

**Pengaruh pengaturan parameter proses pada
friction welding menggunakan material baja
karbon rendah dengan *stainless steel* AISI 304**

*The effect of process parameter settings on friction welding using
low carbon steel material with stainless steel AISI 304*

SKRIPSI

Oleh:

Nama: Akbar Daya Utama

NPM: 223030045



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS PASUNDAN
BANDUNG
2026**

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini,

N a m a : Akbar Daya Utama

Nomor Pokok Mahasiswa : 223030045

Program Studi : Teknik Mesin FT UNPAS

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Dalam Skripsi yang saya kerjakan ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan/ditulis oleh orang lain untuk memperoleh gelar dari suatu perguruan tinggi,
2. Sepanjang pengetahuan saya, tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis dan diterbitkan oleh orang lain kecuali yang secara tertulis diacu/dikutip/disitasi dalam naskah ini dan disebutkan dalam referensi,
3. Naskah laporan skripsi yang ditulis bukan dilakukan secara *copy paste* dari karya orang lain dan mengganti beberapa kata yang tidak perlu.
4. Naskah laporan skripsi bukan hasil plagiarisme.

Apabila di kemudian hari terbukti bahwa pernyataan ini tidak benar maka saya sanggup menerima hukuman/sanksi apa pun sesuai peraturan yang berlaku.

Bandung, 24 Juni 2026

Penulis,



Akbar Daya Utama

SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan di bawah ini, sebagai sivitas akademik Universitas Pasundan, saya:

N a m a : Akbar Daya Utama

NPM : 223030045

Program Studi : Teknik Mesin FT UNPAS

Jenis Karya : Skripsi

Menyatakan bahwa sebagai pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, saya menyetujui memberikan kepada Universitas Pasundan Hak Bebas Royalti Noneksklusif atas karya ilmiah saya yang berjudul:

“Pengaruh pengaturan parameter proses pada *friction welding* menggunakan material baja karbon rendah dengan *stainless steel* AISI 304”

Beserta perangkat yang ada (jika ada). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Pasundan berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Bandung, 24 Juni 2026

Yang menyatakan,



Akbar Daya Utama

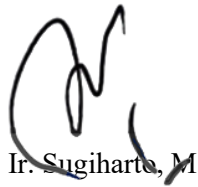
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Pengaruh pengaturan parameter proses pada *friction welding* menggunakan material baja karbon rendah dengan *stainless steel* AISI 304



Nama: Akbar Daya Utama
NPM : 223030045

Pembimbing Utama

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'S' followed by a smaller 'u' and a horizontal line.

Dr. Ir. Sugiharto, M.T.

Pembimbing Pendamping

A handwritten signature in black ink, featuring a large, sweeping 'M' followed by a horizontal line and a small flourish.

Dr. Ir. Muki Satya Permana, M.T.

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Pengaruh pengaturan parameter proses pada *friction welding* menggunakan material baja karbon rendah dengan *stainless steel* AISI 304



Nama: Akbar Daya Utama
NPM : 223030045

Tanggal sidang skripsi: 29 Juni 2026

Ketua : Dr. Ir. Sugiharto, M.T.


.....

Sekretaris : Dr. Ir. Muki Satya Permana, M.T.


.....

Anggota : Prof. Dr. Ir. Hery Sonawan, M.T.


.....

Anggota : Dr. Ir. Agus Sentana, M.T.


.....

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kita panjatkan kepada Allah SWT atas segala kebaikan dan rahmat-Nya yang telah memberikan kekuatan fisik dan mental yang dibutuhkan penulis untuk menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengaruh pengaturan parameter proses pada *friction welding* menggunakan material baja karbon rendah dengan *stainless steel* AISI 304”. Penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada beberapa pihak yang telah banyak membantu dalam pembuatan laporan skripsi ini. Sikap baik memudahkan penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Penghargaan dan terima kasih penulis ucapkan kepada:

1. Allah SWT atas rahmat-Nya yang telah memberikan kemudahan dan petunjuk selama pembuatan laporan ini,
2. Pintu surgaku, Iin Surinah, S.Pd. penulis mengucapkan rasa syukur dan terima kasih yang sedalam-dalamnya atas segala kasih sayang, doa, pengorbanan, serta dukungan yang tiada pernah berhenti diberikan. Ibu adalah sosok luar biasa dengan penuh keteguhan hati telah menjadi tulang punggung keluarga, berjuang tanpa mengenal lelah demi memenuhi kebutuhan dan mewujudkan masa depan yang lebih baik bagi anak-anaknya. Di balik setiap kesulitan dan tantangan yang dihadapi, Ibu tetap berdiri teguh dengan penuh kesabaran, keikhlasan, dan kekuatan yang menjadi teladan bagi penulis. Terima kasih karena selalu percaya kepada penulis, bahkan ketika penulis meragukan kemampuannya sendiri. Terima kasih karena tidak pernah lelah memberikan nasihat, mengingatkan untuk tetap berusaha, serta mendukung setiap keputusan dan cita-cita yang ingin penulis capai. Kasih sayang dan ketulusan yang Ibu berikan menjadi sumber kekuatan yang selalu mendorong penulis untuk terus bangkit dan berjuang menghadapi berbagai tantangan. Skripsi ini penulis persembahkan sebagai wujud rasa syukur dan terima kasih atas segala perjuangan yang telah Ibu berikan. Semoga Allah SWT senantiasa melimpahkan kesehatan, kebahagiaan, keberkahan, serta perlindungan kepada Ibu. Terima kasih karena telah menjadi sosok Ibu yang luar biasa, sumber kekuatan, dan inspirasi terbesar dalam kehidupan penulis.
3. Dengan penuh cinta dan rasa hormat, penulis mengucapkan terima kasih kepada almarhum Ayah tercinta Masnu, S.Pd.. Meskipun Ayah tidak dapat mendampingi hingga akhir perjalanan pendidikan ini, kasih sayang, perjuangan, doa, dan pengorbanan Ayah akan selalu menjadi sumber kekuatan dalam setiap langkah penulis. Ayah telah mengajarkan arti kerja keras, kejujuran, dan keteguhan dalam menghadapi kehidupan.

Setiap nasihat dan harapan yang Ayah titipkan menjadi motivasi bagi penulis untuk terus berjuang hingga menyelesaikan skripsi ini. Kepergian Ayah meninggalkan rindu yang begitu mendalam, namun cinta dan kenangan tentang Ayah akan selalu hidup di hati penulis. Skripsi ini penulis persembahkan sebagai wujud cinta, bakti, dan rasa terima kasih kepada Ayah. Semoga Allah SWT senantiasa melimpahkan rahmat dan ampunan kepada Ayah, menempatkannya di tempat terbaik di sisi-Nya, serta mempertemukan kita kembali di Surga-Nya. **Aamiin.**

4. Dr. Ir. Sugiharto, M.T. selaku dosen pembimbing utama sekaligus Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Pasundan, atas segala bimbingan, arahan, masukan, dan semangat yang selalu diberikan kepada peneliti. Terima kasih atas segala pembelajaran dan motivasi yang diberikan baik saat perkuliahan maupun selama bimbingan yang menjadi penyemangat dalam menyelesaikan skripsi ini. Sungguh suatu kehormatan dan rasa sangat bangga, peneliti berkesempatan menjadi mahasiswa bimbingan bapak.
5. Dr. Ir. Muki Satya Permana, M.T. selaku dosen pembimbing pendamping, atas bimbingan, arahan, masukan, semangat, motivasi yang diberikan dalam membimbing peneliti. Terima kasih yang sebesar-besarnya atas segala bantuan yang bapak berikan, yang selalu menyemangati dan menginspirasi. Sungguh suatu kehormatan dan rasa sangat bangga, peneliti berkesempatan menjadi mahasiswa bimbingan bapak.
6. Semua dosen Program Studi Teknik Mesin yang telah memberikan bekal ilmu pengetahuan kepada penulis selama penyelesaian studi,
7. Seluruh staf Tata Usaha Prodi dan Fakultas yang telah membantu memudahkan segala urusan administrasi peneliti selama berkuliah.
8. Uwa tercinta, Sunardi, S.Pd. kakak dari Ibu sekaligus sosok yang telah menjadi pengganti ayah bagi penulis. Dengan segala kerendahan hati, penulis menyampaikan rasa terima kasih yang tidak akan pernah cukup terwakili oleh kata-kata. Sejak penulis kehilangan sosok ayah, Uwa hadir bukan hanya sebagai keluarga, tetapi juga sebagai tempat bersandar, tempat meminta nasihat, dan sosok yang selalu memberikan arah ketika penulis dihadapkan pada berbagai pilihan hidup. Setiap arahan, nasihat, perhatian, serta dukungan yang Uwa berikan telah menjadi bekal berharga bagi penulis dalam menempuh perjalanan pendidikan hingga mampu menyelesaikan skripsi ini. Setiap langkah penting yang penulis ambil terdapat doa, bimbingan, dan ketulusan Uwa yang senantiasa menguatkan serta meyakinkan penulis untuk terus melangkah maju. Bagi penulis, Uwa bukan hanya seorang paman, melainkan sosok ayah yang telah mengajarkan arti tanggung jawab, keteguhan, dan kebijaksanaan dalam menjalani

kehidupan. Semoga Allah SWT senantiasa melimpahkan kesehatan, kebahagiaan, keberkahan, dan umur yang penuh manfaat kepada Uwa.

9. Kakak tercinta, Delima Cahya Utami, S.Keb. terima kasih sudah selalu berusaha memberikan yang terbaik untuk adik-adikmu, termasuk penulis. Kasih sayang dan dukunganmu sangat berarti dalam perjalanan ini. Kehadiranmu adalah kekuatan yang tak tergantikan bagi penulis.
10. Adik terkasih, Pandu Darma Wibuna terima kasih telah menjadi sumber kebahagiaan dan semangat dalam setiap langkah penulis. Dik, Hiduplah lebih baik dari kakakmu. Teruslah berjuang dan jadilah pribadi yang selalu membawa kebahagiaan bagi keluarga.
11. Keluarga besar yang senantiasa menyertai dengan doa dan dukungan tulus sepanjang perjalanan studi, khususnya dalam menyelesaikan skripsi ini. Segala bentuk perhatian serta kasih sayang menjadi kekuatan utama dalam setiap langkah penulis.
12. Seseorang yang belum dapat disebutkan namanya. Terima kasih telah menjadi bagian dalam proses perjalanan hidup penulis menyusun skripsi. Berkontribusi baik tenaga, waktu, dukungan, serta menghibur penulis dalam kesedihan. Mendengarkan keluh kesah dan meyakinkan penulis untuk pantang menyerah hingga penyusunan skripsi ini terselesaikan.
13. Peneliti juga ingin menyampaikan apresiasi sebesar-besarnya kepada sahabat seperjuangan (Muhamad Athfal, Rodiana, Rianki Febrianta, Dan Ramdan Sidiq). Terima kasih atas setiap detik kebersamaan, berjuang bersama, bantuan, suka dan duka yang telah menjadi bagian indah dari kisah selama menempuh studi ini hingga semester akhir. Semoga kalian semua bahagia, sukses, dan bertemu hal baik di masa depan.
14. Panji Hanggara Setia, Dafa Rio Syah Hidayat, Sabda Bintang Mochammad Senjani, Azrin Karim dan Muhammad Erga Fadhlun Habibussalam sahabat penulis. Terima kasih telah membersamai perjalanan peneliti hingga sampai di titik ini dan selalu memberikan doa, dukungan, menjadi pendengar yang baik di saat peneliti membutuhkan bantuan ketika susah maupun senang, dan semoga kalian selalu bahagia walau kita jarang bertemu karena kesibukan masing-masing untuk mengejar gelar kita masing-masing.
15. Terima kasih kepada teman-teman COZY NONA dan PASGABAT yang sudah menjadi rumah kedua dan menciptakan kenangan yang indah bagi penulis selama menjalankan studi.
16. Prayoga Aditya, S.T. terima kasih telah memberikan dukungan, arahan, dan doa dalam membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

17.Semua rekan satu perjuangan Mahasiswa Teknik Mesin angkatan 2022 Universitas Pasundan.

Pada penulisan laporan ini jauh dari kata sempurna dan dimungkinkan masih banyak kekurangan yang harus diperbaiki oleh karena itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang dapat membangun penulis guna menyempurnakan laporan ini.

Bandung, 24 Juni 2026

Penulis,

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, overlapping loops and strokes, representing the name Akbar Daya Utama.

Akbar Daya Utama

DAFTAR ISI

SURAT PERNYATAAN	I
SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	II
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	III
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI.....	IV
KATA PENGANTAR.....	V
DAFTAR ISI.....	IX
DAFTAR GAMBAR.....	XII
DAFTAR TABEL	XIV
ABSTRAK	XV
<i>ABSTRACT</i>.....	XVI
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1. Latar belakang	1
2. Rumusan masalah	2
3. Tujuan	3
4. Manfaat.....	3
5. Lingkup masalah.....	3
6. Sistematika penulisan	3
BAB II STUDI LITERATUR	5
1. Kajian pustaka	5
A. Penelitian F. Hudiyo, C. Susila, H. Arbi, T. Yesa dan W. Ivan (2023)	5
B. Penelitian Yohanes dan Meipen (2022)	6
C. Penelitian P. Sinabutar Jimmi dan Yohanes (2023)	7
D. Penelitian A. Zaenudin, S. Agus, dan L. Dedi (2025).....	8

2.	Tangki bahan bakar di PT Pertamina (Tangki timbun)	9
3.	Korosi pada tangki timbun.....	11
4.	Pengelasan (<i>Welding</i>)	12
5.	<i>Friction welding</i>	13
6.	Baja karbon rendah	14
7.	<i>Stainless steel</i> (AISI 304)	15
8.	<i>Pretrial</i>	16
9.	Pengujian puntir.....	16
10.	Pengujian kekerasan	17
11.	Pengamatan struktur mikro.....	18
BAB III METODOLOGI		19
1.	Tahapan penelitian.....	19
2.	Tempat Penelitian.....	20
3.	Perancangan eksperimen	21
A.	Pembuatan spesimen	22
B.	Pengujian <i>friction welding</i>	22
C.	Pengujian kekuatan puntir	23
D.	Pengujian kekerasan.....	24
E.	Pengamatan struktur mikro	24
BAB IV PEMBAHASAN		26
1.	Pengujian kekuatan puntir	26
A.	<i>Pretrial</i>	26
B.	Variasi konfigurasi utama	30
2.	Hasil pengujian kekerasan	34
A.	Spesimen pengujian	34
B.	Tabel hasil pengujian	35
C.	Grafik pengujian.....	35

3.	Hasil pengamatan struktur mikro.....	36
A.	Struktur mikro pada material baja karbon rendah	36
B.	Struktur mikro pada material <i>stainless steel</i> AISI 304.....	41
C.	Struktur mikro pada <i>weld metal</i>	46
4.	Penerapan parameter pada batang dengan pelat	49
A.	Hasil pengujian.....	49
B.	Pengujian kekuatan puntir.....	51
C.	Struktur makro	52
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		55
1.	Kesimpulan.....	55
2.	Saran	55
DAFTAR PUSTAKA.....		57
LAMPIRAN.....		59
1.	Jadwal kegiatan.....	59
2.	Anggaran biaya.....	59
3.	Proses pembuatan spesimen	60
4.	Proses pengujian <i>friction welding</i>	61
5.	Hasil pengujian <i>friction welding</i>	62
6.	Spesimen pengujian kekerasan.....	62
7.	Spesimen untuk pengujian struktur mikro	62
8.	Dokumentasi kegiatan	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Hasil <i>friction welding</i> dilihat secara visual	5
Gambar 2. Metalografi hasil <i>friction welding</i>	6
Gambar 3. Hasil pengujian uji keras metode Vickers.....	6
Gambar 4. Struktur makro	7
Gambar 5. Hasil uji keras.....	8
Gambar 6. Perbedaan <i>Aboveground tank</i> dan <i>underground tank</i>	10
Gambar 7. Perbedaan <i>fixed roof tank</i> dan <i>floating roof tank</i>	10
Gambar 8. Korosi pada tangki timbun (<i>storage tank</i>).....	11
Gambar 9. Perbedaan <i>fusion welding</i> dan <i>solid state welding</i>	12
Gambar 10. Jenis <i>friction welding</i>	13
Gambar 11. Baja karbon rendah	14
Gambar 12. Austenitic stainless steel 304	15
Gambar 13. <i>Pretrial</i> pada mesin <i>friction welding</i>	16
Gambar 14. Pengujian puntir	16
Gambar 15. Indentor metode Vickers	17
Gambar 16. Pengujian kekerasan.....	17
Gambar 17. Pengamatan struktur mikro	18
Gambar 18. Diagram alir penelitian.....	19
Gambar 19. Laboratorium Teknik Mesin Universitas Pasundan Bandung.....	21
Gambar 20. Laboratorium Institut Teknologi Bandung.....	21
Gambar 21. Pembuatan spesimen	22
Gambar 22. Pengujian <i>friction welding</i>	22
Gambar 23. Pengujian uji puntir	23
Gambar 24. Melakukan uji keras	24
Gambar 25. Pengamatan struktur mikro	25
Gambar 26. Spesimen pengujian.	26
Gambar 27. Grafik data <i>pretrial</i>	28
Gambar 28. Struktur makro parameter 1 <i>pretrial</i>	28
Gambar 29. Struktur makro parameter 2 <i>pretrial</i>	29
Gambar 30. Struktur makro parameter 3 <i>pretrial</i>	29
Gambar 31. Struktur makro parameter 4 <i>pretrial</i>	30
Gambar 32. Grafik hasil pengujian	31

Gambar 33. Struktur makro parameter 1 pengujian.....	32
Gambar 34. Struktur makro parameter 2 pengujian.....	32
Gambar 35. Struktur makro parameter 2 pengujian.....	33
Gambar 36. Struktur makro parameter 2 pengujian.....	33
Gambar 37. Spesimen uji keras	34
Gambar 38. Grafik hasil uji keras	35
Gambar 39. Spesimen dalam pengujian struktur mikro.....	36
Gambar 40. Struktur mikro material LCS dari BM-WM.....	37
Gambar 41. <i>Base metal</i> pada LCS <i>objective</i> 5.....	37
Gambar 42. <i>Base metal</i> pada LCS <i>objective</i> 10.....	38
Gambar 43. <i>Thermo-Mechanically Affected Zone</i> pada LCS <i>objective</i> 5	39
Gambar 44. <i>Thermo-Mechanically Affected Zone</i> pada LCS <i>objective</i> 10	40
Gambar 45. Struktur mikro material SS dari BM-WM.....	41
Gambar 46. <i>Base metal</i> pada SS <i>objective</i> 5.....	42
Gambar 47. <i>Base metal</i> pada SS <i>objective</i> 10	43
Gambar 48. <i>Thermo-Mechanically Affected Zone</i> pada SS <i>objective</i> 5.....	44
Gambar 49. <i>Thermo-Mechanically Affected Zone</i> pada SS <i>objective</i> 10.....	45
Gambar 50. <i>Weld metal</i> material SS dengan LCS	46
Gambar 51. <i>Weld metal</i> material SS dengan LCS <i>Objective</i> 5.....	47
Gambar 52. <i>Weld metal</i> material SS dengan LCS <i>Objective</i> 10.....	48
Gambar 53. <i>Friction welding</i> batang dengan pelat	49
Gambar 54. Hasil pengelasan spesimen 1.....	50
Gambar 55. Hasil pengelasan spesimen 2.....	50
Gambar 56. Tampilan patahan pada batang secara visual	51
Gambar 57. Tampilan patahan pada pelat secara visual	51
Gambar 58. Struktur makro pada bagian tengah batang.....	52
Gambar 59. Struktur makro pada bagian tepi batang.....	53
Gambar 60. Struktur makro pada bagian tengah pelat.....	53
Gambar 61. Struktur makro pada bagian tepi pelat.....	54

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Data hasil uji fatigue	9
Tabel 2. Konfigurasi <i>pretrial</i>	27
Tabel 3. Variasi konfigurasi <i>pretrial</i>	27
Tabel 4. Konfigurasi pengujian.....	30
Tabel 5. Variasi konfigurasi.....	31
Tabel 6. Hasil pengujian kekerasan	35

ABSTRAK

Friction welding merupakan salah satu metode pengelasan padat (*solid-state welding*) yang memanfaatkan panas akibat gesekan dan tekanan aksial untuk menyambungkan dua material tanpa melalui proses peleburan. Proses ini memiliki keunggulan dalam menghasilkan sambungan berkualitas pada material sejenis maupun tidak sejenis (*dissimilar*), termasuk baja karbon rendah dan *stainless steel* AISI 304. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi tekanan, kecepatan putar, dan waktu gesek terhadap kekuatan puntir, kekerasan, serta struktur mikro pada proses *friction welding* material *dissimilar* baja karbon rendah dan *stainless steel* AISI 304, serta mengkaji penerapan parameter optimum hasil pengelasan batang pada penyambungan batang dengan pelat. Penelitian diawali dengan *pretrial* untuk menentukan batas konfigurasi parameter, kemudian dilakukan pengujian menggunakan putaran konstan 1330 rpm, variasi waktu 25–30 detik, dan tekanan 55–60 psi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa 75% konfigurasi berhasil menghasilkan sambungan, dengan parameter 1330 rpm, 60 psi, dan 30 detik sebagai parameter optimum yang menghasilkan nilai kekuatan puntir tertinggi sebesar 45 N.m serta distribusi kekerasan terbaik. Pengamatan struktur mikro menunjukkan terbentuknya tiga zona utama, yaitu base metal, *Thermo-Mechanically Affected Zone* (TMAZ), dan *weld zone*, di mana perbedaan ukuran butir serta kondisi antarmuka memengaruhi kualitas sambungan. Parameter optimum tersebut selanjutnya diterapkan pada proses penyambungan batang dengan pelat, namun tidak mampu menghasilkan sambungan yang baik akibat perbedaan geometri yang memengaruhi distribusi panas, tekanan kontak, dan deformasi material selama proses pengelasan. Oleh karena itu, dilakukan optimasi parameter dengan meningkatkan kecepatan putar menjadi 1736 rpm, tekanan menjadi 65 psi, serta mengurangi waktu gesek menjadi 10 detik. Parameter hasil optimasi tersebut berhasil menghasilkan sambungan yang baik dengan nilai kekuatan puntir maksimum sebesar 70 N.m serta deformasi plastis (*burn-off*) sepanjang 2 mm. Pengamatan struktur makro menunjukkan adanya aliran plastis (*plastic flow*), pencampuran material pada daerah antarmuka, serta perpindahan material baja karbon rendah yang melekat pada batang *stainless steel* AISI 304 sebagai indikasi terbentuknya ikatan mekanis dan metalurgi yang baik. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa keberhasilan proses *friction welding* sangat dipengaruhi oleh kombinasi parameter putaran, tekanan, waktu gesek, serta geometri benda kerja. Oleh karena itu, parameter optimum pada sambungan batang tidak dapat langsung diterapkan pada sambungan batang dengan pelat, sehingga diperlukan optimasi parameter untuk memperoleh sambungan *friction welding* yang berkualitas.

