

**Perancangan parameter *portable friction welding*
untuk memperbaiki kebocoran pada tangki timbun
bahan bakar dengan material baja karbon rendah**

***Design of portable friction welding parameters for repairing leakage
in low-carbon steel fuel storage***

SKRIPSI

Oleh:

Nama: Rodiana

NPM: 223030026



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

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini,

N a m a : Rodiana

Nomor Pokok Mahasiswa : 223030026

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 dikemudian hari terbukti bahwa pernyataan ini tidak benar maka saya sanggup menerima hukuman/sanksi apapun sesuai peraturan yang berlaku.

Bandung, 24 Juni 2026

Penulis,

A 10,000 Rupiah Indonesian postage stamp featuring the Garuda Pancasila emblem and a signature. The stamp is yellow and orange, with the text 'SEPAJUTRU RUPIAH' and '10000' visible. The signature is in black ink.

Rodiana

SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

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

N a m a: Rodiana

NPM: 223030026

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:

“Perancangan parameter *portable friction welding* untuk memperbaiki kebocoran pada tangki timbun bahan bakar dengan material baja karbon rendah”

Beserta perangkat yang ada (jika ada). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Pasundan berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pakalan 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,



Rodiana

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Perancangan parameter *portable friction welding* untuk memperbaiki kebocoran pada tangki timbun bahan bakar dengan material baja karbon rendah



Nama: Rodiana
NPM: 223030026

Pembimbing Utama

Dr. Ir. Sugiharto, M.T.

Pembimbing Pendamping

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

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Perancangan parameter *portable friction welding* untuk memperbaiki kebocoran pada tangki timbun bahan bakar dengan material baja karbon rendah



Nama: Rodiana
NPM: 223030026

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 penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyusun skripsi yang berjudul

“Perancangan parameter *portable friction welding* untuk memperbaiki kebocoran pada tangki timbun bahan bakar dengan material baja karbon rendah”

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan program sarjana di Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Mesin Universitas Pasundan.

Penyusunan skripsi ini dilatarbelakangi oleh tingginya risiko kebocoran pada tangki bahan bakar yang digunakan di lingkungan Pertamina, tangki bahan bakar memiliki potensi bahaya yang sangat besar apabila diperbaiki dengan menggunakan metode pengelasan konvensional karena dapat menimbulkan percikan api dan memicu ledakan. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode perbaikan yang aman dan efektif tanpa melibatkan sumber panas terbuka. *Friction welding* merupakan salah satu solusi yang dinilai tepat karena proses penyambungannya tidak menghasilkan percikan api. Melalui penelitian ini, penulis berupaya merancang dan mengembangkan alat *friction welding portable* yang aman digunakan untuk memperbaiki kebocoran pada tangki bahan bakar, sehingga dapat meningkatkan aspek keselamatan kerja sekaligus efektivitas proses perbaikan.

Skripsi ini disusun atas beberapa bagian utama, yaitu latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, tinjauan pustaka, metodologi penelitian, hasil pembahasan, kesimpulan dan saran. Metodologi yang digunakan dirancang untuk memperoleh data eksperimen yang valid mengenai hubungan antara tekanan, putaran, dan waktu. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan teknologi pengelasan, khususnya pada perancangan alat *friction welding portabel* yang aman dan efektif untuk perbaikan kebocoran tangki bahan bakar, serta meningkatkan aspek keselamatan kerja di lingkungan industri minyak dan gas.

Dalam penulisan skripsi ini, penulis memperoleh banyak dukungan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat, penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada kedua orang tua penulis tercinta atas doa, kasih sayang, dan dukungan moral yang tiada henti, Bapak Dosen Pembimbing Skripsi, yang telah memberikan arahan, masukan, dan motivasi selama proses penyusunan skripsi ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Ketua Program Studi Teknik Mesin, serta seluruh dosen dan staf Fakultas Teknik Universitas Pasundan, atas segala ilmu, bimbingan,

dan fasilitas yang telah diberikan selama masa studi. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan mahasiswa yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, khususnya Ramdan Sidiq, Akbar Daya Utama, Muhammad Athfal, Rianki Febrianta, dan Herry Rohana.

Akhir kata, penulis berharap semoga penulisan skripsi ini dapat diterima dan memberikan manfaat, baik bagi pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik mesin khususnya di bidang teknik pengelasan, maupun sebagai kontribusi dalam peningkatan keselamatan dan penerapan teknologi perbaikan tangki bahan bakar yang aman di lingkungan industri migas.

Bandung, 24 Juni 2026

Penulis,



Rodiana

DAFTAR ISI

SURAT PERNYATAAN	I
SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	II
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	III
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI.....	IV
KATA PENGANTAR.....	V
DAFTAR ISI.....	VII
DAFTAR GAMBAR.....	X
DAFTAR TABEL	XII
ABSTRAK	XIII
<i>ABSTRACT</i>.....	XIV
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1. Latar belakang	1
2. Rumusan masalah	1
3. Tujuan	2
4. Manfaat.....	2
5. Lingkup masalah.....	2
6. Sistematika penulisan	3
BAB II STUDI LITERATUR	4
1. Kajian pustaka	4
A. Vansen Alexander T dan Akhmad Hafizh A.R.....	4
B. Ardi Meilianto, Rodika, dan Muhammad Riva'i	5
C. Budi Luwar S, Nur Husodo, Sri Bangun S, dan Mahirul Mursid	6
D. Zaenudin Akbar.....	7

