

**PENGARUH VARIASI *REVOLUTION PER MINUTE* (RPM)
TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN *BURN OFF LENGTH*
PADA PENGELASAN *FRICTION WELDING* ALUMINIUM
DAN TEMBAGA**

SKRIPSI



Oleh:

Rizky Putratama Hendra

1803035038

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

PENGARUH VARIASI *REVOLUTION PER MINUTE (RPM)*
TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN *BURN OFF LENGTH*
PADA PENGELASAN *FRICTION WELDING* ALUMUNIUM DAN
TEMBAGA

SKRIPSI

Disusun untuk Memenuhi Persyaratan Kelulusan Sarjana Teknik Mesin



Oleh:

Rizky Putratama Hendra

1803035038

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

2024

HALAMAN PERSETUJUAN

PENGARUH VARIASI *REVOLUTION PER MINUTE* (RPM) TERHADAP
SIFAT FISIK PADA PENGELASAN *FRICTION WELDING* ALUMINIUM
DAN TEMBAGA

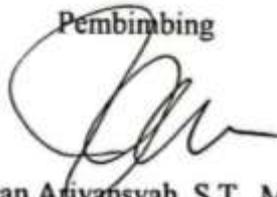
SKRIPSI

Dibuat untuk Memenuhi Persyaratan Kelulusan Sarjana Teknik

Oleh:
Rizky Putratama Hendra
1803035038

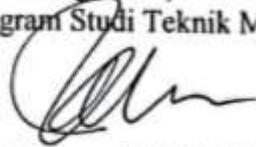
Telah diperiksa dan disetujui untuk diajukan ke Sidang Ujian Skripsi
Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Dan Informatika
UHAMKA
Tanggal, 07 July 2024

Pembimbing



Riyan Ariyansyah, S.T., M.T
NIDN. 03240691002

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Mesin



Riyan Ariyansyah, S.T., M.T
NIDN. 03240691002

HALAMAN PENGESAHAN

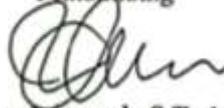
PENGARUH VARIASI *REVOLUTION PER MINUTE* (RPM)
TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN MAKRO PADA PENGELASAN
FRICTION WELDING ALUMINIUM DAN TEMBAGA

SKRIPSI

Oleh:
Rizky Putratama Hendra
1803035038

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

Pembimbing



Riyan Ariyansah, S.T., M.T
NIDN. 03240691002

Penguji-1



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

Penguji-2



Mohammad Yusuf D, Drs., M.M., M.T
NIDN. 0330016001

Mengesahkan,
Dekan
Fakultas Teknologi Industri Dan
Informatika UHAMKA



Dr. Dan Mojisidi, S.T., M.Si.
NIDN. 0301126901

Mengetahui,
Ketua Program Studi
Teknik Mesin



Riyan Ariyansah, S.T., M.T
NIDN. 03240691002

PERNYATAAN KEASLIAN

Saya, yang membuat pernyataan

Nama : Rizky Putratama Hendra

NIM : 1803035038

Judul : PENGARUH *REVOLUTION PER MINUTE (RPM)* TEKANAN
TERHADAP SIFAT FISIK PADA PENGELASAN *FRICTION*
WELDING ALUMUNIUM 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, 12 July 2024



Rizky Putratama Hendra

KATA PENGANTAR

Assallamu'alaikum wa rohmatullahi wa barokaatuh.

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas berkat dan rahmat-nya, sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Pengaruh Variasi *Revolution Per Minute* (RPM) Terhadap Struktur Mikro Dan Makro Pada Pengelasan *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 sudiono hendra dan ibu indri arianti 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 Ariyansyah, S.T., M.T sebagai pembimbing dalam penulisan skripsi ini dan memberi arahan selama penelitian sehingga dapat terselesaikan dengan baik.
3. Bapak Riyan Ariyansyah, 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 Skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan. 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

PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Rizky Putratama Hendra
NIM : 1803035038
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 VARIASI *REVOLUTION PER MINUTE (RPM)* TERHADAP
SIFAT FISIK PADA

PENGELASAN *FRICTION WELDING* ALUMUNIUM 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, 12 July 2024



Rizky Putratama Hendra

ABSTRAK

Pengaruh Variasi *REVOLUTION PER MINUTE (RPM)* Terhadap Struktur Mikro dan *Burn Off Length* Pada Pengelasan *Friction Welding* Aluminium dan Tembaga.

Rizky Putratama Hendra

Pengelasan gesekan adalah teknik penyambungan material yang menggunakan panas yang dihasilkan oleh gesekan antara dua permukaan. *Rotary friction welding* adalah teknik pengelasan solid-state yang menggabungkan dua material melalui gesekan rotasional dan tekanan aksial. Dalam proses ini, dua bahan yang akan disambungkan dirotasikan dengan kecepatan tinggi dan ditekan bersama, menghasilkan panas dari gesekan yang menyebabkan material pada antarmuka melembut tanpa mencair. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak variasi kecepatan putaran (RPM) terhadap sifat fisik dalam proses pengelasan *friction welding* pada aluminium dan tembaga. Penelitian ini mengamati tiga variasi RPM (1000, 1300, 2000) untuk melihat perubahan suhu pengelasan, *burn-off length*, dan struktur mikro/makro sambungan. Hasilnya menunjukkan peningkatan RPM mempengaruhi suhu pengelasan. Pada RPM 1000, suhu gesek 229°C, suhu tekan 118°C, suhu maksimal 232°C, dan suhu akhir 73°C. Pada RPM 1300, suhu gesek 330°C, suhu tekan 102°C, suhu maksimal 339°C, dan suhu akhir 69°C. Pada RPM 2000, suhu gesek 207°C, suhu tekan 113°C, suhu maksimal 255°C, dan suhu akhir 75°C. *Burn-off length* meningkat seiring peningkatan RPM: 4 mm (1000 RPM), 5 mm (1300 RPM), dan 10 mm (2000 RPM). Analisis struktur mikro menunjukkan peningkatan RPM menghasilkan butiran yang lebih kecil dan distribusi partikel yang lebih homogen. Dari penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa variasi RPM memiliki pengaruh signifikan terhadap suhu pengelasan, *burn-off length*, dan struktur mikro/makro pada pengelasan *friction welding* aluminium dan tembaga.

Kata kunci: pengelasan gesek, aluminium, tembaga, RPM, suhu pengelasan, *burn-off length*, struktur mikro dan makro

***The Effect of RPM Variation on the Microstructure and Burn Off Length in
Friction Welding of Aluminum and Copper.***

Rizky Putratama Hendra

Friction welding is a material joining technique that uses heat generated by the friction between two surfaces. Rotary friction welding is a solid-state welding technique that joins two materials through rotational friction and axial pressure. In this process, the two materials to be joined are rotated at high speed and pressed together, generating heat from friction that causes the material at the interface to soften without melting. This study aims to evaluate the impact of varying rotational speeds (RPM) on the physical properties in the friction welding process of aluminum and copper. The study observes three RPM variations (1000, 1300, 2000) to see changes in welding temperature, burn-off length, and the micro/macrostructure of the joint. The results show that an increase in RPM affects the welding temperature. At 1000 RPM, the friction temperature is 229°C, the pressing temperature is 118°C, the maximum temperature is 232°C, and the final temperature is 73°C. At 1300 RPM, the friction temperature is 330°C, the pressing temperature is 102°C, the maximum temperature is 339°C, and the final temperature is 69°C. At 2000 RPM, the friction temperature is 207°C, the pressing temperature is 113°C, the maximum temperature is 255°C, and the final temperature is 75°C. The burn-off length increases with the increase in RPM: 4 mm (1000 RPM), 5 mm (1300 RPM), and 10 mm (2000 RPM). Microstructure analysis shows that increasing RPM results in smaller grains and more homogeneous particle distribution. From this study, it can be concluded that RPM variation has a significant impact on the welding temperature, burn-off length, and micro/macrostructure in the friction welding of aluminum and copper.

Keywords: *friction welding, aluminum, copper, RPM, welding temperature, burn-off length, micro/macrostructure*

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	vi
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GRAFIK.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR NOTASI	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB 2. DASAR TEORI	6
2.1 Pengelasan	6
2.1.1 Klasifikasi Pengelasan	7
2.1.2 Berbagai Proses dan Jenis Pengelasan.....	7
2.2 Las Gesek (<i>Friction Welding</i>)	11
2.2.1 Jenis – jenis Sambungan Las	15
2.3 Aluminium	16
2.3.1 Klasifikasi Aluminium	16
2.4 Tembaga.....	17
2.4.1 Klasifikasi Tembaga	17
2.5 Pengamatan Struktur Mikro	17

2.6	<i>Burn Off Length</i>	18
BAB 3. METODOLOGI.....		19
3.1	Alur Penelitian	19
3.2	Identifikasi Kebutuhan	20
3.2.1	Pemilihan Material	20
3.2.2	Variasi RPM	20
3.2.3	Parameter Pengelasan	20
3.2.4	Pengujian	20
3.3	Pembuatan Spesimen	21
3.4	Pengujian spesimen	23
3.4.1	Uji Struktur Mikro	23
3.4.3	Cara Mengukur Ukuran Butir	23
3.4.4	Uji <i>Burn Off Length</i>	23
3.5	Pembahasan	24
3.5.1	Pengaruh RPM terhadap Struktur Mikro dan Makro	24
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....		25
4.1	Hasil Penelitian	25
4.1.1	Suhu pengelasan rotary friction welding	25
4.1.2	Pengukuran <i>Burn Off Length</i> (BOL)	26
4.1.3	Hasil Pengamatan Struktur Mikro/Makro Pada RPM 1000	28
4.1.4	Hasil Pengamatan Struktur mikro/makro dengan RPM 1300 .	30
4.1.5	Hasil Pengamatan Struktur mikro/makro dengan RPM 2000 .	32
4.2	Pembahasan	34
4.2.1	Hasil Uji <i>Burn Off Length</i> pada RPM 1000	34
4.2.2	Hasil Uji <i>Burn Off Length</i> Pada RPM 1300	35
4.2.3	Hasil Pengamatan Struktur Mikro/Makro Pada RPM 1000	36

4.2.4	Hasil Pengamatan Struktur Mikro/Makro Pada RPM 1300....	36
4.2.5	Hasil Pengamatan Struktur Mikro/Makro Pada RPM 2000....	37
BAB 5.	KESIMPULAN.....	39
5.1	Kesimpulan	39
5.2	Saran.....	39
DAFTAR REFRENSI.....		41
LAMPIRAN.....		44

DAFTAR GRAFIK

Grafik 4. 1 grafik x dan y dari RPM dan Suhu pengelasan Rotary Friction Welding	25
------------------------------------------------------------------------------------------	----