Kata kunci: *friction welding*, baja karbon rendah, *stainless steel* AISI 304, material *dissimilar*, kekuatan puntir, kekerasan, struktur mikro.

ABSTRACT

Friction welding is a solid-state welding method that utilizes heat from friction and axial pressure to join two materials without melting. This process has the advantage of producing quality joints on similar and dissimilar materials, including low carbon steel and AISI 304 stainless steel. This study aims to determine the effect of variations in pressure, rotational speed, and friction time on the torsional strength, hardness, and microstructure in the friction welding process of dissimilar materials of low carbon steel and AISI 304 stainless steel, as well as to examine the application of optimum parameters for rod welding results in joining rods with plates. The study began with a pretrial to determine the parameter configuration limits, then tests were carried out using a constant rotation of 1330 rpm, a time variation of 25–30 seconds, and a pressure of 55–60 psi. The results showed that 75% of the configurations were successful in producing joints, with parameters of 1330 rpm, 60 psi, and 30 seconds as the optimum parameters that produced the highest torsional strength value of 45 N.m and the best hardness distribution. Microstructural observations showed the formation of three main zones, namely the base metal, Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ), and the weld zone, where differences in grain size and interface conditions affect the quality of the joint. The optimum parameters were then applied to the process of joining the rod with the plate, but were unable to produce a good joint due to differences in geometry that affect heat distribution, contact pressure, and material deformation during the welding process. Therefore, parameter optimization was carried out by increasing the rotational speed to 1736 rpm, pressure to 65 psi, and reducing the friction time to 10 seconds. The optimized parameters successfully produced a good joint with a maximum torsional strength value of 70 N.m and plastic deformation (burn-off) of 2 mm. Macrostructural observations showed the presence of plastic flow, material mixing at the interface area, and the transfer of low carbon steel material attached to the AISI 304 stainless steel rod as an indication of the formation of a good mechanical and metallurgical bond. Based on the results of the study, it can be concluded that the success of the friction welding process is greatly influenced by the combination of rotational parameters, pressure, friction time, and workpiece geometry. Therefore, the optimum parameters for bar joints cannot be directly applied to bar-plate joints, requiring parameter optimization to achieve high-quality friction welding joints.

Keywords: *friction welding, low-carbon steel, AISI 304 stainless steel, dissimilar material, torsional strength, hardness, microstructure.*

BAB I PENDAHULUAN

1. Latar belakang

Kasus kebocoran pada tangki bahan bakar di PT Pertamina merupakan permasalahan yang sering terjadi dan memerlukan penanganan segera karena berpotensi menyebabkan kebakaran, berhentinya proses operasional, bahkan menyebabkan pencemaran lingkungan. Insiden kebocoran pada tangki bahan bakar terjadi di Fuel Terminal Tuban PT Pertamina pada tanggal 10 Juni 2024 yang mengakibatkan gas berbahaya menyebar ke pemukiman warga [1]. Oleh karena itu perlu dilakukan tindakan secepatnya untuk mengatasi permasalahan tersebut.

Proses perbaikan kebocoran pada tangki bahan bakar tergolong sulit karena tangki bahan bakar mengandung bahan yang mudah terbakar, sehingga metode perbaikan konvensional seperti pengelasan busur listrik berisiko menimbulkan percikan api dan dapat memicu kebakaran atau ledakan. Perbaikan tangki penyimpanan harus dilakukan dengan mempertimbangkan aspek keselamatan, integritas struktural, serta keberlanjutan operasi tangki setelah perbaikan. Tahap awal yang perlu diperhatikan adalah kondisi tangki dimana tangki wajib dihentikan operasinya, dikosongkan, dibersihkan, dan dinyatakan bebas dari uap mudah terbakar sebelum perbaikan dilaksanakan [2].

Untuk menunjang perbaikan cepat pada kebocoran tangki timbun tanpa melakukan persiapan area yang rumit maka perlu dilakukan metode pengelasan *solid state* dimana pengelasan ini tidak menimbulkan percikan api, sehingga aman untuk tangki yang mudah terbakar. Prinsip *friction welding* merupakan pengelasan yang sesuai untuk perbaikan tangki timbun, dengan menggunakan prinsip tekanan dan gesekan untuk menghasilkan panas.

Keberhasilan proses *friction welding* sangat dipengaruhi oleh parameter proses, terutama kecepatan putar, tekanan aksial, dan waktu gesek. Ketiga parameter tersebut menentukan besarnya energi panas yang dihasilkan pada daerah antarmuka sehingga memengaruhi deformasi plastis, pembentukan ikatan metalurgi, serta kualitas sambungan yang dihasilkan. Apabila parameter yang digunakan terlalu rendah, panas yang terbentuk tidak mencukupi untuk menghasilkan deformasi plastis sehingga sambungan gagal terbentuk. Sebaliknya, parameter yang terlalu tinggi dapat menyebabkan deformasi berlebihan (*excessive flash formation*), pertumbuhan butir, maupun penurunan sifat

mekanik sambungan. Oleh karena itu, optimasi parameter menjadi tahapan penting untuk memperoleh kualitas sambungan yang optimum [3].

Selain parameter proses, pengujian kekerasan merupakan salah satu metode karakterisasi yang penting untuk mengevaluasi perubahan sifat mekanik akibat *friction welding*. Distribusi kekerasan pada daerah *base metal*, *Thermo-Mechanically Affected Zone* (TMAZ), dan *weld zone* mampu menggambarkan pengaruh deformasi plastis, difusi unsur, serta perubahan ukuran butir yang terjadi selama proses pengelasan. Nilai kekerasan yang berbeda pada setiap zona menunjukkan adanya perubahan karakteristik material akibat kombinasi panas dan tekanan selama pengelasan.

Pengamatan struktur mikro juga memiliki peranan penting dalam menjelaskan mekanisme terbentuknya sambungan hasil *friction welding*. Melalui pengamatan metalografi dapat diidentifikasi perubahan morfologi butir pada daerah pengelasan, TMAZ, maupun logam induk. Penelitian Hong Ma dkk. melaporkan bahwa pada sambungan *friction welding* antara baja karbon dan *stainless steel* AISI 304 terjadi penyempurnaan ukuran butir (*grain refinement*), berkurangnya fasa ferrite pada sisi *stainless steel* akibat deformasi plastis, serta terbentuknya lapisan karbida tipis di daerah antarmuka karena proses difusi unsur selama pengelasan [4].

2. Rumusan masalah

Berdasarkan latar belakang masalah di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana menentukan parameter yang tepat pada alat *friction welding* untuk mendapatkan harga kekuatan sambungan yang tinggi pada pengelasan baja karbon rendah dengan *stainless steel* AISI 304;
- b. Bagaimana pengaruh proses pengelasan terhadap distribusi nilai kekerasan pada daerah logam induk (*base metal*), daerah terpengaruh panas (*Heat Affected Zone*), dan logam las (*weld metal*); dan
- c. Bagaimana karakteristik struktur mikro yang terbentuk pada daerah logam induk, daerah terpengaruh panas, dan logam las setelah proses pengelasan berdasarkan hasil pengamatan metalografi.
- d. Bagaimana hasil penerapan parameter yang telah dihasilkan antara batang dengan batang setelah diterapkan pada batang dengan pelat.

3. Tujuan

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah di atas, tujuan penelitian ini adalah menentukan parameter yang baik untuk digunakan pada pengelasan gesek, mengetahui kekuatan torsi, mengetahui distribusi kekerasan pada material setelah proses pengelasan, mengetahui karakteristik struktur mikro yang terbentuk di dalam material setelah proses pengelasan, dan mengetahui hasil penerapan parameter terhadap pelat.

4. Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang teknik pengelasan, khususnya pada proses *friction welding* untuk penyambungan material tak sejenis (*dissimilar materials*), yaitu baja karbon rendah dan *stainless steel* AISI 304. Selain itu, hasil penelitian ini dapat menjadi referensi ilmiah mengenai hubungan antara parameter pengelasan, distribusi nilai kekerasan, serta karakteristik struktur mikro yang terbentuk pada sambungan hasil pengelasan gesek.

5. Lingkup masalah

Agar pembahasan ini lebih fokus diperlukan batasan masalah penelitian. Beberapa masalah yang dibahas pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Diameter batang uji yang digunakan yaitu 8 mm;
- b. Tebal pelat yang digunakan yaitu 6 mm;
- c. Kecepatan putaran pada proses menentukan parameter dibatasi hanya pada kecepatan 1330 rpm;
- d. Melakukan pengujian hasil pengelasan *friction welding* pada baja karbon rendah dengan *stainless steel* AISI 304 meliputi pengujian torsi, uji keras, dan pengamatan struktur mikro;
- e. Pada uji keras proses menentukan harga kekerasan menggunakan metode Vickers; dan
- f. Proses pengamatan struktur mikro dilakukan dengan bantuan pihak luar yaitu di Lab Institut Teknologi Bandung.

6. Sistematika penulisan

Laporan penelitian ini terdiri atas 5 (lima) bab. Kelima bab tersebut yaitu pendahuluan, studi literatur, metodologi, pengujian dan analisa hasil pengujian, serta kesimpulan dan saran.

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini dijelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, lingkup masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II STUDI LITERATUR

Pada bab ini dijelaskan kajian pustaka, tangki bahan bakar di PT Pertamina, korosi pada tangki timbun, pengelasan, *friction welding*, baja karbon rendah, *stainless steel*, *pretreatment*, pengujian puntir, pengujian kekerasan, dan pengamatan struktur mikro.

BAB III METODE PENELITIAN

Pada bab ini dijelaskan tentang tahapan penelitian, tempat penelitian dan perancangan eksperimen.

BAB IV PEMBAHASAN

Pada bab ini dijelaskan mengenai pengujian kekuatan puntir, hasil pengujian kekerasan, hasil pengamatan struktur mikro, dan penerapan parameter pada batang dengan pelat.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini dijelaskan tentang kesimpulan dan saran yang terkait parameter yang optimal untuk *friction welding*.

DAFTAR PUSTAKA

Pada bab ini dijelaskan tentang sumber-sumber acuan yang digunakan dalam penyusunan laporan penelitian. Daftar pustaka memuat referensi berupa jurnal.

LAMPIRAN

Pada bab ini dijelaskan tentang dokumen pendukung yang berkaitan dengan hasil penelitian namun tidak dimuat secara rinci dalam isi utama laporan. Lampiran berfungsi sebagai pelengkap agar pembaca dapat melihat bukti teknis, data, atau informasi tambahan pada penelitian.

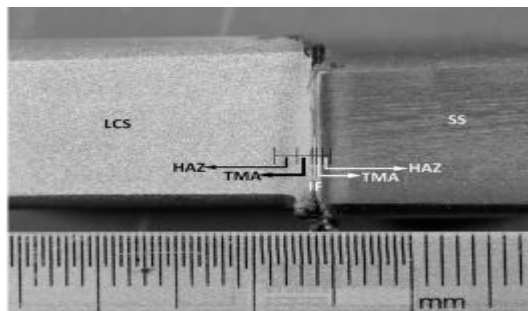
BAB II STUDI LITERATUR

1. Kajian pustaka

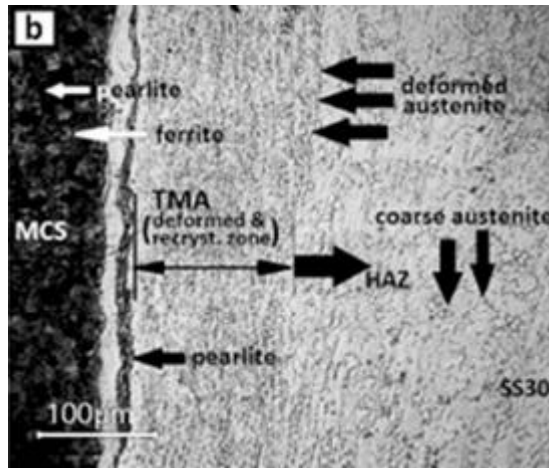
Penelitian ini dilakukan berlandaskan pada penelitian terdahulu, baik dari jenis penelitian maupun teori yang diterapkan pada penelitian ini. Beberapa penelitian terdahulu yang digunakan sebagai sumber referensi meliputi penelitian yang dilakukan oleh Hudiyo Firmanto, Susila Candra, Mochammad Arbi Hadiyat, Yesa Priscilla Triastomo dan Ivan Wirawan (2023), Yohanes dan Meipen (2022), Jimmi Pranata Sinabutar, Yohanes (2023), Zaenudin Akbar, Agus Sentana, dan Dedi Lazuardi (2025).

A. Penelitian F. Hudiyo, C. Susila, H. Arbi, T. Yesa dan W. Ivan (2023)

Penelitian yang dilakukan oleh Hudiyo Firmanto, Susila Candra, Mochammad Arbi Hadiyat, Yesa Priscilla Triastomo dan Ivan Wirawan berjudul "Tensile Strength and Microstructure of Rotary-Friction-Welded Carbon-Steel and Stainless-Steel Joints". Penelitian menggunakan rotary *friction welding* untuk menyambung baja karbon dan SS 304. Tujuan utama menganalisis kekuatan tarik dan mikrostruktur sambungan *dissimilar*. Rotary *friction welding* adalah solid state welding tanpa filler metal, lebih efisien dan ramah lingkungan. Material carbon steel dan SS 304 dipilih karena melengkapi karakteristik masing-masing: kekuatan mekanik dan ketahanan korosi. Penelitian dilakukan dengan uji tarik dan pengamatan mikrostruktur menggunakan microscope untuk menganalisis perubahan struktur butir pada zona las. Hasil diharapkan memberikan pemahaman pengaruh parameter rotary *friction welding* terhadap kualitas sambungan *dissimilar* untuk aplikasi industri [5]. Hasil secara visual penelitian ini dapat dilihat pada gambar 1, dan hasil metalografi penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.



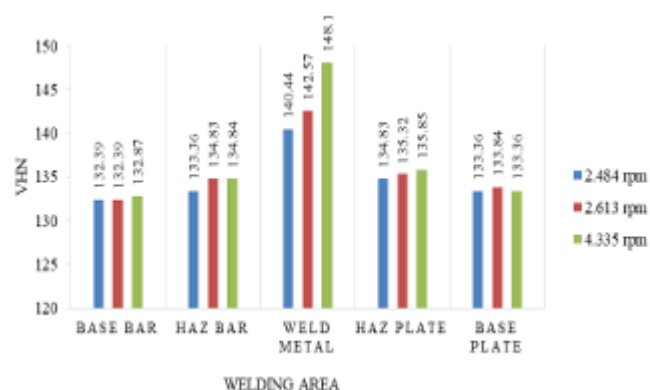
Gambar 1. Hasil *friction welding* dilihat secara visual



Gambar 2. Metalografi hasil friction welding

B. Penelitian Yohanes dan Meipen (2022)

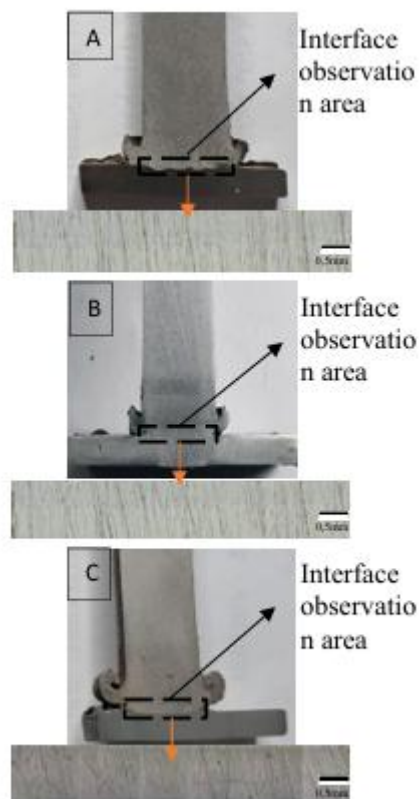
Penelitian yang dilakukan oleh Yohanes dan Meipen bertujuan untuk mengetahui pengaruh kecepatan putar terhadap luas daerah sambungan dan nilai kekerasan pada proses vertical bar-plate *friction welding* material tidak sejenis. Material yang digunakan adalah mild steel AISI 1037 dan *stainless steel* AISI 304. Pengujian dilakukan dengan metode liquid penetrant, pengamatan makro, pengamatan mikro, serta uji kekerasan untuk mengevaluasi kualitas hasil pengelasan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan kecepatan putar berpengaruh terhadap pembentukan area sambungan dan distribusi kekerasan. Semakin sesuai parameter putaran yang digunakan, semakin baik kualitas sambungan yang terbentuk pada interface material [6]. Hasil pengujian uji keras dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.