2.	Tangki bahan bakar (tangki timbun).....	8
3.	Korosi pada tangki timbun.....	9
	A. Korosi internal.....	10
	B. Korosi eksternal	10
4.	Pengelasan (<i>welding</i>)	10
5.	<i>Friction welding</i>	12
6.	Baja karbon rendah.....	13
BAB III METODOLOGI.....		14
1.	Tahapan penelitian.....	14
2.	Tempat penelitian	14
3.	Perancangan eksperimen	15
	A. Pembuatan spesimen	15
	B. Pengujian <i>friction welding</i>	16
	C. Pengujian kekuatan puntir.....	16
	D. Pengamatan struktur mikro	18
	E. Pengujian kekerasan.....	18
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		20
1.	Pengujian kekuatan puntir	20
	A. <i>Pretrial</i>	20
	B. Variasi konfigurasi pertama	22
	C. Variasi konfigurasi kedua.....	23
2.	Pengamatan struktur mikro.....	26
	A. Spesimen 1 (25 N.m).....	27
	B. Spesimen 2 (5 N.m).....	30
3.	Pengujian keras.....	33
	A. Spesimen 1 (25 N.m).....	34
	B. Spesimen 2 (5 N.m).....	36

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	38
1. Kesimpulan.....	38
2. Saran	38
DAFTAR PUSTAKA.....	39
LAMPIRAN.....	41
1. Jadwal kegiatan.....	41
2. Anggaran kegiatan	41
3. Pembuatan spesimen.....	42
4. Persiapan mesin <i>friction welding</i>	42
5. Pengujian <i>friction welding</i>	42

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Spesimen hasil pengujian.....	4
Gambar 2. Grafik data hasil pengujian impak	5
Gambar 3. Pengujian kekerasan.....	6
Gambar 4. Pengujian struktur mikro.....	7
Gambar 5. Grafik kurva S-N uji <i>fatigue</i>	8
Gambar 6. Perbedaan <i>aboveground tank</i> dan <i>underground tank</i>	9
Gambar 7. Perbedaan <i>fixed roof tank</i> dan <i>floating roof tank</i>	9
Gambar 8. Korosi pada tangki timbun (<i>storage tank</i>).....	10
Gambar 9. Perbedaan <i>fusion welding</i> dan <i>solid state welding</i>	11
Gambar 10. Jenis <i>friction welding</i>	12
Gambar 11. Diagram fasa Fe-3C	13
Gambar 12. Alur diagram penelitian.....	14
Gambar 13. Alamat Laboratorium Teknik Mesin Universitas Pasundan Bandung	14
Gambar 14. Alamat Institut Teknologi Bandung.....	15
Gambar 15. Spesimen yang digunakan.....	15
Gambar 16. Pengujian <i>friction welding</i>	16
Gambar 17. Pengujian kekuatan puntir.....	17
Gambar 18. Pembentukan spesimen	17
Gambar 19. Spesimen pengamatan struktur mikro	18
Gambar 20. Spesimen pengujian kekerasan	19
Gambar 21. Grafik pengujian kekuatan torsi	24
Gambar 22. Spesimen pengujian struktur mikro.....	27
Gambar 23. Spesimen 1 (25 N.m).....	27
Gambar 24. Struktur mikro <i>base metal</i> pada spesimen 1.....	28
Gambar 25. Struktur mikro titik sambungan pada spesimen 1	29
Gambar 26. Struktur mikro pada sambungan spesimen 1.....	29
Gambar 27. Struktur mikro pada <i>area base metal</i> dan TMAZ	30
Gambar 28. Spesimen 1 (25 N.m).....	30
Gambar 29. Struktur mikro titik sambungan pada spesimen 2	31
Gambar 30. Struktur mikro titik sambungan pada spesimen 2 yang diperjelas	32
Gambar 31. Struktur mikro pada area pengelasan dan <i>base metal</i>	32
Gambar 32. Pembesaran struktur mikro pada area area pengelasan dan <i>base metal</i>	33

Gambar 33. Spesimen uji keras spesimen 1	34
Gambar 34. Grafik hasil uji keras spesimen 1	35
Gambar 35. Spesimen uji keras spesimen 2.....	36
Gambar 36. Grafik hasil uji keras spesimen 2	37

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Persentase unsur baja karbon	13
Tabel 2. Variasi konfigurasi <i>pretrial</i>	20
Tabel 3. Spesimen pengujian <i>pretrial</i>	21
Tabel 4. Konfigurasi pengujian pertama.....	22
Tabel 5. Variasi konfigurasi pengujian pertama	23
Tabel 6. Konfigurasi pengujian kedua	23
Tabel 7. Variasi konfigurasi pengujian kedua	24
Tabel 8. Spesimen pengujian puntir.....	25
Tabel 9. Data hasil uji keras spesimen 1	34
Tabel 10. Data hasil uji keras spesimen 2.....	36

ABSTRAK

Kasus kebocoran akibat korosi pada tangki timbun bahan bakar di PT Pertamina merupakan permasalahan kritis karena berpotensi menyebabkan kebakaran, ledakan, gangguan operasional, dan pencemaran lingkungan. Metode perbaikan konvensional menggunakan pengelasan fusi (busur listrik) memiliki risiko tinggi karena menghasilkan percikan api pada area yang mudah terbakar. Penelitian ini bertujuan untuk merancang variasi parameter *portable friction welding* pada material baja karbon rendah sebagai solusi perbaikan kebocoran tangki yang aman tanpa melibatkan sumber panas terbuka. Metode eksperimen kuantitatif digunakan dengan memvariasikan kecepatan putaran, besar tekanan, dan waktu pengelasan pada spesimen baja karbon rendah berdiameter 8 mm. Hasil pengelasan selanjutnya diuji melalui pengujian kekuatan puntir (torsi) menggunakan kunci torsi, pengamatan struktur mikro untuk melihat daerah las, *Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ)*, dan *base metal*, serta pengujian kekerasan. Pengujian konfigurasi pertama dengan waktu lama (70–80 detik) dan tekanan tinggi (60–70 psi) mengalami kegagalan total. Namun, penyesuaian pada konfigurasi kedua dengan waktu lebih singkat terbukti berhasil menyambungkan seluruh spesimen. Kekuatan torsi tertinggi dicapai oleh spesimen 1 sebesar 25 N.m pada parameter putaran 1000 rpm, tekanan 65 psi, dan waktu 30 detik. Sebaliknya, kekuatan torsi terendah terdapat pada spesimen 2 sebesar 5 N.m dengan parameter putaran 1400 rpm, tekanan 60 psi, dan waktu 30 detik. Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa penyesuaian parameter yang seimbang antara putaran, waktu, dan tekanan sangat signifikan dalam menentukan kualitas sambungan mekanis. Metode *solid-state friction welding* ini terbukti efektif dan direkomendasikan sebagai teknologi alternatif yang aman untuk memperbaiki kebocoran tangki timbun di lingkungan industri minyak dan gas.

