.....	14
2.6.2	Aluminium Murni	15
2.6.3	Aluminium Paduan	15
2.7	Tembaga	16
2.7.1	Kategorisasi Tembaga dan Berbagai Campuran Logamnya.....	17
2.7.2	Klasifikasi Tembaga	17
2.7.3	Keunggulan Tembaga.....	18
2.7.4	Aplikasi Tembaga.....	19
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN.....		22
3.1.	Diagram Alir	22
3.2.1	Alat Penelitian.....	25
3.2.2	Bahan Penelitian	26
3.3.	Proses Pengerjaan.....	26
3.4	Variabel Penelitian	28
3.5	Teknik Pengolahan Data	28
3.6	Tempat dan Waktu Pelaksanaan Penelitian.....	28
3.6.1	Tempat Pelaksanaan Penelitian	28
3.6.2	Waktu Pelaksanaan Penelitian	29
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....		30
4.1	Hasil Penelitian.....	30
4.1.1	Suhu Selama Proses Pengelasan Gesek Putar.....	30
4.1.2	Daerah Pengambilan Data Metalografi.....	31
4.1.3	Pengukuran <i>Burn-Off Length (BOL)</i>	32
4.1.4	Hasil Pengamatan Struktur Makro dan Mikro Tekanan 20 Kg	35
4.1.5	Hasil Pengamatan Struktur Makro dan Mikro Tekanan 30 Kg	37
4.1.6	Hasil Pengamatan Struktur Makro dan Mikro Tekanan 40 Kg	40
4.2	Pembahasan	43
4.2.1	Pembahasan Perhitungan Panjang <i>BOL</i>	43
4.2.2	Pembahasan Pengamatan Struktur Makro	43
4.2.3	Pembahasan Pengamatan Struktur Mikro.....	45
BAB 5. KESIMPULAN.....		47

5.1	Kesimpulan.....	47
5.2	Saran.....	47
	DAFTAR REFERENSI.....	48
	LAMPIRAN.....	53

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Macam-Macam Alat Pada Penelitian	25
Tabel 3. 2 Macam-Macam Bahan Pada Penelitian.....	26

DAFTAR GRAFIK

Grafik 4. 1 Suhu Selama Pengelasan Gesek Putar	30
Grafik 4. 2 Perhitungan BOL.....	43

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Pengelasan	5
Gambar 2. 2 Klasifikasi Pengelasan	6
Gambar 2. 3 Pengelasan Gesek	7
Gambar 2. 4 Friction Stir Welding (FSW)	9
Gambar 2. 5 Linear Friction Welding (LFW)	9
Gambar 2. 6 Rotary Friction Welding (RFW).....	10
Gambar 2. 7 Skema Rotary Friction Welding (RFW).....	10
Gambar 2. 8 Pembagian Daerah Pengelasan	11
Gambar 2. 9 Rotary Friction Welding	12
Gambar 2. 10 Aluminium.....	13
Gambar 2. 11 Tembaga	16
Gambar 2. 12 Mesin Bubut Konvensional	19
Gambar 2. 13 Pengelompokan Bagian Mesin RFW.....	20
Gambar 2. 14 Mesin Rotary Friction Welding.....	20
Gambar 3. 1 Diagram Alir.....	22
Gambar 4. 1 Daerah Metalografi Pengambilan Data.....	31
Gambar 4. 2 BOL Variasi Tekan 20 kg.....	32
Gambar 4. 3 BOL Variasi Tekan 30 kg.....	33
Gambar 4. 4 BOL Variasi Tekan 40 kg.....	34
Gambar 4. 5 Struktur makro variasi 20 kg	35

Gambar 4. 6 Struktur Mikro Alumunium (Perbesaran 100x).....	35
Gambar 4. 7 Struktur Mikro Daerah Pengelasan (Perbesaram 500x)	36
Gambar 4. 8 Struktur Mikro Tembaga (Perbesaran 1000x).....	36
Gambar 4. 9 Struktur makro variasi 30 kg	37
Gambar 4. 10 Struktur Mikro Aluminium (Perbesaran 100x).....	38
Gambar 4. 11 Struktur Mikro Daerah Pengelasan (Perbesaran 500x)	38
Gambar 4. 12 Stuktur Mikro Tembaga (Perbesaran 1000x)	39
Gambar 4. 13 Struktur Makro Variasi 40 kg	40
Gambar 4. 14 Struktur Mikro Alumunium 40 kg (Perbesaran 100x).....	41
Gambar 4. 15 Struktur Mikro Daerah Pengelasan Variasi 40 kg (Perbesaran 500x)	41
Gambar 4. 16 Struktur Mikro Tembaga 40 Kg (Perbesaran 1000x).....	42

DAFTAR NOTASI

Simbol	Keterangan
<i>FSW</i>	Friction Stir Welding
<i>LFW</i>	Linear Friction Welding
<i>RFW</i>	Rotary Friction Welding
<i>RPM</i>	Revolution per Minute
<i>HAZ</i>	Heat Affected Zone
<i>BOL</i>	Burn-Off Length
<i>AWS</i>	American Welding Society
Al	Aluminium
Cu	Tembaga
Si	Silikon
Mg	Magnesium
<i>UNS</i>	Unified Numbering System
<i>CDA</i>	Copper Development Association
<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
Tp	Total Pemendekan (mm)
Lo	Panjang benda uji sebelum di las (mm)
L	Panjang benda uji setelah di las (mm)

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A. Hasil Turnitin.....	53
Lampiran B. Lembar Bimbingan Skripsi	54
Lampiran C Lembar Revisi Penguji-1	55
Lampiran D Lembar Revisi Penguji-2	56
Lampiran E. Hasil Uji Makro Variasi 20 Kg	57
Lampiran F. Hasil Uji Mikro Alumunium Variasi 20 Kg.....	57
Lampiran G. Hasil Uji Mikro Daerah Pengelasan Variasi 20 Kg.....	57
Lampiran H. Hasil Uji Mikro Tembaga Variasi 20 Kg	58
Lampiran I. Hasil Uji Makro Variasi 30 Kg	58
Lampiran J. Hasil Uji Mikro Aluminium Variasi 30 Kg	58
Lampiran K. Hasil Uji Mikro Daerah Pengelasan Variasi 30 Kg.....	59
Lampiran L.Hasil Uji Mikro Tembaga Variasi 30 Kg.....	59
Lampiran M. Hasil Uji Makro Variasi 40 Kg.....	59
Lampiran N. Hasil Uji Mikro Aluminium Varasi 40 Kg.....	60
Lampiran O. Hasil Uji Mikro Daerah Pengelasan Variasi 40 Kg.....	60
Lampiran P. Hasil Uji Mikro Tembaga Variasi 40 Kg	60

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Rotary Friction Welding (RFW) adalah teknik pengelasan yang menggunakan panas dari gesekan antara dua permukaan material yang akan disambungkan. Dalam proses ini, satu material berputar sementara material lainnya tetap diam dan menerima tekanan. Gesekan yang terjadi antara kedua permukaan ini menghasilkan panas yang meningkat seiring dengan berlanjutnya tekanan, hingga akhirnya mencapai suhu leleh dan menyatukan kedua permukaan tersebut. Gaya tekan diperlukan untuk meningkatkan gaya gesekan. Semakin besar tekanan maka semakin besar pula gaya geseknya. Semakin banyak gesekan menghasilkan lebih banyak panas. (Amin, 2017)

Bahan aluminium semakin banyak digunakan seiring berjalannya waktu karena ringan, tahan karat, dan memenuhi persyaratan industri. Oleh karena itu, kedua material ini harus digabungkan untuk mendapatkan kombinasi sifat yang diinginkan. Namun aluminium merupakan material yang tidak dapat dilas dengan menggunakan pengelasan cair. Selain itu, karena perbedaan titik leleh aluminium dan tembaga, pengelasan *dissimilar* tidak mungkin dilakukan dengan pengelasan konvensional. Untuk mengatasi masalah tersebut digunakan proses pengelasan yang disebut *Rotary Friction Welding (RFW)*. (Minanda, 2018)

Pengujian makro dilakukan untuk mengecek jenis pekerjaan mekanis yang telah dilakukan pada suatu benda. Pekerjaan mekanis seperti tempaan, roll, tekanan, dan gesekan dapat menyebabkan benda berubah bentuk. Untuk mengetahui perubahan lebih jelas, benda dapat dilapisi dengan larutan etsa asam klorida. Pengujian mikro bertujuan untuk mengetahui struktur mikro suatu benda setelah dikenakan proses mekanis maupun termal. Dalam pengujian mikro digunakan alat bantu mikroskop dikarenakan struktur benda tidak dapat dilihat secara langsung oleh mata. Dalam pengujian mikro terlihat ukuran butir, arah dan susunan butir, dan fasa-fasa yang terbentuk. Sebelum dilakukan pengujian mikro benda kerja harus dihaluskan dengan amplas sampai tidak ada goresan kemudian dilakukan etsa sesuai dengan jenis materialnya. (Saputra, 2020)

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disampaikan, maka penulis merumuskan masalah pada skripsi ini yaitu :

1. Bagaimana tekanan 20 kg, 30 kg, dan 40 kg mempengaruhi struktur makro dan mikro pada hasil pengelasan *Rotary Friction Welding*
2. Bagaimana tekanan 20 kg, 30 kg, dan 40 kg mempengaruhi *burn-off length* pada hasil pengelasan *Rotary Friction Welding*

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini memiliki batasan masalah perihal topik penelitian yang harus diselesaikan sesuai tema yang dibahas dan tidak menyimpang jauh dari topik pembahasan agar mendapatkan hasil yang spesifik. Berikut merupakan batasan masalahnya :

1. Pengelasan menggunakan metode *Rotary Friction Welding*.
2. Kecepatan mesin bubut, waktu tekan, dan waktu gesek dianggap konstan.
3. Penelitian ini hanya membahas tentang pengaruh tekanan 20 kg, 30 kg, dan 40 kg terhadap struktur mikro makro dan pengukuran *burn-off length* pada hasil pengelasan.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan diatas maka dapat ditentukan tujuan penelitian sebagai berikut :

1. Untuk mengetahui pengaruh tekanan terhadap struktur makro dan mikro pada hasil pengelasan *Rotary Friction Welding*.
2. Untuk mengetahui pengaruh tekanan terhadap pengukuran *burn-off length* pada hasil pengelasan *Rotary Friction Welding*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Memberikan alternatif pengelasan alumunium dengan metode *RFW*.
2. Mengetahui pengaruh variasi tekanan terhadap struktur mikro makro dan *burn-off length* pada sambungan las tak sejenis (*dissimilar joint*) alumunium dan tembaga.
3. Memperoleh informasi tentang variasi pengelasan antara alumunium dengan tembaga dengan metode *RFW*.
4. Bagi peneliti, penelitian ini merupakan saran untuk melatih diri agar bertambah pengetahuan serta keterampilan dalam melakukan penelitian.

1.6 Sistematika Penulisan

Tahapan ini dibuat menjadi bagian-bagian dengan tujuan pemudahan pemahaman apa saja yang diperlukan serta menyelesaikan penulisan secara teratur sesuai panduan dari masing-masing instansi. Berikut adalah tahapan-tahapan dalam penulisan ini :

1. BAB 1. PENDAHULUAN

Penulisan ini dimulai dengan latar belakang masalah, selanjutnya perumusan masalah. Kemudian dijelaskan batasan-batasan masalah pada penelitian, lalu penentuan tujuan dibuatnya penelitian ini. Setelah itu, manfaat dari penelitian ini dijelaskan, diikuti dengan uraian tentang sistematika penulisan.

2. BAB 2. DASAR TEORI

Pada pembahasan ini menyajikan teori mengenai las gesek untuk bahan beda jenis seperti tembaga dan aluminium. Penulisan ini didasarkan pada teori-teori yang telah dikumpulkan dari berbagai referensi yang sah mengenai pengelasan gesek putar.

3. BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian merupakan penentuan suatu cara apa yang akan dipakai pada saat penelitian. Dalam penelitian ini mempunyai dua jenis penulisan yang berbeda, yaitu penelitian eksperimental dan penelitian

perancangan. Penelitian ini memakai jenis penelitian eksperimental dengan melakukan penelitian proses pengelasan gesek aluminium dengan tembaga dengan berbagai variasi tekanan untuk mendapatkan hasil terbaik terhadap struktur mikro/makro dan pengukuran panjang *BOL*.

4. BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian serta pengujian dalam bab sebelumnya mendapatkan hasil dan akan ditentukan disini dan dibahas lebih mendalam hasil atau temuan penelitian dan pembahasan.

5. BAB 5 KESIMPULAN

Penulisan ini berisi mengenai suatu narasi yang dapat ditulis dalam bentuk paragraf tentang hal-hal yang menjawab pertanyaan dari sebuah tujuan yang ada, narasi tersebut juga dapat berbentuk poin (urutan angka).

6. DAFTAR REFERENSI

Daftar referensi berisi tentang semua referensi yang dijadikan sebagai sumber ataupun acuan dalam penelitian. Daftar referensi dapat dijadikan sebagai bahan uji validitas sebuah data agar tidak menyimpang dari teori yang sudah ada.