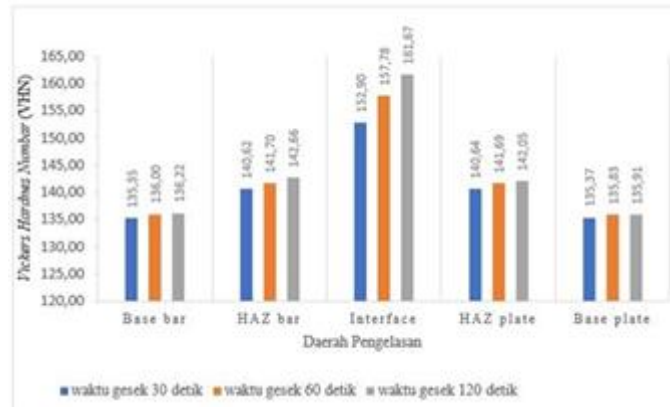
Gambar 3. Hasil pengujian uji keras metode Vickers

C. Penelitian P. Sinabutar Jimmi dan Yohanes (2023)

Penelitian yang dilakukan oleh Jimmi Pranata Sinabutar dan Yohanes membahas pengaruh variasi waktu gesek terhadap kualitas sambungan material tidak sejenis antara mild steel AISI 1037 dan *stainless steel* AISI 304 menggunakan mesin bar-plate upright rotary friction welding. Variasi waktu gesek yang digunakan adalah 30 (A), 60 (B), dan 120 (C) detik. Pengujian dilakukan melalui liquid penetrant, pengamatan makro, pengamatan mikro, dan uji kekerasan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi waktu gesek memengaruhi kondisi sambungan dan nilai kekerasan pada daerah interface. Waktu gesek yang lebih lama cenderung menghasilkan ikatan yang lebih baik karena panas gesek yang terbentuk semakin besar [7]. Untuk struktur makro dapat dilihat pada gambar 4 dan untuk hasil uji keras dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 4. Struktur makro



Gambar 5. Hasil uji keras

Hasil uji keras dari sintesis ketiga penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa parameter kritis yang berpengaruh signifikan terhadap kualitas sambungan *friction welding dissimilar* meliputi kecepatan putar (*rotational speed*), waktu gesek (*friction time*), dan tekanan gesek (*friction pressure*). Penelitian Yohanes dan Meipen menunjukkan bahwa kecepatan putar berpengaruh pada pembentukan area sambungan dan distribusi kekerasan, sedangkan penelitian Jimmi Pranata Sinabutar membuktikan bahwa waktu gesek lebih lama menghasilkan ikatan lebih baik akibat increment panas gesek. Penelitian yang saya lakukan yang bertujuan untuk menentukan parameter optimal, melakukan pengujian kekerasan, dan analisis struktur mikro untuk material *stainless steel* AISI 304 dan *carbon steel*.

D. Penelitian A. Zaenudin, S. Agus, dan L. Dedi (2025)

Pengelasan gesek merupakan metode penyambungan tanpa bahan pengisi yang banyak digunakan pada material baja, karena mampu menghasilkan sambungan yang kuat melalui panas dari gesekan. Namun, waktu pengelasan yang tidak tepat dapat menyebabkan cacat seperti porositas dan retakan yang berpengaruh pada kekuatan fatigue material. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh waktu pengelasan gesek terhadap kekuatan fatigue baja St 37 serta mengetahui pengaruh sambungan pengelasan gesek terhadap kekuatan fatigue. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen dengan variasi waktu pengelasan 90 detik, 120 detik, dan 150 detik, menggunakan kecepatan putar motor 1400 rpm dan gaya tekan 41368,56 Newton. Hasil pengujian menunjukkan bahwa jumlah siklus terbesar, yaitu 209 siklus, diperoleh pada beban 15 kg dengan tegangan 3,269 MPa dan waktu hingga kegagalan 8,97 detik.

Tabel 1. Data hasil uji fatigue

D = 8 mm						
No	Waktu las (detik)	x	F ₁	M	σ (MPa)	Siklus
1	90	155	126,58	6329	125,8	190
2		161	131,48	6574	130,7	184
3		167	136,38	6819	135,6	159
4		192	156,8	7840	155,9	93
5		208	169,86	8493	168,9	83
6		223	182,11	9105	181,1	50
7	120	155	126,58	6329	125,8	204
8		161	131,48	6574	130,7	190
9		167	136,38	6819	135,6	176
10		192	156,8	7840	155,9	149
11		208	169,86	8493	168,9	106
12		223	182,11	9105	181,1	79
13	150	155	126,58	6329	125,8	209
14		161	131,48	6574	130,7	203
15		167	136,38	6819	135,6	182
16		192	156,8	7840	155,9	124
17		208	169,86	8493	168,9	112
18		223	182,11	9105	181,1	81

Sebaliknya, jumlah siklus terkecil, yaitu 50 siklus, terjadi pada beban 22 kg dengan tegangan 2,165 MPa dan waktu hingga kegagalan 2,16 detik. Data menunjukkan bahwa semakin besar beban yang diterima material, semakin cepat material mengalami kegagalan, dengan jumlah siklus dan waktu hingga kegagalan yang semakin menurun. Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa parameter waktu pengelasan sangat berpengaruh terhadap ketahanan fatigue, dan waktu pengelasan yang optimal diperlukan untuk meningkatkan kualitas sambungan baja St 37 dalam aplikasi industri yang memerlukan ketahanan terhadap beban berulang[8].

2. Tangki bahan bakar di PT Pertamina (Tangki timbun)

Tangki timbun (*storage tank*) merupakan salah satu peralatan yang memiliki peranan penting dalam proses produksi pada industri perminyakan, yang berfungsi sebagai media penyimpanan dan penimbunan bahan cair, baik berupa minyak mentah, bahan bakar minyak (BBM), produk hasil pengolahan minyak, maupun bahan kimia lainnya. Tangki

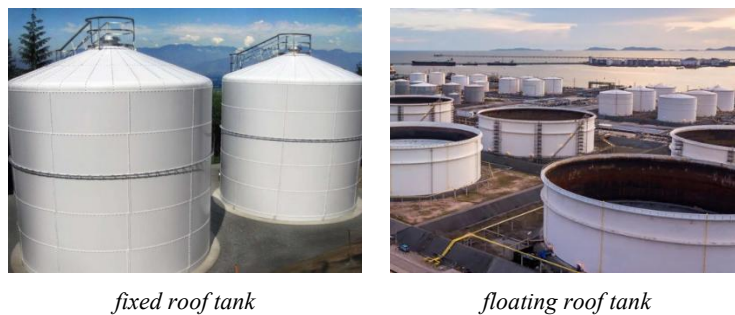
timbun memiliki beragam bentuk dan tipe, di mana setiap tipe memiliki karakteristik, kelebihan, kekurangan, serta fungsi yang berbeda. Berdasarkan klasifikasi tekanan operasinya, tangki penyimpanan secara umum dibedakan menjadi dua jenis, yaitu tangki atmosferik (bertekanan rendah) dan tangki bertekanan (pressure tank) yang beroperasi pada tekanan lebih dari 11,1 psi[3].

Berdasarkan pada penempatannya, tangki dibagi menjadi dua tipe, yaitu: tangki di atas permukaan tanah dan tangki di bawah permukaan tanah. Tangki di atas permukaan tanah sering digunakan untuk penyimpanan minyak (fuel oil) dan cairan yang mengandung chemical sedangkan tangki di bawah permukaan tanah pada umumnya digunakan untuk penyimpanan bahan bakar minyak di stasiun pengisian bahan bakar umum[3].



Gambar 6. Perbedaan *Aboveground tank* dan *underground tank*

Berdasarkan bentuk atapnya tangki dibagi menjadi dua tipe yaitu: fixed roof tank (atap bersatu dengan dinding tangki). Dari atapnya dapat berbentuk cone atau dome sedangkan floating roof tank (tangki atap terapung). Untuk menahan uap minyak yang keluar dari sela-sela atap dengan dinding tangki dilengkapi dengan seal.[3]



fixed roof tank

floating roof tank

Gambar 7. Perbedaan *fixed roof tank* dan *floating roof tank*.

Tangki timbun (storage tank) merupakan komponen kritis dalam industri minyak dan gas yang digunakan untuk menyimpan berbagai jenis fluida, seperti bahan bakar, minyak mentah, pelumas, serta produk kimia lainnya. Material yang umum digunakan untuk konstruksi tangki timbun adalah baja karbon rendah (low carbon steel) karena memiliki

kekuatan dan ketahanan yang baik. Salah satu jenis material yang banyak diterapkan adalah baja ASTM A283 Grade C [9].

3. Korosi pada tangki timbun

Korosi merupakan proses degradasi material akibat reaksi kimia atau elektrokimia dengan lingkungan sekitarnya. Kebocoran pada tangki timbun (storage tank) merupakan permasalahan umum yang dapat menurunkan kinerja tangki serta memengaruhi kualitas minyak bumi yang disimpan. Keberadaan pengotor (impurities) dalam minyak mentah dapat memicu terjadinya korosi pada dinding tangki [5].



Gambar 8. Korosi pada tangki timbun (*storage tank*).

Material konstruksi tangki timbun umumnya menggunakan baja yang relatif rentan terhadap korosi. Korosi pada tangki timbun merupakan kerusakan material logam yang terjadi akibat reaksi kimia atau elektrokimia dengan lingkungan sekitarnya. Laju korosi dapat dipercepat oleh faktor eksternal, seperti interaksi tangki dengan komponen lain yang saling terhubung serta kondisi lingkungan yang bersifat korosif. Secara umum, terdapat dua jenis korosi yang sering terjadi pada tangki timbun, yaitu:

a. Korosi internal

Korosi internal merupakan korosi yang terjadi pada permukaan bagian dalam tangki akibat keberadaan gas CO_2 dan H_2S dalam minyak bumi. Ketika gas-gas tersebut berinteraksi dengan air, dapat terbentuk senyawa asam yang bersifat korosif sehingga memicu degradasi material pada dinding bagian dalam tangki.

b. Korosi eksternal

Korosi eksternal merupakan korosi yang terjadi pada bagian luar tangki, baik yang kontak dengan udara, tanah, air dan lingkungan lainnya [6].

Jika sebuah tangki timbun telah terjadi kebocoran akibat korosi, maka perlu dilakukan perbaikan dengan cara menambalnya. Perbaikan sebuah tangki timbun memerlukan metode khusus, karena perbaikan tangki timbun memiliki risiko yang

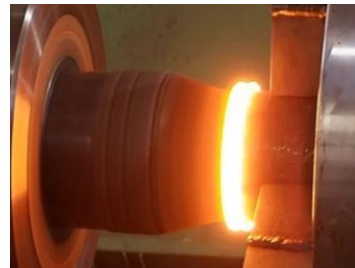
tinggi untuk terbakar bahkan dapat menimbulkan ledakan jika dilakukan perbaikan tidak sesuai dengan standar perbaikan tangki tersebut.

4. Pengelasan (*Welding*)

Menurut standar DIN (*Deutsche Industrie Norm*), pengelasan merupakan pembentukan ikatan metalurgi pada sambungan logam atau paduan logam yang dilakukan dalam kondisi cair. Dengan demikian, pengelasan dapat didefinisikan sebagai proses penyambungan dua logam melalui pemanasan hingga terjadi peleburan pada bagian ujung yang disambung, umumnya menggunakan sumber panas dari busur listrik. [7]. Berdasarkan kondisi material saat proses penyambungan, pengelasan diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama, yaitu pengelasan fusi (*fusion welding*) dan pengelasan keadaan padat (*solid-state welding*).



Fusion welding



Solid state welding

Gambar 9. Perbedaan *fusion welding* dan *solid state welding*

Pengelasan fusi (*fusion welding*) merupakan proses penyambungan material melalui pelelehan sebagian logam induk yang kemudian diikuti proses pembekuan (*solidifikasi*). Pada proses ini, kedua logam disambung menggunakan sumber panas berupa nyala busur listrik yang terjadi antara kawat elektroda dan logam induk [8]. Dalam aplikasinya, pengelasan fusi banyak digunakan untuk penyambungan pelat datar, pelat siku, maupun pipa. Beberapa metode pengelasan fusi yang umum digunakan antara lain *gas tungsten arc welding* (GTAW), *shielded metal arc welding* (SMAW), dan *metal inert gas* (MIG).

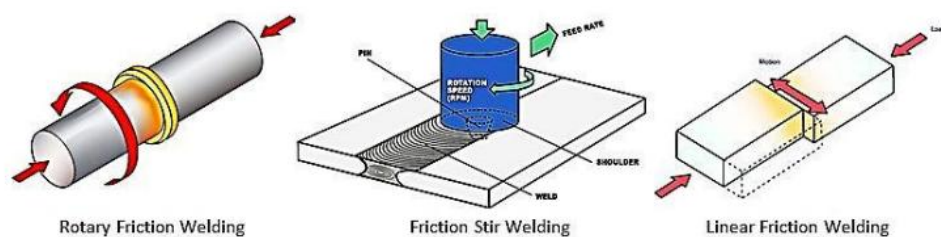
Pengelasan *solid state* merupakan proses penyambungan yang dihasilkan baik dari penekanan maupun kombinasi dari panas dan tekan. Jika panas digunakan, temperatur dalam proses harus berada di bawah *melting point* dari material yang akan dilakukan pengelasan. *Solid state* welding dapat dikategorikan menjadi *diffusion welding* (DFW), dua permukaan material yang akan disatukan dan ditahan di bawah tekanan pada temperatur tinggi kedua material akan mengalami difusi (*solid state diffusion*). Proses

pengelasan difusi berlangsung dimana material tidak mencapai titik lelehnya yang membedakannya dari pengelasan fusi.

Karakteristik *solid state welding* memungkinkan pengelasan difusi dapat diterapkan pada material dengan titik leleh tinggi atau rentan terhadap distorsi *thermal*. Proses ini umumnya digunakan dalam industri dimana kekuatan tinggi dan sambungan performa tinggi diperlukan, seperti pada aplikasi dirgantaraan dan otomotif [9]. Jenis pengelasan *solid state* yang sering dijumpai adalah *friction welding* (FRW), *friction stir welding* (FSW), *diffusion welding* (DFW).

5. Friction welding

Friction welding (FRW) atau pengelasan gesek merupakan salah satu proses *solid state welding* yang digunakan untuk menyambungkan logam melalui pemanfaatan energi panas yang dihasilkan akibat gesekan antara dua material yang akan disatukan. Proses ini tidak memerlukan sumber panas eksternal seperti listrik atau pembakaran, melainkan memanfaatkan konversi langsung energi mekanik menjadi energi panas. Panas yang timbul dari gesekan pada antarmuka kontak meningkatkan temperatur material dalam jarak yang sangat terbatas. Penyambungan terjadi ketika temperatur pada permukaan antarmuka mencapai kondisi di bawah titik lebur material. Ikatan las terbentuk sebagai akibat dari penerapan tekanan yang memicu deformasi plastis logam serta mekanisme difusi antar material. Secara umum, terdapat tiga jenis *friction welding* yang banyak digunakan, yaitu *rotary friction welding*, *friction stir welding*, dan *linear friction welding*.



Gambar 10. Jenis *friction welding*

Keberhasilan dari *friction welding* dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor yang berhubungan dengan sifat material dan kondisi kerja, yaitu:

1. Alat ukur dan parameter pengujian
 - a. Tachometer : untuk mengukur kecepatan putaran,
 - b. Pressure gauge : Untuk mengukur tekanan yang digunakan,

- c. *Stopwatch* : Untuk mengukur waktu yang digunakan,
- d. *Thermo gun* dan *thermocopel* : Untuk mengukur temperatur yang dibentuk pada permukaan.

2. Sifat material

- a. Material memiliki mampu tempa (*forgeability*) yang sangat baik,
- b. Material mampu menghasilkan gesekan *interface*.

Material yang bersifat getas serta memiliki karakteristik *dry lubrication*, seperti besi tuang, keramik, dan material karbida, umumnya tidak dapat disambung menggunakan proses *friction welding*[10]. Parameter keluaran yang dievaluasi pada pengujian *friction welding* meliputi kekuatan puntir, kekerasan, serta karakteristik struktur mikro hasil sambungan.

6. Baja karbon rendah

Baja karbon rendah (*low carbon steel*) merupakan jenis baja karbon yang memiliki kandungan unsur karbon antara 0,1–0,3% dari keseluruhan berat baja paduan. Beberapa literatur menyebutkan batas kandungan karbon kurang dari 0,25%. Baja ini juga dikenal sebagai baja ringan (*mild steel*) karena karakteristik kekuatan dan kekerasannya yang rendah.



Gambar 11. Baja karbon rendah

Baja karbon rendah merupakan baja yang paling murah diproduksi di antara semua karbon, mudah di-*machining* dan dilas, serta keuletan dan ketangguhannya sangat tinggi tetapi kekerasannya rendah dan tahan aus. Selain itu, untuk harganya terbilang murah dan lebih mudah ditemukan di toko material logam dibandingkan dengan baja jenis lainnya. Baja karbon rendah memiliki kemampuan las sangat baik tanpa memerlukan perlakuan panas khusus [11].

7. *Stainless steel* (AISI 304)

Stainless steel austenitic merupakan jenis *stainless steel* yang paling banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri. *Stainless steel* AISI 304 (SS 304) adalah baja tahan karat austenitik yang memiliki komposisi paduan 18Cr-8Ni dan merupakan jenis baja tahan karat austenitik yang paling populer dan serbaguna. Material ini memiliki ketahanan korosi yang sangat baik, kekuatan mekanik tinggi, dan karakteristik las serta ketahanan panas yang unggul [12].



Gambar 12. Austenitic stainless steel 304

Berdasarkan pengujian komposisi kimia menggunakan spectrometer, *stainless steel* AISI 304 memiliki komposisi unsur utama: besi (Fe) 71,45–50%, krom (Cr) 18,12–18,24%, nikel (Ni) 8,15–8,49%, mangan (Mn) 0,914–1,19%, karbon (C) 0,042–0,08%, silikon (Si) 0,049%, fosfor (P) 0,034%, sulfur (S) 0,006%, dan nitrogen (N) 8%.

Stainless steel AISI 304 memiliki daya tahan korosi yang sangat bagus dalam asam organik, industri, dan lingkungan laut. Daya tahan korosi yang sangat baik dalam asam organik, industri, dan lingkungan laut merupakan karakteristik utama material ini. Walaupun memiliki ketahanan korosi yang baik, *Stainless steel* AISI 304 rentan terhadap larutan asam halogen atau garam halogen.

Stainless steel austenitic dapat digunakan sampai temperatur 600°C dan untuk temperatur rendah pada rentang kriogenik. *Stainless steel* AISI 304 cocok untuk aplikasi temperatur rendah disebabkan unsur nikel membuat material tidak menjadi rapuh pada temperatur rendah.

Stainless steel tipe austenitic dipilih sebagai material untuk produk karena sifat tahan korosi, non-magnetic, dan *weldability* yang baik. Kemampuan mengelas sangat bagus untuk semua proses pengelasan. Karakteristik lasan *Stainless steel* AISI 304 sangat baik dengan pembentukan yang bagus [13].

8. *Pretrial*

Pretrial atau uji pendahuluan merupakan tahap eksperimental fundamental yang dilakukan sebelum pelaksanaan penelitian utama untuk mengidentifikasi, validasi, dan menentukan parameter optimal dalam proses friction welding. *Pretrial* berfungsi sebagai mekanisme investigasi sistematis untuk mengevaluasi rentang parameter yang layak dan mengeliminasi kondisi yang tidak menghasilkan sambungan berkualitas sebelum memasuki tahap pengujian utama [14].



Gambar 13. *Pretrial* pada mesin *friction welding*

9. Pengujian puntir

Uji puntir adalah metode pengujian mekanik untuk menentukan sifat-sifat material saat menerima beban puntir (torsi). Pengujian ini dilakukan dengan cara memutar salah satu ujung spesimen sementara ujung lainnya ditahan tetap, sehingga material mengalami tegangan geser akibat momen puntir yang bekerja [15].

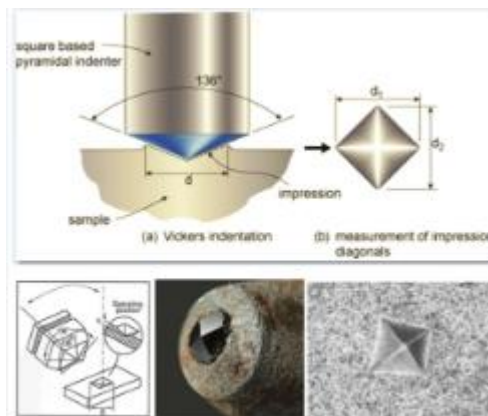


Gambar 14. Pengujian puntir

10. Pengujian kekerasan

Berdasarkan berbagai penelitian yang menganalisis sambungan las *dissimilar* antara *stainless steel* AISI 304 dan baja karbon rendah, metode pengujian kekerasan yang paling umum dan direkomendasikan adalah Metode Vickers (*Vickers Hardness Test*), terutama dalam skala mikro (*Microhardness Vickers*).