Kata kunci: baja karbon rendah, kekuatan torsi, pengelasan gesek (*friction welding*), tangki timbun, variasi parameter.

ABSTRACT

Fuel storage tank leakage caused by corrosion at PT Pertamina is a critical issue that poses high risks of fire, explosion, operational disruption, and environmental pollution. Conventional repair methods utilizing fusion welding are highly hazardous due to the generation of open sparks in a flammable environment. This study aims to design the parameter variations for a portable friction welding method on low-carbon steel as a safe repair solution without involving open heat sources. A quantitative experimental method was employed by varying the rotation speed, friction pressure, and welding time (St\$) on low-carbon steel specimens with a diameter of 8 mm. The welded joints were evaluated through torsion strength testing using a torque wrench, microstructure observation to analyze the weld nugget, Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ), and base metal, alongside hardness testing. The first configuration trial involving a long duration (70–80 seconds) and high pressure (60–70 psi) resulted in a total bonding failure. However, adjustments made in the second configuration with shorter durations successfully joined all specimens. The highest torsion strength was achieved by specimen 1 at 25 N.m under the parameters of 1000 rpm rotation speed, 65 psi pressure, and 30 seconds duration. Conversely, the lowest torsion strength was found in specimen 2 at 5 N.m under 1400 rpm rotation speed, 60 psi pressure, and 30 seconds duration. In conclusion, a balanced adjustment between rotation, time, and pressure significantly dictates the mechanical joint quality. This solid-state friction welding method proves effective and is highly recommended as a safe alternative technology for repairing storage tank leakages within the oil and gas industry.

Keywords: *friction welding, low-carbon steel, parameter variations, storage tank, torsion strength.*

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 menciptakan 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.

2. Rumusan masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut:

- Bagaimana menentukan parameter yang tepat pada alat *friction welding* untuk mendapatkan harga kekuatan sambungan yang tinggi pada pengelasan baja karbon rendah,

- Bagaimana karakteristik struktur mikro yang terbentuk pada daerah logam induk, daerah terpengaruh panas, dan logam las setelah proses pengelasan berdasarkan hasil pengamatan metalografi,
- Bagaimana pengaruh proses pengelasan terhadap distribusi nilai kekerasan pada daerah logam induk (*base metal*), daerah terpengaruh panas (*thermo-mechanically affected zone*), dan logam las (*weld metal*).

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, dan mengetahui karakteristik struktur mikro yang terbentuk didalam material setelah proses pengelasan.

4. Manfaat

Memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan teknologi pengelasan, khususnya metode *friction welding* sebagai solusi perbaikan kebocoran pada tangki bahan bakar di PT Pertamina.

5. Lingkup masalah

Untuk menjaga supaya penelitian terarah dan fokus, maka penelitian ini memiliki batasan-batasan sebagai berikut:

- Dimensi diameter spesimen yang digunakan yaitu 8 mm,
- Kecepatan putaran pada proses menentukan parameter dibatasi hanya pada kecepatan 1000 dan 1400 rpm,
- Melakukan pengujian hasil pengelasan *friction welding* pada baja karbon rendah dengan *stainless steel* 304 meliputi pengujian torsi, pengamatan struktur mikro, dan uji keras,
- Pada uji keras proses menentukan harga kekerasan menggunakan metode Vickers, dan
- Proses pengamatan struktur mikro dilakukan dengan bantuan pihak luar yaitu di Lab Institut Teknologi Bandung.

6. Sistematika penulisan

Sistematika terdiri dari empat bab dalam penulisan ini, yang disusun secara sistematis supaya memberikan pemahaman yang jelas. Berikut adalah ringkasan dari masing-masing bab:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini menjelaskan latar belakang, Perumusan masalah, tujuan, manfaat, dan batasan masalah.

BAB II STUDI LITERATUR

Pada bab ini membahas penjelasan mengenai teori-teori yang relevan, meliputi topik tangki bahan bakar di PT Pertamina (tangki timbun), korosi pada tangki timbun, pengelasan (*welding*), *friction welding*, baja karbon rendah.

BAB III METODE PENELITIAN

Pada bab ini mencakup tahapan penelitian, tempat penelitian, variabel eksperimen, rancangan eksperimen, alat dan bahan, set up eksperimen, dan metode eksperimen.

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA HASIL

Pada bab ini dijelaskan mengenai pengujian kekuatan puntir, hasil pengujian kekerasan, dan hasil pengamatan struktur mikro.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini dijelaskan tentang kesimpulan dan saran yang terkait dengan hasil pengujian *friction welding*.

DAFTAR PUSTAKA

Pada bab ini dijelaskan tentang sumber-sumber acuan yang digunakan dalam penyusunan laporan penelitian. Daftar pustaka memuat referensi berupa buku, jurnal ilmiah, artikel, maupun sumber daring.

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 Vansen Alexander Tanuwijaya dan Akhmad Hafizh Ainur Rasyid, Ardi Meilianto, Rodika, dan Muhammad Riva'i (2022), serta Budi Luwar Sanyoto, Nur Husodo, Sri Bangun Setyawati, dan Mahirul Mursid (2012).