7. LAMPIRAN

Lampiran merupakan bentuk data-data tambahan sebagai penunjang proses dari suatu penelitian agar bisa diperlihatkan secara visual untuk mempermudah pembaca dalam membayangkan penelitian yang sedang dikerjakan

BAB 2.DASAR TEORI

2.1 Pengelasan

Pengelasan adalah proses penyambungan pada paduan logam yang dilakukan pada kondisi cair ataupun padat. Pengelasan merupakan cara menyambungkan bahan padat menggunakan cara pelelehan dengan pemanasan. Pengelasan didefinisikan sebagai proses menyambungkan lebih dari satu logam dengan pemanasan, sampai terbuat suatu molekul pada logam yang disambungkan itu. (Parekke, S.T., M.T. & Yantony, S.S.T., M.P.d., 2023)



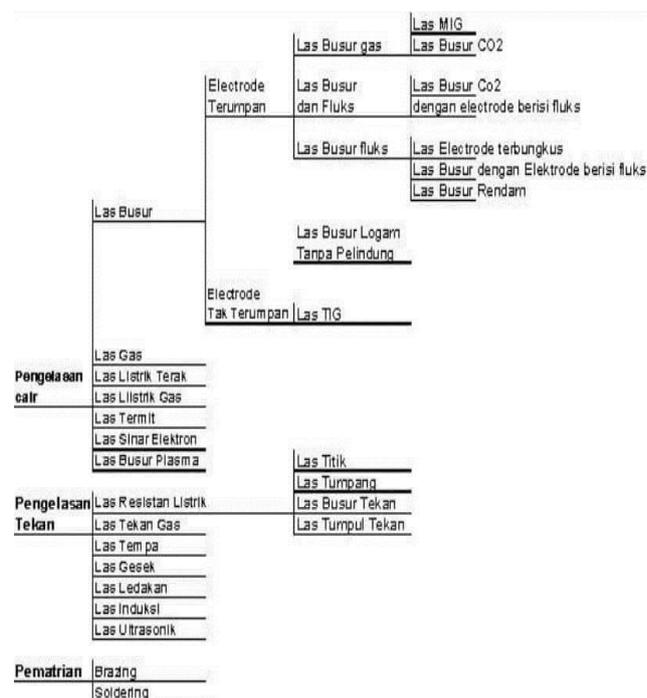
Gambar 2. 1 Pengelasan
Sumber : (posonsky, 2021)

Pengelasan merupakan metode penggabungan logam dengan cara pelelehan sebagian dari logam pengisi atau logam dasar, baik menggunakan tekan maupun tidak, serta menggunakan atau tanpa menggunakan bahan pendukung, sehingga menghasilkan sambungan yang permanen. Selain itu juga bisa diartikan sebagai proses penyambungan logam yang memanfaatkan energi panas untuk melelehkan bahan yang akan disambung hingga logam tersebut memadat kembali, dengan atau tanpa bahan tambahan.. (Hidayat, 2022)

2.2 Kelompok Pengelasan

Teknik pengelasan dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori utama berdasarkan prinsip kerjanya. Pertama, pengelasan cair memanfaatkan energi panas dari sumber seperti nyala api atau busur listrik untuk melelehkan dan menyatukan logam yang akan disambung. Kedua, pengelasan tekan menggabungkan proses pemanasan dengan aplikasi tekanan pada area sambungan hingga terbentuk ikatan. Terakhir, pematrian menggunakan paduan logam dengan titik leleh rendah sebagai bahan pengisi untuk menyambung logam tanpa melelehkan logam induknya. Setiap metode ini memiliki karakteristik dan aplikasi khusus dalam industri pengelasan, memberikan fleksibilitas dalam pemilihan teknik yang sesuai untuk berbagai kebutuhan penyambungan logam.. (S.P.d., M.P.d., et al., 2023)

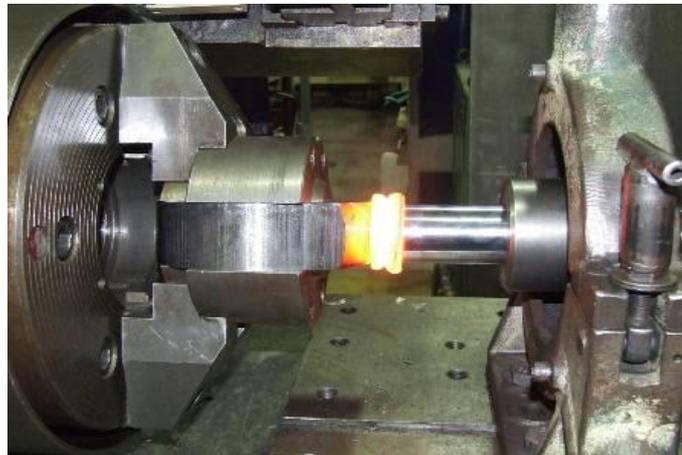
Pada gambar 2.2 merupakan perincian lebih lanjut dari klasifikasi pengelasan :



Gambar 2. 2 Klasifikasi Pengelasan
Sumber : (S.P.d., M.P.d., et al., 2023)

2.3 Pengelasan Gesek (*FW*)

Merupakan metode penyambungan baja yang menggunakan suhu dari gaya gesek. Dalam teknik ini, satu sumbu berputar sementara sumbu lainnya tetap diam, membuat permukaan kedua bahan yang akan disambung saling bersentuhan di bawah tekanan. Karena gaya gesek antara kedua permukaan terjadi secara berulang, panas yang dihasilkan semakin bertambah. Gaya tekan dan panas yang diterapkan pada antar muka menyebabkan panas pada titik gesek antar muka material naik hingga dicapai suhu lebur, sehingga proses las terjadi. (Wahyu, 2023)



Gambar 2. 3 Pengelasan Gesek
Sumber : (Aliyudin, 2011)

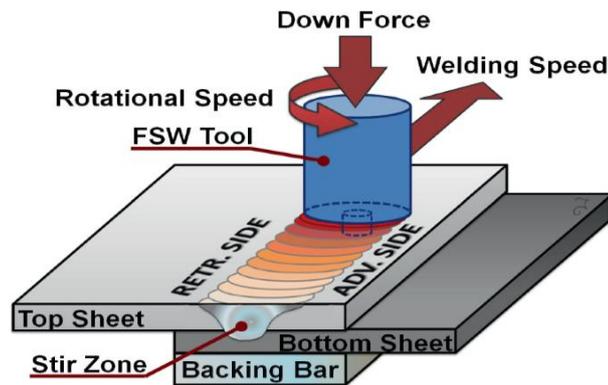
AL Chudikov, seorang ahli mesin soviet (Asosiasi Pengelasan Indonesia) menerbitkan hasil pengamatannya pada tahun 1950, mempublikasikan temuannya tentang konversi energi mekanik menjadi panas melalui gesekan. Ia mengamati bahwa gesekan antar komponen mekanik bergerak menghasilkan panas, yang umumnya dianggap sebagai kerugian energi. Chudikov kemudian mengusulkan pemanfaatan fenomena ini untuk pengelasan.

Melalui serangkaian eksperimen, ia berhasil mengembangkan teknik pengelasan yang memanfaatkan panas dari gesekan. Metode ini ditingkatkan dengan menambahkan tekanan pada benda kerja yang berputar, menghasilkan lebih banyak panas dan memfasilitasi fusi. Inovasi ini kemudian dikenal sebagai pengelasan gesek. (*FW*). (Haryanto, Ismail, Jamari, & Nugroho, 2023)

Pengelasan gesek terbagi menjadi tiga jenis utama: *Friction Stir Welding (FSW)*, *Linear Friction Welding (LFW)*, dan *Rotary Friction Welding (RFW)*. Klasifikasi ini didasarkan pada perbedaan suhu, tegangan, regangan, dan laju regangan pada tahap awal proses, yang krusial untuk keberhasilan pengelasan. Meskipun setiap jenis menggunakan gerakan yang berbeda, prinsip dasarnya sama: memanfaatkan gesekan untuk menghasilkan panas lokal yang memungkinkan terjadinya pengelasan. Pada ketiga jenis ini, sambungan las terbentuk melalui proses deformasi plastis di antarmuka dua bahan yang disambung. (Vairis, Papazafeiropoulos, & Tsainis, 2016)

2.3.1. Friction Stir Welding (FSW)

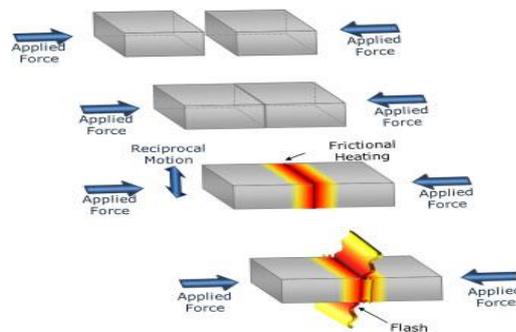
Metode pengelasan ini memanfaatkan alat khusus untuk menggabungkan logam. Prosesnya melibatkan perputaran logam pada permukaannya, menyebabkan pencampuran sambungan dalam kondisi padat. Panas yang dihasilkan dari gesekan antara alat dan bahan kerja cukup untuk melunakkan material, memudahkan pembentukan dan pencampuran. Proses ini tidak memerlukan peleburan logam, memungkinkan penyambungan baik antara logam sejenis maupun berbeda jenis. Teknik ini, yang dikenal sebagai *FSW*, membutuhkan desain alat yang tepat dan parameter proses yang sesuai, terutama ketika menggabungkan logam yang berbeda. (Jupri, Ikhsan, B, & Zulkarnain, 2022)



Gambar 2. 4 Friction Stir Welding (FSW)
Sumber : (Sharma & Dwivedi, 2021)

2.3.2. Linear Friction Welding (LFW)

Pengelasan gesek linear (*LFW*) yaitu metode penyambungan untuk bagian tebal non-aksisimetris, terutama digunakan dalam industri pesawat. Teknik ini sangat efektif untuk paduan titanium dan nikel karena sifat mekanik dan termal mereka yang sesuai. Meski demikian, penelitian terus dibuat agar membuat luas penggunaan *LFW* untuk bahan umum seperti paduan baja dan aluminium. (Mogami, Matsuda, Sano, Yoshida, Hori, & Hirose, 2018)

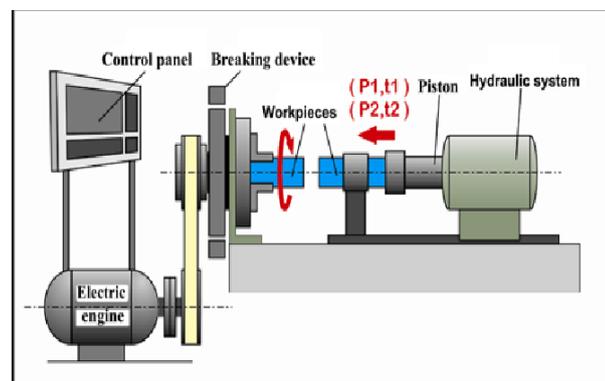


Gambar 2. 5 Linear Friction Welding (LFW)

Sumber : (Global, 2024)

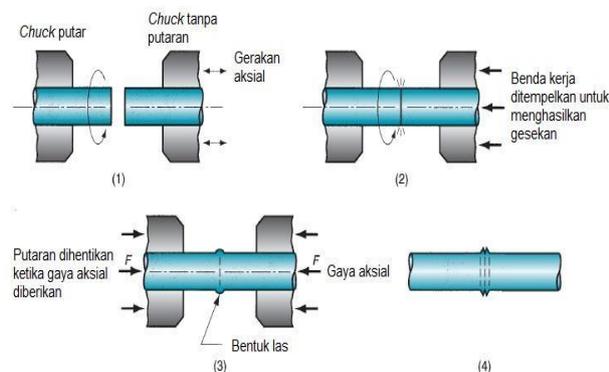
2.3.3. Rotary Friction Welding (RFW)

Proses penyambungan solid-state yang terjadi di bawah titik leleh logam dasar. Gesekan antarpermukaan meningkatkan suhu dengan cepat, menyebabkan deformasi plastis dan aliran material. Proses ini membersihkan permukaan dari kotoran dan oksida, menciptakan ikatan fisik dan kimia yang kuat. Kombinasi suhu tinggi dan tekanan pada antarmuka sambungan menghasilkan difusi atau fusi antara kedua bahan. (Alves, Neto, & An, 2019)



Gambar 2. 6 Rotary Friction Welding (RFW)
Sumber : (Alves, An, Neto, & Dos Santos, 2020)

Gambar dibawah ini mengilustrasikan proses pengelasan gesekan. Dua batang uji disambung, satu diam dan satu berputar. Gesekan terjadi saat batang diam diberi gaya tekan. Penerapan gaya tekan terus-menerus menghasilkan panas yang bertambah sampai mencapai suhu lebur, menyebabkan peleburan pada antar muka bahan yang bergesekan. (Haryanto, Ismail Rifky, Jamari, & Nugroho, 2011)

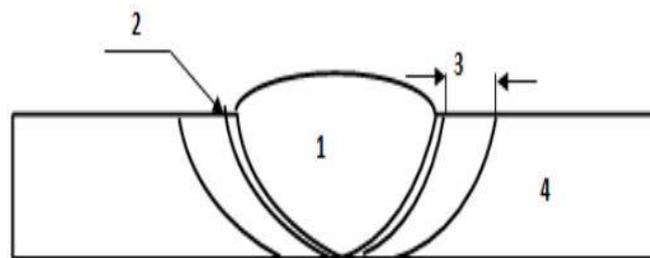


Gambar 2. 7 Skema Rotary Friction Welding (RFW)
Sumber : (Radius, 2015)

Las gesek memiliki keunggulan dalam penghematan material tambahan dan waktu, serta kemampuan menyambung material sejenis maupun berbeda. Proses ini memerlukan perhatian pada parameter dan jenis material. Keunggulan utamanya adalah kemampuan menyatukan seluruh permukaan benda, menghasilkan kualitas tinggi yang tidak dapat dicapai dengan pengelasan SMAW. (Wahyu, 2023)

2.4 Daerah Pengelasan

Gambar 2.8 menyajikan ilustrasi yang menunjukkan berbagai zona yang terbentuk selama proses pengelasan, disertai dengan penjelasan untuk setiap daerah tersebut..



Gambar 2. 8 Pembagian Daerah Pengelasan
Sumber : (Soedarmadji, 2020)

1. Zona Las (*Weld Zone*) :

Ini adalah area utama di tengah yang berbentuk seperti lensa atau setengah lingkaran. Ini merupakan logam las yang telah meleleh dan kemudian membeku, membentuk sambungan antara dua bagian yang dilas.

2. Garis fusi (*Fusion Line*) :

Garis ini menandai batas antara zona las dan logam dasar. Ini adalah area di mana logam las menyatu dengan logam dasar.

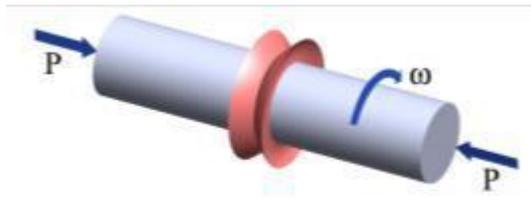
3. *Heat Affected Zone (HAZ)* :

Meskipun tidak ditandai secara eksplisit, area di sekitar garis fusi yang berbatasan langsung dengan zona las kemungkinan adalah HAZ. Daerah ini mengalami perubahan struktur mikro karena panas dari proses pengelasan, tetapi tidak sampai meleleh.