Vickers *Microhardness* (HV) adalah metode yang paling banyak ditemukan dalam literatur akademis dan teknis untuk pengelasan *dissimilar*. Metode ini dipilih karena pengelasan menciptakan zona-zona yang sangat kecil dan spesifik seperti *fusion line* (batas cair) dan HAZ (*Heat Affected Zone*). *Microhardness Vickers* menggunakan indenter piramida intan dengan beban yang sangat kecil (biasanya 100-500 gf), sehingga mampu mengukur kekerasan tepat pada area-area sempit ini tanpa merusak area sekitarnya.



Gambar 15. Indentor metode Vickers

Metode ini memungkinkan peneliti untuk membuat "profil" atau peta kekerasan dengan melakukan indentasi secara berurutan (*traverse*) mulai dari logam induk baja karbon, melewati HAZ, logam las, hingga logam induk *stainless steel*. Ini sangat penting untuk melihat perubahan sifat material secara gradual akibat panas pengelasan. Metode Vickers diatur dalam standar seperti ASTM E92, menjadikannya acuan yang valid dan diakui secara global[16].



Gambar 16. Pengujian kekerasan

Uji keras pada material *dissimilar* antara *stainless steel* dan baja karbon rendah berfungsi untuk mendeteksi gradien kekerasan antara base metal, Heat Affected Zone (HAZ), dan weld metal karena kedua material memiliki sifat mekanik yang berbeda. Pengujian ini juga mendeteksi pembentukan fasa rapuh seperti fasa intermetalik (sigma phase, chromium carbide) yang getas di daerah transisi SS-CS, serta mengevaluasi pengaruh *heat input* dan laju pendinginan terhadap struktur mikro dan sifat mekanik sambungan.

Selain itu, uji keras berfungsi untuk mendeteksi difusi karbon dari baja karbon rendah ke *stainless steel* di HAZ yang dapat menyebabkan *hardened zone* dan potensi retak, validasi kualitas sambungan agar nilai kekerasan masih dalam batas standar untuk aplikasi tekanan tinggi dan industri minyak dan gas[17].

11. Pengamatan struktur mikro

Pengamatan struktur mikro adalah kegiatan atau proses mengamati, memeriksa, dan menganalisis susunan internal material pada skala mikroskopis menggunakan alat bantu perbesaran tinggi. Kegiatan ini merupakan bagian inti dari pengujian metalografi, namun lebih berfokus pada aspek visualisasi dan interpretasi hasil, bukan pada keseluruhan prosedur persiapan sampel.



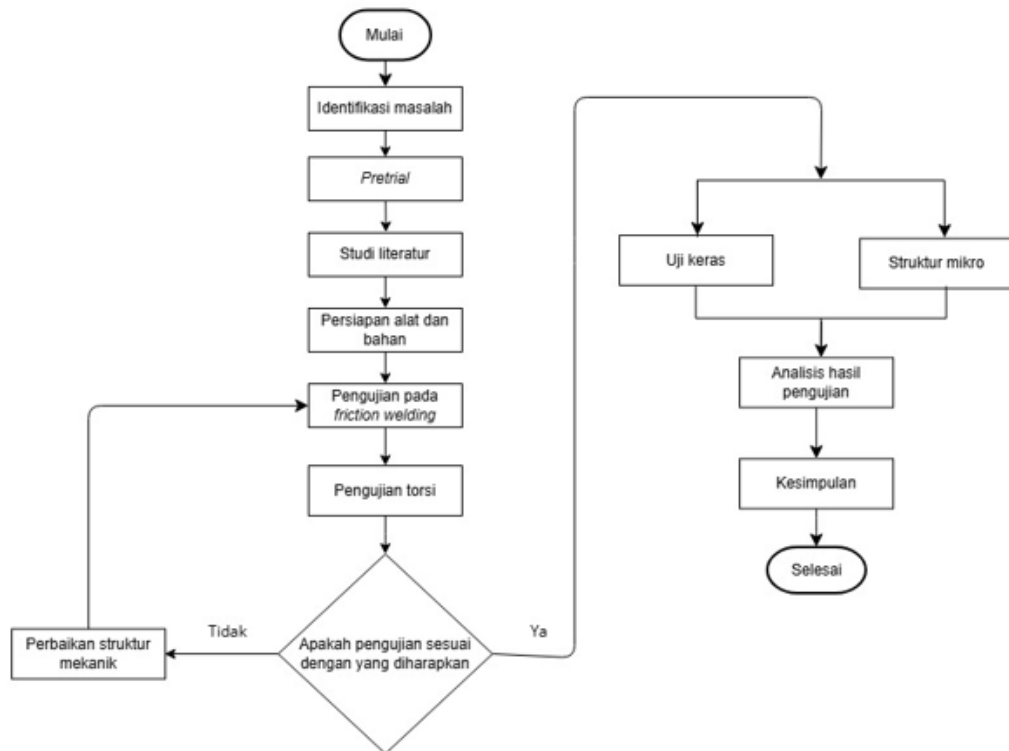
Gambar 17. Pengamatan struktur mikro

Pengamatan struktur mikro dimungkinkan karena material yang telah di etsa (diberi larutan kimia) akan menunjukkan perbedaan kontras antara berbagai fasa atau orientasi butir. Batas butir dan fasa yang berbeda memiliki laju korosi yang berbeda, sehingga setelah di etsa, area tersebut akan tampak lebih gelap atau lebih terang saat diamati di bawah mikroskop [17] .

BAB III METODOLOGI

1. Tahapan penelitian

Berikut ini merupakan tahapan penelitian yang dilaksanakan:



Gambar 18. Diagram alir penelitian

Penjelasan diagram alir di atas adalah sebagai berikut:

a. Identifikasi masalah

Dalam penelitian *friction welding* material *dissimilar stainless steel* dan baja karbon rendah, identifikasi masalah yang jelas memastikan penelitian fokus pada optimasi waktu gesek dan tekanan untuk menghasilkan sambungan yang berkualitas tinggi, sehingga hasil penelitian dapat diterapkan secara luas dalam aplikasi industri.

b. *Pretrial*

Dilakukan untuk mencari parameter yang paling optimal dalam pengelasan *dissimilar* antara material *stainless steel* AISI 304 dan baja karbon rendah.

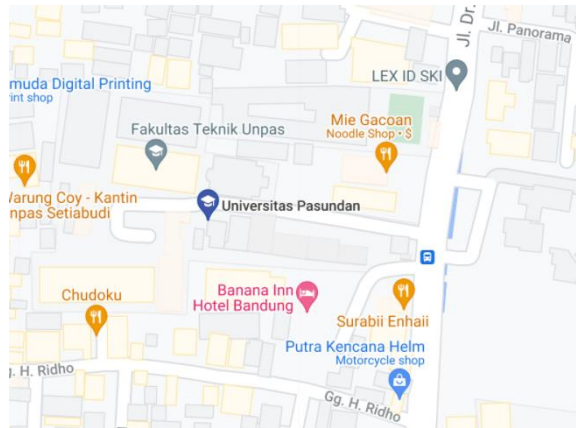
c. Studi literatur

Merupakan proses mengumpulkan, menganalisis, dan mengevaluasi data dari hasil *pretrial* yang telah dilakukan.

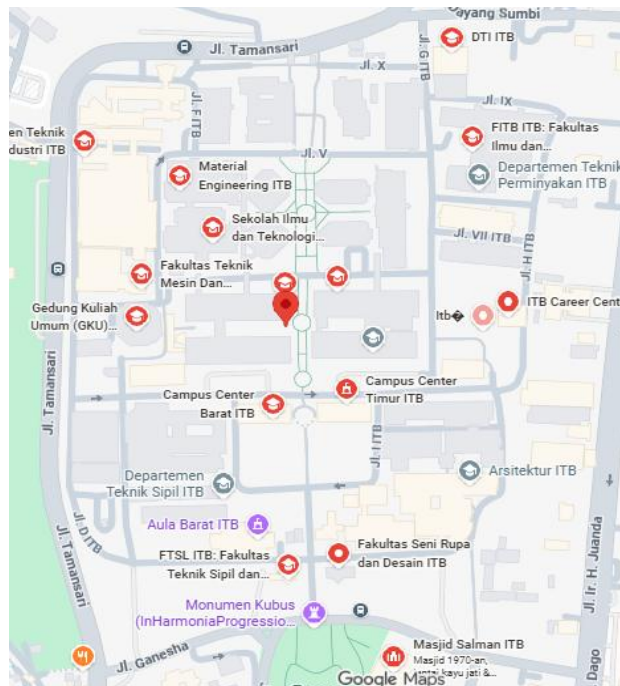
- d. Persiapan alat dan bahan
Proses ini merupakan langkah mempersiapkan alat dan bahan untuk dilakukannya pengujian pada *friction welding*.
- e. Pengujian pada *friction welding*
Pengujian ini dilakukan dengan menerapkan parameter yang telah dihasilkan pada tahap *pretrial*.
- f. Pengujian torsi
Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui gaya torsi maksimal pada spesimen yang telah dilakukan pengujian *friction welding*.
- g. Apakah pengujian sesuai dengan yang diharapkan
Pada tahap ini jika torsi yang didapatkan sesuai dengan yang diharapkan maka akan lanjut ke tahap selanjutnya (Ya). Tetapi jika torsi yang didapatkan tidak sesuai dengan yang diharapkan maka dilakukan perbaikan sistem pengujian (Tidak).
- h. Perbaikan struktur mekanik
Pada tahap ini dilakukan perbaikan pada struktur permukaan spesimen yang akan diuji.
- i. Uji keras
Pada tahap uji keras dilakukan untuk mengetahui perubahan kekerasan material dari base metal, heat affected zone, dan weld metal.
- j. Struktur mikro
Pada tahap uji struktur mikro dilakukan untuk mengetahui struktur mikro yang terdapat pada hasil pengelasan *friction welding*.
- k. Analisis hasil pengujian
Pada tahap ini bertujuan untuk menganalisis hasil uji keras dan struktur mikro yang telah dilakukan.
- l. Kesimpulan dan saran
Menyimpulkan dari hasil akhir penelitian ini.

2. Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan jalan Dr. Setiabudi No. 193, Gegerkalog, Kec. Sukasari, Kota Bandung, Jawa Barat 40153. Laboratorium Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan.



Untuk pengamatan struktur mikro dilakukan di Laboratorium Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha No.10, Lb. Siliwangi, Kecamatan Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat 40132



3. Perancangan eksperimen

Perancangan eksperimen dilakukan melalui beberapa tahapan. Tahap tersebut mencakup pembuatan spesimen, pengujian *friction welding*, pengujian kekuatan puntir, pengujian kekerasan, dan pengujian struktur mikro.

A. Pembuatan spesimen

Pembuatan spesimen dilakukan dengan menyiapkan material dasar berupa baja karbon rendah dan *stainless steel* AISI 304 dengan diameter 8 mm. Material dipotong kemudian dilakukan pemesinan dengan cara pembubutan. Berikut merupakan gambar spesimen yang akan digunakan untuk pengujian *friction welding*



Gambar 21. Pembuatan spesimen

Material yang digunakan merupakan baja karbon rendah yang umum digunakan sebagai baja konstruksi dan *stainless steel* AISI 304. Material tersebut dipilih karena baja konstruksi mempunyai komposisi karbon yang rendah. Sedangkan *stainless steel* AISI 304 dipilih karena paling banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri.

B. Pengujian *friction welding*

Pengujian *friction welding* dilakukan melalui serangkaian percobaan yang bertujuan untuk menentukan parameter optimal guna mencapai hasil pengelasan yang baik. Dalam penelitian ini, variasi parameter yang digunakan meliputi besar tekanan, serta waktu pengelasan. Setiap parameter diubah secara sistematis untuk mengamati pengaruhnya terhadap kualitas sambungan yang dihasilkan. Proses pengujian dilakukan dengan mengombinasikan nilai-nilai tertentu dari kedua parameter tersebut, kemudian hasilnya dianalisis berdasarkan karakteristik sambungan las yang terbentuk.



Gambar 22. Pengujian friction welding

Hasil dari pengujian tersebut kemudian digunakan sebagai dasar untuk menganalisis pengaruh masing-masing parameter terhadap kualitas sambungan las yang dihasilkan. Analisis dilakukan dengan membandingkan kondisi setiap variasi parameter guna mengetahui kombinasi yang menghasilkan sambungan dengan kekuatan dan kualitas terbaik. Selain itu, evaluasi juga mempertimbangkan kemungkinan terjadinya cacat pada hasil pengelasan, sehingga dapat ditentukan parameter yang paling efektif dan sesuai untuk proses *friction welding* yang digunakan.

C. Pengujian kekuatan puntir

Setelah memperoleh hasil pengelasan, tahap selanjutnya adalah melakukan pengujian kekuatan puntir dengan menggunakan kunci torsi. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan sambungan las dalam menahan beban puntir yang diberikan hingga mencapai batas tertentu. Proses pengujian dilakukan dengan memberikan momen puntir secara bertahap pada spesimen hingga terjadi kegagalan atau deformasi, sehingga dapat diketahui tingkat kekuatan dan ketahanan sambungan hasil *friction welding* terhadap beban puntir.



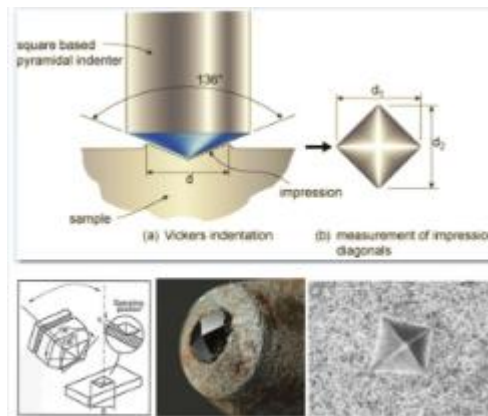
Gambar 23. Pengujian uji puntir

Untuk melakukan pengujian kekuatan puntir, spesimen hasil pengelasan terlebih dahulu dibuatkan permukaan berbentuk segi enam. Pembentukan ini bertujuan agar spesimen dapat dijepit dan diputar dengan menggunakan kunci torsi secara optimal tanpa terjadi selip. Proses pembuatan permukaan segi enam dilakukan menggunakan mesin *milling*, sehingga diperoleh dimensi dan bentuk yang presisi sesuai kebutuhan pengujian.

Dengan adanya modifikasi ini, penerapan beban puntir dapat dilakukan secara lebih efektif dan hasil pengujian menjadi lebih akurat, sehingga data yang diperoleh dapat merepresentasikan kekuatan sambungan las secara lebih valid dan dapat digunakan sebagai dasar dalam evaluasi kualitas hasil pengelasan.

D. Pengujian kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan pada spesimen dengan parameter yang sama, yaitu spesimen dengan nilai kekuatan puntir tertinggi dan terendah. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui distribusi kekerasan pada daerah sambungan las, *heat affected zone* (HAZ), dan *base metal*, serta didukung dengan pengamatan struktur mikro untuk menganalisis hubungan antara perubahan mikrostruktur dan nilai kekerasan yang diperoleh.



Gambar 24. Melakukan uji keras

Hasil dari pengujian tersebut kemudian dibandingkan untuk mengetahui keterkaitan antara distribusi kekerasan, karakteristik struktur mikro, dan kekuatan puntir pada masing-masing spesimen. Analisis ini dilakukan dengan mengamati perbedaan nilai kekerasan pada setiap daerah serta perubahan struktur mikro yang terjadi, sehingga dapat diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai pengaruh parameter pengelasan terhadap sifat mekanik dan kualitas sambungan yang dihasilkan

E. Pengamatan struktur mikro

Selanjutnya dilakukan pengujian struktur mikro pada spesimen dengan nilai kekuatan puntir tertinggi dan terendah. Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan karakteristik struktur mikro yang terbentuk, seperti perbedaan ukuran butir dan kemungkinan adanya cacat pada daerah sambungan, sehingga dapat diketahui pengaruhnya terhadap kekuatan hasil pengelasan



Gambar 25. Pengamatan struktur mikro

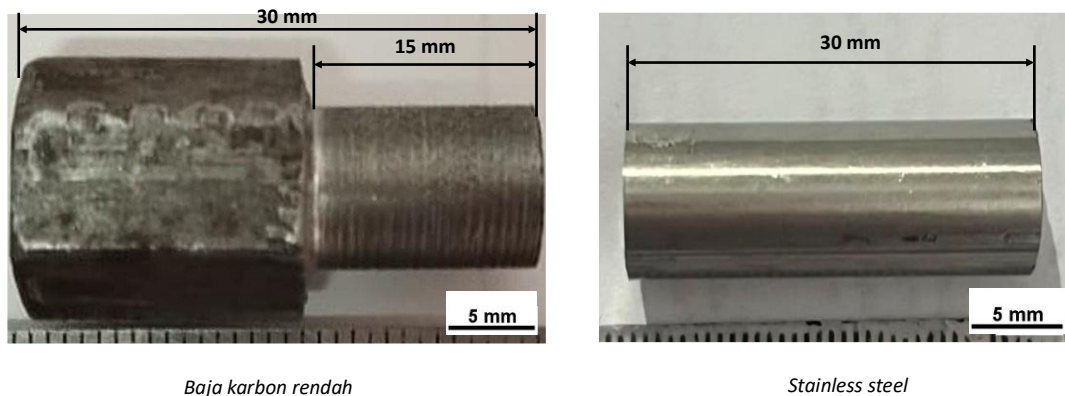
Selain itu, pengujian struktur mikro juga diperlukan untuk mengamati luas daerah pengelasan, *Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ)*, dan *base metal*. Dengan pengamatan ini, dapat diketahui distribusi perubahan struktur yang terjadi akibat proses pengelasan serta pengaruhnya terhadap sifat mekanik sambungan yang dihasilkan.

BAB IV PEMBAHASAN

1. Pengujian kekuatan puntir

Rancangan eksperimen disusun untuk mengetahui pengaruh variabel tekanan, putaran, dan waktu terhadap kekuatan puntir, kekuatan tarik, serta pengamatan struktur mikro. Melalui rancangan ini, setiap variabel dikontrol dan divariasikan secara sistematis untuk memperoleh data yang dapat digunakan dalam menganalisis hubungan antara parameter proses dan sifat mekanik serta karakteristik struktur mikro hasil pengelasan.

Pada proses awal ini adalah melakukan pengujian puntir. Pengujian ini dilakukan dengan cara memutar salah satu ujung spesimen sementara ujung lainnya ditahan tetap, sehingga material mengalami tegangan geser akibat momen puntir yang bekerja. Pengujian ini dilakukan sesuai pada variasi yang telah ditentukan.



Gambar 26. Spesimen pengujian.

Gambar 26. merupakan spesimen yang akan dilakukan pengujian dengan dimensi spesimen panjang 30 mm dan diameter 8 mm.

A. *Pretrial*

Pretrial bertujuan untuk mengetahui batasan-batasan konfigurasi yang akan digunakan dalam proses pengujian. Tahap ini dilakukan sebagai langkah awal untuk menentukan rentang parameter yang sesuai, sehingga percobaan utama dapat berjalan dengan lebih terarah dan menghasilkan data yang optimal. Parameter yang digunakan dalam *pretrial* ini yaitu parameter yang telah dihasilkan oleh peneliti sebelumnya dengan menggunakan material baja karbon rendah dan baja karbon rendah.