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 SMAW (Shield Metal Arch Welding)	8
Gambar 2. 2 SAW (Submerged Arch Welding)	8
Gambar 2. 3 Diagram keseimbangan panas pada weldment elektroslag biasa.....	9
Gambar 2. 4 EWS (Stud Welding).....	9
Gambar 2. 5 Las Gesek (Friction Welding).....	10
Gambar 2. 6 ERW (Electric Resistant Welding)	10
Gambar 2. 7 EBW (Electron Beam Welding).....	11
Gambar 2. 8 Proses Pengelasan Gesek	13
Gambar 2. 9 Direct Drive Welding	14
Gambar 2. 10 Skema setup untuk Inersia welding (Friction welding)	15
Gambar 2. 11 Daerah lasan	15
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian.....	19
Gambar 3. 2 pemotongan material aluminium dan tembaga	21
Gambar 3. 3 persiapan permukaan aluminium dan tembaga	21
Gambar 3. 4 Mesin rotary friction welding.....	21
Gambar 3. 5 Proses pengelasan friction welding	22
Gambar 4. 1 aluminium dan tembaga setelah di friction welding	26
Gambar 4. 2 aluminium dan tembaga setelah di friction welding	27
Gambar 4. 3 aluminium dan tembaga setelah di friction welding	27
Gambar 4. 4 Struktur makro pada rpm 1000.....	28
Gambar 4. 5 Struktur mikro aluminium.....	28
Gambar 4. 6 Struktur mikro daerah pengelasan.....	29
Gambar 4. 7 Struktur mikro tembaga.....	29
Gambar 4. 8 Struktur makro pada rpm 1300.....	30
Gambar 4. 9 Struktur mikro aluminium.....	31
Gambar 4. 10 Struktur mikro daerah pengelasan.....	31
Gambar 4. 11 Struktur mikro tembaga.....	32
Gambar 4. 12 Struktur makro pada rpm 2000	32
Gambar 4. 13 Struktur mikro aluminium.....	33
Gambar 4. 14 Struktur mikro daerah pengelasan.....	33

Gambar 4. 15 Struktur mikro tembaga..... 34

DAFTAR NOTASI

Simbol	Keterangan
F	Gaya atau Tekanan (dalam kilogram atau Newton)
t	Waktu (dalam detik atau menit)
μ	Koefisien gesek
T	Temperatur (dalam derajat Celsius atau Kelvin)
d	Diameter (dalam milimeter)
L	Panjang (dalam milimeter)
E	Modulus elastisitas (dalam GPa)
σ	Tegangan (dalam MPa atau N/mm ²)
ϵ	Regangan
H	Kekerasan (dalam Vickers atau Rockwell)
Tp	Total Pemendekan (mm)
Lo	Panjang spesimen sebelum pengelasan (mm)
L	Panjang spesimen setelah pengelasan (mm)

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran a	44
Lampiran b	45
Lampiran c	45
Lampiran d	45
Lampiran e	46
Lampiran f	46
Lampiran g	46
Lampiran h	47
Lampiran i	47
Lampiran j	47
Lampiran k	48
Lampiran l	48
Lampiran m	48
Lampiran n	49

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Rotary friction welding banyak diterapkan di industri antariksa bakal menggabungkan komponen berbentuk bundar semacam katup mesin, batang penggerak, dan komponen lainnya. langkah RFW yaitu metode *welding solid-state* akan mampu melampaui kelemahan *welding* fusi dalam menggabungkan bahan beserta titik lebur yang beragam. Melalui *welding* gesek, aluminium dan tembaga dapat disambung walaupun memiliki titik lebur yang beragam, sesuatu yang bukan dapat dicapai dengan metode pengelasan fusi konvensional. (Chapke dkk., 2020).

Pengelasan gesekan menjadi teknik penting dalam penyambungan material di berbagai sektor, termasuk otomotif, dirgantara, dan manufaktur. Teknik ini memanfaatkan panas yang dihasilkan dari gesekan antara dua permukaan untuk menciptakan ikatan bermutu tanpa memerlukan material pengisi. Diantara parameter kunci di proses ini yaitu kelajuan atau putaran per menit (RPM). Kecepatan putaran akan lebih tinggi memengaruhi diferensial parsial dan tingkat sambungan yang dihasilkan, meningkatkan diferensial parsial dan membuat ikatan yang sangat kuat serta kaku (Erfiansyah & Drastiawati, 2023).

Aluminium dan tembaga sering digunakan dalam berbagai aplikasi industri berkat sifat unggul mereka. Aluminium terkenal dengan bobot yang ringan dan ketahanan terhadap korosi, sedangkan tembaga memiliki daya hantar listrik dan termal yang teramat tinggi dan juga tahan pengamatan. Namun, terdapat perbedaan yang mencolok dalam sifat fisik dan termal dari kedua logam ini menghadirkan tantangan tersendiri dalam proses pengelasan gesekan untuk menggabungkan keduanya (Ay & Çelik, 1999).

Studi sebelumnya *Subramanya R. Prabhu, B., Shettigar, A.K., Herbert, M.A., Rao, S.S.* (2021) menunjukkan bahwa variasi RPM dalam proses *friction welding* memiliki dampak signifikan terhadap karakteristik mekanik dan mikrostruktur dari sambungan yang dihasilkan. Menurut jurnal yang diterbitkan oleh *Subramanya R. Prabhu, B., Shettigar, A.K., Herbert, M.A., Rao, S.S.* (2021), variasi RPM mempengaruhi laju perpindahan panas, distribusi tegangan, dan formasi zona pengelasan, yang pada akhirnya mempengaruhi kekuatan dan kualitas sambungan. Penelitian oleh *Koley, I., Dhar, A., Kumar, A.* (2023) juga menekankan pentingnya optimalisasi RPM untuk mencapai keseimbangan antara kecepatan produksi dan kualitas sambungan.

Selain itu, penelitian yang dipublikasikan dalam *Muthumanickam, A., Gandham, P. & Dhenuvakonda, S. Effect of Friction Stir Welding Parameters on Mechanical Properties and Microstructure of AA2195 Al–Li Alloy Welds. Trans Indian Inst Met 72, 1557–1561* (2019). Menemukan bahwa variasi RPM berpengaruh terhadap homogenitas mikrostruktur dan sifat mekanik sambungan pada pengelasan antara aluminium dan tembaga. Penggunaan RPM yang terlalu rendah dapat menyebabkan penyambungan yang tidak sempurna, sementara RPM yang terlalu tinggi dapat menyebabkan deformasi berlebih dan keretakan pada sambungan. Oleh karena itu, penentuan RPM yang tepat sangat penting untuk memastikan kualitas sambungan yang optimal.

Penelitian oleh *Koley et al.* (2023) menekankan pentingnya optimalisasi RPM untuk mencapai keseimbangan antara kecepatan produksi dan kualitas sambungan. Mereka menemukan bahwa variasi RPM mempengaruhi mikrostruktur dan sifat mekanik sambungan. Penggunaan RPM yang terlalu rendah dapat menyebabkan penyambungan yang tidak sempurna, sementara RPM yang terlalu tinggi dapat menyebabkan deformasi berlebih dan keretakan pada sambungan.

1.2 Rumusan Masalah

Oleh karena itu, pertanyaan utama dalam Studi ini meneliti bagaimana variasi *revolution per minute* (RPM) mempengaruhi sifat fisik ketika pengelasan *friction*

welding antara aluminium dan tembaga. Pengujian yang direncanakan untuk menilai kualitas pengelasan mencakup analisis sifat fisik, seperti analisis struktur mikro-makro dan panjang pembakaran. Berdasarkan latar belakang ini, pertanyaan penelitian dirumuskan sebagai berikut: bagaimana efek putaran dan kecepatan spindle terhadap sifat fisik sambungan las gesek pada aluminium dan tembaga?

1.3 Batasan Masalah

Dalam penyusunan tugas akhir ini, penulis merumuskan permasalahan yang akan dibahas sebagai berikut :

1. Bahan yang digunakan
Tugas akhir ini akan dibatasi pada penggunaan dua jenis logam, yaitu aluminium dan tembaga murni. Material lain tidak akan dibahas dalam penelitian ini.
2. Parameter RPM:
Fokus penelitian adalah pada variasi RPM dalam rentang tertentu yang relevan untuk proses friction welding. RPM yang berada di luar rentang optimal yang telah ditetapkan oleh studi-studi sebelumnya tidak akan dieksplorasi secara mendalam.
3. Proses pengelasan
Penelitian hanya akan mengkaji pengelasan gesekan putar (rotary friction welding) dan tidak akan membahas metode pengelasan lain seperti friction stir welding atau pengelasan fusi.
4. Karakteristik yang diukur
Penelitian ini akan memfokuskan pada distribusi panas, homogenitas mikrostruktur, sifat fisik dan deformasi sambungan. Aspek lain seperti sifat kimia atau korosi tidak akan menjadi fokus utama.
5. Metode pengujian
Pengujian akan dilakukan menggunakan teknik-teknik tertentu seperti analisis mikrostruktur dengan mikroskop optik dan elektron. Teknik

pengujian lain yang lebih spesifik atau kompleks tidak akan dibahas secara rinci.

6. Lingkungan dan kondisi uji

Eksperimen dilakukan dalam kondisi laboratorium yang terkendali. Faktor eksternal seperti kondisi lingkungan (suhu, kelembaban) dan variasi kondisi operasional industri tidak akan dieksplorasi.

7. Aspek ekonomi dan aplikasi praktis

Penelitian ini tidak akan membahas aspek ekonomi dari proses pengelasan atau aplikasi praktis di industri nyata secara mendalam. Fokusnya hanya pada pemahaman teoretis dan ilmiah mengenai pengaruh variasi RPM terhadap sifat fisik sambungan.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disampaikan maka penulis menentukan tujuan dari penelitian yaitu :

1. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh *revolution per minute* (RPM) terhadap struktur mikro dan makro
2. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh *revolution per minute* (RPM) terhadap *burn off length*

1.5 Manfaat Penelitian

1. Menyediakan pilihan metode *welding* aluminium menggunakan RFW.
2. Mendapat data mengenai keberagaman teknik pengelasan aluminium dan tembaga menggunakan cara RFW.
3. Meningkatkan kualitas sambungan las gesekan pada material aluminium dan tembaga dengan memvariasikan putaran *spindle* dan kecepatan.
4. Bagi peneliti, penelitian ini juga dapat membantu dalam memahami pengaruh variasi putaran *spindle* dan kecepatan terhadap sifat fisik sambungan las gesekan pada material aluminium dan tembaga

1.6 Sistematika Penulisan

Penjelasan singkat mengenai sistematika penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. BAB 1. PENDAHULUAN

Bab 1 mencakup latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

2. BAB 2 DASAR TEORI

Bab 2 membahas dasar teori mengenai pengelasan, klasifikasi pengelasan, berbagai proses dan jenis pengelasan, las gesek, jenis jenis sambungan las, aluminium, tembaga, sifat sifat tembaga, dan *burn off length*

3. BAB 3 METODOLOGI

Bab 3 mencakup metodologi penelitian, mulai dari alur penelitian, pembuatan alat, hingga perolehan kesimpulan. Di dalamnya terdapat prosedur penelitian serta proses pengambilan dan pengolahan data.

4. BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab 4 membahas hasil dan analisis dari penelitian yang telah dilakukan. Bab ini berisi pembahasan mengenai data yang diperoleh dari penelitian dan diolah untuk mencapai tujuan yang diinginkan.

5. BAB 5 SIMPULAN

Bab 5 mencakup kesimpulan dan saran berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh penulis.

BAB 2. DASAR TEORI

2.1 Pengelasan

Pada konsep ini dijelaskan landasan teoritis yang berkaitan dengan topik penelitian. Pengelasan gesek menggabungkan dua bahan dengan cara menggesekkan permukaan mereka hingga mencapai suhu yang memungkinkan terbentuknya ikatan metalurgi. Kecepatan rotasi atau putaran per menit (RPM) adalah salah satu faktor utama yang mempengaruhi hasil pengelasan. Kecepatan rotasi menentukan seberapa cepat panas dipindahkan dan tekanan gesekan yang diterapkan pada permukaan bahan.