4. Logam Dasar (*Base Metal*) : Ini adalah bagian utama material yang dilas, yang tidak terpengaruh secara signifikan oleh panas pengelasan.. (Soedarmadji, 2020)

2.5 Rotary Friction Welding (RFW)

Gambar 2.9 mengilustrasikan proses pengelasan gesek putar. Dalam metode ini, digunakan benda uji silinder. Satu sisi logam diberi putaran, sementara sisi yang lain tidak berputar dan mendapatkan bobot axial. (Yohanes, Siregar, Susilawati, & Badri, 2018)



Gambar 2.9 Rotary Friction Welding

Sumber : (Yohanes, Siregar, Susilawati, & Badri, 2018)

American Welding Society (AWS) mengklasifikasikan Pengelasan Gesek Putar (*RFW*) sebagai pengelasan *solid state*. *RFW* bekerja dengan menggesekan dua benda di bawah tekanan, menghasilkan panas untuk penyatuan. Suhu yang dicapai berada di bawah titik leleh (sekitar 80% dari titik leleh), menjaga material dalam kondisi plastis saat disambung. (Saputra, 2020)

Proses pengelasan gesek putar (*RFW*) terdiri dari dua tahap utama. Tahap gesekan: material dipanaskan dan terjadi interferensi yang diperlukan. Tahap penempaan: memperkuat area las yang telah terbentuk. (Shete & Deokar, 2017)

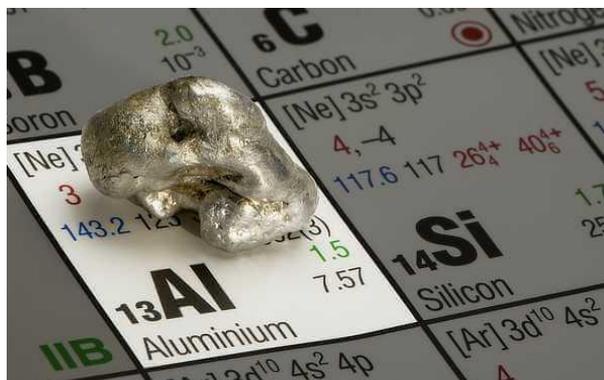
Pengelasan gesek putar (*RFW*) unggul karena siklus termalnya yang mengurangi cacat dan zona terpengaruh panas. Metode ini ramah lingkungan, hemat energi, konsisten, dan tidak memerlukan gas pelindung atau logam pengisi. *RFW* dapat menyambung logam tak sejenis dengan porositas rendah, termasuk poros padat yang sulit dilas dengan metode lain. Keunggulan ini menjadikan *RFW*

pilihan utama dalam pembuatan komponen kendaraan dan pesawat. (Purwaningrum, Fatha, & Pratama, 2022)

2.6 Logam Aluminium (Al)

Proses ekstraksi aluminium modern dikembangkan pada 1886 oleh Paul Errol dan C.M. Hall menggunakan elektrolisis. Metode ini masih digunakan hingga kini. Aluminium menjadi logam non-besi kedua terbanyak dikonsumsi setelah baja, dengan produksi global sampai 15.000.000 ton setahun pada 1981. (Rahmawati & Nuraliyah, 2024)

Aluminium dengan paduannya memiliki keunggulan seperti bobot yang ringan, kekuatan yang tinggi, keuletan yang baik saat dingin, dan ketahanan korosi yang sangat baik. Logam ini digunakan luas di berbagai industri seperti transportasi, kimia, listrik, dan konstruksi. Namun, aluminium mempunyai sifat las yang lebih buruk dibandingkan logam lain karena konduktivitas termal tinggi, koefisien muai besar, kecenderungan membentuk lapisan oksida, berat jenis dan titik leleh rendah. (Prayoga & Tarmizi, 2016)



Gambar 2. 10 Aluminium
Sumber : (Weerg, 2021)

Paduan aluminium dibagi dalam 2 jenis : paduan aluminium *wrought* dan paduan aluminium *casting*. Al murni (99,99%) mempunyai berat 2,7 g/cm³, massa 2,685 kg/m³, dan titik lelehan 660 °C. Al memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang lebih tinggi daripada baja. Sifat tahan korosi Al diperoleh dari bagian aluminium oksidasi yang terbentuk di permukaannya, yang melekat erat dan stabil, sehingga bagian dalam terlindungi. (Widodo, 2013)

2.6.1 Klasifikasi Aluminium

1. Paduan Aluminium Seri 1xxx
Komposisi $\geq 99\%$ aluminium murni. Sifat sangat tahan terhadap korosi, konduktivitas termal dan listrik yang tinggi, namun kekuatannya rendah. Aplikasi foil, konduktor listrik, dan aplikasi yang membutuhkan ketahanan korosi tinggi.
2. Paduan Aluminium Seri 2xxx
Komposisi Mengandung tembaga sebagai elemen paduan utama. Sifat kekuatan tinggi, namun ketahanan korosi rendah dibandingkan seri lainnya. Aplikasi struktur pesawat terbang dan aplikasi lainnya yang membutuhkan kekuatan tinggi.
3. Paduan Aluminium Seri 3xxx
Komposisi mengandung mangan sebagai elemen paduan utama. Sifat kekuatan sedang, ketahanan korosi baik, dan mudah dibentuk. Aplikasi kaleng minuman, peralatan masak, dan aplikasi yang membutuhkan formabilitas dan ketahanan korosi.
4. Paduan Aluminium Seri 4xxx
Komposisi mengandung silikon sebagai elemen paduan utama. Sifat memiliki titik leleh rendah, sehingga sering digunakan sebagai bahan las. Aplikasi kawat las, pelat las, dan aplikasi lainnya yang memerlukan pengelasan.
5. Paduan Aluminium Seri 5xxx
Komposisi mengandung magnesium sebagai elemen paduan utama. Sifat Kekuatan sedang hingga tinggi, ketahanan korosi sangat baik, dan sifat formabilitas yang baik. Aplikasi Struktur kapal, tangki bahan bakar, dan aplikasi yang membutuhkan ketahanan terhadap lingkungan laut.
6. Paduan Aluminium Seri 6xxx
Komposisi: Mengandung magnesium dan silikon. Sifat: Kekuatan sedang, tahan korosi, dan mudah dibentuk. Aplikasi: Struktur bangunan, rangka otomotif, dan aplikasi rekayasa umum.

7. Paduan Aluminium Seri 7xxx

Komposisi: Mengandung seng sebagai elemen paduan utama. Sifat: Kekuatan sangat tinggi, namun ketahanan korosi lebih rendah. Aplikasi: Struktur pesawat terbang, peralatan olahraga, dan aplikasi yang membutuhkan kekuatan sangat tinggi.

8. Paduan Aluminium Seri 8xxx

Komposisi: Mengandung elemen lain seperti litium. Sifat: Bervariasi tergantung elemen paduannya, namun umumnya digunakan untuk aplikasi khusus. Aplikasi khusus yang memerlukan sifat-sifat unik seperti baterai aluminium-litium.

2.6.2 Aluminium Murni

Aluminium murni diproduksi dengan cara elektrolisis dengan kemurnian 99,85%, yang dapat ditingkatkan hingga 99,99% menggunakan teknologi elektrolisis terbaru. Namun, Al murni memiliki kekuatan yang rendah, sehingga dicampur dengan elemen lain untuk meningkatkan sifat mekaniknya. Al 6061, bagian dari seri 6xxx, mengandung magnesium dan silikon sebagai paduan utama. Paduan ini memiliki ketahanan korosi baik, dapat dipanaskan, serta mudah dilas dan dipotong. (Khusaini, Fadelan, & Winardi, 2021)

2.6.2 Aluminium Paduan

Klasifikasi paduan aluminium (Al) menggunakan berbagai standar global, dengan standar Asosiasi Aluminium Amerika (AA) sebagai yang paling dikenal. Sistem AA menggunakan kode angka untuk mengidentifikasi jenis paduan:

1. Angka pertama (1-7) menunjukkan unsur paduan utama.
2. Untuk paduan tempa, digunakan satu atau dua angka "S".
3. Paduan cor menggunakan tiga angka.
4. Angka kedua menandakan modifikasi paduan atau tingkat kemurnian Al.
5. Angka ketiga dan keempat berasal dari sistem penamaan Alcoa sebelumnya.

Contoh: 3003 (sebelumnya 3S) adalah paduan Al-Mn, 6063 (sebelumnya 63S) adalah paduan Al-Mg-Si, dan 1100 menunjukkan Al dengan kemurnian minimal 99,0%.. (Rahmawati & Nuraliyah, 2024)

2.7 Tembaga

Merupakan elemen logam transisi bernomor atom 29, memiliki massa atom 63,55 g/mol. Warna kemerahan menandai bentuk murninya, namun dapat berubah saat membentuk senyawa dengan ion lainnya. $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, salah satu senyawa tembaga yang populer, banyak dimanfaatkan dalam berbagai sektor industri, mencakup produksi tekstil, proses penyepuhan, pelapisan logam, dan pengolahan perak. (Khairuddin, Yamin, & Kusmiyati, 2021)



Gambar 2. 11 Tembaga
Sumber : (Wikipedia)

Keunggulan tembaga dan paduan nya adalah :

1. Tahan korosi
2. Konduktor listrik dan panas yang baik
3. Tampilan menarik
4. Kekuatan dan keuletan tinggi
5. Mudah difabrikasi

Kombinasi sifat-sifat ini menjadikan tembaga bahan yang sangat berguna dalam berbagai bidang teknik. (Suwanda, Serena, & Nugroho, 2016)

2.7.1 Kategorisasi Tembaga dan Berbagai Campuran Logamnya

Unified Numbering System (UNS) adalah cara pembuatan nama standar untuk tembaga dan paduannya, menggunakan kode lima digit yang berawalan huruf C. Cara ini merupakan pengembangan dari cara tiga digit sebelumnya di AS. Contohnya, paduan #377 kini menjadi C37700. *UNS* dikelola oleh *Copper Development Association (CDA)* dan diadopsi oleh *ASTM* dan *SAE*. Kode C10000-C79999 digunakan untuk tembaga olahan, sedangkan C80000-C99999 untuk tembaga tuang.. (Pangaribuan, 2016)

2.7.2 Klasifikasi Tembaga

1. Tembaga Murni

Komposisi $\geq 99\%$ tembaga. Sifat: Konduktivitas listrik dan termal sangat tinggi, ketahanan korosi baik, dan mudah dibentuk. Aplikasi: Kabel listrik, komponen elektronik, dan pipa-pipa untuk instalasi air.

2. Paduan Tembaga-Timah (Perunggu)

Komposisi mengandung timah sebagai elemen paduan utama. Sifat: Kekuatan dan ketahanan korosi tinggi, mudah dicetak dan dibentuk. Aplikasi: Bushing, bearing, patung, dan peralatan kapal.

3. Paduan Tembaga-Seng (Kuningan)

Komposisi: Mengandung seng sebagai elemen paduan utama. Sifat: Kekuatan sedang hingga tinggi, mudah dibentuk dan dicetak, ketahanan korosi baik. Aplikasi: Alat musik, komponen mesin, fitting pipa, dan ornamen dekoratif.

4. Paduan Tembaga-Nikel (Cupronickel)

Komposisi: Mengandung nikel sebagai elemen paduan utama. Sifat: Ketahanan korosi sangat baik, terutama di lingkungan air laut, konduktivitas listrik dan termal rendah. Aplikasi: Koin, komponen kapal, dan aplikasi kelautan.

5. Paduan Tembaga-Berilium (Berilium Tembaga)

Komposisi: Mengandung berilium sebagai elemen paduan utama. Sifat: Kekuatan tinggi, ketahanan aus dan korosi baik, konduktivitas listrik dan

termal sedang. Aplikasi: Alat-alat yang membutuhkan kekuatan tinggi dan konduktivitas seperti alat musik, alat medis, dan komponen pesawat.

6. Paduan Tembaga-Silikon

Komposisi: Mengandung silikon sebagai elemen paduan utama. Sifat: Ketahanan korosi dan kekuatan baik, kemampuan cetak yang baik. Aplikasi: Peralatan kelistrikan, fitting hidrolik, dan komponen otomotif.

7. Paduan Tembaga-Aluminium

Komposisi: Mengandung aluminium sebagai elemen paduan utama. Sifat: Ketahanan korosi sangat baik, terutama terhadap air laut, kekuatan sedang hingga tinggi. Aplikasi: Komponen kapal, fitting pipa, dan aplikasi kelautan.

8. Paduan Tembaga-Tembaga Fosfor (Phosphor Bronze)

Komposisi: Mengandung fosfor sebagai elemen paduan tambahan.

Sifat: Kekuatan, ketahanan aus, dan ketahanan korosi sangat baik, kemampuan pegas tinggi. Aplikasi: Bushing, pegas, dan komponen mesin.

2.7.3 Keunggulan Tembaga

Tembaga dikenal karena berbagai keunggulannya yang menjadikannya material yang berharga tinggi pada berbagai aplikasi. Logam ini menonjol dengan konduktivitas termal dan listrik yang tinggi, menjadikannya pilihan utama untuk komponen elektronik dan sistem pendingin. Tembaga juga menawarkan kombinasi unik antara keuletan dan kekuatan, memungkinkannya untuk digunakan dalam struktur yang memerlukan ketahanan terhadap tekanan dan deformasi. Kemudahan dalam pemrosesan, termasuk kemampuan untuk dimesin, dicetak, dan dilas dengan baik, menambah fleksibilitas penggunaannya dalam industri. Ketahanan korosi yang tinggi membuat tembaga cocok untuk aplikasi di lingkungan yang agresif atau lembab. Selain keunggulan teknis, tembaga juga memiliki daya tarik estetis dengan warna khasnya yang hangat, membuatnya populer dalam desain arsitektur dan dekorasi interior.

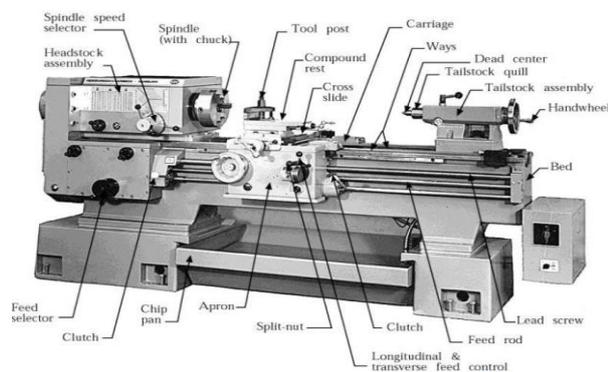
2.7.4 Aplikasi Tembaga

Penggunaan tembaga memiliki sejarah panjang, dengan bukti penggunaan awal ditemukan di Asia Kecil sekitar 8500 SM dan di Mesopotamia sekitar 3500 SM. Paduan tembaga mulai digunakan pada abad ke-1 SM, dimulai dengan campuran tembaga dan timah yang menandai awal Zaman Perunggu. Kemudian, tembaga juga dicampur dengan seng. Paduan-paduan ini digunakan secara luas untuk membuat aksesoris kecantikan, alat rumah tangga, dan alutsista. (Pangaribuan , 2016)

Tembaga sering dipadukan bersama logam lain sebagai logam peningkat sifat logam lain. Kuningan, tembaga paduan dan juga seng, memiliki kekuatan tinggi dan dapat diekstrusi menjadi berbagai bentuk. Dalam bentuk lembaran, kuningan sangat tangguh dan mudah dibentuk. Perunggu, campuran tembaga dan timah, sering ditambah fosfor (perunggu fosfor) untuk meningkatkan kekuatan tariknya. Perunggu biasa digunakan untuk bantalan dan pengecoran, menawarkan kekuatan dan tahan terhadap korosi yang bagus. (Sudjana, 2008)

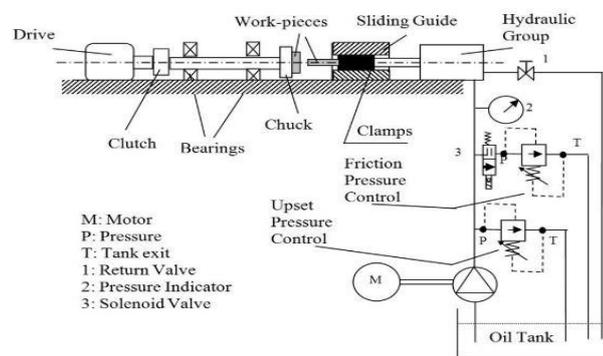
2.8 Mesin Pengelasan Gesek Putar (RFW)

Mesin bubut mempunyai dua jenis bagian utama yaitu bagian tetap dan bagian bergerak. Setiap komponen memiliki fungsi khusus dalam operasi mesin. Struktur lengkap mesin bubut diperlihatkan pada gambar dibawah ini.