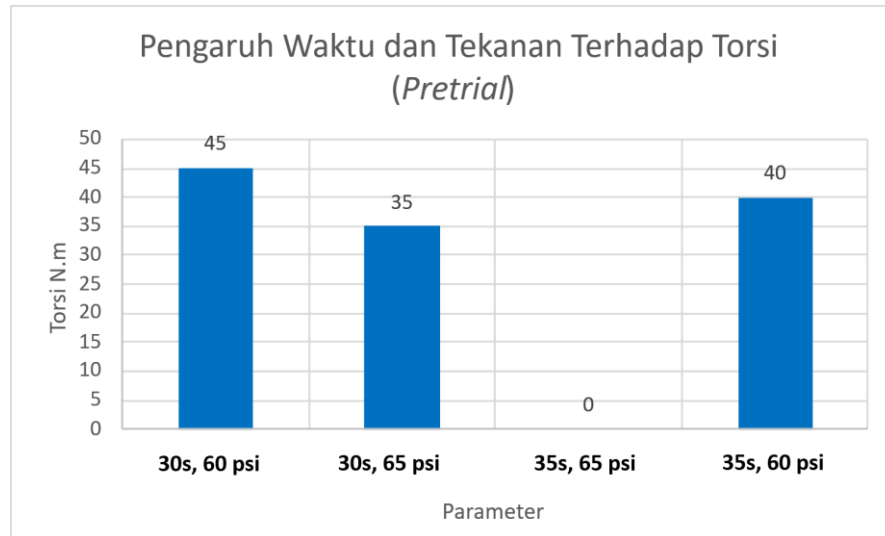
Tabel 2. Konfigurasi *pretrial*

Putaran, n RPM	simbol	Waktu, t s	Tekanan, p psi
1330	+	30	60
	–	35	65

Tabel 3. Variasi konfigurasi *pretrial*

No	Putaran, n RPM	Variasi	Waktu, t s	Tekanan, p psi	Torsi N.m	Keterangan
1	1330	++	30	60	45	Berhasil
2		+ -	30	65	35	Berhasil
3		--	35	65	0	Gagal
4		- +	35	60	40	Berhasil

Berdasarkan data hasil *pretrial* pada tabel di atas, dapat diketahui bahwa variasi waktu (t) dan tekanan (p) memberikan pengaruh terhadap keberhasilan proses pengelasan dan nilai torsi yang dihasilkan. Pada beberapa kombinasi parameter, proses pengelasan berhasil menghasilkan sambungan dengan nilai torsi tertentu, sedangkan pada kombinasi lainnya mengalami kegagalan yang ditandai dengan nilai torsi nol. Hasil ini menunjukkan bahwa tidak semua konfigurasi parameter dapat menghasilkan sambungan yang baik. Secara umum, keberhasilan pengelasan cenderung terjadi pada kombinasi parameter yang seimbang antara putaran, waktu, dan tekanan, sehingga dapat dijadikan acuan dalam menentukan rentang parameter yang akan digunakan pada pengujian utama.



Gambar 27. Grafik data *pretrial*

Pada grafik gambar 27 menunjukkan bahwa variasi konfigurasi proses memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai torsi yang dihasilkan selama pengelasan *friction welding* material *dissimilar* SS AISI 304 dan baja karbon rendah. Nilai torsi tertinggi diperoleh pada konfigurasi 1 sebesar 45 N.m, sedangkan konfigurasi 3 menunjukkan kegagalan proses dengan nilai torsi 0 N.m. Hasil ini mengindikasikan bahwa pemilihan parameter proses sangat menentukan besarnya torsi yang terbentuk. Berikut adalah gambar makro pada spesimen uji untuk mengetahui persentase area yang menyambung.

1). 1330 RPM, 30 s, 60 Psi (45 N.m)

Pandangan samping



Pandangan atas



Persentase bonded area = 85 %

Persentase unbonded area = 15 %

Gambar 28. Struktur makro parameter 1 *pretrial*

2). 1330 RPM, 30 s, 65 Psi (35 N.m)
 Pandangan samping



Pandangan atas



Persentase bonded area = 75 %
 Persentase unbonded area = 20 %

Gambar 29. Struktur makro parameter 2 *pretrial*

3). 1330 RPM, 35 s, 65 Psi (0 N.m)
 Pandangan samping



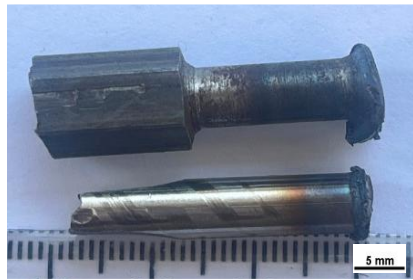
Pandangan atas



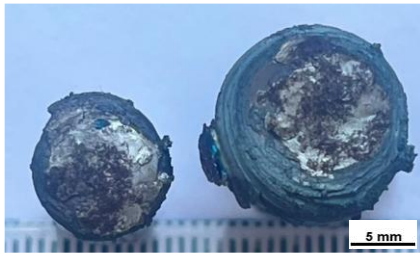
Persentase bonded area = 20 %
 Persentase unbonded area = 80 %

Gambar 30. Struktur makro parameter 3 *pretrial*

4). 1330 RPM, 35 s, 60 Psi (40 N.m)
 Pandangan samping



Pandangan atas



Persentase bonded area = 80 %
 Persentase unbonded area = 20 %

Gambar 31. Struktur makro parameter 4 *pretrial*

B. Variasi konfigurasi utama

Variasi konfigurasi pertama merupakan hasil dari konfigurasi yang digunakan pada pengujian *friction welding* baja karbon rendah, konfigurasi ini dipilih untuk mengetahui perbandingan antara hasil pengujian baja karbon rendah dan hasil pengujian *stainless steel* dengan menggunakan variasi konfigurasi yang sama.

Tabel 4. Konfigurasi pengujian

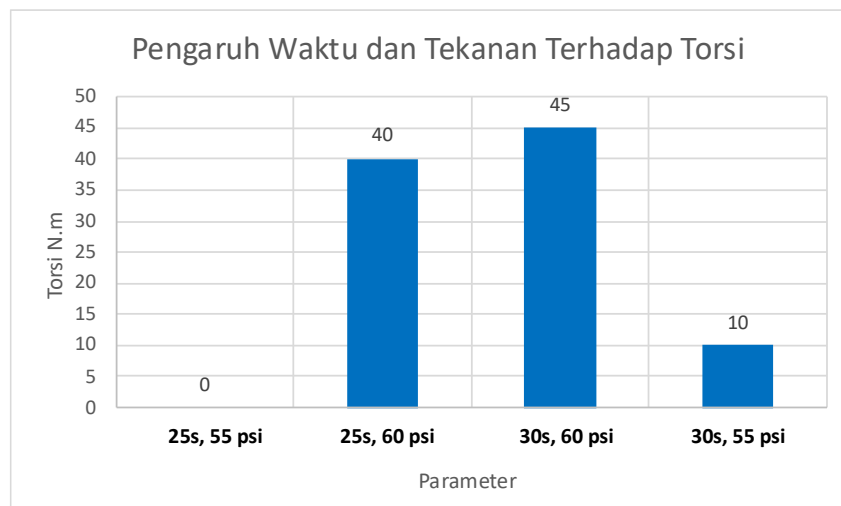
Putaran, n RPM	simbol	Waktu, t s	Tekanan, p psi
1330	+	25	55
	–	30	60

Dari variabel yang telah ditentukan, diperoleh empat variasi konfigurasi yang digunakan dalam pengujian. Variasi tersebut merupakan kombinasi dari parameter tekanan dan waktu yang disusun secara sistematis untuk menganalisis pengaruh masing-masing variabel terhadap kualitas sambungan hasil pengelasan. Untuk variabel putaran dibuat menjadi konstan yaitu 1330 rpm.

Tabel 5. Variasi konfigurasi

No	Putaran, n RPM	Variasi	Waktu, t s	Tekanan, p psi	Torsi N.m	Keterangan
1	1330	++	25	55	0	Gagal
2		+-	25	60	40	Berhasil
3		--	30	60	45	Berhasil
4		-+	30	55	10	Berhasil

Pengujian pada tabel 5 menyatakan 75% konfigurasi yang digunakan berhasil menghasilkan sambungan antara kedua material. Hal ini menunjukkan bahwa penyesuaian parameter yang dilakukan telah memberikan kondisi proses yang lebih optimal dibandingkan pengujian sebelumnya. Dari hasil yang diperoleh, konfigurasi ketiga menunjukkan kinerja terbaik dengan nilai kekuatan torsi mencapai 45 N.m, sedangkan konfigurasi pertama menghasilkan kekuatan puntir terendah dengan nilai torsi sebesar 0 N.m. Perbedaan ini mengindikasikan adanya pengaruh signifikan dari variasi parameter terhadap kekuatan sambungan yang dihasilkan.

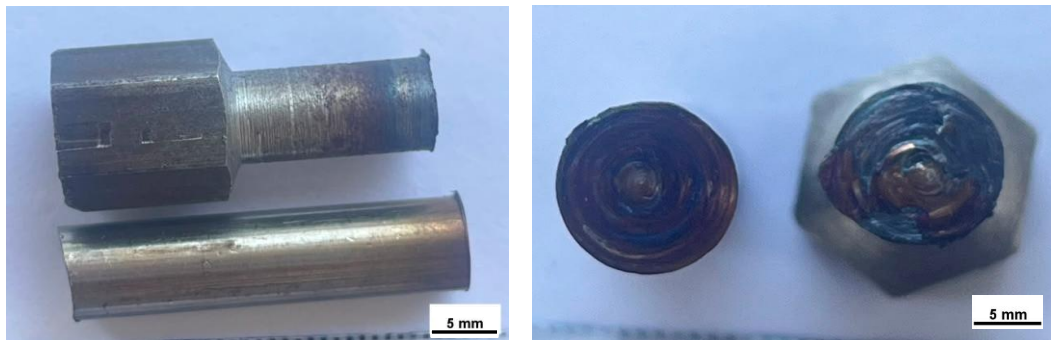


Gambar 32. Grafik hasil pengujian

Berdasarkan grafik pada gambar 32 diperoleh bahwa variasi parameter waktu dan tekanan berpengaruh terhadap besarnya torsi yang dihasilkan selama proses *friction welding*. Nilai torsi tertinggi diperoleh pada konfigurasi 3 sebesar 45 N.m, sedangkan nilai

terendah terdapat pada konfigurasi 1 sebesar 0 N.m. Hasil tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi 3 menghasilkan kondisi gesekan yang paling efektif sehingga berpotensi menghasilkan kualitas sambungan yang lebih baik dibandingkan konfigurasi lainnya. Penurunan torsi pada konfigurasi 4 mengindikasikan bahwa peningkatan atau perubahan parameter yang berlebihan dapat menurunkan efektivitas proses pengelasan. Berikut adalah gambar makro dari hasil pengujian.

1). 1330 RPM, 25 s, 55 Psi (0 N.m)



Pandangan samping

Pandangan atas

Gambar 33. Struktur makro parameter 1 pengujian

Pada gambar 33 pemanasan tidak tercapai sehingga batang uji belum bisa tersambung persentasenya yaitu 0%.

2). 1330 RPM, 25 s, 60 Psi (40 N.m)

Pandangan samping



Pandangan atas



Persentase bonded area = 80 %
Persentase unbonded area = 20 %

Gambar 34. Struktur makro parameter 2 pengujian

3). 1330 RPM, 30 s, 60 Psi (45 N.m)

Pandangan samping



Pandangan atas



Persentase bonded area	= 85 %
Persentase unbonded area	= 62,2 %

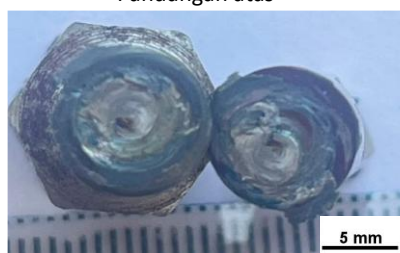
Gambar 35. Struktur makro parameter 2 pengujian

4). 1330 RPM, 30 s, 55 Psi (10 N.m)

Pandangan samping



Pandangan atas

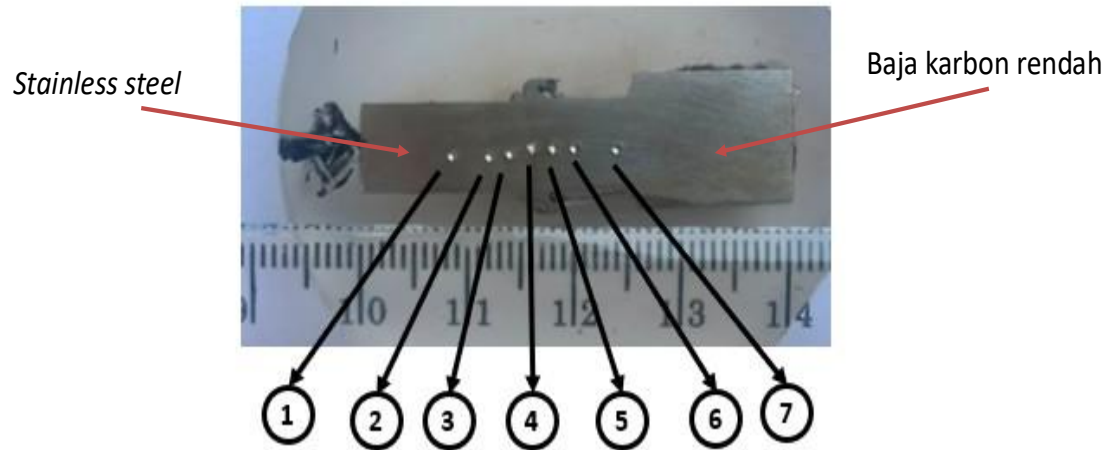


Persentase bonded area	= 35 %
Persentase unbonded area	= 65 %

Gambar 36. Struktur makro parameter 2 pengujian

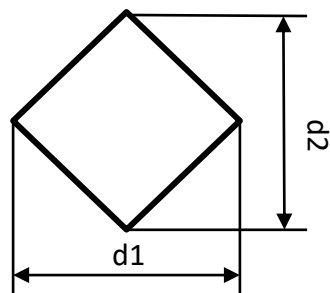
2. Hasil pengujian kekerasan

A. Spesimen pengujian



Gambar 37. Spesimen uji keras

Pada gambar 37 pengujian kekerasan dilakukan pada tujuh titik pengamatan yang tersebar melintang dari material *stainless steel* AISI 304 menuju baja karbon rendah. Titik 1 hingga 3 berada pada daerah logam induk *stainless steel* AISI 304, titik 4 berada tepat pada daerah sambungan (*weld metal*), sedangkan titik 5 hingga 7 berada pada daerah logam induk baja karbon rendah. Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui distribusi kekerasan akibat pengaruh panas selama proses *friction welding*. Perbedaan nilai kekerasan pada setiap titik menunjukkan perubahan sifat mekanik material yang terjadi dari logam induk menuju daerah sambungan dan kembali ke logam induk material lainnya. persamaan untuk mencari harga kekerasan sebagai berikut.



$d1, d2$ = Nilai terbesar – Nilai terkecil

$$d_{rata} = \left(\frac{d1 + d2}{2} \right)$$

$$VHN = \frac{1.8544 \times P}{d_{rata}^2} \times 10^2$$

P = Hasil kalibrasi (7,24)

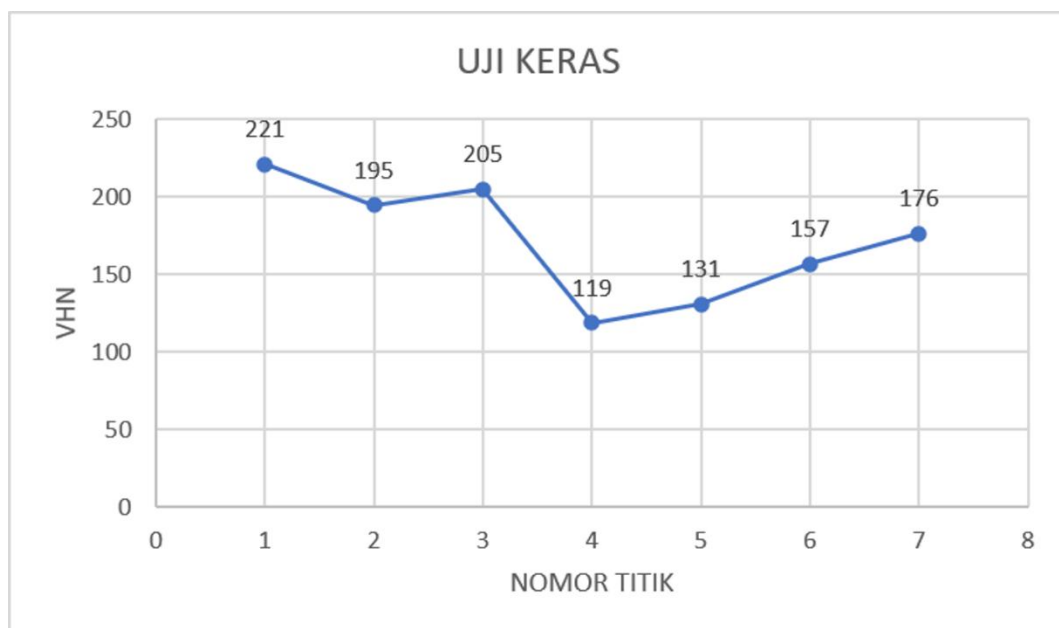
B. Tabel hasil pengujian

Tabel 6. Hasil pengujian kekerasan

No	d1			d2			drata"	d2rata"	VHN
	Koordinat		Hasil	Koordinat		Hasil			
	Kiri	Kanan		Atas	Bawah				
1	352	600	248	185	430	245	246.5	60762	221
2	227	487	260	311	576	265	262.5	68906	195
3	348	604	256	244	500	256	256	65536	205
4	325	661	336	231	567	336	336	112896	119
5	461	781	320	229	550	321	320.5	102720	131
6	71	366	295	250	540	290	292.5	85556	157
7	164	443	279	229	502	273	276	76176	176

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan Vickers, nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada daerah *stainless steel* AISI 304 dengan rata-rata 206,89 VHN. Nilai kekerasan terendah terdapat di daerah *weld metal* sebesar 118,92 VHN. Pada sisi baja karbon rendah, nilai kekerasan berada pada rentang 130,70–176,25 VHN dengan rata-rata 154,62 VHN. Hasil ini menunjukkan bahwa proses *friction welding* menghasilkan distribusi kekerasan yang tidak merata, dimana daerah sambungan mengalami penurunan kekerasan dibandingkan kedua logam induknya. Kondisi tersebut mengindikasikan adanya perubahan struktur mikro akibat pengaruh panas dan deformasi plastis selama proses pengelasan

C. Grafik pengujian

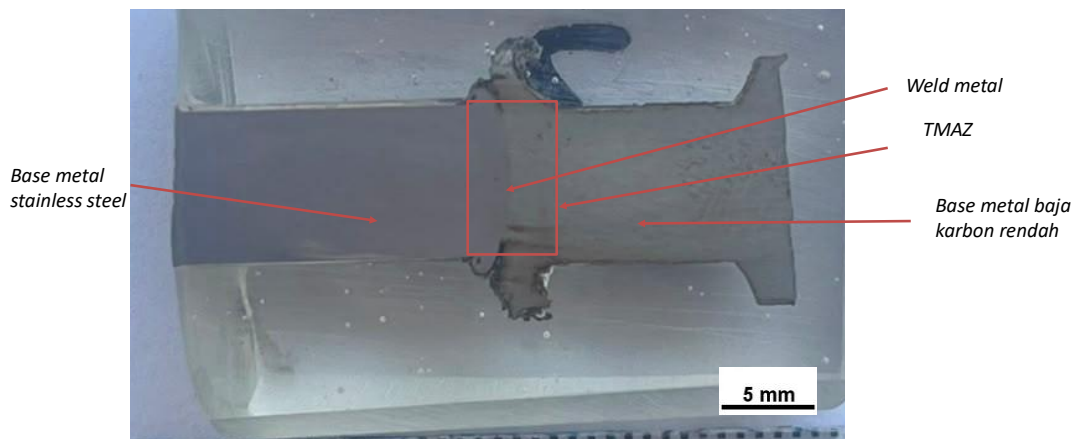


Gambar 38. Grafik hasil uji keras

Berdasarkan grafik distribusi kekerasan, daerah *stainless steel* AISI 304 (titik 1–3) memiliki kekerasan tertinggi dengan rentang 194,84–220,96 VHN, sedangkan daerah *weld metal* (titik 4) memiliki kekerasan terendah yaitu 118,92 VHN. Penurunan kekerasan pada daerah sambungan disebabkan oleh kombinasi pengaruh panas gesek yang tinggi, Setelah melewati daerah sambungan, nilai kekerasan meningkat kembali pada sisi baja karbon rendah hingga mencapai 176,25 VHN pada titik 7. Hasil ini menunjukkan bahwa daerah sambungan merupakan zona yang paling terpengaruh oleh proses *friction welding* dan mengalami perubahan sifat mekanik yang paling signifikan dibandingkan kedua logam induknya.