Menurut teori termodinamika, panas yang dihasilkan oleh gesekan meningkatkan suhu permukaan kontak material, sehingga menciptakan plastisitas dan memungkinkan material terikat. Variasi kecepatan mempengaruhi jumlah panas yang dihasilkan dan distribusi suhu sepanjang zona pengelasan. Kecepatan yang lebih tinggi cenderung menghasilkan lebih banyak panas dan mempercepat proses pengelasan, namun juga menimbulkan risiko panas berlebih dan kerusakan material. Sebaliknya, kecepatan rendah mungkin tidak menghasilkan panas yang memadai untuk proses pengelasan yang efektif, sehingga berpotensi menghasilkan sambungan yang kurang kuat.

Aluminium dan tembaga mempunyai perbedaan nyata dalam sifat fisik dan termalnya. Aluminium memiliki titik leleh yang rendah dan konduktivitas termal yang tinggi, sedangkan tembaga memiliki daya hantar listrik dan sifat panas yang sangat tinggi serta titik leleh yang tinggi. Perbedaan ini mempengaruhi bagaimana kedua material bereaksi terhadap panas yang dihasilkan selama proses pengelasan gesekan.

Penemuan artefak sejarah memungkinkan kita mengetahui bahwa metode penyambungan logam sudah dilakukan sejak zaman prasejarah. Contohnya adalah penggunaan logam emas campuran dan tembaga dan pematrian paduan timbal-timah. Sejauh yang diketahui, telah diketahui dan digunakan antara tahun 3000 SM dan 4000 SM. Setelah alat las busur digunakan dalam praktik, mereka digunakan secara luas (Umartono Setiyo & Irawan, 2018). Berdasarkan definisi dari *Deutsche*

Industrie Normen (DIN), las adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam paduan yang terjadi dalam kondisi lumer atau cair. Dari definisi tersebut, dapat dijelaskan lebih lanjut bahwa las adalah sambungan lokal dari beberapa batang logam yang terbentuk melalui aplikasi energi panas..

Pengelasan adalah proses penyambungan dua logam menjadi satu melalui pemanasan atau peleburan. Ada beberapa metode pengelasan, termasuk pengelasan busur terendam, pengelasan logam terlindung SMAW, dan pengelasan gas tungsten GTAW. (Umartono Setiyo & Irawan, 2018)

2.1.1 Klasifikasi Pengelasan

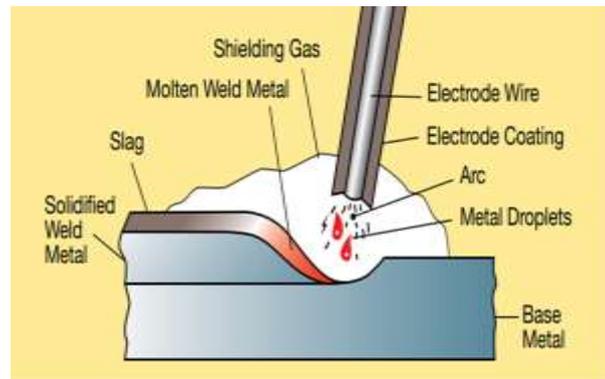
Menurut klasifikasinya, *welding* dibedakan menjadi tiga kategori besar, ialah : penyambungan lebur, penyambungan tekanan, dan *brazing*.

- a. Pengelasan cair adalah suatu teknik pengelasan dimana sambungan dipanaskan sampai meleleh karena panas yang dihasilkan oleh busur atau pancaran gas pembakaran.
- b. Pengelasan bertekanan adalah suatu teknik pengelasan dimana sambungan dipanaskan kemudian dikerutkan.
- c. *Brazing* adalah teknik pengelasan dengan logam berlebur rendah untuk menyambung dan merekatkan sambungan (Suhada & Rafiq Yanhar, 2023).

2.1.2 Berbagai Proses dan Jenis Pengelasan

1. SMAW (*Shield Metal Arch Welding*)

SMAW (*Shield Metal Arch Welding*) adalah salah satu metode pengelasan yang menggunakan elektroda yang dilapisi bahan pelindung. Panas yang dihasilkan oleh elektroda ini mencairkan logam dan menghasilkan sambungan yang kuat dan kuat. SMAW adalah salah satu cara pengelasan yang paling hits karena mudah digunakan dalam berbagai aplikasi industri dan sumber energi listrik yang tersedia secara luas.

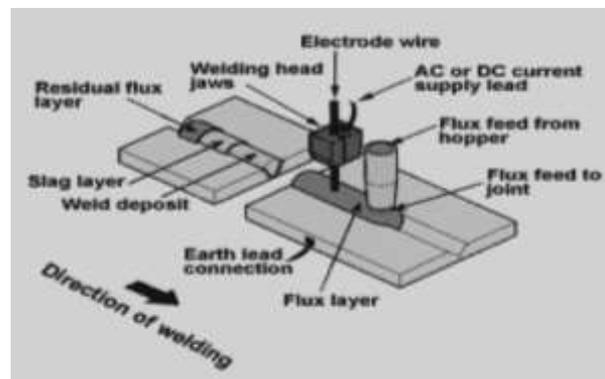


Gambar 2. 1 SMAW (Shield Metal Arch Welding)

(Sumber : <https://www.allpro.co.id/pengelasan/smaw/>)

2. SAW (Submerged Arch Welding).

SAW (Submerged Arch Welding) adalah proses pengelasan yang umum digunakan untuk menyambung struktur berat seperti jembatan, pipa, dan gedung. Cara ini banyak digunakan karena otomatis dan dapat diandalkan. Struktur mikro dan ketangguhan las dipengaruhi oleh banyak faktor antara lain : komposisi kimia logam las, masukan panas, logam pengisi, *fluks*, dll.



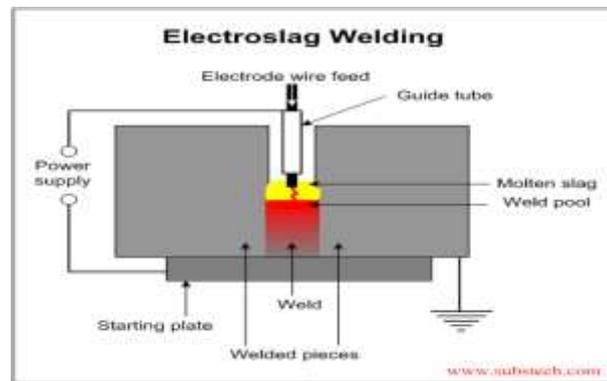
Gambar 2. 2 SAW (Submerged Arch Welding)

(Sumber :Subekti, 2011)

3. ESW (Electro Slag Welding)

ESW (Electro Slag Welding) adalah suatu proses pengelasan dimana energi panas untuk melelehkan logam dasar dan logam pengisi diperoleh dari terak, dan apabila terak tersebut menjadi bermuatan listrik maka berfungsi sebagai resistor listrik. Untuk memulai pengelasan, *fluks* dipanaskan oleh busur yang mengenai dasar sambungan. Logam las kemudian dibuat secara

vertikal dengan mencampurkan sisi logam dasar dengan logam pengisi cair. Proses pencampuran ini berlangsung sepanjang lapisan las yang dipisahkan oleh pelat berpendingin air.



Gambar 2. 3 Diagram keseimbangan panas pada weldment elektroslag biasa

(Sumber : https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=electroslag_welding_esw)

4. EWS (*Stud Welding*)

EWS (*Electro Welding Stud*) adalah suatu proses pengelasan yang menggunakan busur listrik untuk menyambung suatu benda padat dengan benda kerja lainnya. Dalam proses ini, busur terbentuk antara ujung baut dan permukaan benda kerja, melelehkan kedua bagiannya dan kemudian memadatkan baut menjadi genangan cair. Lasan yang dihasilkan kuat dan andal, menjadikan EWS pilihan populer untuk banyak aplikasi.



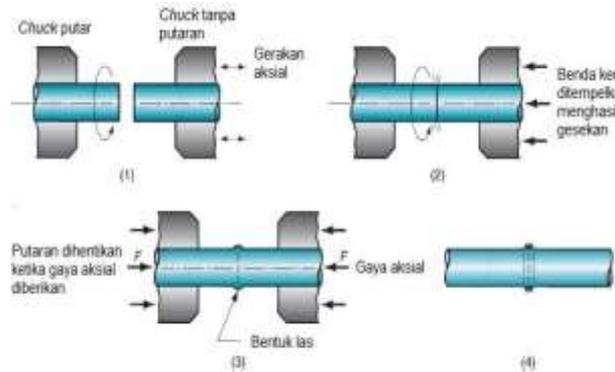
Gambar 2. 4 EWS (*Stud Welding*)

(Sumber : <https://soyer.de/en/stud-welding/>)

5. Pengelasan Gesek (*Friction Welding*)

Suatu proses yang menyambungkan dua benda kerja yang terbuat dari bahan benda kerja pada suhu dibawah titik leleh bahan, dan digunakan untuk

menyambung bahan benda kerja tanpa melelehkan permukaan bahan teknik yang digunakan (Agustiawan Adriani dkk., 2023).

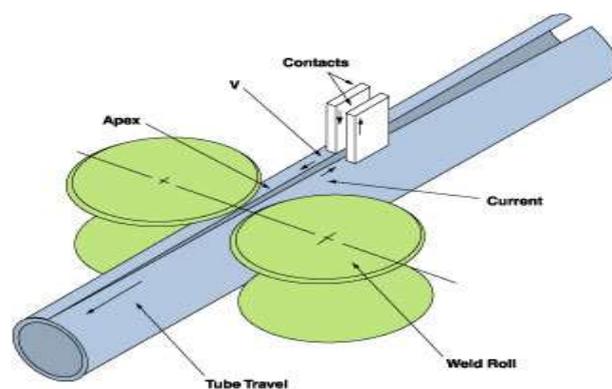


Gambar 2. 5 Las Gesek (Friction Welding)

(Sumber: International Journal of Emerging Technology and Advanced)

6. ERW (Electric Resistant Welding)

ERW (Electric Resistant Welding) adalah suatu proses pengelasan yang menggunakan arus Listrik untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan untuk mengelas material. Dengan menghubungkan dua elektroda logam dengan satu atau lebih logam, arus kuat dihasilkan antara elektroda tembaga. Arus ini menciptakan hambatan listrik yang menghasilkan panas pada titik penjepitan, melelehkan logam pada titik tersebut dan menyatukannya (Sardjono & Munandar, 2019)

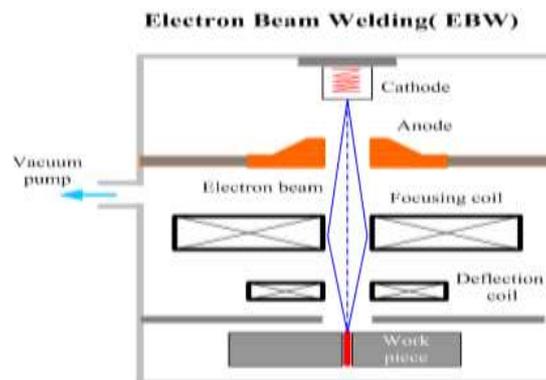


Gambar 2. 6 ERW (Electric Resistant Welding)

(Sumber: International Journal of Emerging Technology and Advanced)

7. EBW (*Electron Beam Welding*)

EBW (*Electron Beam Welding*) adalah metode *welding* yang memanfaatkan interaksi elektron. Proses ini mencairkan material menggunakan panas yang dihasilkan dari pancaran elektron yang terfokus dan fokus pada objek yang akan dilas. Pengelasan ini dilaksanakan di dalam kondisi vakum, akibatnya menghilangkan risiko perubahan kimia dan kontaminasi.