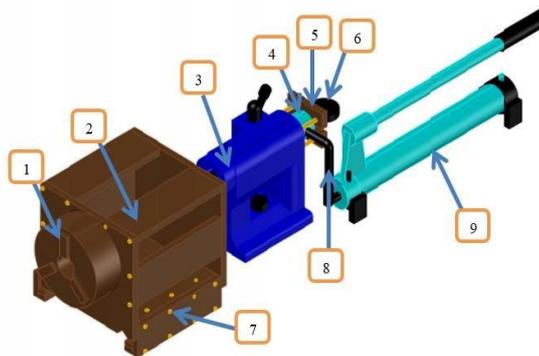


Gambar 2. 12 Mesin Bubut Konvensional
Sumber : (Sunnyoto, Nugroho, Subarjan, & Sasmito, 2020)

Mesin *RFW* memiliki struktur yang terdiri dari dua jenis komponen utama yaitu komponen yang berputar dan komponen yang tetap diam. Struktur ini dapat dilihat pada Gambar 2.13. Ada kemiripan antara komponen-komponen ini dengan yang ada pada mesin bubut. Oleh karena itu, dalam pengembangan mesin *RFW*, fungsi-fungsi yang ada pada mesin bubut telah diadaptasi dan dioptimalkan untuk memenuhi kebutuhan khusus proses pengelasan gesek putar. (Sunyoto, Nugroho, Subarjan, & Sasmito, 2020)



Gambar 2. 13 Pengelompokan Bagian Mesin RFW
Sumber : (Sunyoto, Nugroho, Subarjan, & Sasmito, 2020)



Gambar 2. 14 Mesin Rotary Friction Welding
Sumber : (Faisal, Bastomi, & S, 2023)

M. Faisal, dkk berhasil membuat mesin bubut konvensional menjadi mesin las gesek putar (*RFW*) dengan penambahan sistem pres tekanan hidrolis. Modifikasi ini, yang ditunjukkan pada Gambar 2.14, mencakup penambahan beberapa komponen kunci seperti chuck untuk menjepit benda kerja, tailstock

sebagai penyangga, sistem hidrolik untuk memberikan tekanan, dan berbagai komponen pendukung lainnya. Sistem ini dilengkapi dengan pengukur tekanan dan pompa hidrolik untuk mengontrol proses pengelasan gesek. Modifikasi ini memungkinkan mesin bubut konvensional untuk melakukan fungsi pengelasan gesek rotari dengan efektif. (Faisal, Bastomi, & S, 2023)

2.9 Pengamatan Hasil Pengelasan

Pengujian hasil pengelasan dilakukan melalui tiga metode utama:

1. Pengamatan Struktur Mikro: Mengamati susunan struktur logam berukuran sangat kecil menggunakan mikroskop. Struktur ini bergantung pada komposisi dan proses pembuatan logam.
2. Pengamatan Struktur Makro: Memeriksa perubahan ukuran butir dan bentuk yang terlihat dengan mata telanjang setelah proses pemolesan dan etsa. Metode ini berguna untuk menganalisis efek pengerasan permukaan atau deformasi.
3. Pengamatan *Burn-off Length*: Mengukur pemendekan material akibat pembentukan flash selama pengelasan gesek. Pemendekan ini disebabkan oleh gaya gesek dan gaya tekan yang mengakibatkan adanya panas, material menjadi lunak, dan membuat adanya *flash*. (Bowo, 2019)

Dibawah ini adalah rumusan untuk perhitungan *BOL* :

$$T = L_o - L$$

Keterangan :

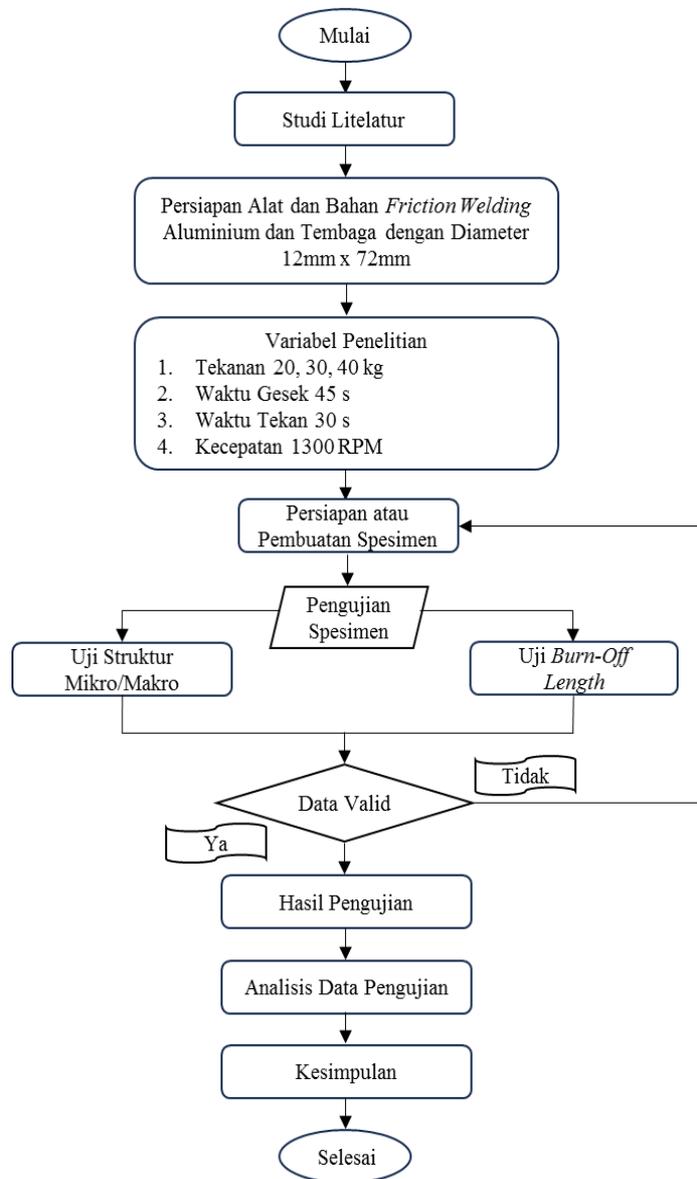
T = Total Pengurangan Ukuran Panjang Material

L_o = Ukuran Panjang Material Pra Proses Pengelasan

L = Ukuran Panjang Material Pasca Proses Pengelasan

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir



Gambar 3. 1 Diagram Alir

Diagram 3.1 menggambarkan proses tentang pengelasan gesek aluminium dan tembaga. Berikut penjelasan tahap-tahapnya::

1. Mulai

Ini merupakan awalan dimulainya suatu penelitian.

2. Studi Literatur

Mengkaji berbagai sumber informasi terkait pengelasan gesek, sifat-sifat aluminium dan tembaga, serta metode pengujian yang relevan.

3. Persiapan Alat dan Bahan

Menyiapkan perlengkapan serta apa saja yang dibutuhkan untuk pengujian pengelasan gesek dan bahan aluminium serta tembaga dengan ukuran spesifik (diameter 12mm x 72mm).

4. Proses Pengerjaan

Titik dimana proses pengerjaan pengelasan gesek dilaksanakan sesuai dengan parameter yang telah ditentukan.

5. Variabel Penelitian

Penentuan variable penelitian yang akan digunakan :

1. Variasi Tekan Benda Uji : 20 kg, 30 kg, dan 40 kg
2. Waktu Gesek Benda Uji : 45 detik
3. Waktu Tekan Benda Uji : 30 detik
4. Kecepatan Putaran Mesin Bubut : RPM 1300

6. Pembuatan Spesimen

Pembuatan sampel-sampel untuk pengujian dari hasil pengelasan.

7. Pengujian Spesimen

a. Uji Struktur Mikro/Makro

Pengujian ini berguna untuk mengamati struktur mikro dan makro terhadap hasil dari pengelasan

b. Uji *Burn-Off Length*

Pengujian ini berguna untuk mengetahui ukuran total pengurangan panjang benda uji setelah mengalami proses pengelasan.

8. Data Valid

Memeriksa apakah data yang diperoleh konsisten dan dapat diandalkan. Jika data sudah sesuai selanjutnya masuk hasil pengujian, sedangkan jika data tidak sesuai akan berbalik lagi ke tahap persiapan spesimen.

9. Hasil Pengujian

Menghimpun dan mendokumentasikan data hasil uji yang telah tervalidasi.

10. Analisis Data Pengujian

Menginterpretasikan hasil riset, mencari sifat fisik aluminium dan tembaga yang dihasilkan oleh variabel penelitian selama proses pengelasan.

11. Kesimpulan

Membuat suatu kesimpulan dari analisis data saat penelitian dan menjawab pertanyaan penelitian atau hipotesis awal.

12. Selesai

Menandakan berakhirnya proses penelitian ini.

Proses ini memungkinkan peneliti untuk mengontrol variabel, melakukan pengujian yang relevan, dan menganalisis hasilnya untuk mencapai kesimpulan yang valid.

3.2. Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1 Alat Penelitian

Tabel 3. 1 Macam-Macam Alat Pada Penelitian

No	Alat	Fungsi	Gambar
1	Gerinda Duduk	Digunakan sebagai alat potong bahan benda uji.	
2	<i>Thermometer Infrared</i>	Berguna sebagai alat ukur temperatur spesimen saat proses pengelasan di daerah sambungan.	
3	Mesin Bubut	Berguna sebagai mesin untuk penelitian proses pembuatan spesimen pengelasan friksi.	
4	Dongkrak Hidrolik	Alat yang digunakan untuk memodifikasi mesin bubut sebagai alat tekan.	
5	Gas LPG	Berguna sebagai bahan bakar untuk memanaskan bahan las.	
6	Oksigen	Sebagai bahan bakar tambah gas untuk mendapatkan suhu yang tinggi agar tercapai titik leleh material.	

3.2.2 Bahan Penelitian

Tabel 3. 2 Macam-Macam Bahan Pada Penelitian

No	Alat	Fungsi	Gambar
1.	Alumunium	Bahan yang digunakan pada riset ini menggunakan ukuran panjang 72 milimeter dan diameter 12 milimeter.	
2.	Tembaga	Bahan yang digunakan pada riset ini menggunakan ukuran panjang 72 milimeter dan diameter 12 milimeter.	

3.3. Proses Pengerjaan

1. Menyiapkan spesimen :

Persiapan spesimen untuk proses pengelasan melibatkan pemotongan dua jenis logam. Pertama, batang Aluminium 6061 dipotong dengan dimensi panjang 72 mm dan diameter 12 mm. Kedua, material Tembaga (Cu) juga disiapkan dengan ukuran yang identik, yaitu panjang 72 mm dan diameter 12 mm. Kedua spesimen ini akan digunakan sebagai bahan uji dalam eksperimen pengelasan yang akan dilakukan.

2. Proses Pemanasan Tembaga :

Tahap persiapan meliputi penyediaan campuran gas elpiji dan oksigen yang akan digunakan sebagai sumber panas untuk tembaga (Cu). Selanjutnya, spesimen tembaga (Cu) disiapkan dan ditempatkan pada mesin bubut untuk proses pemanasan. Langkah terakhir melibatkan pemanasan tembaga (Cu) secara bertahap hingga mencapai titik lelehnya, menggunakan campuran gas yang telah disiapkan sebelumnya. Proses ini

dilakukan dengan hati-hati untuk memastikan tembaga mencapai suhu yang tepat untuk pengolahan lebih lanjut.

3. Proses Pengelasan Friksi :

Persiapan dimulai dengan menyiapkan mesin bubut lalu ditempatkannya benda kerja pada posisi yang sesuai. Metode pengelasan friksi kemudian dimulai dengan memutar spesimen tembaga, membuatnya bergesekan dengan aluminium selama 45 detik. Setelah periode gesekan ini, aluminium diberi tekanan bervariasi yaitu 20 kg, 30 kg, dan 40 kg masing-masing diterapkan selama 30 detik. Setelah tahapan pengelasan selesai, spesimen dilepaskan dari mesin bubut untuk menjalani proses pendinginan alami. Metode ini memanfaatkan panas yang dihasilkan dari gesekan untuk menyatukan kedua logam berbeda, dengan tekanan tambahan untuk memastikan sambungan las yang kuat.

4. Pengujian Hasil Pengelasan:

a. Pengujian Struktur *Makro* :

Siapkan sampel las untuk analisis makroskopik dengan memotong secara melintang dan memoles permukaannya. Aplikasikan larutan etsa yang sesuai, lalu gunakan mikroskop stereo untuk meneliti dan mendokumentasikan area pengelasan, zona terpengaruh panas (HAZ), serta batas-batas butir.

b. Pengujian Struktur *Mikro* :

Persiapkan sampel untuk analisis mikrostruktur dengan menanamnya dalam resin dan memoles hingga mencapai kehalusan optimal. Setelah proses etsa ringan, gunakan mikroskop optik untuk meneliti dan mendokumentasikan karakteristik mikroskopik, termasuk dimensi butir, morfologi fasa, dan distribusi partikel dalam material.

c. Perhitungan *Burn-Off Length*:

Tentukan *BOL* melalui pengukuran selisih panjang material menggunakan jangka sorong, dengan membandingkan ukuran spesimen sesudah dan sebelum proses las dilakukan.

3.4 Variabel Penelitian

Variabel dalam penelitian ini terbagi menjadi dua :

1. Variabel Bebas: Tekanan yang diterapkan saat pengelasan, dengan variasi 20 kg, 30 kg, dan 40 kg.
2. Variabel Terikat: Hasil yang diamati akibat perubahan tekanan, meliputi: Struktur mikro dan makro hasil pengelasan dan *Nilai burn-off length* spesimen.

Variabel bebas mempengaruhi variabel terikat, memungkinkan analisis dampak perubahan tekanan terhadap karakteristik sambungan las.