3. Hasil pengamatan struktur mikro

A. Struktur mikro pada material baja karbon rendah

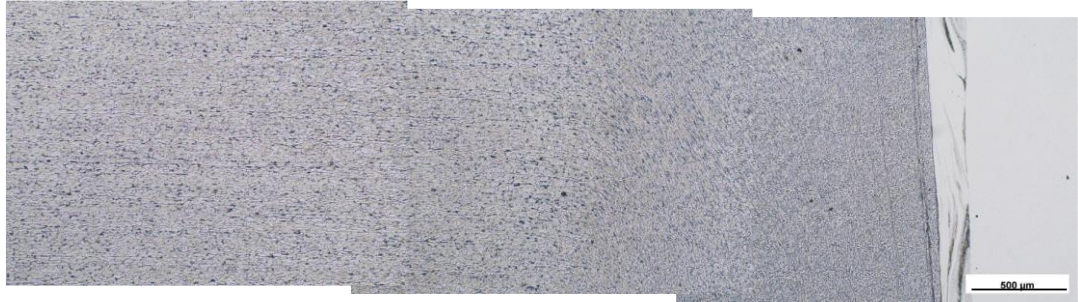


Gambar 39. Spesimen dalam pengujian struktur mikro

Pada gambar 39 spesimen yang diamati merupakan hasil pengelasan *friction welding* antara baja karbon rendah dan *stainless steel* AISI 304 yang telah dipreparasi melalui proses *mounting*, pengamplasan, pemolesan, dan pengetsaan. Pengamatan struktur mikro dilakukan pada daerah logam induk baja karbon rendah, daerah sambungan, dan logam induk *stainless steel* AISI 304 untuk mengevaluasi perubahan mikrostruktur akibat pengaruh panas dan deformasi plastis selama proses pengelasan. Pengetsaan pada baja karbon rendah dilakukan menggunakan larutan Nital 2%, sedangkan pada *stainless steel* AISI 304 digunakan larutan Glyceregia atau Kalling's Reagent untuk memperjelas batas butir dan fasa yang terbentuk. Hasil pengamatan diharapkan dapat menunjukkan hubungan antara perubahan struktur mikro dengan sifat mekanik sambungan, khususnya distribusi kekerasan pada daerah pengelasan.

Dimensi spesimen sebelum dilakukan pengujian *friction welding* memiliki panjang 65 mm dan diameter 8 mm. Spesimen pengujian mengalami pengurangan panjang total sepanjang 5 mm. 1,9 mm pada material *stainless steel* AISI 304 dan 3,1 mm pada material baja karbon rendah.

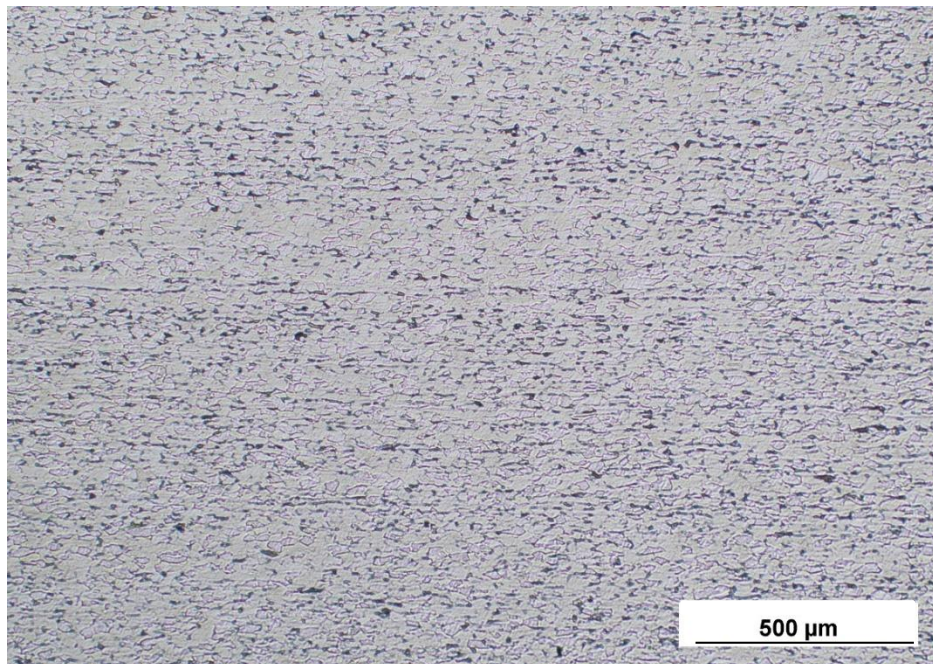
a. *Low carbon steel to Stainless steel* AISI 304



Gambar 40. Struktur mikro material LCS dari BM-WM

Merupakan gambar struktur mikro dari material baja karbon rendah dari area *base metal* sampai area *weld metal*.

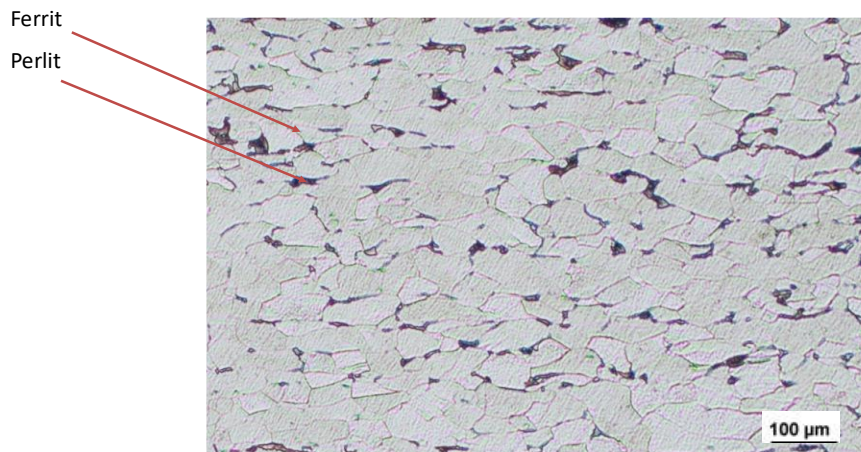
b. *Low carbon steel to Stainless steel* AISI 304 (BM Objective 5)



Gambar 41. *Base metal* pada LCS objective 5

Hasil pengamatan struktur mikro pada daerah logam induk (*base metal*) baja karbon rendah dengan perbesaran objektif 5. Menunjukkan bahwa mikrostruktur didominasi oleh fasa ferrit yang berwarna terang dengan sejumlah koloni perlit yang tersebar merata di antara butir ferrit. Dominasi ferrit menunjukkan bahwa material memiliki kandungan karbon yang rendah sehingga memiliki sifat keuletan yang baik. Pada perbesaran ini, distribusi ferrit dan perlit tampak homogen tanpa adanya indikasi cacat mikro yang signifikan. Struktur mikro yang terbentuk merupakan karakteristik umum baja karbon rendah yang belum mengalami perubahan akibat siklus termal pengelasan.

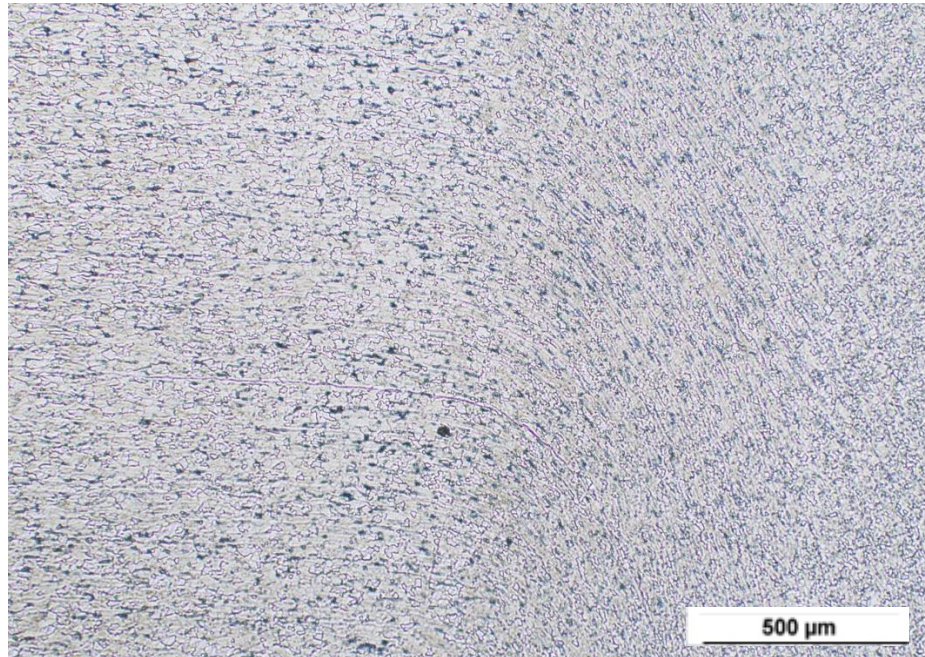
c. *Low carbon steel to Stainless steel* AISI 304 (BM Objective 10)



Gambar 42. *Base metal* pada LCS objective 10

Hasil pengamatan struktur mikro pada daerah logam induk (*base metal*) baja karbon rendah dengan perbesaran objektif 10 menunjukkan bahwa mikrostruktur didominasi oleh fasa ferrit yang berwarna terang dan koloni perlit yang berwarna lebih gelap. Butir ferrit tampak berbentuk poligonal dengan batas butir yang terlihat jelas akibat proses etsa. Distribusi ferrit dan perlit relatif homogen di seluruh bidang pengamatan, menunjukkan bahwa material masih mempertahankan karakteristik mikrostruktur asli baja karbon rendah. Dominasi fasa ferrit mengindikasikan sifat material yang ulet dan mudah dilas, sedangkan keberadaan perlit berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan dan kekerasan material. Struktur mikro yang diamati tidak menunjukkan adanya cacat mikro yang signifikan, sehingga dapat disimpulkan bahwa daerah tersebut merupakan logam induk yang tidak mengalami perubahan mikrostruktur akibat proses pengelasan.

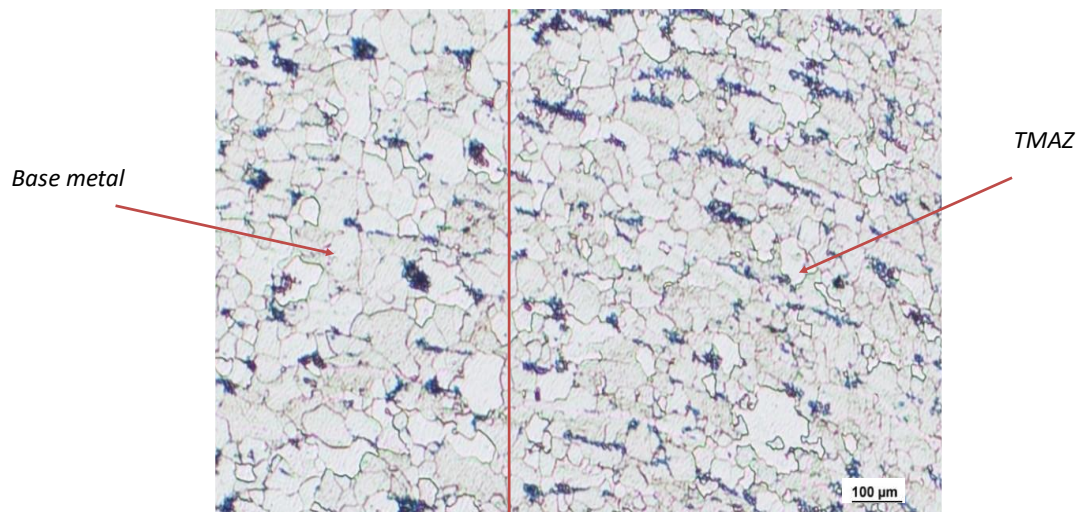
d. *Low carbon steel to Stainless steel AISI 304 (TMAZ Objective 5)*



Gambar 43. *Thermo-Mechanically Affected Zone* pada LCS objective 5

Hasil pengamatan struktur mikro pada daerah *Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ)* dengan perbesaran objektif 5 menunjukkan adanya perubahan morfologi struktur mikro dibandingkan logam induk. Daerah logam induk masih memperlihatkan distribusi ferrit dan perlit yang relatif homogen, sedangkan daerah TMAZ menunjukkan struktur yang lebih rapat dan terorientasi akibat pengaruh panas dan deformasi plastis selama proses *friction welding*. Terlihat adanya pola aliran material (*plastic flow*) pada daerah transisi yang menunjukkan terjadinya deformasi mekanik selama proses penyambungan. Perubahan struktur mikro pada zona ini mengindikasikan bahwa material mengalami siklus termal yang cukup tinggi tanpa mengalami peleburan, sehingga menyebabkan rekristalisasi dan perubahan ukuran butir yang berpengaruh terhadap sifat mekanik sambungan.

e. *Low carbon steel to Stainless steel* AISI 304 (TMAZ Objective 10)



Gambar 44. *Thermo-Mechanically Affected Zone* pada LCS objective 10

Hasil pengamatan struktur mikro pada daerah *Thermo-Mechanically Affected Zone* (TMAZ) dengan perbesaran objektif 10 menunjukkan adanya perubahan morfologi butir yang signifikan dibandingkan daerah logam induk. Pada daerah base metal terlihat butir ferrit berbentuk poligonal dengan distribusi perlit yang merata, sedangkan pada daerah TMAZ butir mengalami deformasi plastis sehingga tampak memanjang dan berorientasi mengikuti arah aliran material selama proses friction welding. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa daerah TMAZ mengalami kombinasi pengaruh panas dan tekanan yang tinggi sehingga memicu proses rekristalisasi dinamis dan perubahan ukuran butir. Adanya batas transisi yang jelas antara kedua daerah mengindikasikan konsentrasi pengaruh termomekanik pada area yang berdekatan dengan sambungan las. Struktur mikro yang terbentuk berpengaruh terhadap distribusi sifat mekanik, khususnya nilai kekerasan pada daerah sambungan

B. Struktur mikro pada material *stainless steel* AISI 304

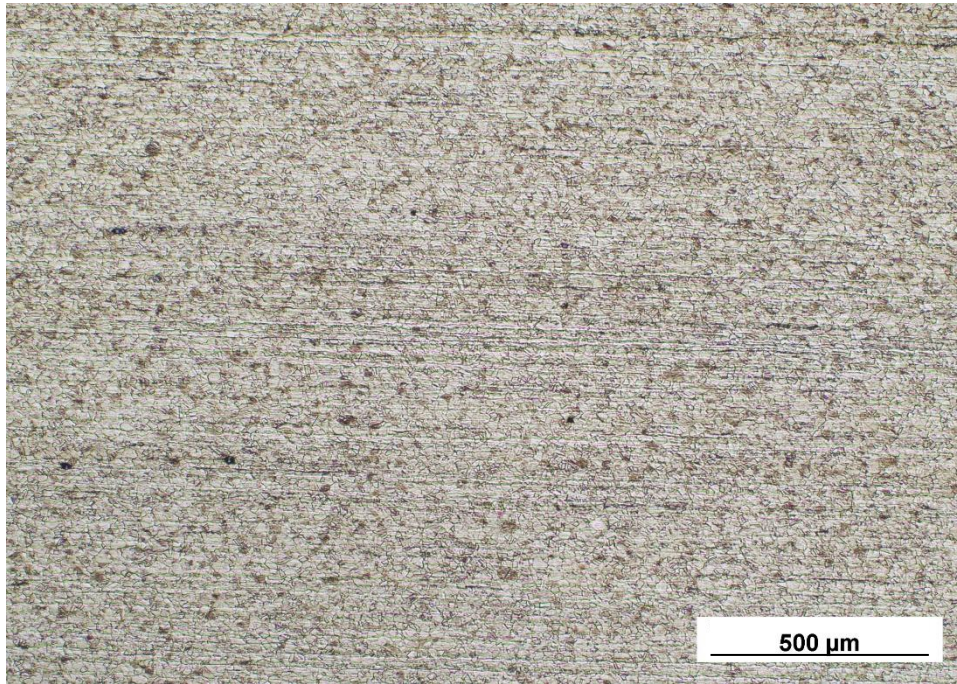
a. *Stainless steel* AISI 304 to *Low carbon steel*



Gambar 45. Struktur mikro material SS dari BM-WM

Hasil pengamatan struktur mikro menunjukkan adanya perubahan bertahap dari base metal *stainless steel* AISI 304 menuju weld metal. Daerah base metal masih memiliki struktur butir yang homogen dan equiaxed. Memasuki daerah TMAZ, butir mengalami deformasi plastis dan orientasi mengikuti arah aliran material akibat kombinasi panas dan tekanan selama proses *friction welding*. Pada daerah antarmuka sambungan terlihat zona yang sangat terdeformasi dan padat sebagai indikasi terbentuknya ikatan metalurgi melalui mekanisme *solid-state welding*. Tidak terlihat adanya cacat makroskopik berupa retak atau rongga yang signifikan, sehingga sambungan dapat dikatakan berhasil terbentuk. Perubahan mikrostruktur yang terjadi pada daerah sambungan berkontribusi terhadap penurunan nilai kekerasan dibandingkan logam induk *stainless steel* AISI 304 yang ditunjukkan oleh hasil uji kekerasan sebelumnya.

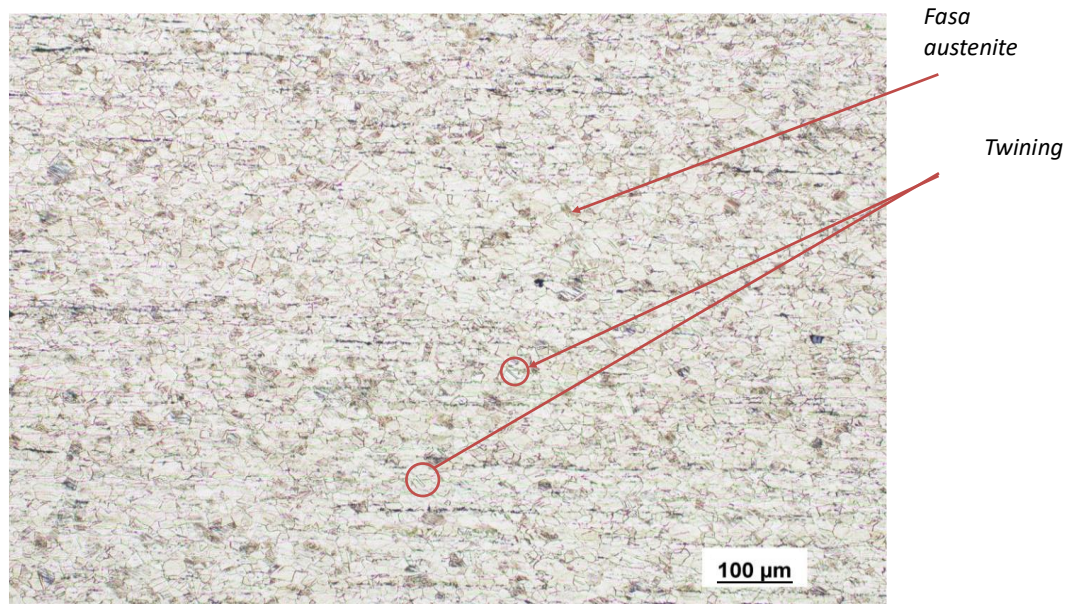
b. *Stainless steel AISI 304 to Low carbon steel (BM Objective 5)*



Gambar 46. *Base metal* pada SS objective 5

Hasil pengamatan struktur mikro pada daerah logam induk (*base metal*) *stainless steel* AISI 304 dengan perbesaran objektif 5 menunjukkan struktur mikro yang homogen dengan butir-butir berbentuk poligonal yang tersebar merata. Batas butir terlihat jelas akibat proses etsa, sedangkan indikasi deformasi plastis maupun perubahan mikrostruktur akibat pengaruh panas tidak ditemukan. Struktur mikro ini menunjukkan bahwa daerah yang diamati masih mempertahankan karakteristik asli material sebelum proses pengelasan. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa logam induk *stainless steel* AISI 304 memiliki stabilitas mikrostruktur yang baik dan belum mengalami perubahan akibat siklus termal maupun tekanan selama proses *friction welding*.