A. Vansen Alexander T dan Akhmad Hafizh A.R

Penelitian yang dilakukan oleh Vansen Alexander Tanuwijaya dan Akhmad Hafizh Ainur Rasyid berjudul "Analisa kekuatan tarik dan struktur mikro sambungan *friction welding* al alloy 6061 t6 dan *carbon steel* aisi 1018". Penelitian ini membahas pengaruh variasi parameter pengelasan berupa tekanan gesek, kecepatan putar, dan tekanan tempa terhadap kekuatan tarik serta struktur mikro hasil sambungan *rotary friction welding* pada material berbeda jenis (*dissimilar material*), yaitu aluminium alloy 6061-T6 dan *carbon steel* AISI 1018. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen kuantitatif dengan melakukan validasi terhadap parameter pengelasan yang sebelumnya diperoleh melalui simulasi berbasis *Finite Element Method* (FEM).



Spesimen 1



Spesimen 2



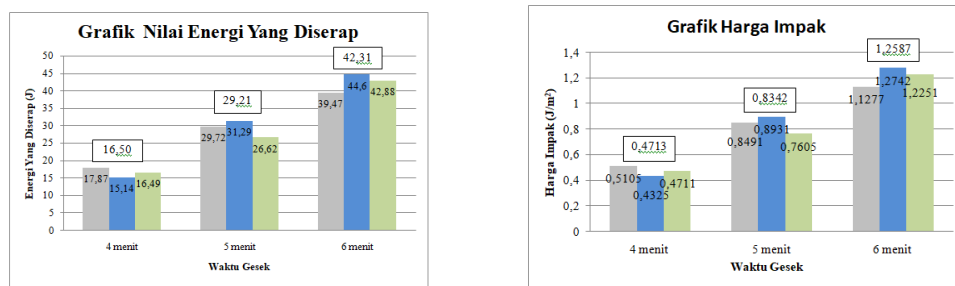
Spesimen 3

Gambar 1. Spesimen hasil pengujian

Hasil penelitian menunjukkan bahwa dari tiga variasi parameter yang diuji, hanya satu variasi yang berhasil menghasilkan sambungan yang baik, dengan nilai kekuatan tarik tertinggi sebesar 80,47 MPa dan rata-rata kekuatan tarik sebesar 66,66 MPa. Pengujian struktur mikro juga menunjukkan adanya difusi antara kedua material serta perubahan struktur kristal pada daerah sambungan. Namun, penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena dua variasi parameter lainnya mengalami kegagalan penyambungan akibat kondisi proses pengelasan yang belum optimal serta adanya perbedaan antara kondisi simulasi dan eksperimen secara langsung [3].

B. Ardi Meilianto, Rodika, dan Muhammad Riva'i

Penelitian yang dilakukan oleh Ardi Meilianto, Rodika, dan Muhammad Riva'i berjudul "Pengaruh variasi waktu gesek pada pengelasan gesek (*friction welding*) terhadap kekuatan impact baja st37". Penelitian ini membahas pengaruh variasi waktu gesek terhadap kekuatan impact hasil pengelasan gesek pada material baja karbon rendah ST37 berbentuk silinder pejal berdiameter 13 mm. Metode yang digunakan adalah metode eksperimen dengan variasi waktu gesek selama 4 menit, 5 menit, dan 6 menit, sedangkan parameter lainnya dibuat tetap yaitu kecepatan putar 720 rpm dan jarak penekanan 3 mm. Pengujian dilakukan menggunakan metode *impak Charpy* untuk mengetahui nilai energi yang diserap dan harga impact dari setiap spesimen hasil pengelasan.

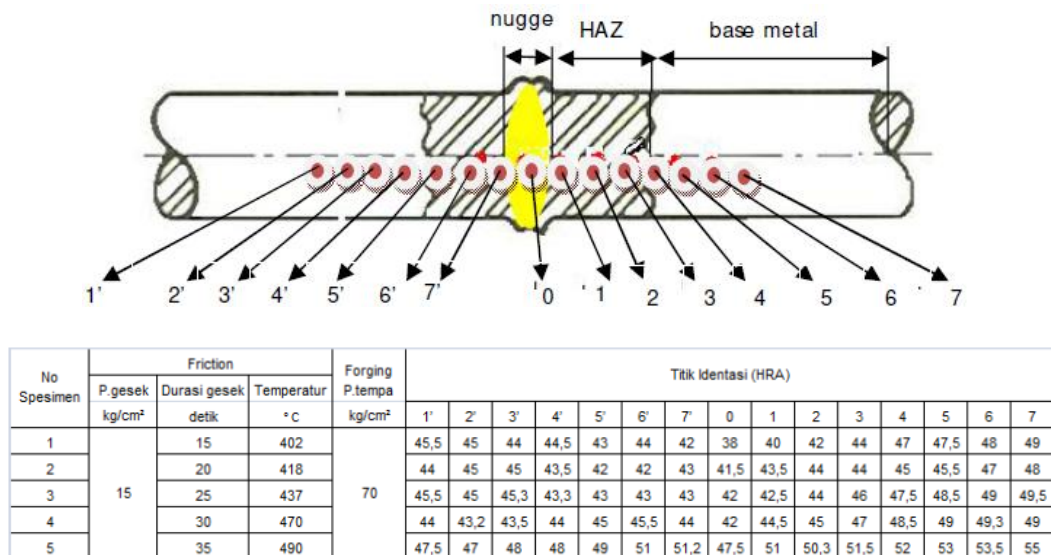


Gambar 2. Grafik data hasil pengujian impact

Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu gesek 6 menit menghasilkan nilai impact tertinggi, dengan energi yang diserap sebesar 49,73 joule dan harga impact sebesar 1,740 joule/mm². Sementara itu, waktu gesek 4 menit menghasilkan nilai terendah, yaitu energi yang diserap sebesar 32,03 joule dan harga impact sebesar 1,119 joule/mm². Penelitian ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu gesek yang diberikan pada proses *friction welding*, maka semakin tinggi nilai energi yang diserap dan harga impact yang diperoleh. Namun, penelitian ini hanya berfokus pada pengaruh waktu gesek terhadap kekuatan impact baja ST37 [4].