3.5 Teknik Pengolahan Data

Pada riset ini, data mentah dari hasil pengujian diolah untuk menghasilkan informasi yang lebih bermakna. Proses pengolahan data melibatkan tiga metode utama: pembuatan grafik untuk visualisasi tren, penyajian gambar hasil pengujian untuk analisis visual, dan perhitungan *burn-off length*. Kombinasi teknik-teknik ini memungkinkan interpretasi yang komprehensif terhadap efek variasi tekanan pada karakteristik sambungan las, memberikan dasar untuk analisis dan kesimpulan yang lebih mendalam.

3.6 Tempat dan Waktu Pelaksanaan Penelitian

3.6.1 Tempat Pelaksanaan Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini pada dua lokasi berbeda. Proses pembuatan spesimen dan pengelasan dilakukan di Lab Permesinan Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka di Kota Jakarta. Sementara itu, pengujian metalurgi dilaksanakan di Lab Metalografi Fakultas Teknik Mesin, Universitas Indonesia di Kota Depok, Jawa Barat. Pemisahan lokasi ini memungkinkan pemanfaatan fasilitas dan keahlian khusus di masing-masing institusi untuk memastikan kualitas dan akurasi hasil penelitian.

3.6.2 Waktu Pelaksanaan Penelitian

Pelaksanaan kegiatan ini berlangsung sekitar 10 bulan. Proses dimulai dengan persiapan dan perencanaan penelitian selama 1 bulan, diikuti pengumpulan bahan baku aluminium dan tembaga yang juga memakan waktu 1 bulan. Tahap berikutnya adalah pengaturan dan pengujian mesin friction welding, yang memerlukan waktu 2 bulan. Selanjutnya, peneliti menghabiskan 3 bulan untuk mencoba berbagai metode variasi tekanan hingga proses pengelasan selesai. Analisis hasil uji, termasuk pengamatan struktur mikro dan makro, dilakukan selama 2 bulan. Akhirnya, penyusunan laporan akhir membutuhkan waktu 1 bulan untuk menyelesaikannya. Rangkaian kegiatan ini menunjukkan pendekatan sistematis dan menyeluruh dalam melaksanakan penelitian friction welding antara aluminium dan tembaga.

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

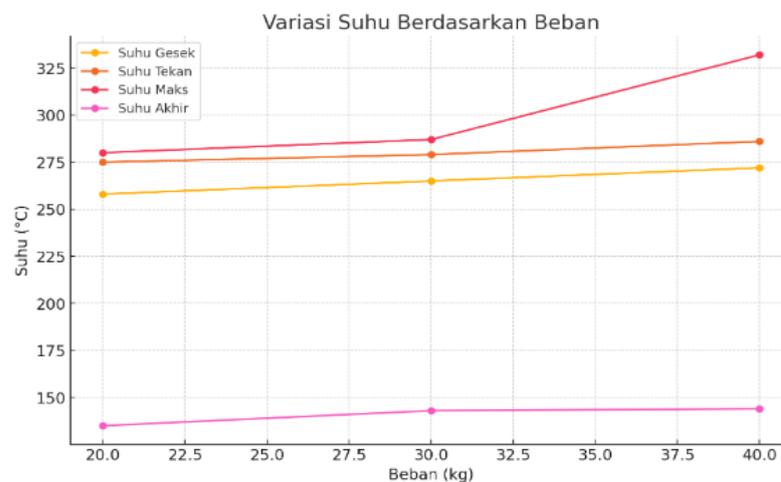
4.1 Hasil Penelitian

Bertujuan mengeksplorasi dampak perubahan tekanan terhadap karakteristik fisik sambungan las yang dihasilkan melalui metode friction welding antara aluminium dan tembaga. Dengan memvariasikan tekanan yang diterapkan selama proses pengelasan, penelitian ini berusaha mengungkap bagaimana parameter tersebut mempengaruhi kualitas dan sifat-sifat fisik dari sambungan kedua logam yang berbeda tersebut. Hasil penelitian di harapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang optimalisasi proses friction welding untuk kombinasi material aluminium-tembaga.

4.1.1. Suhu Selama Proses Pengelasan Gesek Putar

Tabel 4. 1 Suhu Selama Proses Pengelasan

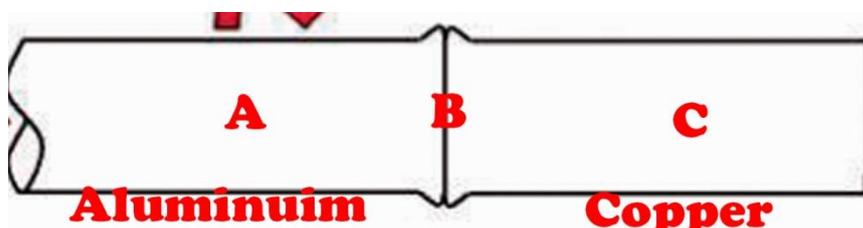
Variasi Tekanan (Kg)	Suhu Gesek	Suhu Tekan	Suhu Maks	Suhu Akhir
20 Kg	258° C	275° C	280° C	135° C
30 Kg	265° C	279° C	287° C	143° C
40 Kg	272° C	286° C	332° C	144° C



Grafik 4. 1 Suhu Selama Pengelasan Gesek Putar

Grafik tersebut menggambarkan hubungan antara beban tekan dan suhu dalam proses pengelasan friksi. Setiap garis mempresentasikan 4 buah suhu : Gesek, Tekan, Maksimum, dan Akhir. Tren menunjukkan bahwa peningkatan beban tekan berbanding lurus dengan kenaikan suhu untuk semua jenis pengukuran. Hal ini mengindikasikan korelasi positif antara tekanan yang diterapkan dan suhu yang dihasilkan selama proses pengelasan.

4.1.2. Daerah Pengambilan Data Metalografi



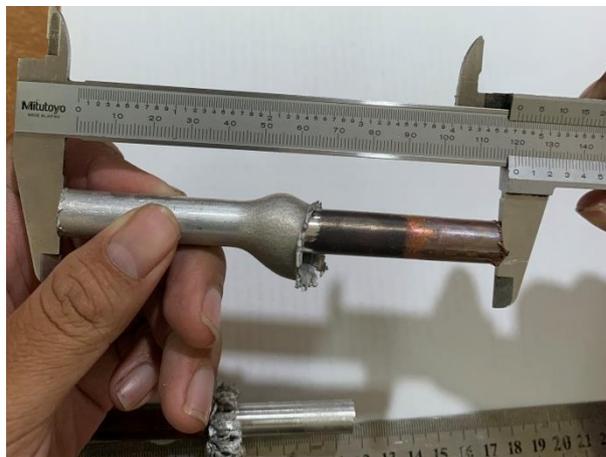
Gambar 4. 1 Daerah Metalografi Pengambilan Data

Skema pengambilan data metalografi pada sambungan las friksi antara aluminium dan tembaga melibatkan tiga daerah kunci. Daerah A terletak di bagian aluminium jauh dari area las, mewakili struktur logam dasar aluminium yang tidak terpengaruh. Daerah B berada tepat di garis sambungan (*interface*) antara kedua logam, menunjukkan zona pengelasan di mana aluminium dan tembaga menyatu. Daerah C terletak di bagian tembaga jauh dari area las, mewakili struktur logam dasar tembaga yang tidak terpengaruh. Pengambilan data pada ketiga titik ini memungkinkan analisis perbandingan struktur mikro antara logam dasar dan daerah las, membantu memahami perubahan mikrostruktur akibat proses friction welding dan bagaimana kedua logam berbeda tersebut menyatu di zona pengelasan.

4.1.3. Pengukuran Burn-Off Length (BOL)

Setelah proses pengelasan selesai, dilakukan pengukuran *BOL*. Prosedur ini melibatkan pengukuran panjang spesimen benda uji pada dua tahap : pertama sebelum proses pengelasan dimulai, dan kedua setelah proses pengelasan selesai. Perbandingan kedua hasil pengukuran ini memungkinkan evaluasi perubahan dimensi yang terjadi akibat proses pengelasan friksi pada spesimen tersebut.

a. *Burn-Off Length* Variasi Tekan 20 kg



Gambar 4. 2 BOL Variasi Tekan 20 kg

$$T = L_0 - L$$

$$T = (72 \text{ mm} + 72 \text{ mm}) - 122 \text{ mm}$$

$$T = 144 \text{ mm} - 122 \text{ mm}$$

$$T = 22 \text{ mm}$$

Pengukuran menunjukkan bahwa spesimen yang dilas dengan tekanan 20 kg mengalami total pemendekan atau *burn-off length* sebesar 22 mm. Angka ini merepresentasikan selisih panjang spesimen sebelum dan sesudah proses pengelasan friksi, menggambarkan besarnya deformasi plastis yang terjadi akibat kombinasi panas gesekan dan tekanan yang diberikan selama proses pengelasan.

b. *Burn-Off Length* Variasi Tekan 30 kg



Gambar 4. 3 BOL Variasi Tekan 30 kg

$$T = L_0 - L$$

$$T = (72 \text{ mm} + 72 \text{ mm}) - 120 \text{ mm}$$

$$T = 144 \text{ mm} - 120 \text{ mm}$$

$$T = 24 \text{ mm}$$

Pengukuran menunjukkan bahwa spesimen yang dilas dengan tekanan 30 kg mengalami total pemendekan atau *burn-off length* sebesar 24 mm. Angka ini merepresentasikan selisih panjang spesimen sebelum dan sesudah proses pengelasan friksi, menggambarkan besarnya deformasi plastis yang terjadi akibat kombinasi panas gesekan dan tekanan yang diberikan selama proses pengelasan.

c. *Burn-Off Length* Variasi Tekan 40 kg



Gambar 4. 4 BOL Variasi Tekan 40 kg

$$T = L_o - L$$

$$T = (72 \text{ mm} + 72 \text{ mm}) - 115 \text{ mm}$$

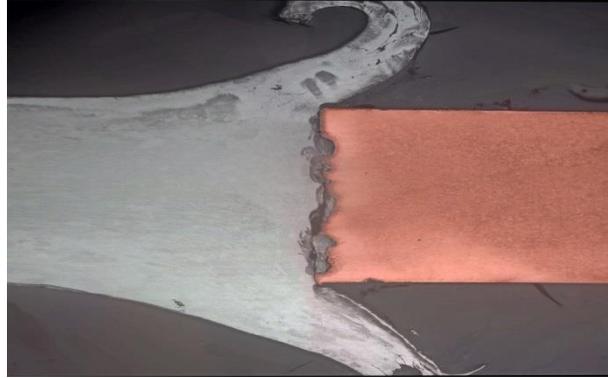
$$T = 144 \text{ mm} - 115 \text{ mm}$$

$$T = 29 \text{ mm}$$

Pengukuran menunjukkan bahwa spesimen yang dilas dengan tekanan 40 kg mengalami total pemendekan atau *burn-off length* sebesar 19 mm. Angka ini merepresentasikan selisih panjang spesimen sebelum dan sesudah proses pengelasan friksi, menggambarkan besarnya deformasi plastis yang terjadi akibat kombinasi panas gesekan dan tekanan yang diberikan selama proses pengelasan.

4.1.4. Hasil Pengamatan Struktur Makro dan Mikro Tekanan 20 kg

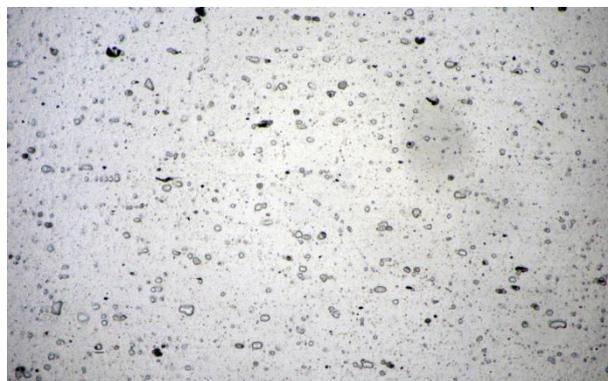
1. Struktur Makro



Gambar 4. 5 Struktur makro variasi 20 kg

Hasil pengelasan antara aluminium dan tembaga yang terlihat pada gambar 4.5 ini menunjukkan beberapa karakteristik struktur makro yang signifikan. Zona fusi terlihat jelas dengan perbedaan warna kontras antara kedua logam, mengindikasikan pencampuran terbatas. Meskipun tidak terlihat langsung, zona ini kemungkinan mengandung struktur dendritik dan senyawa intermetalik Al-Cu. Porositas mungkin hadir, ditunjukkan oleh titik-titik gelap di sepanjang batas las, sementara retakan atau celah kecil bisa disebabkan oleh perbedaan koefisien ekspansi termal antara aluminium dan tembaga. Area yang lebih terang di sisi aluminium mungkin menandakan Zona Terpengaruh Panas (HAZ).

2. Struktur Mikro



Gambar 4. 6 Struktur Mikro Aluminium (Perbesaran 100x)

Gambar diatas memperlihatkan struktur mikroskopik aluminium dengan struktur butir yang relatif seragam dengan ukuran butir yang kecil dan tersebar merata.



Gambar 4. 7 Struktur Mikro Daerah Pengelasan (Perbesaran 500x)

Gambar diatas ini memperlihatkan hasil struktur mikroskopik pada daerah pengelasan aluminium dengan tembaga. Tampak adanya perbedaan jelas antara daerah pengelasan dan material dasar. Zona pengelasan terlihat lebih homogen.



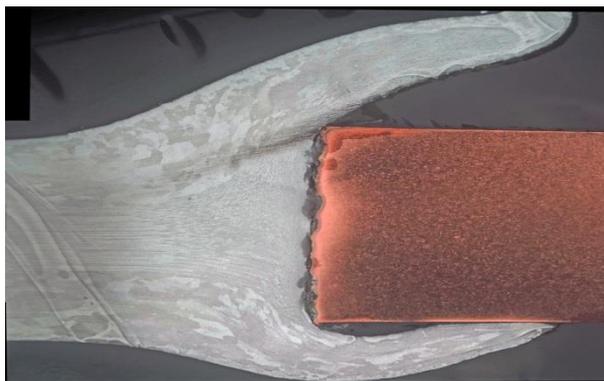
Gambar 4. 8 Struktur Mikro Tembaga (Perbesaran 1000x)

Gambar di atas memperlihatkan struktur mikroskopik tembaga dengan butiran besar berbentuk poligonal. Ukuran butiran yang besar ini dihasilkan dari proses pemanasan atau perlakuan panas yang mendorong pertumbuhan butiran. Batas butiran terlihat jelas dengan garis-garis yang membatasi setiap butiran, mempengaruhi sifat mekanik seperti kekuatan dan ketangguhan material. Beberapa area tampak lebih gelap, kemungkinan inklusi dari proses pengelasan atau bahan baku yang

digunakan. Pori-pori kecil juga terlihat, yang dapat mempengaruhi kekuatan material dan terjadi akibat proses pengecoran atau pemanasan yang tidak sempurna. Gambar menunjukkan struktur internal kompleks dengan variasi dalam komposisi atau fase, termasuk presipitasi fase kedua atau variasi komposisi kimia dalam butiran. Beberapa butiran menunjukkan garisan-garisan yang menandakan deformasi plastik atau jejak dari proses pengerjaan sebelumnya. Tidak terlihat adanya retakan besar, menunjukkan struktur mikro yang relatif utuh tanpa keretakan signifikan selama proses manufaktur atau perlakuan panas.