Gambar 2. 7 EBW (*Electron Beam Welding*)

(Sumber: International Journal of Emerging Technology and Advanced)

2.2 Las Gesek (*Friction Welding*)

Pengelasan gesekan merupakan teknik pengelasan yang memanfaatkan panas dari gesekan. Dalam proses ini, dua permukaan komponen yang akan disatukan, salah satunya berputar sementara yang lain tetap diam, saling bersentuhan di bawah tekanan. Gesekan yang terus menerus di antara kedua permukaan menghasilkan panas yang semakin meningkat. Pengelasan terjadi ketika gaya tekan dan panas yang diterapkan menyebabkan kedua bahan mencapai suhu leleh, sehingga terjadi sambungan (Putra dkk., 2022).

Berbagai fenomena fisika yang terjadi pada saat pengelasan gesekan, antara lain: Perubahan termal akibat gesekan, deformasi plastis, dll. Parameter penting dari proses pengelasan gesekan meliputi waktu gesekan, kecepatan, dan tekanan gesekan. Parameter diatas mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap hasil pengelasan gesekan yang dilakukan (Sofwan, 2023).

Menurut (Husodo dkk., 2013), Teknologi pengelasan gesekan adalah salah satu dari proses pengelasan solid-state. Panas yang dihasilkan disebabkan oleh gesekan

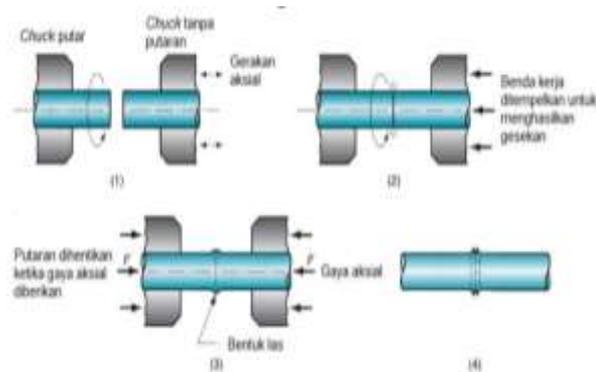
dua logam satu sama lain. Kombinasi panas dan tekanan tempa menyatukan kedua logam tersebut. Teknologi pengelasan gesekan ini semakin menarik perhatian karena pengoperasiannya yang mudah, proses yang cepat, tanpa logam pengisi, tanpa geometri bevel, dan hasil penyambung yang baik. Merupakan mesin las gesekan yang mirip dengan mesin bubut, sehingga mudah digunakan.

Pada proses pengelasan gesekan, kecepatan putaran merupakan variabel yang sensitif, dan dalam hal ini kecepatan putaran dapat diubah jika waktu pemanasan, suhu dan tekanan dikontrol dengan baik.

1. Prinsip Kerja Las Gesek

Dalam industri *modern*, biasanya terdapat dua kategori proses pengelasan. Pengelasan dengan peleburan (*fusion weld*) dan pengelasan tanpa peleburan atau dalam keadaan padat (pengelasan semi padat). Pengelasan gesekan (FW) merupakan metode pengelasan yang dikembangkan pada tahun 1950 oleh *AL Chudikov*, seorang ahli mekanik di *Uni Soviet*. Pengujiannya menunjukkan bahwa proses dapat digunakan untuk mengubah energi mekanik menjadi energi panas. Saat ini, dalam penerapannya di industri modern, teknologi pengelasan gesekan telah menjadi solusi alternatif untuk menyelesaikan masalah sambungan logam. Masalah ini sulit diatasi dengan pengelasan fusi, bahkan untuk sambungan antara poros engkol dan poros. Prinsip pengoperasian FW adalah memanfaatkan gesekan antara benda kerja yang berputar dan benda kerja yang diam untuk melelehkan kedua sisi logam las (logam dasar), dan membentuk permukaan las yang terhubung A dengan menggunakan tekanan luar.

Dalam konteks pengelasan gesekan, faktor-faktor seperti waktu pengoperasian lengan penggerak dan gaya yang diterapkan merupakan parameter penting. Memilih parameter proses secara akurat, seperti kekuatan tarik las, sangat penting untuk memastikan kualitas hasil pengelasan gesekan memuaskan. (Solihin dkk., 2017).



Gambar 2. 8 Proses Pengelasan Gesek

(Sumber: International Journal of Emerging Technology and Advanced)

Pengelasan gesekan ialah teknik *welding solid-state* di mana penyatuan material terjadi melalui kombinasi panas dan tekanan gesekan. Umumnya, gesekan berlangsung antara dua permukaan benda kerja yang bergerak relatif satu sama lain, sehingga menaikkan suhu pada kedua permukaan. Suhu yang dihasilkan akan berada dalam kisaran suhu kerja panas. Kedua benda kerja kemudian disatukan dengan tekanan yang cukup untuk membentuk sambungan metalurgi. Sebagai aturan umum, bahan tambahan (pengisi) tidak digunakan dalam pengelasan gesekan. Tidak diperlukan *fluks* untuk pengelasan ini juga. Selain itu, RFW bekerja tanpa gas pelindung dan tidak melelehkan benda kerja.

Metode pengelasan gesekan :

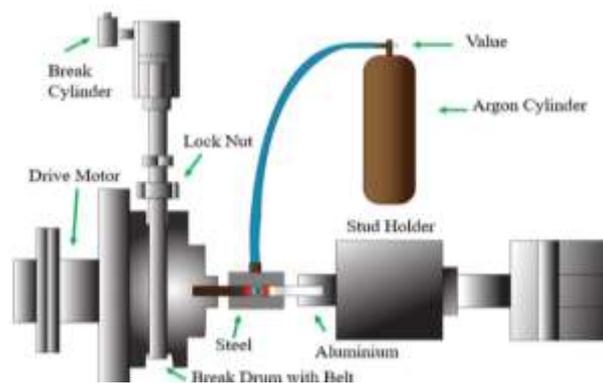
1. Benda kerja bergerak bersama dengan salah satu *chuck*
2. Merakit benda dengan cara ini menimbulkan gesekan dan panas.
3. Sambungan dibentuk dengan menerapkan gaya aksial sambil menghentikan putaran.
4. Bentuk sambungan.

Perhatikan bahwa Panjang benda kerja berkurang. Mesin las gesekan mirip dengan mesin bubut karena memerlukan rotasi untuk menghasilkan panas. Mesin las gesekan memerlukan spindle yang kuat untuk memutar benda kerja dengan kecepatan tinggi. Mesin harus mampu menggerakkan benda kerja secara aksial dengan menggunakan chuck berputar dan tidak berputar. Ada dua proses pengelasan gesekan: Pengelasan *Direct Drive* dan pengelasan *Inertia Drive*.

2. *Direct drive welding*

Skema pengelasan *Direct-drive welding* dapat dilihat pada gambar 2.10. pertama, mesin memutar poros utama hingga mencapai putaran konstan, kemudian secara perlahan memberi tekanan pada benda kerja dengan tekanan rendah hingga bersentuhan dengan benda kerja lain, dan fase tekanan awal berlanjut hingga jangka waktu yang telah ditentukan berlalu.

Pada tahap ini, tahap gesekan terjadi setelah kedua tahap tercapai sesuai waktu. Ketika putaran poros utama berkurang dengan cepat dan tekanan pengelasan berikutnya diterapkan, diperlukan kekuatan yang lebih tinggi dari tekanan awal agar lebih banyak kemacetan yang terbentuk pada sambungan las pada tahap akhir yang disebut tahap pengelasan.

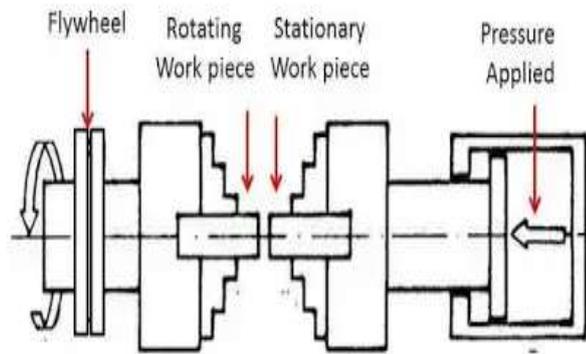


Gambar 2. 9 *Direct Drive Welding*

(Sumber :Samsudin, 2021)

3. *Inertia-Drive Welding*

Suatu proses pengelasan gesekan yang menggunakan energi yang tersimpan pada *flywheel* sebagai energi masukan untuk proses pengelasan seperti terlihat pada gambar 2.10. *flywheel* energi ini digunakan untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan untuk mengelas material. IDW sering disebut sebagai pengelasan gesekan roda gila karena menggunakan roda gila yang berputar untuk menghasilkan energi gesekan yang di perlukan untuk proses pengelasan (Fauzi dkk., t.t.).

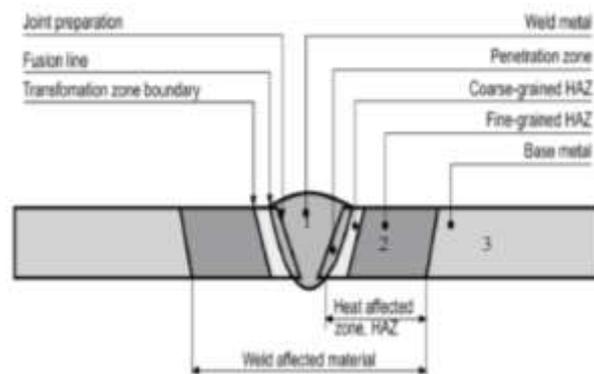


Gambar 2. 10 Skema setup untuk Inersia welding (Friction welding)

(Sumber : <https://www.mech4study.com/production-engineering/friction-welding-principle-working-types-application-advantages-and-disadvantages.html/>)

2.2.1 Jenis – jenis Sambungan Las

Dalam proses pengelasan ada empat zona seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini :



Gambar 2. 11 Daerah lasan

(Sumber :Iswanto dkk., 2017)

1. Logam Induk (*Base Metal*), yaitu bagian logam dasar di mana panas dan suhu pengelasan tidak menyebabkan perubahan struktur dan sifat.
2. Logam las, yaitu bagian dari logam yang mencair dan membeku selama proses pengelasan.
3. Daerah pengaruh panas atau *heat effected zone* (HAZ), yaitu logam dasar yang bersebelahan dengan logam las yang mengalami siklus termal pemanasan dan pendinginan cepat selama proses pengelasan.

4. Batas las atau daerah fusi (*fusion line*), yaitu daerah yang membatasi antara logam las dengan daerah pengaruh panas (HAZ).

2.3 Aluminium

Sebagian besar lingkungan, termasuk udara, air (air asin), dan senyawa kimia lainnya, memiliki tingkat ketahanan korosi yang tinggi terhadap aluminium, yang pada dasarnya dianggap sebagai logam nonferrous. Oleh karena itu, hal ini sangat diinginkan. Aluminium terbuat dari *kreolit* dan *bauksit*. Aluminium berwarna putih keperakan dengan titik leleh 660,32 °C dan titik didih 2519 °C. Aluminium merupakan logam yang dapat dibentuk menjadi berbagai bentuk untuk diproses lebih lanjut, seperti pelat, tabung, kabel, dan profil (Faizin Alamsyah, 2013). Paduan aluminium dan tembaga menghasilkan sifat yang keras dan kuat, namun juga rapuh. Untuk tujuan penempaan, konsentrasi tembaga pada paduan umumnya tidak boleh melebihi 5,6%. Hal ini karena senyawa CuAl_2 terbentuk di dalam logam sehingga membuatnya rapuh. Maka dari itu, untuk meningkatkan hal ini, Teknologi pengelasan fusi, termasuk pengelasan gesekan (FW), telah dikembangkan. Ini adalah versi perbaikan dari proses pengelasan gesekan yang memungkinkan beberapa paduan aluminium yang sulit disambung dilas menerapkan teknik pengelasan lebur. Tujuan dari studi ini adalah untuk memahami struktur mikro dari sambungan las gesekan berbahan tembaga dan paduan aluminium yang sebenarnya telah dikerjakan oleh peneliti. Oleh karena itu, peneliti merasa sangat termotivasi untuk menulis makalah ini (Ihsan Eldina dkk., 2019).