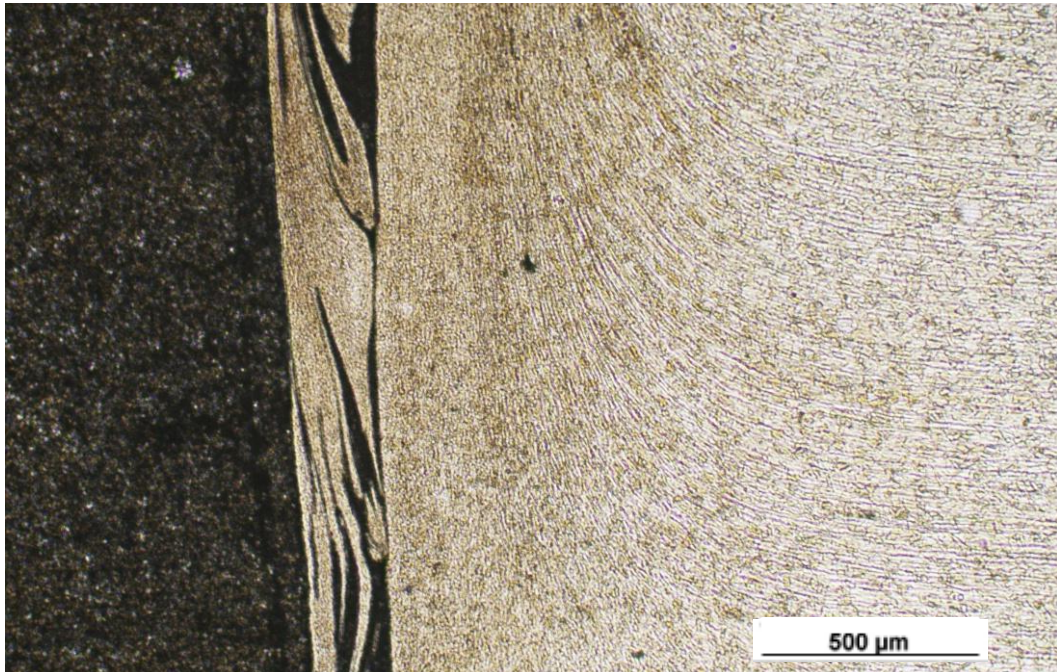
c. *Stainless steel AISI 304 to Low carbon steel (BM Objective 10)*



Gambar 47. *Base metal pada SS objective 10*

Hasil pengamatan struktur mikro pada daerah logam induk (*base metal*) *stainless steel* AISI 304 dengan perbesaran objektif 10 menunjukkan mikrostruktur yang didominasi oleh butir austenit berbentuk poligonal dengan distribusi yang homogen. Batas-batas butir tampak jelas dan pada beberapa butir teridentifikasi adanya *annealing twins* yang merupakan karakteristik khas *stainless steel* austenitik. Tidak ditemukan indikasi deformasi plastis maupun perubahan mikrostruktur akibat pengaruh panas pengelasan. Kondisi ini menunjukkan bahwa daerah yang diamati masih mempertahankan struktur mikro asli material sebelum proses penyambungan, sehingga sifat mekaniknya masih merepresentasikan karakteristik logam induk *stainless steel* AISI 304.

d. *Stainless steel AISI 304 to Low carbon steel (TMAZ Objective 5)*



Gambar 48. *Thermo-Mechanically Affected Zone* pada SS objective 5

Hasil pengamatan struktur mikro pada objektif 5 menunjukkan adanya perubahan bertahap dari *base metal stainless steel* AISI 304 menuju daerah sambungan. Daerah base metal memiliki struktur yang homogen dan belum mengalami deformasi. Pada daerah TMAZ terlihat butir yang memanjang dan terorientasi akibat kombinasi panas dan tekanan selama proses *friction welding*. Sementara itu, pada daerah *weld metal* atau *interface* sambungan terlihat pola aliran material (*flow lines*) yang menunjukkan terjadinya deformasi plastis maksimum dan pembentukan ikatan metalurgi melalui mekanisme pengelasan fase padat (*solid-state welding*). Struktur ini mengindikasikan bahwa proses *friction welding* berhasil menghasilkan penyambungan yang baik antara kedua material tanpa adanya indikasi cacat makroskopik yang signifikan.

e. *Stainless steel AISI 304 to Low carbon steel (TMAZ Objective 10)*

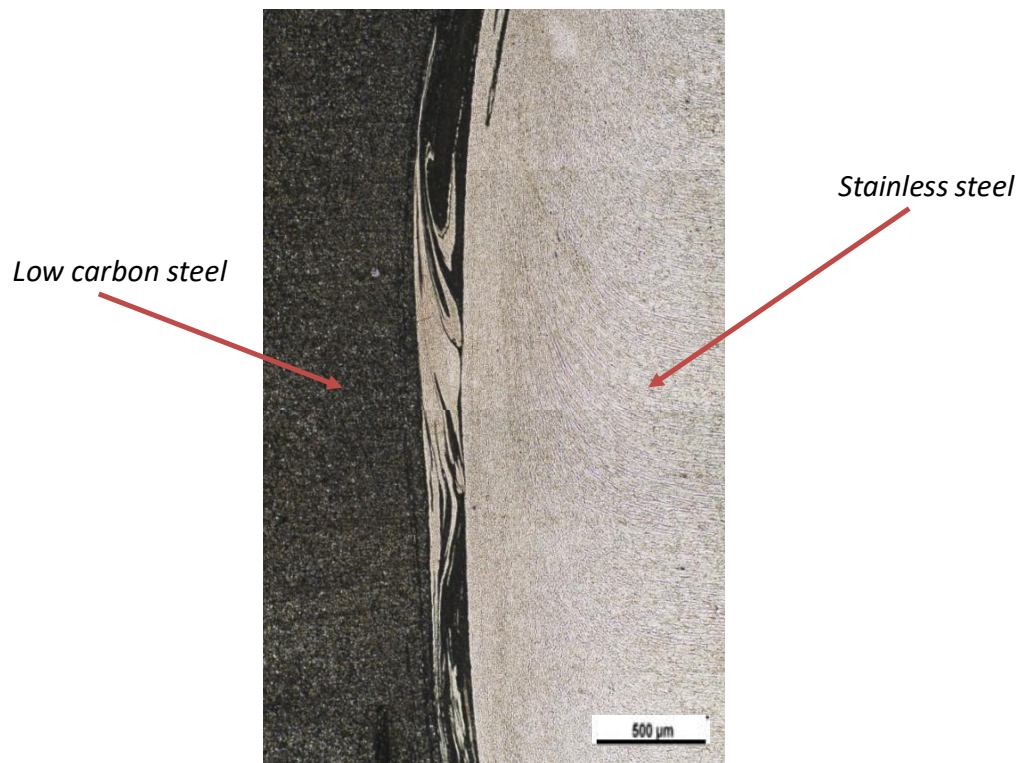


Gambar 49. *Thermo-Mechanically Affected Zone* pada SS objective 10

Hasil pengamatan struktur mikro pada daerah TMAZ *stainless steel* AISI 304 dengan perbesaran objektif 10 menunjukkan perubahan morfologi butir yang signifikan dibandingkan logam induk. Struktur mikro pada daerah base metal masih didominasi oleh butir austenit berbentuk poligonal, sedangkan pada daerah yang mendekati sambungan terlihat butir mengalami deformasi dan orientasi mengikuti arah aliran material. Kondisi ini menunjukkan terjadinya kombinasi pengaruh panas dan deformasi plastis selama proses *friction welding*. Struktur yang semakin rapat dan halus pada daerah dekat antarmuka sambungan mengindikasikan terjadinya rekristalisasi dinamis yang berkontribusi terhadap perubahan sifat mekanik pada daerah sambungan.

C. Struktur mikro pada *weld metal*

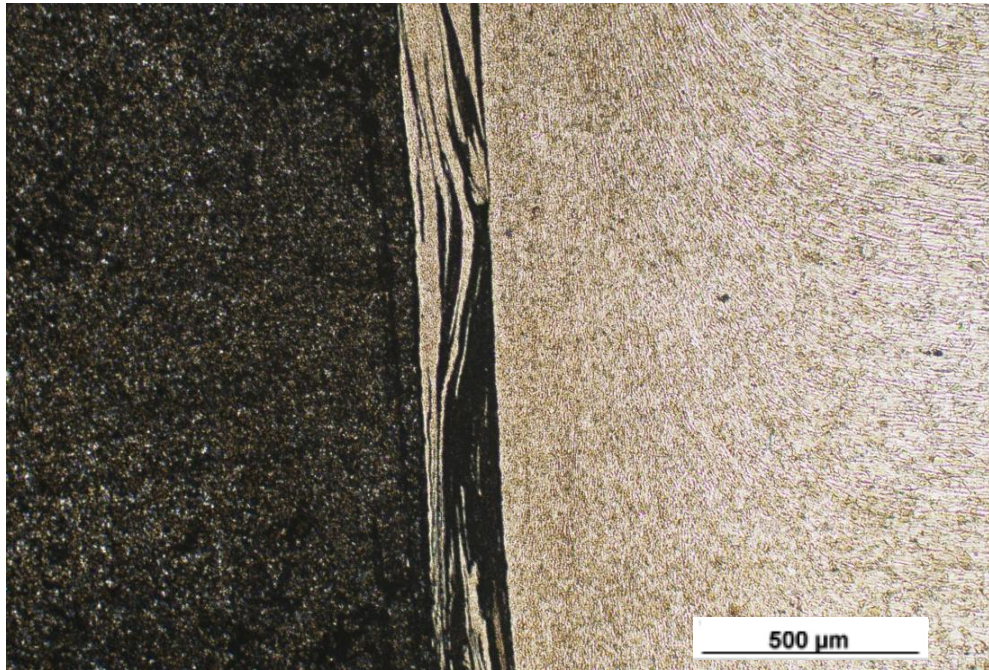
a. *Stainless steel* AISI 304 to *Low carbon steel* (WM)



Gambar 50. *Weld metal* material SS dengan LCS

Hasil pengamatan struktur mikro pada daerah *weld metal* menunjukkan adanya zona antarmuka yang terbentuk akibat proses *friction welding* antara *stainless steel* dan baja karbon rendah. Daerah ini ditandai oleh pola aliran material (*material flow*) yang jelas sebagai akibat deformasi plastis dan tekanan tempa selama proses penyambungan. Struktur yang tampak lebih rapat dibandingkan logam induk menunjukkan bahwa daerah tersebut mengalami temperatur dan deformasi tertinggi sehingga memicu rekristalisasi dinamis serta difusi unsur antar material. Keberadaan zona transisi ini menunjukkan terbentuknya ikatan metalurgi yang baik antara kedua material tanpa melalui proses peleburan, yang merupakan karakteristik utama dari proses *friction welding*.

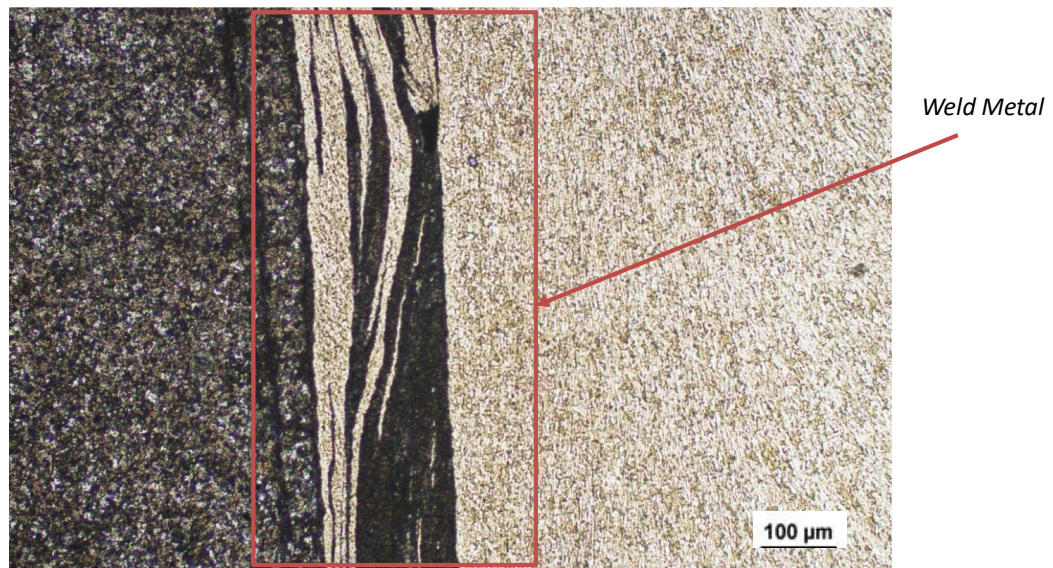
b. *Stainless steel* AISI 304 to *Low carbon steel* (WM Objective 5)



Gambar 51. *Weld metal material* SS dengan LCS Objective 5

Hasil pengamatan struktur mikro pada daerah *weld metal* menggunakan perbesaran objektif 5 menunjukkan adanya zona antarmuka yang jelas antara *stainless steel* dan baja karbon rendah. Daerah sambungan ditandai oleh pola aliran material (*material flow*) berbentuk lapisan-lapisan memanjang yang terbentuk akibat kombinasi panas gesekan dan tekanan tempa selama proses *friction welding*. Struktur pada daerah ini tampak lebih padat dibandingkan daerah logam induk, yang mengindikasikan terjadinya deformasi plastis yang tinggi. Tidak ditemukan cacat makroskopik berupa retak maupun porositas pada daerah antarmuka. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sambungan terbentuk melalui mekanisme pengelasan fase padat (*solid-state welding*) dengan ikatan metalurgi yang baik antara material *stainless steel* dan baja karbon rendah.

c. *Stainless steel* AISI 304 to *Low carbon steel* (WM Objective 10)



Gambar 52. *Weld metal* material SS dengan LCS Objective 10

Hasil pengamatan struktur mikro pada daerah *weld metal* dengan perbesaran objektif 10 menunjukkan adanya zona antarmuka yang jelas antara *stainless steel* AISI 304 dan baja karbon rendah. Daerah sambungan ditandai oleh pola aliran material (*flow lines*) yang lebih detail dibandingkan pengamatan pada objektif 5. Pola tersebut menunjukkan terjadinya deformasi plastis yang tinggi akibat kombinasi panas gesekan dan tekanan tempa selama proses *friction welding*. Struktur pada daerah interface tampak padat dan kontinu tanpa indikasi cacat mikro yang signifikan, yang menunjukkan terbentuknya ikatan metalurgi yang baik antara kedua material. Keberadaan zona transisi ini mengindikasikan bahwa sambungan terbentuk melalui mekanisme pengelasan fase padat (*solid-state welding*) yang didukung oleh deformasi plastis dan difusi unsur pada daerah antarmuka.

4. Penerapan parameter pada batang dengan pelat

A. Hasil pengujian

Pengujian awal dilakukan dengan menggunakan parameter proses yang sebelumnya telah menghasilkan sambungan terbaik pada spesimen berbentuk batang, yaitu kecepatan putar sebesar 1330 rpm, tekanan aksial 60 psi, dan waktu gesek 30 detik. Parameter tersebut dipilih berdasarkan penelitian pendahuluan yang menunjukkan bahwa kombinasi tersebut mampu menghasilkan kualitas sambungan yang baik pada material berbentuk silinder.

Namun demikian, ketika parameter tersebut diaplikasikan pada spesimen berbentuk pelat, sambungan yang dihasilkan tidak memenuhi kriteria keberhasilan pengelasan. Berdasarkan hasil pengamatan visual setelah proses pengelasan, kedua material tidak mengalami penyatuan secara sempurna dan sambungan gagal terbentuk sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 53. Kegagalan tersebut menunjukkan bahwa parameter yang optimum untuk spesimen berbentuk batang tidak dapat langsung diterapkan pada spesimen berbentuk pelat.



Gambar 53. *Friction welding* batang dengan pelat

Perbedaan ini disebabkan oleh adanya perbedaan karakteristik geometri antara batang dan pelat yang memengaruhi mekanisme pembangkitan panas selama proses *friction welding*. Pada spesimen batang, kontak awal terjadi secara merata pada seluruh permukaan penampang sehingga panas gesekan terdistribusi secara relatif homogen. Sebaliknya, pada spesimen pelat, distribusi tekanan dan kontak gesekan cenderung tidak merata akibat luas bidang kontak yang lebih besar serta kekakuan sistem yang berbeda. Kondisi tersebut menyebabkan energi panas yang dihasilkan dengan parameter awal belum mencukupi untuk mencapai kondisi plastis pada daerah antarmuka sambungan.

Oleh karena itu, dilakukan penyesuaian parameter proses dengan meningkatkan kecepatan putar menjadi 1736 rpm, menaikkan tekanan aksial menjadi 65 psi, serta mengurangi waktu gesek menjadi 10 detik. Peningkatan kecepatan putar bertujuan untuk meningkatkan laju pembangkitan panas akibat gesekan, sedangkan peningkatan tekanan aksial dimaksudkan untuk memperbesar gaya gesek sehingga deformasi plastis pada antarmuka dapat terjadi secara lebih efektif. Di sisi lain, waktu gesek dipersingkat untuk mencegah terjadinya kehilangan panas yang berlebihan serta menghindari deformasi berlebih (*excessive flash formation*) yang dapat menurunkan kualitas sambungan..



Gambar 54. Hasil pengelasan spesimen 1

Hasil pengelasan pada spesimen 1 menghasilkan pengurangan panjang pada batang sebanyak 2 mm.



Gambar 55. Hasil pengelasan spesimen 2

Hasil pengelasan pada spesimen 2 menghasilkan pengurangan panjang pada batang sebanyak 2 mm.

Berdasarkan hasil pengamatan visual terhadap spesimen setelah proses *friction welding*, terlihat bahwa material mengalami deformasi plastis pada daerah sambungan yang ditandai dengan terjadinya pemendekan batang (*burn-off*) sepanjang 2 mm, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 54 dan gambar 55. Deformasi tersebut terjadi akibat kombinasi

panas hasil gesekan dan tekanan aksial selama proses pengelasan yang menyebabkan material pada daerah antarmuka mencapai kondisi plastis

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa parameter optimum pada pengelasan batang tidak dapat langsung digunakan pada pengelasan pelat karena adanya perbedaan mekanisme distribusi panas, luas kontak, dan kekakuan benda kerja. Oleh sebab itu, diperlukan optimasi parameter khusus sesuai dengan bentuk geometri spesimen agar energi panas yang dihasilkan mampu menghasilkan sambungan yang berkualitas

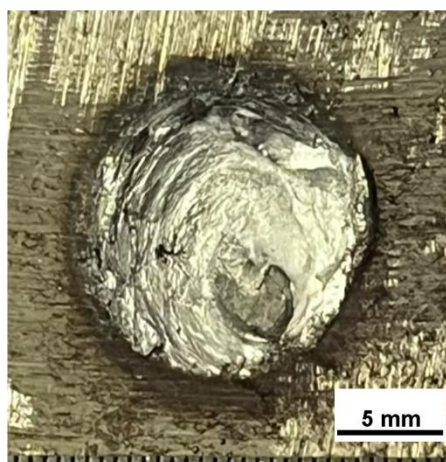
B. Pengujian kekuatan puntir

Batang



Gambar 56. Tampilan patahan pada batang secara visual

Pelat



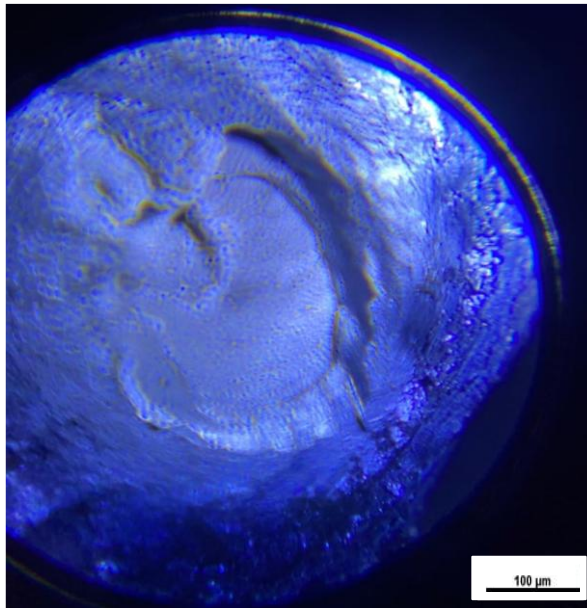
Gambar 57. Tampilan patahan pada pelat secara visual

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kombinasi parameter dengan putaran 1736 rpm, tekanan 65 psi, waktu gesek 10 detik mampu menghasilkan sambungan yang lebih baik

dibandingkan parameter sebelumnya. Torsi maksimum yang dihasilkan dengan parameter tersebut sebesar 70 N.m, yang mengindikasikan adanya peningkatan hambatan gesek pada daerah kontak. Nilai torsi tersebut menunjukkan bahwa interaksi antara kecepatan putar dan tekanan aksial telah menghasilkan gaya gesek yang cukup untuk meningkatkan temperatur antarmuka hingga mencapai kondisi deformasi plastis yang diperlukan dalam proses *friction welding*.