4.1.5. Hasil Pengamatan Struktur Makro dan Mikro Tekanan 30 kg

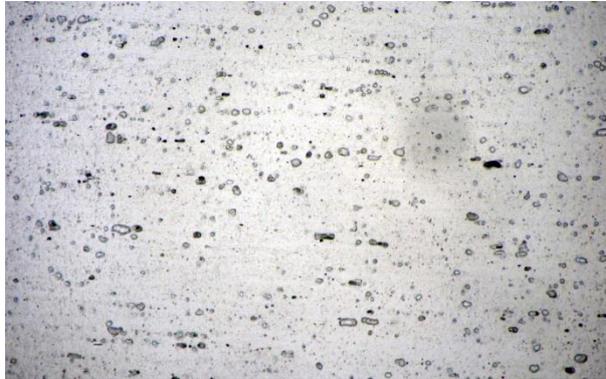
1. Struktur Makro



Gambar 4. 9 Struktur makro variasi 30 kg

Analisis struktur makro pada gambar 4.9 ini merupakan hasil pengelasan aluminium-tembaga yang mengungkapkan beberapa karakteristik metalurgi yang signifikan. Zona fusi menampilkan batas tegas antara kedua logam, menandakan pencampuran terbatas akibat perbedaan sifat Al-Cu. Pola aliran material pada sisi aluminium dan perbedaan tekstur di Zona Terpengaruh Panas (HAZ) mencerminkan dinamika pengelasan. Interface las menunjukkan diskontinuitas yang mungkin mengindikasikan pembentukan fasa intermetalik atau porositas. Perbedaan tekstur permukaan kedua logam menggambarkan respons termal yang berbeda selama pendinginan.

2. Struktur Mikro



Gambar 4. 10 Struktur Mikro Aluminium (Perbesaran 100x)

Gambar diatas ini memperlihatkan struktur mikro aluminium yang memperlihatkan distribusi pori-pori atau rongga kecil yang tersebar acak di seluruh permukaan. Terlihat adanya peningkatan ukuran butir dibandingkan dengan tekanan 20 kg, menunjukkan pengaruh panas dan tekanan yang lebih tinggi.



Gambar 4. 11 Struktur Mikro Daerah Pengelasan (Perbesaran 500x)

Gambar ini menunjukkan beberapa fitur utama, yaitu zona logam induk, zona campuran atau fusi, zona logam induk aluminium, dan zona HAZ (Heat Affected Zone). Bagian paling kanan adalah logam induk tembaga yang homogen dengan butiran besar dan pori-pori kecil tersebar. Bagian tengah adalah zona campuran antara aluminium dan tembaga, menunjukkan perubahan struktur mikro signifikan dan pembentukan senyawa intermetalik yang keras dan rapuh. Bagian paling kiri kemungkinan adalah logam induk aluminium dengan struktur mikro yang

lebih kompleks, butiran halus, dan mungkin adanya segregasi atau inklusi. Antara zona campuran dan logam induk, terdapat zona HAZ di mana material mengalami perubahan struktur mikro akibat panas pengelasan tanpa mencair, dengan butiran lebih besar dan sifat mekanik berbeda

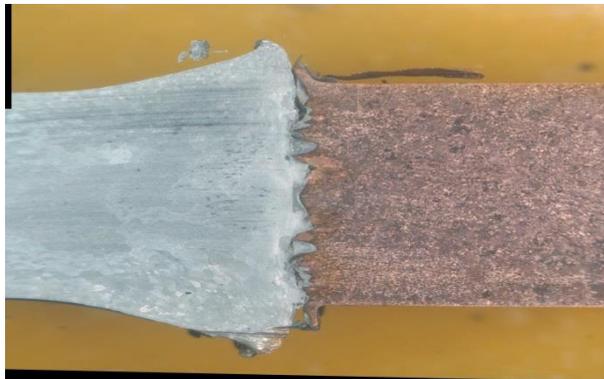


Gambar 4. 12 Stuktur Mikro Tembaga (Perbesaran 1000x)

Gambar 4.12 memperlihatkan struktur mikro tembaga dengan karakteristik khas. Butiran besar dan poligonal yang terlihat menunjukkan material telah mengalami proses anil, dengan batas butir yang jelas sebagai area potensial untuk kegagalan material. Terlihat adanya pori-pori atau inklusi yang dapat mempengaruhi sifat mekanik. Garis-garis lurus dalam beberapa butir mengindikasikan batas kembar, hasil dari deformasi mekanik atau pemanasan tertentu. Struktur butir mulai membesar dan ada beberapa daerah yang menunjukkan tanda-tanda perubahan struktur akibat tekanan dan panas yang lebih tinggi.

4.1.6. Hasil Pengamatan Struktur Makro dan Mikro Tekanan 40 kg

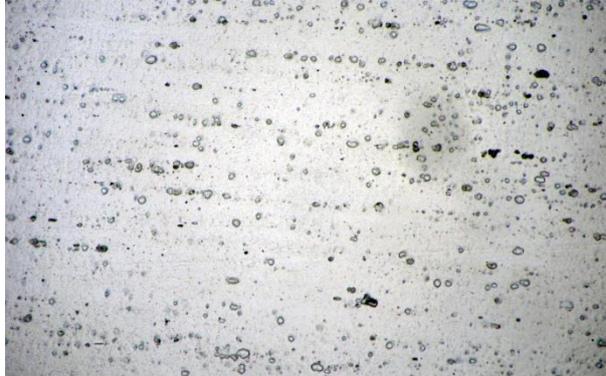
1. Stuktur Makro



Gambar 4. 13 Struktur Makro Variasi 40 kg

Gambar 4.13 ini menunjukkan struktur makro hasil pengelasan antara aluminium (bagian abu-abu) dan tembaga (bagian coklat kemerahan), memberikan wawasan penting tentang karakteristik sambungan logam tak sejenis ini. Interface las menampilkan batas yang tidak teratur dan bergerigi, mengindikasikan pencampuran terbatas dan kemungkinan pembentukan fasa intermetalik Al-Cu. Perbedaan warna dan tekstur yang jelas antara kedua logam mencerminkan perbedaan sifat fisik dan kimia mereka. Terlihat adanya diskontinuitas dan celah di sepanjang garis las, yang mungkin disebabkan oleh perbedaan koefisien ekspansi termal dan titik lebur antara aluminium dan tembaga. Hal ini dapat mengakibatkan tegangan sisa dan potensi kelemahan struktural. Permukaan aluminium tampak lebih halus dibandingkan tembaga, menunjukkan respons yang berbeda terhadap proses pengelasan dan pendinginan.

2. Struktur Mikro



Gambar 4. 14 Struktur Mikro Alumunium 40 kg (Perbesaran 100x)

Struktur mikro dari aluminium dalam gambar 4.14 tampak memiliki pori-pori atau inklusi yang tersebar. Titik-titik gelap yang terlihat dapat menjadi indikasi adanya pori-pori dalam material. Ukuran butir semakin membesar, mengindikasikan rekristalisasi lebih lanjut akibat tekanan dan panas yang lebih tinggi.



Gambar 4. 15 Struktur Mikro Daerah Pengelasan Variasi 40 kg (Perbesaran 500x)

Gambar di atas menunjukkan struktur mikroskopik pada daerah las gesek AlCu, dengan perbedaan jelas antara kedua logam. Di sisi kiri, aluminium memiliki struktur mikro yang tidak teratur dengan warna keabu-abuan dan hijau, menunjukkan deformasi plastis signifikan akibat pengelasan gesek. Bagian tengah memperlihatkan zona transisi atau interface las yang ditandai dengan garis vertikal, di mana kedua logam bercampur dan bereaksi, membentuk fasa intermetalik Al-Cu dengan struktur kompleks dan beragam warna. Di sisi kanan, tembaga tampak

lebih homogen dengan warna kecokelatan dan beberapa titik gelap yang mungkin merupakan inklusi atau porositas. Perbedaan warna dan tekstur antar bagian mencerminkan perubahan mikrostruktur selama pengelasan gesek, termasuk deformasi plastis, difusi atom, dan pembentukan fasa baru di daerah interface.

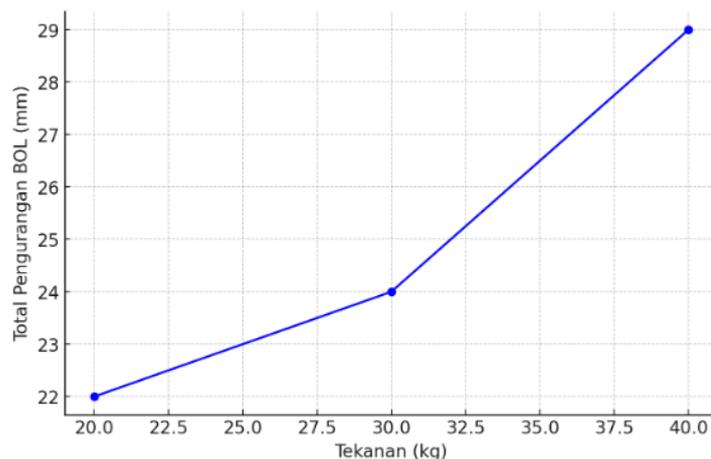


Gambar 4. 16 Struktur Mikro Tembaga 40 Kg (Perbesaran 1000x)

Berdasarkan pengamatan terhadap gambar 4.16, terlihat struktur dendritik, yang sering terbentuk pada logam saat pendinginan dari fase cair ke padat. Dendritik merupakan struktur bercabang yang umum ditemukan dalam proses solidifikasi. Area yang lebih terang dalam gambar menunjukkan adanya fase intermetalik, yang merupakan senyawa yang terbentuk dari reaksi antara tembaga dan unsur lain, seperti aluminium dalam pengelasan ini. Fase intermetalik ini biasanya keras dan rapuh. Daerah yang menunjukkan berubahnya struktur mikroskopik dari pemanasan dan pendinginan cepat selama proses pengelasan. HAZ biasanya menunjukkan butiran yang lebih besar dan perubahan sifat mekanik dari material asli. Ukuran butir lebih besar dibandingkan dengan tekanan yang lebih rendah, dengan perubahan yang lebih signifikan pada struktur mikro.

4.2 Pembahasan

4.2.1. Pembahasan Perhitungan Panjang *BOL*



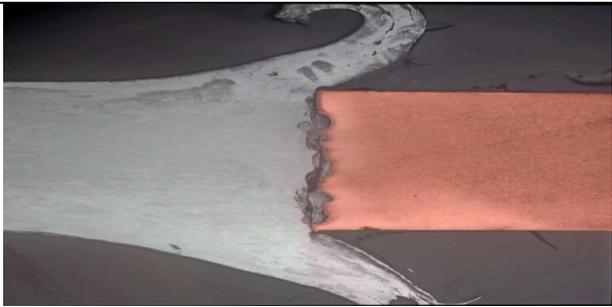
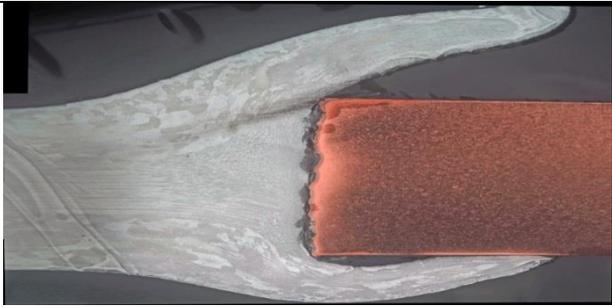
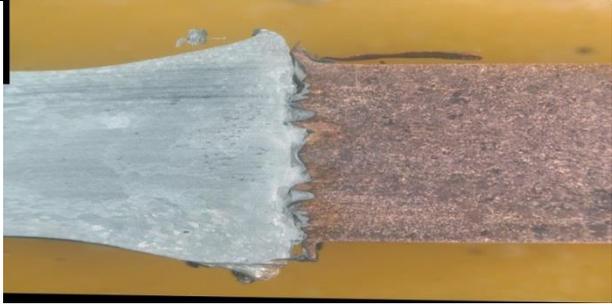
Grafik 4. 2 Perhitungan *BOL*

Hasil perhitungan *BOL* pada proses *Rotary Friction Welding* menunjukkan pemendekan spesimen yang bervariasi sesuai dengan tekanan yang diterapkan. Pada tekanan 20 kg, spesimen mengalami pengurangan panjang sebesar 22 mm. Pengelasan dengan tekanan 30 kg menghasilkan pemendekan 24 mm, sementara pada tekanan 40 kg, panjang spesimen berkurang hingga 29 mm. Data ini menggambarkan hubungan langsung antara peningkatan tekanan pengelasan dengan besarnya deformasi plastis yang terjadi, yang tercermin dari peningkatan *Burn-Off length*. (Bowo, 2019)

4.2.2. Pembahasan Pengamatan Struktur Makro

Pengamatan struktur makro ini dilakukan menggunakan lensa optik dengan kemampuan pembesaran makro. Tujuan pengamatan struktur makro adalah untuk memeriksa daerah pengelasan. Pengamatan struktur makro dilakukan pada spesimen yang telah disambung dengan variasi tekanan. Adapun hasil pengamatan struktur makro dapat dilihat pada tabel 4.2 dibawah ini. (Fatha, 2019)

Tabel 4. 2 Pembahasan Pengamatan Struktur Makro

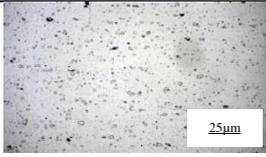
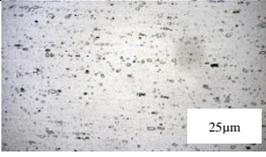
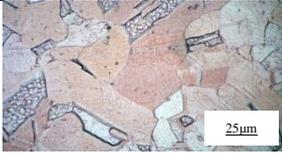
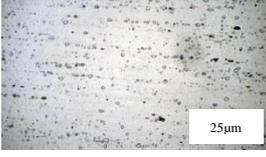
Variasi Tekanan (Kg)	Pengamatan Struktur Makro
20 Kg	
30 Kg	
40 Kg	

Dari pengamatan struktur makro yang dilakukan, terlihat bahwa daerah hasil lasan tersambung dengan baik, meskipun terjadi perubahan struktur material di sekitar area las. Perubahan struktur ini disebabkan oleh panas yang dihasilkan dari gesekan antar spesimen. Metode pengelasan ini sangat cocok untuk penyambungan material silinder pejal dengan penyambungan yang menyeluruh dari lapisan dalam hingga luar. Menggunakan mesin bubut untuk melaksanakan pengelasan RFW, parameter yang digunakan telah menghasilkan sambungan yang sesuai dengan harapan. (Fatha, 2019)