2.3.1 Klasifikasi Aluminium

Di bidang teknik, aluminium adalah pilihan populer karena konduktivitas termalnya yang luar biasa dan ketahanan terhadap korosi, serta sifatnya yang ringan. Klasifikasi aluminium berdasarkan komposisi kimianya dibagi menjadi dua kategori utama :

1. Aluminium murni (seri 1xxx): Mengandung lebih dari 99% aluminium.

2. Paduan Aluminium: diklasifikasikan menurut unsur paduan utama seperti 2xxx (tembaga), 3xxx (mangan), 4xxx (silikon), 5xxx (magnesium), 6xxx (magnesium dan silikon), 7xxx (seng) (William F & Smith, 2010) .

2.4 Tembaga

Di antara logam terpenting di dunia, tembaga (Cu) dimurnikan, diproses sebagai campuran dan ditambahkan ke paduan logam lain untuk memodifikasi sifatnya. Tembaga merupakan logam yang lunak dan ulet, merupakan penghantar panas dan listrik yang baik, cenderung membentuk campuran, menyebar lebih merata bila didinginkan, dapat dikerjakan panas atau dingin, tembaga tahan terhadap pengaruh korosi udara melalui formasi (Anggraini & Rosyidi, 2023).

2.4.1 Klasifikasi Tembaga

Tembaga adalah logam dengan konduktivitas listrik dan termal yang sangat baik. Klasifikasi tembaga dibagi menjadi beberapa kategori besar berdasarkan kemurnian dan unsur paduan yang digunakan :

1. Tembaga Murni (C11000): Mengandung 99.9% tembaga.
2. Tembaga Paduan: Seperti kuningan (paduan tembaga-seng), perunggu (paduan tembaga-timah), dan cupronikel (paduan tembaga-nikel) Davis, J. R. (2001).

2.5 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan mikrostruktur dilakukan untuk memahami struktur internal suatu material pada tingkat mikroskopis, yang dapat mempengaruhi sifat mekanik dan fisiknya. Pengamatan ini menggunakan mikroskop cahaya atau elektron untuk mengamati partikel, fase, dan inklusi di dalam material. Pengamatan terhadap struktur mikro aluminium dan tembaga yang dilas dengan pengelasan gesekan menunjukkan perbedaan yang signifikan dalam ukuran butir dan distribusi, serta adanya retakan dan pori-pori yang mempengaruhi kekuatan sambungan las (Hachette pratique. & Macrolibros, 2018).

2.6 Burn Off Length

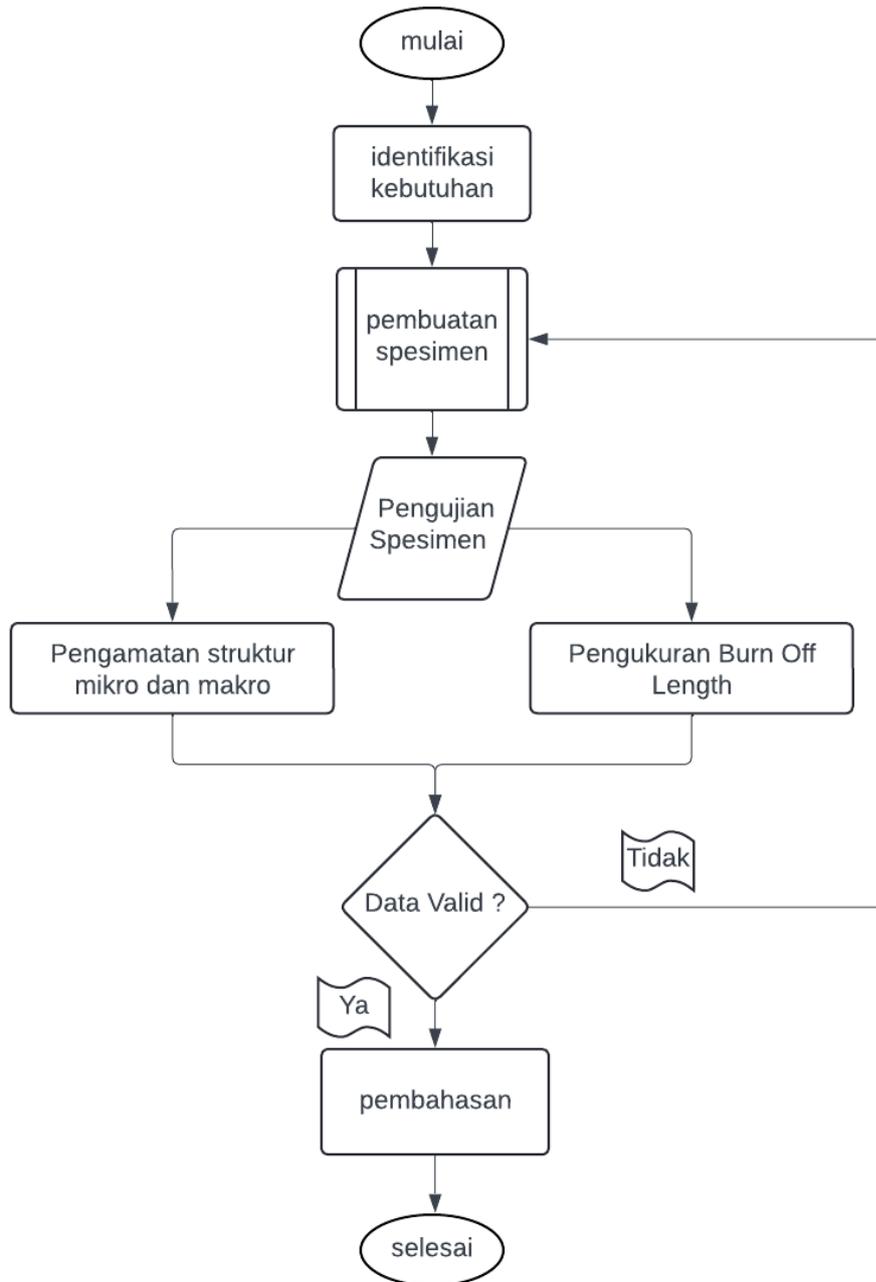
Burn off length adalah parameter penting dalam proses *friction welding* yang mempengaruhi sifat sambungan las. Pengaruh *Burn off length* terhadap kekuatan sambungan adalah kekuatan sambungan las gesek dipengaruhi oleh *Burn off length*. Semakin besar *Burn off length* maka semakin besar pula kekuatannya. Namun jika *Burn off length* terlalu besar, kekuatan ikatan dapat menurun karena terbentuknya cacat pori.

Struktur *mikro* sambungan las gesekan dipengaruhi oleh *Burn off length*. Semakin besar *Burn off length* maka semakin tebal dan padat lapisan campuran yang terbentuk. Ini mempengaruhi kekuatan dan ketahanan sambungan las. *Burn off length* yang optimal dapat dicapai dengan mengoptimalkan parameter proses pengelasan gesekan, seperti waktu gesekan, tekanan gesekan, dan kecepatan putaran. Hal ini mempengaruhi kekuatan, porositas, dan kualitas sambungan las (Cheepu & Che, 2019).

BAB 3. METODOLOGI

3.1 Alur Penelitian

Diagram alir berikut digunakan saat penelitian berlangsung.



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

3.2 Identifikasi Kebutuhan

Studi ini bertujuan mengevaluasi efek variasi RPM dalam proses pengelasan *friction welding* terhadap sifat fisik material aluminium dan tembaga. Untuk mencapai tujuan ini, beberapa langkah diperlukan.

3.2.1 Pemilihan Material

Kedua material ini dipilih karena memiliki sifat fisik dan termal yang berbeda. Aluminium dikenal dengan sifatnya yang ringan dan daya hantar termal yang tinggi, sementara tembaga memiliki konduktivitas listrik dan termal yang sangat baik serta ketahanan korosi yang tinggi. Perbedaan sifat ini diharapkan dapat memberikan wawasan mendalam tentang bagaimana variasi RPM mempengaruhi hasil pengelasan.

3.2.2 Variasi RPM

Berbagai RPM akan digunakan dalam proses pengelasan untuk menentukan pengaruhnya terhadap hasil pengelasan. Variasi ini bertujuan untuk mengidentifikasi RPM optimal yang menghasilkan sifat fisik terbaik pada sambungan aluminium dan tembaga.

3.2.3 Parameter Pengelasan

Selain RPM, parameter lain seperti tekanan, waktu pengelasan, dan pendinginan harus diidentifikasi dan dikendalikan. Pengendalian parameter ini sangat penting untuk memastikan hasil yang konsisten dan dapat dibandingkan. Tekanan yang tepat harus diterapkan untuk memastikan perpaduan yang baik antara material. Durasi pengelasan akan diatur untuk mengoptimalkan kualitas sambungan. Metode pendinginan setelah pengelasan juga akan dipertimbangkan untuk melihat pengaruhnya terhadap sifat fisik hasil pengelasan.

3.2.4 Pengujian

Berbagai jenis pengujian akan dilakukan untuk mengevaluasi sifat fisik hasil pengelasan, termasuk uji struktur mikro/makro dan uji *burn of length*.

3.3 Pembuatan Spesimen

Proses pembuatan spesimen metode *friction welding* dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri dan Informatika Uhamka. Adapun tahapan pengerjaan penelitiannya adalah sebagai berikut:

1. Pemotongan Material: Material aluminium dan tembaga dipotong dengan panjang 72 mm dan diameter 12 mm.



Gambar 3. 2 pemotongan material aluminium dan tembaga

2. Persiapan Permukaan: Permukaan material yang akan dilas dirapihkan (dikikir) agar memudahkan ketika dilakukan friction



Gambar 3. 3 persiapan permukaan aluminium dan tembaga

3. *Setting* Mesin: Mesin *friction welding* disetel sesuai dengan variasi RPM yang telah ditentukan.



Gambar 3. 4 Mesin rotary friction welding

4. Proses Pengelasan: Pasang batang aluminium di satu sisi *chuck* mesin *friction welding* kemudian pasang batang tembaga di sisi *chuck* yang lain lalu atur mesin pada RPM tertentu, misalnya mulai dari 1000 RPM, variasikan RPM untuk percobaan selanjutnya, misalnya 1300 RPM dan 2000 RPM kemudian Nyalakan mesin untuk memulai putaran salah satu batang (misalnya, tembaga) tekan batang aluminium ke batang tembaga yang berputar hingga terjadi gesekan dan panas Lanjutkan proses ini sampai suhu mencapai titik leleh kedua bahan pada titik kontak, tetapi tidak meleleh sepenuhnya Setelah suhu yang cukup tercapai dan sambungan mulai terbentuk, hentikan putaran mesin secara mendadak sambil tetap memberikan tekanan biarkan sambungan mendingin di bawah tekanan konstan untuk memastikan kualitas sambungan ulangi langkah-langkah ini untuk setiap variasi RPM yang telah ditentukan.