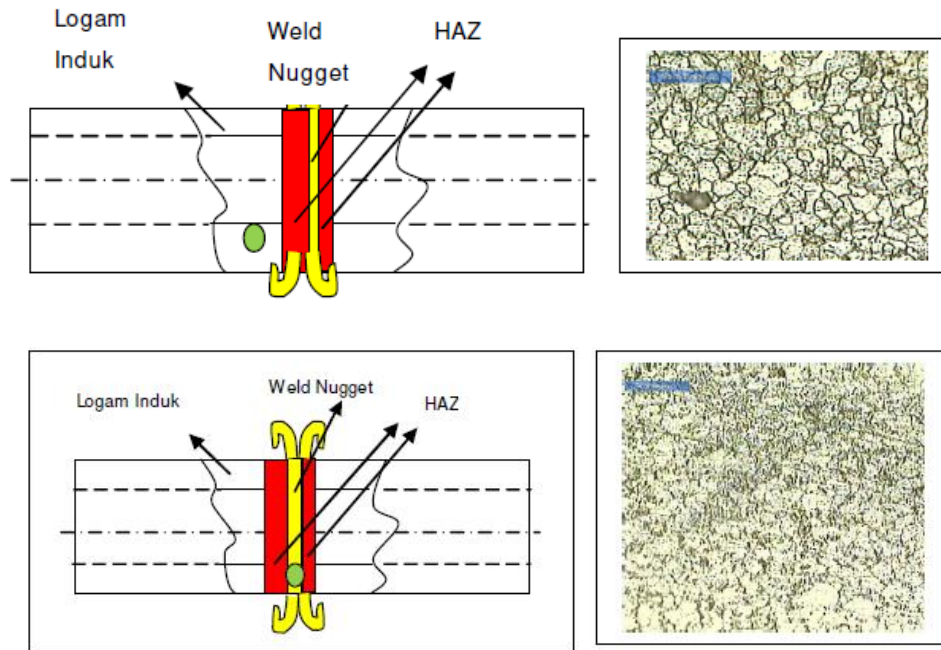
C. Budi Luwar S, Nur Husodo, Sri Bangun S, dan Mahirul Mursid

Penelitian yang dilakukan oleh Budi Luwar Sanyoto, Nur Husodo, Sri Bangun Setyawati, dan Mahirul Mursid berjudul "Penerapan teknologi las gesek (*friction welding*) dalam proses penyambungan dua buah pipa logam baja karbon rendah". Penelitian ini membahas penerapan metode *friction welding* pada proses penyambungan pipa baja karbon rendah dengan memvariasikan waktu gesek untuk mengetahui pengaruhnya terhadap struktur mikro dan distribusi kekerasan sambungan las. Penelitian dilakukan menggunakan metode eksperimen dengan variasi waktu gesek 15, 20, 25, 30, dan 35 detik, sedangkan parameter lainnya dibuat konstan, yaitu kecepatan putar 4125 rpm, tekanan gesek 15 kg/cm², dan tekanan tempa 70 kg/cm². Pengujian yang dilakukan meliputi uji metalografi dan uji kekerasan *rockwell* untuk menganalisis perubahan struktur mikro serta distribusi kekerasan pada daerah logam induk, daerah pengaruh panas (TMAZ), dan logam las.



Gambar 3. Pengujian kekerasan

Berdasarkan Gambar 3. pengujian kekerasan dilakukan pada beberapa titik indentasi yang tersebar dari daerah logam induk (*base metal*), *thermo-mechanically affected zone* (TMAZ), hingga daerah sambungan las (*nugget*). Distribusi titik pengujian tersebut bertujuan untuk mengetahui perubahan nilai kekerasan pada setiap daerah akibat pengaruh panas dan deformasi selama proses *friction welding*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi waktu gesek memberikan pengaruh terhadap distribusi kekerasan pada sambungan las, sehingga pengujian kekerasan dapat digunakan untuk mengevaluasi perubahan sifat mekanik yang terjadi setelah proses penyambungan.

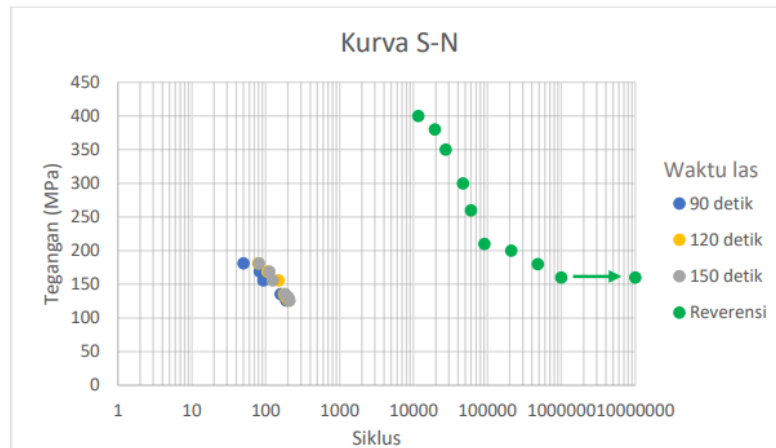


Gambar 4. Pengujian struktur mikro

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin lama waktu gesek, maka temperatur yang dihasilkan semakin tinggi sehingga nilai upset dan panjang daerah TMAZ juga meningkat. Waktu gesek 35 detik direkomendasikan sebagai parameter terbaik dalam proses penyambungan pipa baja karbon rendah menggunakan *friction welding*. Selain itu, hasil pengamatan struktur mikro menunjukkan bahwa perubahan struktur mikro pada daerah sambungan tidak terlalu signifikan sehingga sifat mekanik material tidak mengalami perubahan yang besar. Namun, penelitian ini hanya berfokus pada pengaruh waktu gesek terhadap kekerasan dan struktur mikro pada material pipa baja karbon rendah, sehingga belum membahas pengaruh parameter lain seperti variasi tekanan gesek, tekanan tempa, maupun kekuatan tarik hasil sambungan las [5].