4.2.3. Pembahasan Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 100x, 500x, dan 1000x, di mana 1 strip skala pada foto mikro menunjukkan 25 μm . Data hasil pengamatan struktur mikro pengelasan diambil pada Aluminium, Daerah Pengelasan, dan Tembaga. Terdapat tiga variasi tekanan yang diberikan, yaitu tekanan 20 kg, 30 kg, dan 40 kg, sehingga pengambilan data pengamatan struktur mikro ini dilakukan sebanyak 9 kali. Data hasil pengamatan struktur mikro ini dapat dilihat pada tabel berikut. (Fatha, 2019)

Tabel 4. 3 Pembahasan Pengamatan Struktur Mikro

Variasi Tekanan (Kg)	Aluminium	Daerah Pengelasan	Tembaga
20 Kg			
30 Kg			
40 Kg			

Pada aluminium, tekanan 20 kg menghasilkan struktur butir seragam dengan ukuran kecil dan tersebar merata. Tekanan 30 kg meningkatkan ukuran butir, menunjukkan pengaruh panas dan tekanan lebih tinggi, sementara tekanan 40 kg menyebabkan butir semakin membesar, menunjukkan rekristalisasi lebih lanjut. Di daerah pengelasan, tekanan 20 kg menghasilkan perbedaan jelas antara daerah pengelasan dan material dasar dengan zona pengelasan yang lebih homogen. Tekanan 30 kg menunjukkan perubahan signifikan dengan beberapa daerah rekristalisasi, dan tekanan 40 kg menghasilkan struktur lebih kasar dengan ukuran

butir yang lebih besar dan perubahan fase material akibat panas yang intens. Pada tembaga, tekanan 20 kg menghasilkan struktur butir seragam dan halus, mirip dengan aluminium pada tekanan yang sama. Tekanan 30 kg menyebabkan struktur butir mulai membesar dengan tanda-tanda perubahan struktur, dan tekanan 40 kg menghasilkan ukuran butir yang lebih besar, menunjukkan perubahan mikrostruktur yang lebih signifikan. (Fatha, 2019)

BAB 5. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pendahuluan dan tujuan sebelumnya dapat diuraikan kesimpulan sebagai berikut :

1. Peningkatan tekanan selama proses pengelasan *Rotary Friction Welding (RFW)* menghasilkan perubahan dalam struktur mikro dan makro pada Aluminium, daerah pengelasan, dan Tembaga. Semakin tinggi tekanan, semakin besar ukuran butir dan lebih signifikan perubahan struktur akibat tekanan yang lebih intens. Pada tekanan 40 kg memiliki ukuran butir terbesar pada hasil pengelasan.
2. Hasil perhitungan *Burn-Off Length (BOL)* pada proses *Rotary Friction Welding (RFW)* menunjukkan bahwa peningkatan tekanan pengelasan berkorelasi langsung dengan peningkatan deformasi plastis, sebagaimana ditunjukkan oleh pemendekan spesimen. Pada tekanan 20 kg, spesimen memendek 22 mm, pada tekanan 30 kg pemendekan mencapai 24 mm, dan pada tekanan 40 kg panjang spesimen berkurang hingga 29 mm. Data ini menegaskan bahwa semakin tinggi tekanan pengelasan, semakin besar *Burn-Off length* yang terjadi.

5.2 Saran

1. Diperlukan pengujian tambahan seperti pengujian kekerasan pada sambungan las, agar dapat mengetahui tekanan terbaik terhadap kekerasan sambungan las spesimen.
2. Diperlukan studi mikro struktur lanjutan menggunakan teknik *Scanning Electron Microscopy (SEM)* dan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX)*. Untuk mendapatkan pemahaman yang lebih mendalam tentang perubahan struktur *mikro* pada zona sambungan.

DAFTAR REFERENSI

- Alves, E. P., Neto, F. P., & An, C. Y. (2019). Welding of AA1050 aluminum with AISI 304 stainless steel by rotary friction welding process. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 301-302.
- Alves, P. E., An, C. Y., Neto, F. P., & Dos Santos, E. F. (2020). Experimental Determination of Temperature during Rotary Friction Welding of Dissimilar Materials. *Frontiers in Aerospace Engineering*, 20.
- Amin, A. (2017). PENGARUH VARIASI BEBAN GESEK TERHADAP STRUKTUR MIKRO AXLE SHAFT HASIL SAMBUNGAN FRICTION WELDING. *Jurnal Teknik Mesin UNISKA*, 4-5.
- Bowo, P. A. (2019). PENGARUH KECEPATAN PUTARAN DAN BURN-OFF LENGTH (BOL) TERHADAP KEKUATAN TARIK DISSIMILAR FRICTION WELDING A6061 DENGAN S50C. *Academia Edu*, 17-18.
- Faisal, M., Bastomi, M., & S, H. A. (2023). Rancang Bangun Alat Bantu Tekan Berbasis Hidrolik pada Proses Pengelasan Gesek. *Blend Sains Jurnal Teknik*, 259.
- Global, T. (2024). *TWI Global*. Retrieved July 2, 2024, from TWI Global: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/linear-friction-welding-146>
- Haliym Moek'arriharsjah, D. A. (2020, December 30). *Optimasi Pengelasan Dissimilar Aluminium-Baja Dengan Metode*. Retrieved May 28, 2024, from DSpace UII: <https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/29431>
- Haryanto, P., Ismail Rifky, Jamari, & Nugroho, S. (2011). PENGARUH GAYA TEKAN, KECEPATAN PUTAR, DAN WAKTU KONTAK PADA PENGELASAN GESEK BAJA ST60 TERHADAP KUALITAS. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi ke-2*, 2.

- Haryanto, P., Ismail, R., Jamari, & Nugroho, S. (2023). PENGARUH GAYA TEKAN, KECEPATAN PUTAR, DAN WAKTU KONTAK PADA PENGELASAN GESEK BAJA ST60 TERHADAP KUALITAS SAMBUNGAN. *Digilib Unila*, 1.
- Hidayat, S. (2022). ANALISIS PENGELASAN SMAW PADA SAMBUNGAN BAJA ST37 DENGAN VARIASI JENIS ELEKTRODA. *Repositori Untidar*, 10.
- Jupri, Ikhsan, M., B, S., & Zulkarnain. (2022). ANALISIS PENGUJIAN TARIK PADA PENYAMBUNGAN ALUMINIUM-TEMBAGA dengan PROSES FRICTION STIR WELDING. *JURNAL INOVTEK POLBENG*, 75.
- Khairuddin, Yamin, M., & Kusmiyati. (2021). ANALISIS KANDUNGAN LOGAM BERAT TEMBAGA (Cu) PADA BANDENG (*Chanos chanos* Forsk) YANG BERASAL DARI KAMPUNG MELAYU KOTA BIMA. *J. Pijar MIPA*, 98.
- Khusaini, M., Fadelan, & Winardi, Y. (2021). Pengaruh Kuat Arus Terhadap Kekuatan Tarik dan Struktur Mikro pada Pengelasan MIG (Metal Inert Gas) Aluminium. *Jurnal AutoMech*, 26.
- Minanda, T. E. (2018). ANALISIS SIFAT FISIS DAN MEKANIS HASIL PENYAMBUNGAN PLAT BEDA MATERIAL (Al-CuZn) (Al-Cu) (Cu-CuZn) MENGGUNAKAN METODE FRICTION STIR WELDING. *UMS Digital Library*, 2.
- Mogami, H., Matsuda, T., Sano, T., Yoshida, R., Hori, H., & Hirose, A. (2018). High-frequency linear friction welding of aluminum alloys. *Science Direct*, 458.
- Pangaribuan, P. M. (2016). PENGARUH PENAMBAHAN NIKEL (Ni) TERHADAP SIFAT ELEKTRIK DAN KEKERASAN PADUAN TEMBAGA-NIKEL UNTUK APLIKASI TERMOKOPEL. *Repository ITS*, 18.

- Pangaribuan, P. M. (2016). PENGARUH PENAMBAHAN NIKEL (Ni) TERHADAP SIFAT ELEKTRIK DAN KEKERASAN PADUAN TEMBAGA-NIKEL UNTUK APLIKASI TERMOKOPEL. *Repository ITS*, 15.
- Parekke, S.T., M.T., S., & Yantony, S.S.T., M.P.d., D. (2023). *Teknologi Pengelasan Logam (Jilid 1)*. Pekalongan: PT Nasya Expanding Management.
- Prayoga, B., & Tarmizi. (2016). ANALISA SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO PADA PROSES FRICTION STIR WELDING ALUMUNIUM 5052. *Jurnal Riset Industri Vol. 10 No. 2*, 70.
- Purwaningrum, Y., Fatha, F., & Pratama, A. D. (2022). OPTIMASI SAMBUNGAN ROTARY FRICTION WELDING (RFW) PADA ALUMINIUM 4017 DENGAN VARIASI BENTUK PROFIL SAMBUNGAN . *Simposium Nasional RAPI XXI – 2022 FT UMS*, 165.
- Putra, A. D., Purwanto, H., & Syafa'at, I. (2020). ANALISIS SIFAT FISIK DAN MEKANIK PADA SAMBUNGAN LAS GESEK DUA JENIS. *Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Wahid Hasyim*, 35.
- Radius. (2015, Mei 21). *Teknologi Manufaktur*. Retrieved July 2, 2024, from Teknik Mesin Manufaktur: <https://teknikmesinmanufaktur.blogspot.com/2015/05/friction-welding-frw.html>
- Rahmawati, D. I., & Nuraliyah, A. (2024). Pengaruh ketahanan korosi logam alumunium terhadap variasi pada larutan asam klorida 0,1 M dan 0,5 M. *Dynamics in Engineering Systems: Innovations and Applications (DYNAMES)*, 17.
- Rahmawati, D. I., & Nuraliyah, A. (2024). Pengaruh ketahanan korosi logam alumunium terhadap variasi pada larutan asam klorida 0,1 M dan 0,5 M.

Dynamics in Engineering Systems: Innovations and Applications (DYNAMES), 18.

S.P.d., M.P.d., J., Halik, S.Pd., MT., I., Hasim S, S.Pd., M.Pd., I., S.Pd., M.Pd., W., S.Pd., M.T., I., S.Pd., M.Pd., M., et al. (2023). *Teknik Pengelasan*. Makassar: Rizmedia Pustaka Indonesia.

Saputra, R. D. (2020). *DSpace UII*. Retrieved June Thursday, 2024, from DSpace UII: <https://dspace.uii.ac.id/handle/123456789/31105>

Setiawan, H. (2013). PENGUJIAN KEKUATAN TARIK, KEKERASAN, DAN STRUKTUR MIKRO PRODUK COR PROPELER KUNINGAN. *Jurnal SIMETRIS*, 74.

Sharma, A., & Dwivedi, V. K. (2021). Recent Development in Friction Stir Welding: An Advancement in Welding Technology. *Springer Link*.

Shete, N., & Deokar, S. (2017). A Review Paper on Rotary Friction Welding. *International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering*, 1558-1559.

Soedarmadji, W. (2020). PENGARUH PENGELASAN SHIELDED METAL ARC WELDING (SMAW) PADA MILD STEEL S45C DI DAERAH HAZ DENGAN PENGUJIAN METALOGRAFI. *Journal Mechanical and Manufacture Technology*, 13.

Sudjana, H. (2008). *Teknik Pengecoran Logam Jilid 1*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.

Sunyoto, Nugroho, G., Subarjan, & Sasmito, A. (2020). Optimalisasi Fungsi Mesin Bubut untuk Proses Pengelasan Rotary Friction Welding dengan Menambah Jig dan Pendorong Hidrolik. *INDONESIAN JOURNAL OF LABORATORY*, 18.

Sunyoto, Nugroho, G., Subarjan, & Sasmito, A. (2020). Optimalisasi Fungsi Mesin Bubut untuk Proses Pengelasan Rotary Friction Welding dengan

Menambah Jig dan Pendorong Hidrolik. *INDONESIAN JOURNAL OF LABORATORY*, 17.

Suwanda, T., Serena, S. A., & Nugroho, A. W. (2016). Mikrostruktur dan Kekerasan Sambungan Pengelasan Gesek Disimilar Pipa Tembaga/Kuningan (Cu/Cu-Zn). *Semesta Teknika*, 68.

Vairis, A., Papazafeiropoulos, G., & Tsainis, A. M. (2016). A comparison between friction stir welding, linear friction welding and rotary friction welding. *Springer Link*, 296-304.

Wahyu, T. (2023). ANALISIS KEKUATAN TARIK PENGELASAN GESEK (FRICTION WELDING) PADA ALUMINIUM 6061 DENGAN VARIASI KECEPATAN PUTAR DAN BEBAN TEMPA. *DIGITAL REPOSITORY UNILA*, 8.