Gambar 3. 5 Proses pengelasan friction welding

5. Metode pengumpulan data dalam studi ini melibatkan penggunaan variasi RPM sebesar 1000, 1300, dan 2000. Suhu dicatat selama proses pengelasan, dengan waktu gesek selama 1 menit, dengan penekanan selama 30 detik, dan beban 20 kg. Setelah proses *friction welding* selesai, melakukan pengujian karakteristik fisik yang mencakup analisis struktur mikro dan makro.

3.4 Pengujian spesimen

Setelah spesimen selesai dibuat, dilakukan berbagai pengujian di laboratorium Metalurgi fisik Universitas Indonesia untuk mengevaluasi sifat fisik hasil pengelasan :

3.4.1 Uji Struktur Mikro

Spesimen dipotong dan dipoles untuk pengamatan mikroskopis. Struktur mikro seperti butiran dan fase yang terbentuk akibat pengelasan diamati.

3.4.2 Uji Struktur Makro

Permukaan spesimen diamati dengan mata telanjang atau dengan mikroskop optik untuk melihat distribusi dan homogenitas sambungan las.

3.4.3 Cara Mengukur Ukuran Butir

1. Persiapan Spesimen
 - a. Potong spesimen dari daerah lasan yang akan diamati.
 - b. Poles permukaan spesimen hingga halus dan bebas goresan.
2. *Etching*

Lakukan etching pada permukaan spesimen menggunakan larutan kimia yang sesuai untuk menonjolkan batas butir.
3. Pengamatan Mikroskopis
 - b. Amati spesimen menggunakan mikroskop optik atau mikroskop elektron.
 - c. Gunakan pembesaran yang sesuai untuk melihat butiran dengan jelas.
4. Analisis Ukuran Butir
 - a. Gunakan perangkat lunak analisis citra untuk mengukur diameter butir.
 - b. Tentukan ukuran butir rata-rata dengan menghitung ukuran beberapa butir di berbagai lokasi pada spesimen.

3.4.4 Uji *Burn Off Length*

Uji ini dilakukan untuk mengukur panjang material yang hilang selama proses pengelasan akibat gesekan dan tekanan

1. Pengukuran Awal: Sebelum pengelasan, panjang material diukur dengan akurat.
2. Pengukuran Akhir: Setelah pengelasan, panjang material diukur kembali.
3. Analisis Data: Panjang material yang hilang dihitung dan dianalisis untuk menentukan pengaruh variasi RPM terhadap burn of length.

3.5 Pembahasan

Dalam sub bab ini, hasil dari berbagai pengujian dan observasi yang telah dilakukan dianalisis dan dibahas. Beberapa poin yang akan dibahas meliputi:

3.5.1 Pengaruh RPM terhadap Struktur Mikro dan Makro

Pembahasan mengenai perubahan struktur mikro dan makro yang diamati.

3.5.2 Pengaruh RPM terhadap *Burn Off Length*

Analisis pengaruh variasi RPM terhadap panjang material yang hilang selama pengelasan.

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Studi ini dilaksanakan agar mengevaluasi dampak variasi kecepatan putaran (RPM) terhadap sifat fisik dalam proses pengelasan *friction welding* pada aluminium dan tembaga.

4.1.1 Suhu pengelasan rotary friction welding

RPM Variasi	Suhu Gesek (°C)	Suhu Tekan (°C)	Suhu Maksimal (°C)	Suhu Akhir (°C)
1000	229	118	232	73
1300	330	102	339	69
2000	207	113	255	75

table 4. 1 Suhu pengelasan rotary friction welding



Grafik 4. 1 grafik x dan y dari RPM dan Suhu pengelasan Rotary Friction Welding

Berikut adalah grafik variasi suhu berdasarkan beban RPM. Grafik ini menunjukkan suhu gesek, suhu tekan, suhu maksimal, dan suhu akhir pada variasi RPM yang berbeda (1000, 1300, dan 2000 RPM).

1. Suhu Gesek: Suhu yang dihasilkan selama gesekan.

2. Suhu Tekan: Suhu yang dihasilkan selama penerapan tekanan.
3. Suhu Maks: Suhu tertinggi yang dicapai selama proses pengelasan.
4. Suhu Akhir: Suhu akhir setelah pendinginan.

4.1.2 Pengukuran *Burn Off Length* (BOL)

Pengukuran *burn-off length* dilakukan setelah proses pengelasan selesai, dengan mengukur panjang spesimen sebelum dan sesudah pengelasan. Di bawah ini adalah rumus perhitungan *burn-off length*..:

$$Tp = Lo - L$$

1. *Burn off length* rpm 1000



Gambar 4. 1 aluminium dan tembaga setelah di friction welding

$$Tp = Lo - L$$

$$Tp = (72 \text{ mm} + 72 \text{ mm}) - 140 \text{ mm}$$

$$Tp = 144 \text{ mm} - 140 \text{ mm}$$

$$Tp = 4 \text{ mm}$$

Dengan demikian, total pemendekan *burn-off length* untuk spesimen dengan RPM 1000 adalah 4 mm.

2. *Burn-Off Length* rpm 1300



Gambar 4. 2 aluminium dan tembaga setelah di friction welding

$$T_p = L_o - L$$

$$T_p = (72 \text{ mm} + 72 \text{ mm}) - 139 \text{ mm}$$

$$T_p = 144 \text{ mm} - 139 \text{ mm}$$

$$T_p = 5 \text{ mm}$$

Dengan demikian, total pemendekan *burn-off length* untuk spesimen dengan RPM 1300 adalah 5 mm.

3. *Burn Off Length* rpm 2000



Gambar 4. 3 aluminium dan tembaga setelah di friction welding

$$T_p = L_o - L$$

$$T_p = (72 \text{ mm} + 72 \text{ mm}) - 134 \text{ mm}$$

$$T_p = 144 \text{ mm} - 134 \text{ mm}$$

$$T_p = 10 \text{ mm}$$

Dengan demikian, total pemendekan *burn-off length* untuk spesimen dengan RPM 2000 adalah 10 mm.

4.1.3 Hasil Pengamatan Struktur Mikro/Makro Pada RPM 1000



Gambar 4. 4 Struktur makro pada rpm 1000

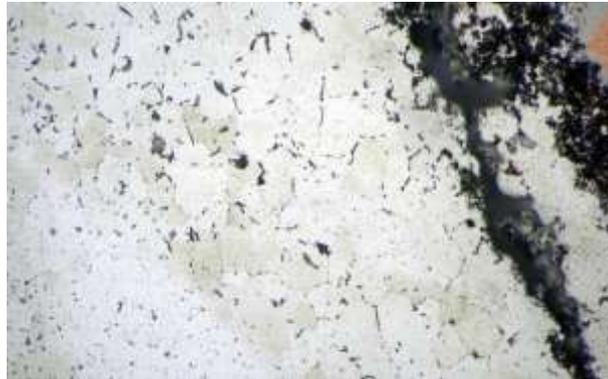
Gambar 4.4 menunjukkan zona sambungan antara dua logam yang telah dilas dengan metode *friction welding*. Permukaan antara kedua logam menunjukkan area kontak di mana gesekan dan tekanan telah menyebabkan kedua material menyatu. Pada sisi kanan gambar terlihat adanya material yang menonjol keluar dari zona sambungan, yang dikenal sebagai *flash*. *Flash* ini adalah hasil dari material yang dipanaskan dan tertekan keluar dari zona sambungan selama proses pengelasan. Bagian kiri gambar menunjukkan struktur material yang berbeda dari bagian kanan, menunjukkan perbedaan sifat fisik, warna, dan tekstur dari kedua logam yang dilas.



Gambar 4. 5 Struktur mikro aluminium dengan perbesaran 100x

Gambar 4.5 hasil pengukuran menunjukkan bahwa terlihat adanya distribusi partikel kecil yang tersebar merata di seluruh permukaan material. Partikel-partikel ini menunjukkan hasil dari perubahan mikrostruktur akibat panas dan tekanan yang dihasilkan selama proses pengelasan. Homogenitas distribusi partikel ini

mengindikasikan bahwa proses pengelasan berjalan dengan baik, menghasilkan sambungan yang kuat dan seragam.



Gambar 4. 6 Struktur mikro daerah pengelasan dengan perbesaran 500x

Gambar 4.6 hasil pengukuran menunjukkan bahwa struktur mikro pada material hasil pengelasan. Terlihat adanya garis batas yang jelas antara dua area yang berbeda, yang mungkin merupakan zona yang terkena panas (heat-affected zone) dan zona logam dasar. Di sepanjang batas tersebut, terdapat partikel-partikel kecil dan porositas yang mungkin menunjukkan area yang mengalami stress atau ketidaksempurnaan dalam proses pengelasan. Distribusi partikel dan retakan kecil di sekitar garis batas ini menunjukkan adanya perubahan struktur mikro akibat panas dan tekanan selama proses pengelasan.



Gambar 4. 7 Struktur mikro tembaga dengan perbesaran 1000x

Pada gambar 4.7 menunjukkan fase primer (*alpha*) area berwarna putih menunjukkan fase primer dari aluminium dan tembaga, *ferrit* dalam aluminium dan tembaga dalam paduan lainnya. Struktur ini memiliki butiran yang terlihat jelas

dengan ukuran yang bervariasi. Fase sekunder area yang lebih gelap dan memiliki tekstur berbeda menunjukkan fase sekunder, seperti cementit dalam aluminium dan tembaga atau partikel penguat dalam paduan. Fase ini biasanya terbentuk karena komposisi kimia yang berbeda atau melalui proses perlakuan panas. Batas butir garis-garis yang terlihat memisahkan butiran menunjukkan batas butir. Batas butir ini penting karena dapat mempengaruhi sifat fisik material, seperti kekuatan dan ketahanan terhadap korosi. Inklusi atau kekosongan terdapat beberapa area gelap kecil yang menunjukkan adanya inklusi atau kekosongan dalam material. Inklusi ini bisa berupa partikel *non-logam* yang terperangkap selama proses pembuatan material atau *void* yang terbentuk akibat proses pengerjaan.

4.1.4 Hasil Pengamatan Struktur mikro/makro dengan RPM 1300



Gambar 4. 8 Struktur makro pada rpm 1300

Material sebelah kiri memiliki tekstur kasar dan berwarna coklat. Material sebelah kanan memiliki tekstur halus dengan garis-garis yang menunjukkan kemungkinan proses penggosokan atau pengasahan, serta berwarna abu-abu kebiruan. Terdapat tanda-tanda deformasi pada material sebelah kanan di bagian pinggir yang berbatasan langsung dengan material sebelah kiri.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa terdapat interaksi yang signifikan antara kedua jenis material pada batas antar muka. Deformasi yang terjadi pada material aluminium dan tembaga menunjukkan adanya tekanan mekanis yang cukup besar. Hal ini penting untuk dipertimbangkan dalam aplikasi praktis di mana kedua material ini akan digunakan bersama.



Gambar 4. 9 Struktur mikro aluminium dengan perbesaran 100x

Gambar 4.9 menunjukkan distribusi partikel terlihat adanya distribusi partikel yang merata di seluruh permukaan sampel. Partikel-partikel tersebut tampak sebagai titik-titik gelap pada latar belakang yang lebih terang. Ukuran dan bentuk partikel ukuran partikel bervariasi, dengan sebagian besar partikel memiliki bentuk yang tidak beraturan. Hal ini menunjukkan bahwa partikel tidak mengalami proses pembentukan yang seragam. Kehadiran porositas terdapat indikasi adanya porositas pada sampel, ditandai dengan adanya area kosong atau celah di antara partikel-partikel.