D. Zaenudin Akbar

Penelitian yang dilakukan oleh Zaenudin Akbar berjudul "Analisis pengaruh waktu pengelasan gesek material baja ST37 terhadap kekuatan *fatigue*". Penelitian ini membahas pengaruh variasi waktu pengelasan gesek terhadap kekuatan *fatigue* pada material baja karbon rendah ST37. Metode yang digunakan adalah metode eksperimen dengan variasi waktu pengelasan selama 90 detik, 120 detik, dan 150 detik, sedangkan parameter lainnya dibuat tetap, yaitu kecepatan putar 1400 rpm dan gaya tekan sebesar 41.368,56 N. Pengujian dilakukan menggunakan *rotary bending fatigue machine* untuk mengetahui jumlah siklus hingga kegagalan (*fatigue life*) pada setiap spesimen hasil pengelasan.



Gambar 5. Grafik kurva S-N uji *fatigue*

Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu pengelasan 150 detik menghasilkan ketahanan *fatigue* terbaik dengan jumlah siklus tertinggi yaitu 209 siklus pada tegangan 125,8 MPa, sedangkan jumlah siklus terendah yaitu 50 siklus diperoleh pada waktu pengelasan 90 detik dengan tegangan 181,1 MPa. Penelitian ini menunjukkan bahwa semakin besar beban atau tegangan yang diterima material, maka semakin cepat material mengalami kegagalan akibat *fatigue*. Selain itu, waktu pengelasan yang lebih lama cenderung meningkatkan ketahanan *fatigue* sambungan hasil *friction welding*. Namun, penelitian ini hanya berfokus pada pengaruh waktu pengelasan terhadap kekuatan *fatigue* baja ST37 dan belum menganalisis perubahan struktur mikro maupun sifat kekerasan material akibat variasi parameter pengelasan [6].

2. Tangki bahan bakar (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, dimana 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 [7].

Berdasarkan pada penempatannya, tangki dibagi menjadi dua tipe, yaitu: tangki di atas permukaan tanah dan tangki dibawah permukaan tanah. Tangki 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 [7].



Aboveground tank



Underground tank

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 [7].



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 [8].

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 [9].



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

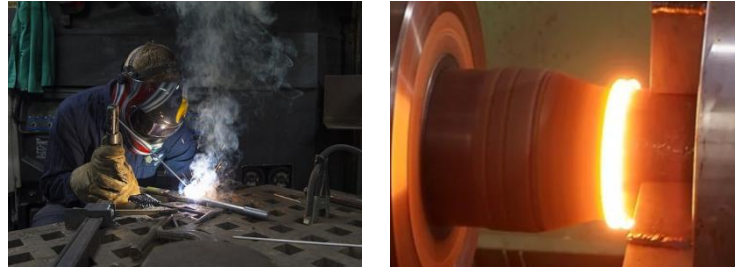
Korosi eksternal merupakan korosi yang terjadi pada bagian luar tangki, baik yang kontak dengan udara, tanah, air dan lingkungan lainnya [10].

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 [11]. 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*

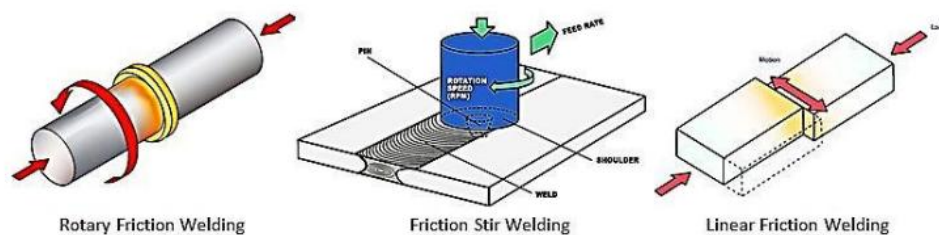
Pengelasan fusi (*fusion welding*) merupakan proses penyambungan material melalui pelelehan sebagian logam induk yang kemudian diikuti proses pembekuan (*solidifikasi*). Pada proses ini, kedua logam disambung menggunakan sumber panas berupa nyala busur listrik yang terjadi antara kawat elektroda dan logam induk [12]. 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 dibawah 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 dibawah 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 tinggi diperlukan, seperti pada aplikasi ke-dirgantaraan dan otomotif [13]. Jenis pengelasan *solid state* yang sering dijumpai adalah *friction welding* (FRW), *friction stir welding* (FSW), *diffusion welding* (DFW), *ultrasonic welding* (USW), dan lainnya.

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 dibawah 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
 - Tacho meter : untuk mengukur kecepatan putaran,
 - *Pressure gauge* : Untuk mengukur tekanan yang digunakan,
 - *Stop Watch* : Untuk mengukur waktu yang digunakan,
 - *Thermo gun* dan *thermo copel* : Untuk mengukur temperatur yang dibentuk pada permukaan.
2. Sifat material
 - Material memiliki mampu tempa (*forgeability*) yang sangat baik,
 - 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* [14]. Parameter keluaran yang dievaluasi pada pengujian *friction welding* meliputi kekuatan puntir, kekuatan tarik, serta karakteristik struktur mikro hasil sambungan.