Weerg. (2021, July 13). *Weerg*. Retrieved July 2, 2024, from Weerg: <https://www.weerg.com/guides/aluminum-properties-and-advantages-of-aluminum>

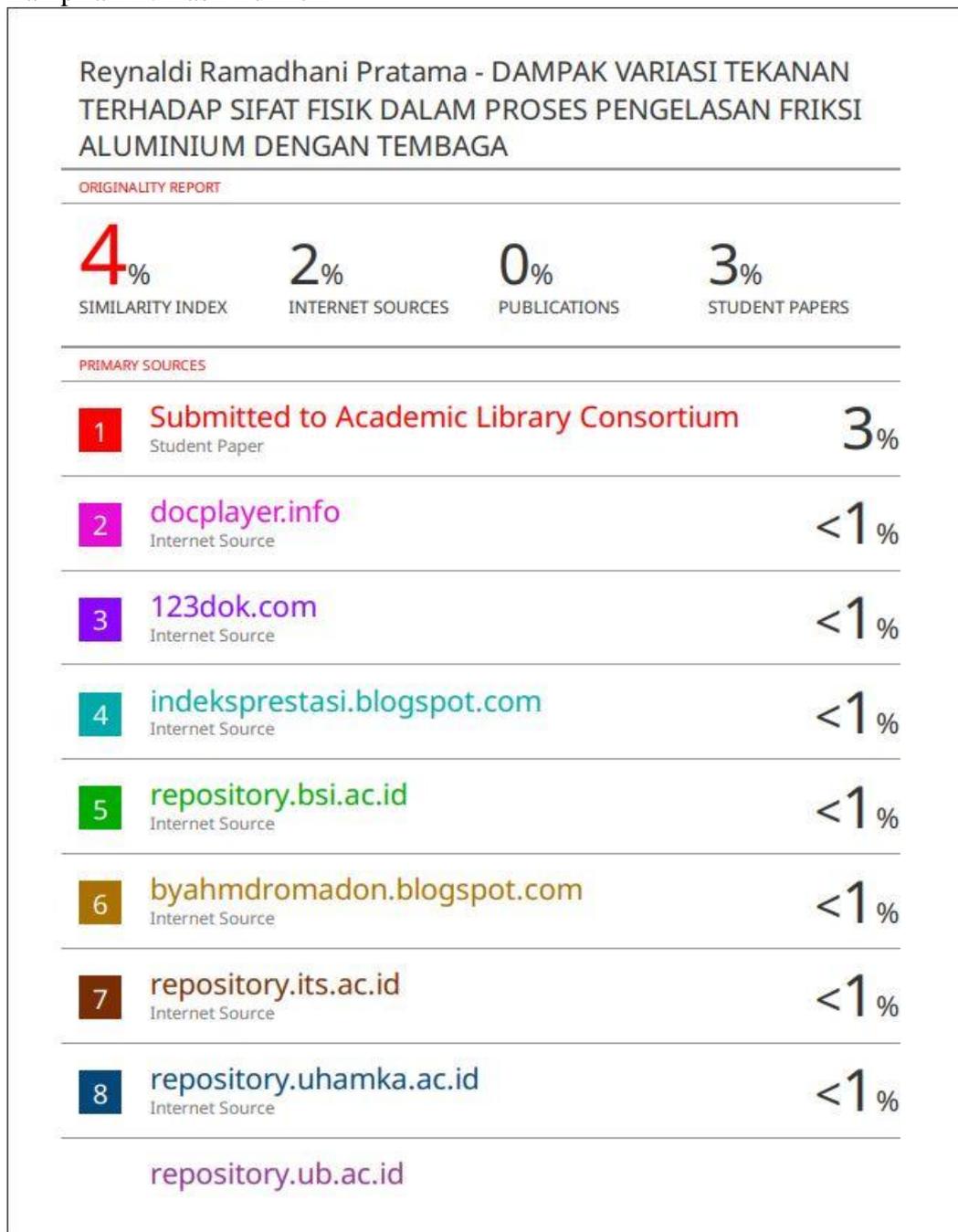
Widodo, G. E. (2013). *ANALISIS KEKUATAN LAS BERBAHAN ALUMINIUM MAMPU LAS TERHADAP SIFAT FISIS DAN MEKANIS*. Retrieved July 1, 2024, from EPrints UMS: <http://eprints.ums.ac.id>

Wikipedia. (n.d.). Retrieved July 2, 2024, from Wikipedia: <https://id.wikipedia.org/wiki/Tembaga>

Yohanes, Siregar, E., Susilawati, A., & Badri, M. (2018). Performance Analysis of Flywheel Addition on Drive System of Rotary Friction Welding Machine. *Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace*, 15.

LAMPIRAN

Lampiran A. Hasil Turnitin



Lampiran B. Lembar Bimbingan Skripsi



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH PROF. DR. HAMKA
 FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN INFORMATIKA
 Jl. Tanah Merdeka No. 6 Kp. Rambutan, Ciracas, Jakarta Timur. Telp. (021) 8400941, Fax. (021) 87782739
 Website : ft.uhamka.ac.id, E-mail : ft@uhamka.ac.id

LEMBAR BIMBINGAN SKRIPSI

Nama : Reynaldi Ramadhan Pratama
 NIM : 1803035081
 Program Studi : Teknik Mesin
 Judul :
 Pembimbing : Rizyan Ariyansyah, S.T., M.T.

No.	Tanggal	Keterangan	Paraf
1.	20/6/24	Pengenalan Materi dan jurnal	
2.	21/6/24	Diskusi tentang jurnal	
3.	28/6/24	Diskusi tentang BAB I	
4.	2/7/24	Pemeriksaan dan Revisi BAB I	
5.	6/7/24	Pemeriksaan dan Revisi BAB II	
6.	8/7/24	Pemeriksaan dan Revisi BAB IV	
7.	9/7/24	Pemeriksaan kesimpulan	
8.	10/7/24	Pemeriksaan keseluruhan Skripsi	
9.	11/7/24	- Tanda tangan persetujuan - siap disidangkan	

Lampiran C Lembar Revisi Penguji-1

LEMBAR REVISI SIDANG SKRIPSI TEKNIK MESIN ONLINE (PENGUJI-1)
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN INFORMATIKA UHAMKA

Nama Mahasiswa	: REYNALDI RAMADHANI PRATAMA
NIM	: 1803035081
Hari Tanggal Sidang	: Senin, 22 Juli 2024
Nama Pembimbing Skripsi	: Riyan Ariyansah, S.T., M.T.
Judul Skripsi	: DAMPAK VARIASI TEKANAN TERHADAP SIFAT FISIK DALAM PROSES PENGELASAN FRIKSI ALUMINIUM DENGAN TEMBAGA

Catatan

1	Bab 4. Masukkan data hasil pengujian sebelum grafik
2	Kesimpulan diperbaiki
3	
4	
5	
6	

VALIDASI REVISI	NAMA DOSEN	TANGGAL REVISI	PARAF
Ketua Sidang	Drs. Moh. Yusuf Djeli, M.M., M.T.	25/7 2024	
Pembimbing-1	Riyan Ariyansah, S.T., M.T.	25/7-2024	
Pembimbing-2			
Penguji-1	Drs. Moh. Yusuf Djeli, M.M., M.T.	25/7 2024	
Penguji-2	Agus Fikri, S.T., M.M., MT	25/7-2024	

Selanjutnya, yang bersangkutan harus segera menyelesaikan permasalahan sehubungan dengan skripsi ini, selambat-lambatnya 7 (tujuh) hari setelah tanggal pelaksanaan sidang.

- ü Apabila revisi telah selesai dan mendapatkan approval (penguji, pembimbing, Kaprodi dan Dekan), maka tulisan (Skripsi, Jurnal dan Program) dikumpulkan dalam Google Drive (Fakultas/Perpustakaan, Pembimbing dan Program Studi)
 - ü Berkas disusun sesuai petunjuk dan tanda tangan setiap berkas Asli, untuk softcopy dilampirkan hasil pemindaian / scanning.
 - ü Batas Akhir Revisi (hh/bb/tttt)
 - ü Batas Akhir Pengumpulan Berkas dan CD (Skripsi, Jurnal) (hh/bb/tttt)
- Wassalamu'alaikum wa Rohmatullahi wa Barokaatuh,*

Riyan Ariyansah, S.T., M.T

Ketua Program Studi Teknik Mesin

Catatan: Daftar revisi ini diserahkan kepada mahasiswa untuk acuan revisi bagi Dosen Pembimbing

Lampiran D Lembar Revisi Penguji-2

LEMBAR REVISI SIDANG SKRIPSI TEKNIK MESIN ONLINE (PENGUJI-2)
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN INFORMATIKA UHAMKA

Nama Mahasiswa	: REYNALDI RAMADHANI PRATAMA
NIM	: 1803035081
Hari Tanggal Sidang	: Senin, 22 Juli 2024
Nama Pembimbing Skripsi	: Riyan Ariyansah, S.T., M.T.
Judul Skripsi	: DAMPAK VARIASI TEKANAN TERHADAP SIFAT FISIK DALAM PROSES PENGELASAN FRIKSI ALUMINIUM DENGAN TEMBAGA

Catatan

1	Perbaiki format penulisan dan judul dengan kalimat yang efektif (sifat fisik & friction diganti)
2	Pendahuluan : perbaiki latar belakang, rumusan masalah, dan tujuan
3	Abstrak : pada bagian hasil penelitian
4	Dasar teori : klasifikasi Al dan Cu
5	Pembahasan : analisa berdasarkan jurnal, perbesaran struktur makro mikro dituliskan
6	Kesimpulan menjawab tujuan

VALIDASI REVISI	NAMA DOSEN	TANGGAL REVISI	PARAF
Ketua Sidang	Drs. Moh. Yusuf Djeli, M.M., M.T.	25/7 2024	
Pembimbing-1	Riyan Ariyansah, S.T., M.T.	25/7 2024	
Pembimbing-2			
Penguji-1	Drs. Moh. Yusuf Djeli, M.M., M.T.	25/7 2024	
Penguji-2	Agus Fikri, S.T., M.M., MT	25/7-2024	

Selanjutnya, yang bersangkutan harus segera menyelesaikan permasalahan sehubungan dengan skripsi ini, selambat-lambatnya 7 (tujuh) hari setelah tanggal pelaksanaan sidang.

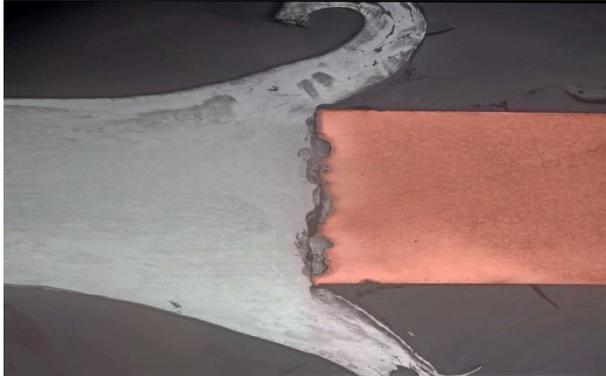
- ü Apabila revisi telah selesai dan mendapatkan approval (penguji, pembimbing, Kaprodi dan Dekan), maka tulisan (Skripsi, Jurnal) dan Program dikumpulkan dalam Google Drive (Fakultas/Perpustakaan, Pembimbing dan Program Studi)
 - ü Berkas disusun sesuai petunjuk dan tanda tangan setiap berkas Asli, untuk softcopy dilampirkan hasil pemindaian / scanning.
 - ü Batas Akhir Revisi (hh/bb/ttt)
 - ü Batas Akhir Pengumpulan Berkas dan CD (Skripsi, Jurnal) (hh/bb/ttt)
- Wassalamu'alaikum wa Rahmatullahi wa Barakaatuh,*

Riyan Ariyansah, S.T., M.T

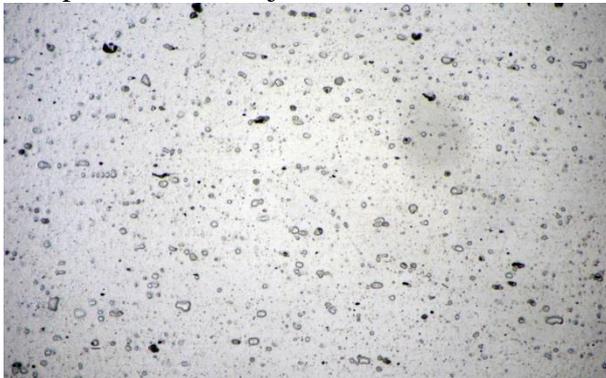
Ketua Program Studi Teknik Mesin

Catatan: Daftar revisi ini diserahkan kepada mahasiswa untuk acuan revisi bagi Dosen Pembimbing

Lampiran E. Hasil Uji Makro Variasi 20 Kg



Lampiran F. Hasil Uji Mikro Alumunium Variasi 20 Kg



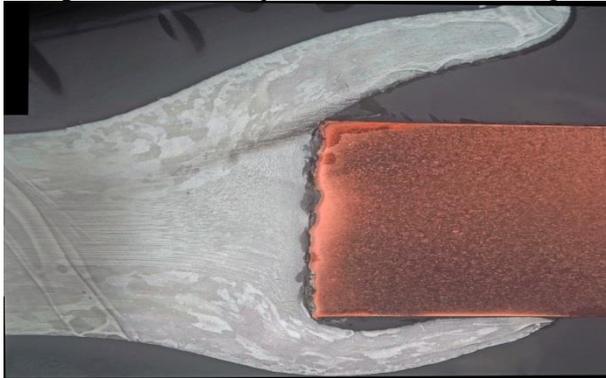
Lampiran G. Hasil Uji Mikro Daerah Pengelasan Variasi 20 Kg



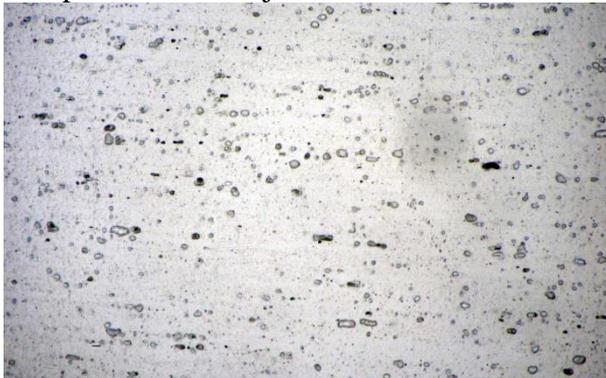
Lampiran H. Hasil Uji Mikro Tembaga Variasi 20 Kg



Lampiran I. Hasil Uji Makro Variasi 30 Kg



Lampiran J. Hasil Uji Mikro Aluminium Variasi 30 Kg



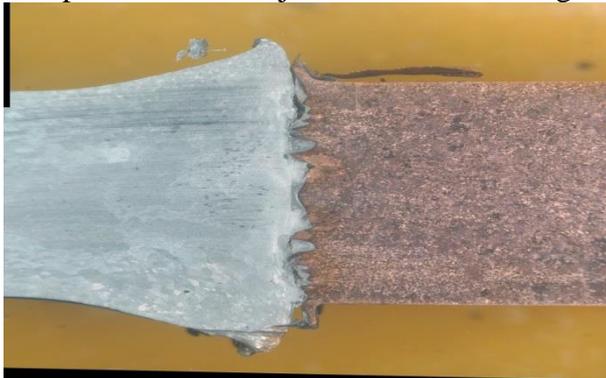
Lampiran K. Hasil Uji Mikro Daerah Pengelasan Varasi 30 Kg



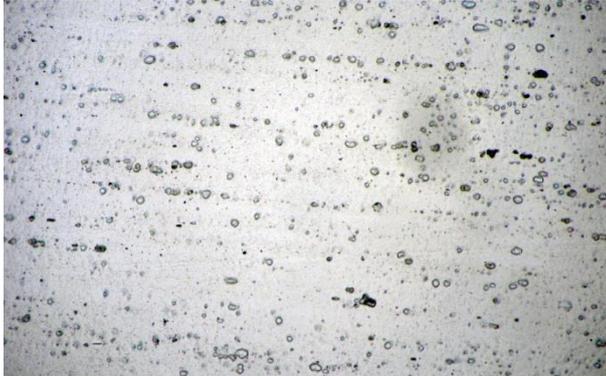
Lampiran L. Hasil Uji Mikro Tembaga Varasi 30 Kg



Lampiran M. Hasil Uji Makro Varasi 40 Kg



Lampiran N. Hasil Uji Mikro Aluminium Varasi 40 Kg



Lampiran O. Hasil Uji Mikro Daerah Pengelasan Varasi 40 Kg



Lampiran P. Hasil Uji Mikro Tembaga Varasi 40 Kg