Gambar 4. 10 Struktur mikro daerah pengelasan dengan perbesaran 500x

Gambar 4.10 menunjukkan distribusi partikel terlihat adanya distribusi partikel yang cukup merata di seluruh permukaan sampel. Partikel tampak sebagai area gelap pada latar belakang yang lebih terang. Ukuran dan bentuk partikel partikel-partikel memiliki ukuran yang bervariasi dan bentuk yang tidak beraturan. Beberapa partikel tampak berbentuk kristalin. Kehadiran retakan dan porositas

terdapat indikasi adanya retakan (*cracks*) dan porositas pada sampel, terutama di bagian yang lebih gelap dan padat. Zona peralihan tampak adanya zona peralihan di sepanjang batas sampel dengan area yang lebih berwarna, yang mungkin menunjukkan perubahan komposisi atau fase material di area tersebut.



Gambar 4. 11 Struktur mikro tembaga dengan perbesaran 1000x

4.1.5 Hasil Pengamatan Struktur mikro/makro dengan RPM 2000



Gambar 4. 12 Struktur makro pada rpm 2000

Gambar 4.12 kedua permukaan silinder logam menunjukkan pola lingkaran konsentris yang merupakan hasil dari proses pemesinan. Permukaan silinder terlihat mengalami kerusakan yang cukup signifikan dengan adanya goresan dan pecahan kecil di beberapa titik. Terdapat variasi tingkat kerusakan antar kedua silinder, meskipun pola lingkaran konsentris tetap terlihat jelas.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa kedua silinder logam mengalami proses pemesinan yang serupa, menghasilkan pola lingkaran konsentris yang menunjukkan penggunaan alat pemesin yang konsisten. Namun, kerusakan pada

permukaan silinder menunjukkan adanya keausan yang perlu diperhatikan lebih lanjut.



Gambar 4. 13 Struktur mikro aluminium dengan perbesaran 100x

Pada gambar 4.13 struktur mikroskopis gambar menunjukkan struktur mikroskopis dari material dengan berbagai pori-pori dan inklusi yang tersebar secara acak. Distribusi pori terdapat distribusi pori-pori yang cukup merata di seluruh permukaan sampel. Pori-pori ini berukuran bervariasi, mulai dari yang sangat kecil hingga yang lebih besar. Inklusi dan kekosongan di beberapa bagian, terlihat adanya inklusi atau kekosongan yang lebih besar dibandingkan dengan daerah sekitarnya. Homogenitas secara keseluruhan, struktur material terlihat cukup homogen, meskipun terdapat beberapa area dengan konsentrasi pori-pori yang lebih tinggi.



Gambar 4. 14 Struktur mikro daerah pengelasan dengan perbesaran 500x

Pada gambar 4.14 menunjukkan area Putih area ini kemungkinan besar merupakan fasa utama dari material, yang bisa berupa matriks logam dalam komposit. Area abu-abu area ini mungkin menunjukkan interaksi antara dua fasa atau mungkin

merupakan produk reaksi yang terjadi selama proses manufaktur atau perlakuan panas. Area hitam area gelap bisa menunjukkan presipitasi, porositas, atau inklusi non-logam yang ada dalam material.



Gambar 4. 15 Struktur mikro tembaga dengan perbesaran 1000x

Pada gambar 4.15 menunjukkan area coklat muda area ini kemungkinan besar adalah matriks utama dari material, yang bisa berupa logam atau *alloy* yang diinvestigasi. area putih area ini menunjukkan fasa kedua atau presipitasi yang terjadi dalam matriks utama. Bitnik hitam bintik hitam kecil yang tersebar di seluruh gambar bisa jadi merupakan porositas atau inklusi *non-logam*.

4.2 Pembahasan

4.2.1 Hasil Uji *Burn Off Length* pada RPM 1000

Pada pengujian burn of length pada RPM 1000, pengamatan menunjukkan bahwa panjang burn of length yang terbentuk selama proses friction welding berbanding lurus dengan durasi waktu pengelasan. Proses ini ditandai dengan pelelehan material pada zona sambungan yang diakibatkan oleh panas gesekan yang terjadi di antara kedua permukaan material yang digosokkan.

Grafik yang dihasilkan dari uji burn of length pada RPM 1000 menunjukkan bahwa terjadi peningkatan panjang burn of length seiring dengan bertambahnya waktu pengelasan. Pada RPM 1000, panas yang dihasilkan cukup untuk

menyebabkan material meleleh secara signifikan, namun tidak berlebihan sehingga panjang burn of length dapat diatur dan dikendalikan.

Peningkatan panjang burn of length ini mengindikasikan bahwa suhu pada zona las mencapai titik yang optimal untuk terjadinya ikatan metalurgi tanpa menyebabkan kerusakan atau deformasi yang berlebihan pada material. Hal ini penting untuk memastikan bahwa sambungan yang dihasilkan memiliki kekuatan mekanis yang baik dan tahan terhadap beban yang akan diterimanya.

4.2.2 Hasil Uji *Burn Off Length* Pada RPM 1300

Hasil pengujian ini menunjukkan pemendekan panjang spesimen sebesar 5 mm pada kecepatan putaran 1300 rpm. Berikut beberapa poin penting terkait hasil ini:

1. Efek Friksi dan Panas: Kecepatan putaran yang tinggi (1300 rpm) menghasilkan panas yang signifikan akibat friksi. Panas ini menyebabkan material spesimen mengalami pemendekan.
2. Material Responsiveness: Material spesimen merespons panas dan friksi dengan mengalami pemendekan sebesar 5 mm. Hal ini mengindikasikan karakteristik termal dan mekanis dari material tersebut.

4.2.3 Hasil Uji *Burn Off Length* Pada RPM 2000

Hasil pengujian ini menunjukkan pemendekan panjang spesimen sebesar 10 mm pada kecepatan putaran 2000 rpm. Berikut beberapa poin penting terkait hasil ini:

1. Efek Friksi dan Panas: Kecepatan putaran yang lebih tinggi (2000 rpm) menghasilkan panas yang lebih signifikan akibat friksi dibandingkan dengan kecepatan putaran yang lebih rendah. Panas ini menyebabkan material spesimen mengalami pemendekan yang lebih besar.
2. Material Responsiveness: Material spesimen merespons panas dan friksi dengan mengalami pemendekan sebesar 10 mm. Hal ini mengindikasikan bahwa material tersebut sangat sensitif terhadap perubahan suhu dan tekanan akibat friksi.

4.2.3 Hasil Pengamatan Struktur Mikro/Makro Pada RPM 1000

Pada pengujian struktur mikro/makro dengan RPM 1000, hasil observasi menunjukkan adanya perubahan signifikan pada struktur mikro material di sekitar zona las. Struktur mikro yang terbentuk pada RPM 1000 cenderung lebih homogen dan menunjukkan adanya butir-butir yang lebih halus dibandingkan dengan pengujian pada RPM yang lebih tinggi.

Perubahan struktur mikro ini diakibatkan oleh suhu dan tekanan yang diterapkan selama proses pengelasan. Pada RPM 1000, suhu yang dihasilkan cukup untuk mencapai plastisitas material tanpa menyebabkan kerusakan mikrostruktur. Hal ini memungkinkan terjadinya difusi atom yang optimal sehingga terbentuk ikatan metalurgi yang kuat antara kedua material yang dilas.

Secara makro, hasil pengujian menunjukkan bahwa zona las memiliki penampang yang merata dengan sedikit deformasi di sekitar daerah sambungan. Ini menunjukkan bahwa RPM 1000 adalah parameter yang efektif untuk mendapatkan sambungan las yang kuat dan seragam tanpa menyebabkan kerusakan pada material induk

4.2.4 Hasil Pengamatan Struktur Mikro/Makro Pada RPM 1300

Pada RPM 1300, struktur makro menunjukkan interaksi yang signifikan antara material aluminium dan tembaga pada batas antar muka. Material sebelah kiri (aluminium) memiliki tekstur kasar dan berwarna coklat, sementara material sebelah kanan (tembaga) memiliki tekstur halus dengan garis-garis yang menunjukkan proses penggosokan atau pengasahan serta berwarna abu-abu kebiruan. Terdapat tanda-tanda deformasi pada material tembaga di bagian pinggir yang berbatasan langsung dengan material aluminium.

Struktur Mikro pada RPM 1300 di aluminium menunjukkan distribusi partikel merata di seluruh permukaan sampel. Partikel tampak sebagai titik-titik gelap pada latar belakang yang lebih terang, dengan ukuran dan bentuk yang bervariasi, sebagian besar berbentuk tidak beraturan. Selain itu, terdapat indikasi porositas dengan area kosong atau celah di antara partikel-partikel tersebut.

Daerah pengelasan distribusi partikel merata di seluruh permukaan sampel. Partikel tampak sebagai area gelap pada latar belakang yang lebih terang, dengan ukuran partikel yang bervariasi dan bentuk yang tidak beraturan. Kehadiran retakan dan porositas terutama terlihat di bagian yang lebih gelap dan padat. Zona peralihan di sepanjang batas sampel menunjukkan perubahan komposisi atau fase material.

Struktur tembaga menunjukkan fase primer dan sekunder dengan butiran yang terlihat jelas. Fase primer berupa area berwarna putih, sedangkan fase sekunder lebih gelap dan bertekstur berbeda. Garis-garis batas butir memisahkan butiran yang penting untuk sifat fisik material. Selain itu, terdapat inklusi atau kekosongan kecil yang menunjukkan partikel non-logam atau void.

4.2.5 Hasil Pengamatan Struktur Mikro/Makro Pada RPM 2000

Struktur Makro Pada RPM 2000, hasil pengamatan menunjukkan bahwa kedua permukaan silinder logam mengalami proses pemesinan yang serupa, menghasilkan pola lingkaran konsentris. Permukaan silinder menunjukkan adanya kerusakan signifikan berupa goresan dan pecahan kecil di beberapa titik. Kerusakan ini menunjukkan variasi tingkat keausan antar silinder, meskipun pola lingkaran konsentris tetap terlihat jelas.

Struktur Mikro pada RPM 2000 di aluminium menunjukkan distribusi pori-pori merata di seluruh permukaan sampel. Pori-pori bervariasi dalam ukuran, dari yang sangat kecil hingga yang lebih besar. Inklusi dan kekosongan terlihat lebih besar dibandingkan dengan daerah sekitarnya. Secara keseluruhan, struktur material cukup homogen meskipun terdapat inklusi dan kekosongan yang bervariasi.

Daerah Pengelasan distribusi partikel cukup merata di seluruh permukaan sampel. Partikel tampak sebagai area gelap pada latar belakang yang lebih terang, dengan ukuran partikel yang bervariasi dan bentuk yang tidak beraturan. Kehadiran retakan dan porositas terutama terlihat di bagian yang lebih gelap dan padat. Zona peralihan menunjukkan perubahan komposisi atau fase material di area tersebut.

Struktur tembaga menunjukkan fase primer dan sekunder dengan butiran yang terlihat jelas. Fase primer berupa area berwarna putih, sedangkan fase sekunder

lebih gelap dan bertekstur berbeda. Garis-garis batas butir memisahkan butiran yang penting untuk sifat fisik material. Selain itu, terdapat inklusi atau kekosongan kecil yang menunjukkan partikel non-logam atau void.