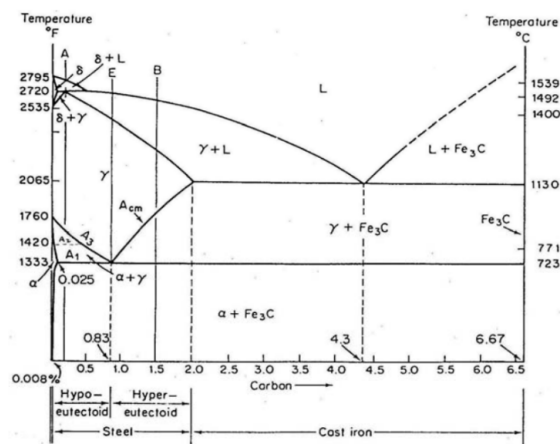
6. Baja karbon rendah

Baja karbon rendah merupakan jenis baja yang memiliki kandungan karbon kurang dari 0,25%. Klasifikasi yang lebih rinci mengenai komposisi dan karakteristik baja karbon rendah dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 1. Persentase unsur baja karbon

Jenis baja karbon		Persentase unsur karbon
1	Baja karbon rendah	$\leq 0,25 \%$
2	Baja karbon sedang	0,25 % - 0,55 %
3	Baja karbon tinggi	$\geq 0,55 \%$

Unsur paduan lainnya, seperti mangan (Mn), dibatasi hingga maksimum 0,8%, silikon (Si) maksimum 0,5%, dan tembaga (Cu) maksimum 0,6%. Berdasarkan kandungan karbonnya, baja karbon diklasifikasikan menurut persentase komposisi unsur karbon sebagaimana ditunjukkan pada diagram fasa Fe – 3C.



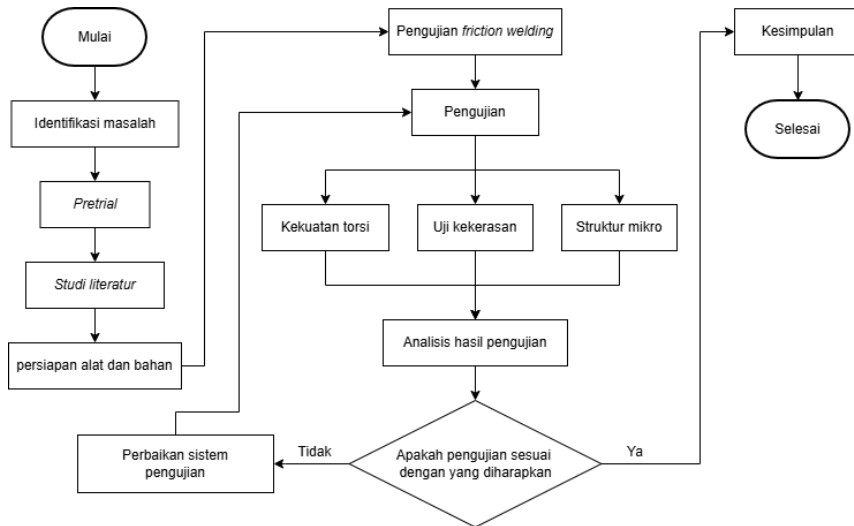
Gambar 11. Diagram fasa Fe-3C

Dapat dilihat dari diagram fasa Fe-3c, baja karbon rendah merupakan jenis *hypoeutektoid* karena persentase karbonnya tidak melebihi 0,8% dan hanya mengandung 0,112%C [15].

BAB III METODOLOGI

1. Tahapan penelitian

Rincian alur penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada diagram alir dibawah ini.

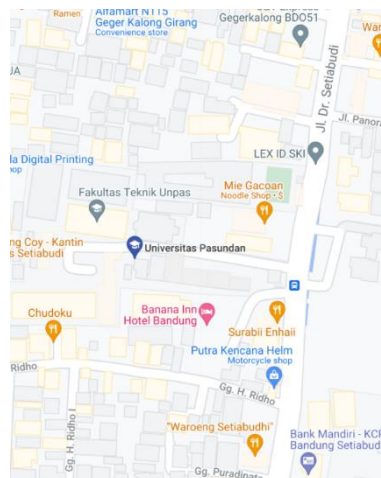


Gambar 12. Alur diagram penelitian

2. Tempat penelitian

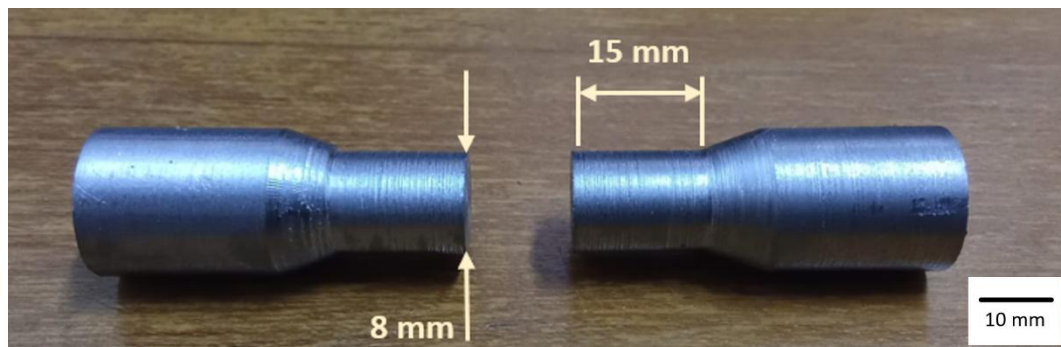
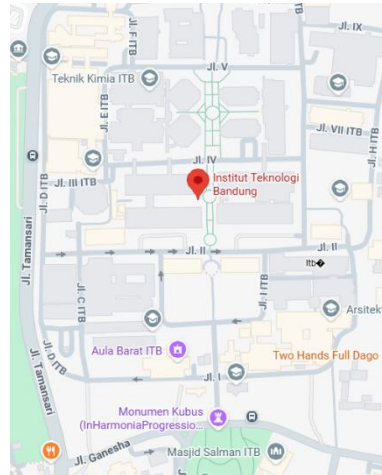
- Universitas Pasundan

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. Tempat penelitian dapat dilihat pada gambar 13.



Gambar 13. Alamat Laboratorium Teknik Mesin Universitas Pasundan Bandung

- Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Institut Teknologi Bandung yang berlokasi di Jalan Ganesa No. 10, Lb. Siliwangi, Kecamatan Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat 40132. Laboratorium yang digunakan merupakan fasilitas penelitian dan pengujian di lingkungan FTMD ITB yang mendukung kegiatan penelitian di bidang teknik manufaktur dan pengelasan. Lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 13.