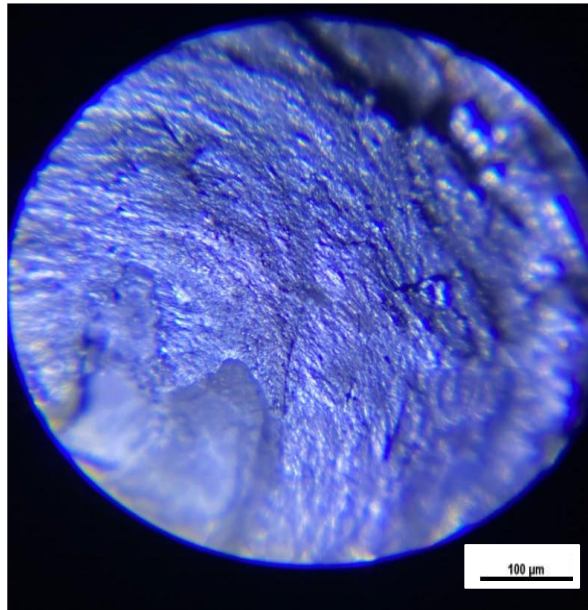
C. Struktur makro

a. Struktur makro pada batang



Gambar 58. Struktur makro pada bagian tengah batang

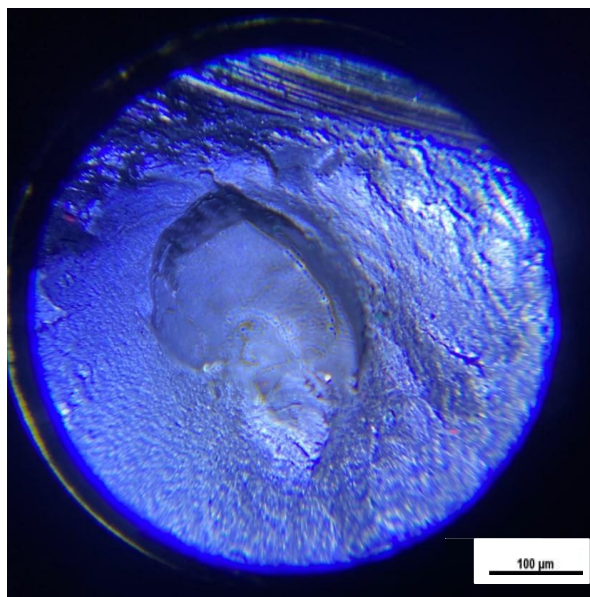
Gambar 58 menunjukkan area di bagian dalam batang yang terkena panas dan putaran. Pada gambar ini, terlihat garis-garis melengkung yang sangat jelas. Garis melengkung ini merupakan bekas aliran material yang berputar dan tercampur selama proses pengelasan. Bagian yang berwarna lebih terang adalah material asli batang *stainless steel* AISI 304, sedangkan bagian yang lebih gelap di sekitarnya adalah material dari pelat baja karbon yang sudah ikut tercampur masuk ke dalam batang. Gambar 58 membuktikan bahwa material pelat tidak hanya menempel di permukaan saja, tetapi sudah menyatu dan berbaaur secara kuat ke dalam struktur batang *stainless steel*.



Gambar 59. Struktur makro pada bagian tepi batang

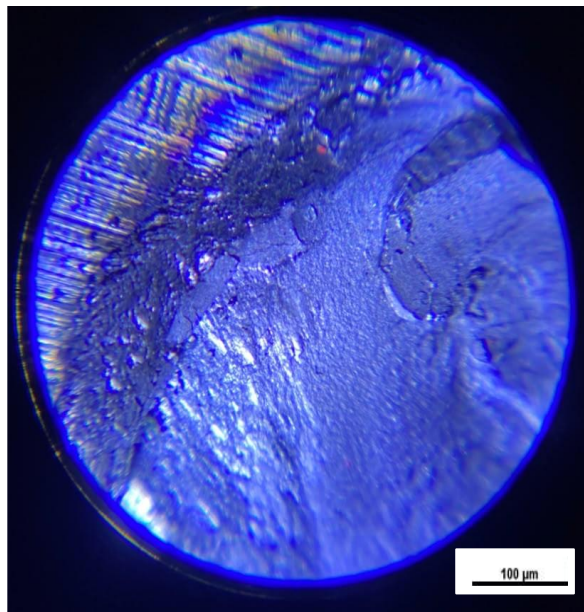
Gambar 59 memperlihatkan permukaan paling luar batang yang langsung bergesekan dengan pelat saat proses pengelasan berlangsung. Permukaan ini terlihat sangat kasar, bergelombang, dan memiliki tekstur seperti sisik atau serat. Tekstur kasar tersebut terjadi karena material pelat yang sudah melunak akibat panas gesekan tergulung dan menempel kuat mengikuti arah putaran batang. Gambar 59 adalah bukti nyata bahwa material pelat terbawa dan melekat pada batang. Lapisan kasar ini membuat ikatan antara batang dan pelat menjadi sangat kuat secara mekanis.

b. Struktur makro pada pelat



Gambar 60. Struktur makro pada bagian tengah pelat

Gambar 60 menunjukkan struktur permukaan pelat yang sudah mengalami perubahan akibat gesekan. Di bagian tengah gambar, terlihat area yang berbentuk seperti cekungan atau "kawah" dengan permukaan yang agak halus dan mengkilap. Area halus ini adalah titik pusat di mana batang *stainless steel* AISI 304 berputar dan menekan paling kuat. Karena panas dan tekanan yang sangat tinggi di titik pusat tersebut, material baja karbon pelat menjadi lunak dan permukaannya menjadi rata seperti dilelehkan. Di sekeliling kawah tersebut, terdapat alur-alur melingkar yang merupakan bekas garukan dan aliran material yang terdorong ke pinggir akibat putaran batang. Gambar 60 menunjukkan bahwa pelat mengalami perubahan bentuk yang sangat signifikan di area kontak utama.



Gambar 61. Struktur makro pada bagian tepi pelat

Gambar 61 memperlihatkan area yang berbeda, yaitu bagian pinggiran atau sisi luar dari area gesekan pada pelat. Pada gambar ini, kita bisa melihat tekstur yang jauh lebih kasar, bergelombang, dan terdapat goresan-goresan sejajar yang sangat jelas, terutama di bagian kiri atas gambar. Goresan-goresan sejajar ini adalah bekas "aliran plastis" (plastic flow), yaitu material pelat yang lunak terdorong ke samping dan terlempar keluar oleh gaya putaran batang. Bagian yang lebih gelap dan kasar di area ini juga mengindikasikan adanya material yang terakumulasi (menumpuk) di pinggiran. Gambar 61 membuktikan bahwa di luar titik kontak pusat, material pelat mengalami deformasi (perubahan bentuk) yang ekstrem dan tertekan ke arah luar.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

1. Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa parameter optimal *friction welding* untuk batang pada baja karbon rendah dengan *stainless steel* AISI 304 adalah putaran 1330 rpm, waktu 30 detik, dan tekanan 60 psi, yang menghasilkan kekuatan puntir maksimum 45 N.m serta tingkat keberhasilan sambungan sebesar 75%. Meskipun sambungan terbebas dari cacat dan menunjukkan integritas antarmuka yang baik, proses ini menghasilkan profil kekerasan yang asimetris dengan nilai tertinggi pada sisi *stainless steel* (221 VHN) dan penurunan drastis hingga 119 VHN di zona las, mengindikasikan terjadinya pelunakan material akibat efek panas.

Parameter *friction welding* yang optimal pada batang (1330 rpm, 60 psi, 30 detik) tidak dapat langsung diterapkan pada pelat akibat perbedaan geometri dan distribusi panas, sehingga sambungan gagal terbentuk. Oleh karena itu, parameter disesuaikan menjadi 1736 rpm, 65 psi, dan 10 detik. Penyesuaian ini berhasil menghasilkan deformasi plastis (*burn-off* 2 mm) dan torsi maksimum 70 N.m. Analisis struktur makro membuktikan bahwa material pelat telah berbaur secara metalurgis ke dalam batang *stainless steel* AISI 304, sedangkan pada pelat terjadi deformasi berupa cekungan di pusat kontak dan aliran plastis kasar di pinggiran. Keberhasilan sambungan sangat bergantung pada optimalisasi parameter yang disesuaikan dengan geometri spesimen.

2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian, pengujian, dan analisis yang telah dilakukan pada proses pengelasan *friction welding* ini, terdapat beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya, antara lain:

- a. Melakukan variasi putaran yang lebih luas dengan rentang rpm berbeda seperti 1800, 2000, 2200, 2400 rpm untuk menemukan parameter putaran optimal yang menghasilkan kekuatan puntir dan kekerasan maksimum pada sambungan *friction welding* material *dissimilar* baja karbon rendah dan *stainless steel*.
- b. Melakukan pengujian tambahan seperti uji tarik dan uji impact untuk mengetahui kekuatan tarik maksimum, elongasi, dan ketangguhan material sambungan las, serta pengujian korosi untuk mengevaluasi ketahanan korosi zona sambungan pada material

dissimilar sehingga data sifat mekanik yang diperoleh lebih lengkap dan komprehensif untuk aplikasi industri.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Nadiawati Elya Susanti Silviana, “*Implementasi efektivitas corporate social responsibility (csr) pada pt pertamina patra niaga fuel terminal tuban ditinjau dari perspektif akuntansi manajemen,*” Malang, May 2025. *Accessed:* Jan. 25, 2026. [Online]. Available: <http://etheses.uin-malang.ac.id/78547/1/210502110010.pdf>
- [2] A. Petroleum Institute, “API Standard 653(Tang Repair,Alternation, and Reconstruction),” Washington, D.C., Dec. 2001. *Accessed:* Jan. 25, 2026. [Online]. Available: <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/api.653.2003.pdf>
- [3] H. Firmanto, S. Candra, and M. A. Hadiyat, “*Rotary friction welding of 304 stainless steel: parametric study, mechanical properties, and microstructure of the joint,*” *Jurnal Polimesin*, vol. 22, no. 2, p. 191, Apr. 2024, doi: 10.30811/jpl.v22i2.4978.
- [4] H. Ma, G. Qin, P. Geng, F. Li, B. Fu, and X. Meng, “*Microstructure characterization and properties of carbon steel to stainless steel dissimilar metal joint made by friction welding,*” *Mater. Des.*, vol. 86, pp. 587–597, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.07.068.
- [5] H. Firmanto, S. Candra, M. A. Hadiyat, Y. P. Triastomo, and I. Wirawan, “*Tensile Strength and Microstructure of Rotary Friction-Welded Carbon Steel and Stainless Steel Joints,*” *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 7, no. 1, Feb. 2023, doi: 10.3390/jmmp7010007.
- [6] Yohanes and Meipen, “*Mechanical and Aerospace-Science and Engineering-30 th,*” *Journal of Ocean*, vol. 66, no. 3, 2022.
- [7] J. Pranata Sinabutar and dan Yohanes, “*The effect of friction time variations on dissimilar material welding joints and hardness value using a bar-plate rotary friction welding machine,*” *Journal Renewable Energy & Mechanics*, no. 01, 2023, doi: 10.25299/rem.2023.vol6(02).14344.
- [8] Akbar Zaenudin, Sentana Agus, and Lazuardi Dedi, “Analisis pengaruh waktu pengelasan gesek material baja St 37 terhadap kekuatan fatigue,” 2025.
- [9] Pristyan Bagas and Amin Muh, “Prediksi Umur Pakai Material ASTM A283 Grade C sebagai Tangki Timbun Bahan Bakar Pertalite Menggunakan Metode

- NDT,” vol. 7, pp. 1–2, Oct. 2024, *Accessed*: Jan. 28, 2026. [Online]. *Available*: <https://prosiding.unimus.ac.id/index.php/semnas/article/download/1798/1803>
- [10] Arifun Amir, *Pengantar Teknologi Pengelasan*. Palembang: Unsri Press, 2024.
 - [11] F. Nico Pratama and A. Bagus Prasetyo, “Pengaruh Waktu Temper Terhadap Mikro Struktur dan Sifat Mekanis Pada Baja Karbon,” vol. 03, no. 02, pp. 93–112, 2022.
 - [12] J. Hasil, K. Ilmiah, M. Naufal Athallah, H. Yudo, and A. F. Zakki, “JURNAL TEKNIK PERKAPALAN Analisa Pengaruh Variasi Arus Las SMAW Pada Pengelasan *Dissimilar* Baja ST42 dan SS304 Terhadap Laju Korosi dan Kekuatan Impak,” *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 13, no. 4, 2025, [Online]. *Available*: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
 - [13] E. Widodo *et al.*, “Pengelasan GTAW pada *Stainless Steel Grade* yang Berbeda untuk Aplikasi pada Power Plant.”
 - [14] I. Sofwan and P. Manufaktur Negeri Bangka Belitung, “Fenomena Las Gesek (Friction Welding) Dengan Variasi Waktu Gesek Pada Material AISI 1040 Dengan Kuningan,” vol. 01, no. 2, 2023.
 - [15] J. Domski, M. Lehmann, A. Sanok, and K. Tvrda, “*Overview of Torsion Tests on Fiber-Reinforced Concrete Beams*,” Jun. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/ma18112452.
 - [16] Fentje Abdul Rauf, Arwanto M. A. Lakat, and Frans P. Sappu, “Uji kekerasan dengan menggunakan alat microhardness Vickers pada berbagai jenis material teknik,” 2026.
 - [17] N. P. Ariyanto *et al.*, “Pengujian kekerasan dan struktur mikro sambungan low-carbon steel dan austenitic stainless steel,” 2022.

LAMPIRAN

1. Jadwal kegiatan

No	Kegiatan	WAKTU KEGIATAN																							
		2025				2026																			
		Desember				Januari				Februari				Maret				April				Mei			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Pengajuan Judul																								
2	Identifikasi Masalah																								
3	Studi Literatur																								
4	Set Up Alat Experimen																								
5	Seminar Usulan Proposal																								
6	Melakukan <i>pretrial</i>																								
7	Pembuatan alat																								
8	Pengujian kinerja alat																								
9	Pengujian kekuatan torsi																								
10	pengujian keras																								
11	Pengamatan struktur mikro																								
12	Pengolahan Data																								
13	Penulisan laporan																								
14	Seminar Tugas Akhir																								
15	Sidang Tugas Akhir																								

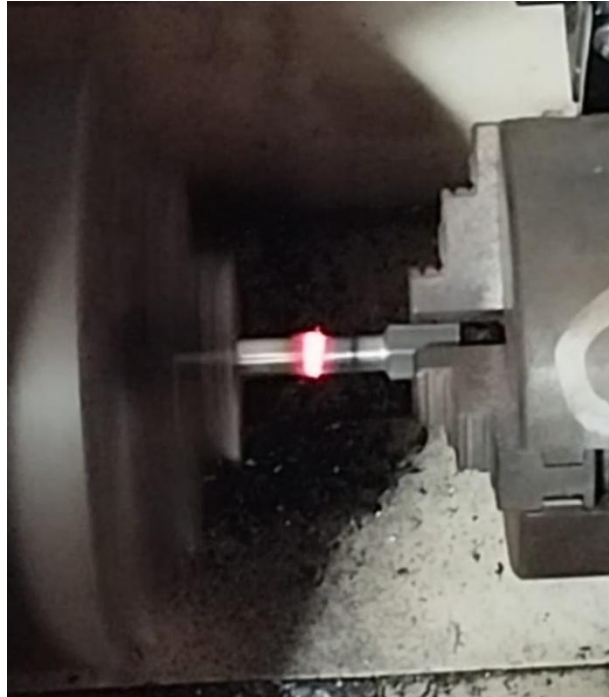
2. Anggaran biaya

No	Alat dan bahan	Volume	Satuan	Unit cost (Rp)	Jumlah
1	Kunci torsi	1	Buah	Rp 106.950,00	Rp 106.950,00
2	Material baja karbon	1	Meter	Rp30.000,00	Rp 30.000,00
3	Amplas	6	Lembar	Rp3.000,00	Rp 18.000,00
4	Pressure gauge	2	Buah	Rp110.000,00	Rp 220.000,00
5	Selang angin	10	Meter	Rp13.000,00	Rp 130.000,00
6	Air motor	1	Buah	Rp270.000,00	Rp 270.000,00
7	Actuator	1	Buah	Rp310.000,00	Rp 310.000,00
8	Roda gigi	2	Buah	Rp150.000,00	Rp 300.000,00
9	Pengatur tekanan	1	Buah	Rp100.000,00	Rp 100.000,00
10	Plat baja	1	Lembar	Rp200.000,00	Rp 200.000,00
11	Resin	1	Liter	Rp122.000,00	Rp 122.000,00
12	Pengujian metalografi	4	Sampel	Rp150.000,00	Rp 600.000,00
13	Jasa bubut	1	Komponen	Rp130.000,00	Rp 130.000,00
14	Selangkan	1	Meter	Rp17.730,00	Rp 17.730,00
15	Slip lock Y	1	Buah	Rp8.520,00	Rp 8.520,00
16	Kawat las	10	Batang	Rp1.000,00	Rp 10.000,00
17	Bearing	1	Buah	Rp14.000,00	Rp 14.000,00
18	Mur & baut	6	Buah	Rp2.000,00	Rp 12.000,00
19	Mata pahat	1	Buah	Rp170.000,00	Rp 170.000,00
20	Mata milling	1	Buah	Rp310.000,00	Rp 310.000,00
21	Nepel L & Y	4	Buah	Rp5.000,00	Rp 20.000,00
22	Stemplet	1	Buah	Rp7.000,00	Rp 7.000,00
Jumlah					Rp3.106.200,00

3. Proses pembuatan spesimen



4. Proses pengujian *friction welding*



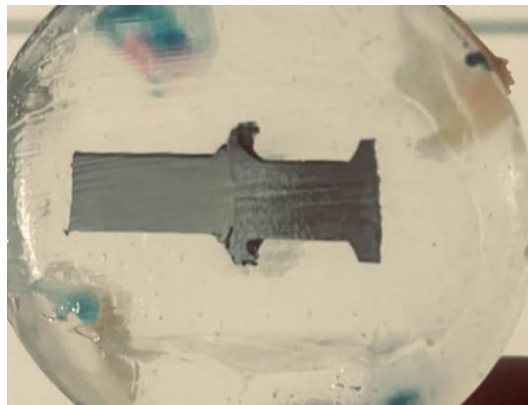
5. Hasil pengujian *friction welding*



6. Spesimen pengujian kekerasan



7. Spesimen untuk pengujian struktur mikro



8. Dokumentasi kegiatan