BAB 5. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

1. **Pengaruh RPM Terhadap Struktur Mikro dan Makro:** Variasi kecepatan putaran spindle (RPM) mempengaruhi struktur mikro dan makro dari sambungan las gesekan antara aluminium dan tembaga. Perubahan RPM menyebabkan variasi dalam distribusi butiran, ukuran pori-pori, dan inklusi dalam material yang dilas.
2. ***Burn Off Length (BOL)*:** Panjang material yang hilang selama proses pengelasan juga dipengaruhi oleh variasi RPM. Burn off length menunjukkan korelasi langsung dengan kecepatan putaran, di mana peningkatan RPM cenderung meningkatkan panjang material yang hilang akibat gesekan dan tekanan.

5.2 Saran

1. Dianjurkan untuk melakukan penelitian tambahan dengan variasi parameter pengelasan lainnya, seperti tekanan dan durasi gesekan, untuk lebih memahami dampaknya terhadap sifat mekanik dan struktur mikro dari sambungan las.
2. Perlu dilakukan uji coba aplikasi praktis di lingkungan industri untuk mengevaluasi kinerja metode RFW dalam kondisi operasional nyata. Ini akan membantu dalam mengidentifikasi potensi tantangan dan keuntungan ekonomi dari metode ini
3. Mengembangkan metode pengujian yang lebih ekstensif termasuk analisis sifat kimia dan korosi dari material yang dilas untuk mendapatkan gambaran yang lebih lengkap tentang kualitas sambungan.
4. Disarankan untuk menguji metode RFW dengan berbagai kombinasi material selain aluminium dan tembaga untuk memperluas penerapan teknik ini di industri.

DAFTAR REFRENSI

- Agustiawan Adriani, V., Asmara, A., Chandrabakty, S., Rismanto, M., Soekarno Hatta Km, J., & -Sulawesi Tengah, P. (2023). WELDING. *Jurnal Mekanikal*, 14(2), 1437–1443.
- Anggraini, E., & Rosyidi, M. (2023). KARAKTERISTIK METALURGI PADA ZAMAN ZULKARNAIN DALAM KAJIAN SAINS: BESI DAN TEMBAGA. <http://jurnal.uinsu.ac.id/index.php/jistech>
- Ay, İ., & Çelik, S. (1999). COMPARISON OF PROPERTIES OF FRICTION AND DIFFUSION WELDED JOINTS MADE BETWEEN THE PURE ALUMINIUM AND COPPER BARS. Dalam *BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* (Vol. 1, Nomor 2). <https://www.researchgate.net/publication/266887000>
- Chapke, Y., Kamble, D., & Shaikh, S. M. S. (2020). *Friction welding of Aluminium Alloy 6063 with copper*. <https://doi.org/10.1051/conf/202017002004>
- Cheepu, M., & Che, W. S. (2019). Effect of Burn-off Length on the Properties of Friction Welded Dissimilar Steel Bars. *Journal of Welding and Joining*, 37(1), 46–55. <https://doi.org/10.5781/jwj.2019.37.1.6>
- Erfiansyah, W., & Drastiawati, N. S. (2023). *Pengaruh Variasi RPM pada Pengelasan Friction Welding Baja S45C* PENGARUH VARIASI RPM PADA PENGELASAN FRICTION WELDING BAJA S45C TERHADAP KEKUATAN TARIK DAN BENTUK PATAHAN.
- Faizin Alamsyah, M. (2013). :6-12 6 PENGARUH HOLDING TIME PADA PROSES AGE HARDENING TERHADAP KEKERASAN KOMPOSIT AL-CU YANG DIPERKUAT SERBUK FLY ASH. Dalam *Jurnal Teknik Mesin S-1* (Vol. 1, Nomor 1).
- Fauzi, A., Ariyanto, N. A., & Taufik Qurohma, M. (t.t.). *UJI TARIK KEKUATAN SAMBUNGAN PENGELASAN LAS GESEK BAJA ST41*. www.poltektegal.ac.id

- Hachette pratique., & Macrolibros). (2018). *Les carrés d'Art Thérapie Winnie L'ourson : [Album à colorier]*. Hachette Livre - Département Pratique.
- Husodo, N., Sanyoto, B. L., Setyawati, B., & Mursid, M. (2013). *Penerapan Teknologi Las Gesek (Friction Welding) dalam Rangka Penyambungan Dua Buah Logam Baja Karbon St41 pada Produk Back Spring Pin*.
- Ihsan Eldina, E., Candra, G., Firdaus, N., Sari Delvita, S., & Putra Ananda. (2019). *ALUMINIUM*.
- Iswanto, P. T., Himarosa, R. A., Lingkar, J., & Tamantirto, S. (2017). *KARAKTERISASI SAMBUNGAN SMAW BAJA KARBON RENDAH MENGGUNAKAN 3 JENIS ELEKTRODA* (Vol. 1, Nomor 2). <http://journal.umy.ac.id/index.php/jmpm>
- Putra, D. R., A Widi, I. K., & W Supriyanto, N. S. (2022). *PENGGUNAAN LAS GESEK (FRICTION WELDING) GUNA PENYAMBUNGAN DUA BUAH LOGAM BAJA KARBON ST 42 PADA PENGUJIAN TARIK DAN STRUKTUR MIKRO UNTUK SPRING PIN PADA MOBIL* (Vol. 12, Nomor 1).
- Samsudin. (2021). *UJI KEKUATAN SAMBUNGAN LAS GESEK DENGAN BAHAN BAJA ST 60*.
- Sardjono, K., & Munandar, R. (2019). *STUDI KEKUATAN LAS RESISTANSI LISTRIK PADA PIPA BAJA API 5L – B DAN API 5L – X60*. 42.
- Sofwan, I. (2023). *FENOMENA LAS GESEK (FRICTION WELDING)*.
- Solihin, Sukmana, I., & Ummah, K. (2017). *Pengaruh waktu kontak terhadap kualitas sambungan hasil las gesek (friction welding) magnesium az-31*.
- Subekti, N. (2011). *OPTIMALISASI KOMPOSISI KANDUNGAN Mn PADA FILLER UNTUK MENDAPATKAN KETANGGUHAN DAN KEKERASAN*.
- Suhada, K., & Rafiq Yanhar, M. (2023). *ANALISA KEMAMPUAN PENGELASAN TERHADAP BEBAN IMPAK DAN TEKAN PADA BAJA C0.40-0.50%*.

Umartono Setiyo, A., & Irawan, D. (2018). *ANALISA PENGARUH PERBEDAAN METODE PENGELASAN SMAW DAN GTAW TERHADAP SIFAT MEKANIS MATERIAL HG 30*. 131–142.

William F, & Smith, J. H. (2010). *Foundations of Materials Science and Engineering*. McGraw-Hill.

LAMPIRAN

Lampiran a

Rizky Putratama Hendra - PENGARUH VARIASI REVOLUTION PER MINUTE (RPM) TERHADAP SIFAT FISIK PADA PENGELASAN FRICTION WELDING ALUMINIUM DAN TEMBAGA

ORIGINALITY REPORT

17%	12%	3%	12%
SIMILARITY INDEX	INTERNET SOURCES	PUBLICATIONS	STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	Submitted to Academic Library Consortium Student Paper	7%
2	repository.its.ac.id Internet Source	1%
3	docplayer.info Internet Source	1%
4	Submitted to Sriwijaya University Student Paper	1%
5	pustaka.sttw.ac.id Internet Source	1%
6	Submitted to Universitas Mercu Buana Student Paper	1%
7	adoc.pub Internet Source	<1%
8	Avinash Kumar, Arindam Dhar, Ishita Koley, Sukumar Kundu. "Interfacial microstructure and electrochemical behavior of diffusion	<1%

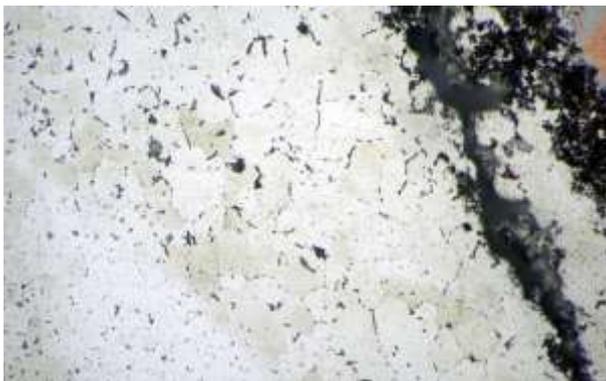
Lampiran b



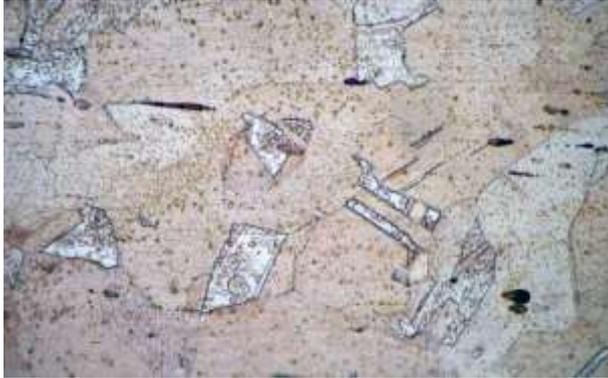
Lampiran c



Lampiran d



Lampiran e



Lampiran f



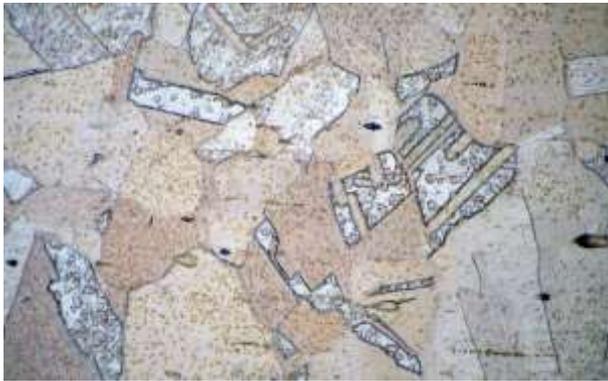
Lampiran g



Lampiran h



Lampiran i



Lampiran j



Lampiran k



Lampiran l



Lampiran m



Lampiran n



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH PROF. DR. HAMKA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN INFORMATIKA
Jl. Tanah Merdeka No. 40 Bandung, Jawa Barat, Indonesia. Telp. (022) 850001 Fax. (022) 8752278
Email: fkip@umh.ac.id



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH PROF. DR. HAMKA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN INFORMATIKA
Jl. Tanah Merdeka No. 40 Bandung, Jawa Barat, Indonesia. Telp. (022) 850001 Fax. (022) 8752278
Email: fkip@umh.ac.id

LEMBAR BIMBINGAN SKRIPSI

Nama : Elizy Nur Rizka Winda
 NIM : 180202011
 Program Studi : Teknik Informatika
 Judul : Penyempurnaan Revolusi Perikanan (R.Pur) Orlandi Gintaka
 Pembimbing : Pada Keseluruhan Fisika dan Kimia Alamiah dan Biologi
Fitri Ariyanti, S.T.M.T.

No.	Tanggal	Keterangan	Paraf
1		Revisi Bab 2	<i>[Signature]</i>
2		Revisi Bab 1-2	<i>[Signature]</i>
3		Mafulekan Gintaka dari wabak	<i>[Signature]</i>
4		revisi bab 3. mendelesi	<i>[Signature]</i>
5		revisi isi dari bab 3	<i>[Signature]</i>
6		revisi bab 3	<i>[Signature]</i>
7		buat gambar terdapat bab	<i>[Signature]</i>
8		Revisi bab 5	<i>[Signature]</i>
9		buat abstrak	<i>[Signature]</i>

No.	Tanggal	Keterangan	Paraf

Mengarah,
Dosen Pembimbing

[Signature]

NIM

Mahasiswa

[Signature]

NIM