Material yang digunakan merupakan baja karbon rendah yang umum digunakan sebagai baja konstruksi. Material tersebut dipilih karena baja konstruksi mempunyai komposisi karbon yang rendah.

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 kecepatan putaran, 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 ketiga parameter tersebut, kemudian hasilnya dianalisis berdasarkan karakteristik sambungan las yang terbentuk. Berikut merupakan gambar pengujian pengelasan *friction welding*.



Gambar 16. 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 17. Pengujian kekuatan 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.



Gambar 18. Pembentukan spesimen

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. 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.

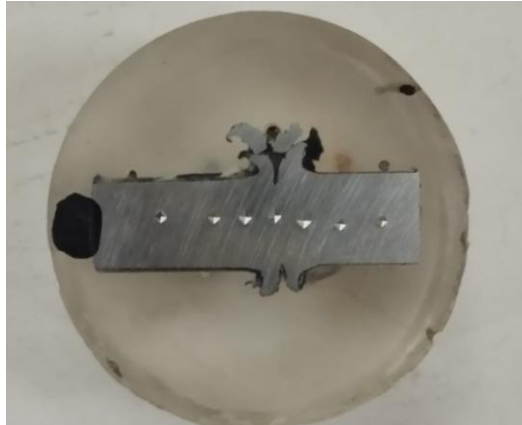


Gambar 19. Spesimen pengamatan struktur mikro

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.

E. 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, *thermo mechanically affected zone* (TMAZ), dan *base metal*, serta didukung dengan pengamatan struktur mikro untuk menganalisis hubungan antara perubahan mikrostruktur dan nilai kekerasan yang diperoleh.



Gambar 20. Spesimen pengujian kekerasan

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.

BAB IV HASIL DAN 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.

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.

Tabel 2. Variasi konfigurasi *pretrial*

Variasi Konfigurasi					
No	n (rpm)	t (s)	F (psi)	keterangan	Torsi (N.m)
1	1000	81	60	Berhasil	5
2	1000	68	65	Gagal	0
3	1000	78	65	Berhasil	15
4	1000	58	70	Gagal	0
5	1200	72	65	Berhasil	10
6	1400	160	50	Gagal	0

Berdasarkan data hasil *pretrial* pada tabel di atas, dapat diketahui bahwa variasi parameter putaran (n), waktu (t), dan tekanan (F) 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. Berikut merupakan tabel hasil pengujian *pretrial* beserta dengan gambar spesimen pengujiannya.

Tabel 3. Spesimen pengujian *pretorial*

No	Parameter	Gambar	Keterangan	Torsi N.m
1	n : 1000 rpm t : 81 s F : 60 psi		Berhasil	5
2	n : 1000 rpm t : 68 s F : 65 psi		Gagal	0
3	n : 1000 rpm t : 78 s F : 65 psi		Berhasil	15
4	n : 1000 rpm t : 58 s F : 70 psi		Gagal	0

No	Parameter	Gambar	Keterangan	Torsi N.m
5	n :1200 rpm t :72 s F :65 psi		Berhasil	10
6	n :1400 rpm t:160 s F :50 psi		Gagal	0

B. Variasi konfigurasi pertama

Setelah dilakukan *pretrial*, maka diperoleh konfigurasi parameter yang dapat digunakan sebagai acuan dalam pelaksanaan pengujian utama. Konfigurasi ini dipilih berdasarkan hasil pengelasan yang menunjukkan keberhasilan serta menghasilkan nilai torsi, sehingga dianggap mampu merepresentasikan kondisi proses yang optimal untuk penelitian lebih lanjut.

Tabel 4. Konfigurasi pengujian pertama

Konfigurasi yang digunakan			
	Putaran, n (RPM)	Waktu, t (s)	Tekanan, F (psi)
+	1000	70	60
-	1400	80	70

Dari variabel tersebut, diperoleh 8 variasi konfigurasi yang digunakan dalam pengujian. Setiap variasi merupakan kombinasi dari parameter putaran, tekanan, dan waktu yang telah ditentukan, sehingga dapat digunakan untuk menganalisis pengaruh masing-masing variabel terhadap kekuatan sambungan dan karakteristik hasil pengelasan.

Tabel 5. Variasi konfigurasi pengujian pertama

Variasi Konfigurasi					
No	n (rpm)	t (s)	F (psi)	Variasi	Torsi (N.m)
1	1000	70	60	+++	Gagal
2	1000	70	70	++-	Gagal
3	1000	80	70	+--	Gagal
4	1400	70	70	--+	Gagal
5	1400	80	60	---	Gagal
6	1400	80	70	---	Gagal
7	1000	80	70	++-	Gagal
8	1400	70	60	-++	Gagal

Pada pengujian pertama, seluruh konfigurasi yang digunakan tidak menghasilkan sambungan yang berhasil. Kegagalan ini diduga dipengaruhi oleh parameter tekanan yang terlalu tinggi serta waktu pengelasan yang terlalu lama, sehingga kedua material yang dilakukan penyambungan tidak dapat menyatu dengan sempurna. Kondisi tersebut menyebabkan proses pembentukan sambungan tidak berlangsung secara optimal. Oleh karena itu, dilakukan penyesuaian terhadap beberapa parameter untuk memperoleh kombinasi yang lebih sesuai dan menghasilkan kualitas pengelasan yang lebih baik.

C. Variasi konfigurasi kedua

Variasi konfigurasi kedua merupakan hasil modifikasi dari variasi konfigurasi pertama, yang dilakukan karena pada konfigurasi sebelumnya belum diperoleh hasil yang maksimal. Perubahan ini dilakukan dengan menyesuaikan parameter proses guna meningkatkan kemungkinan keberhasilan pengelasan serta memperoleh kualitas sambungan yang lebih baik.

Tabel 6. Konfigurasi pengujian kedua

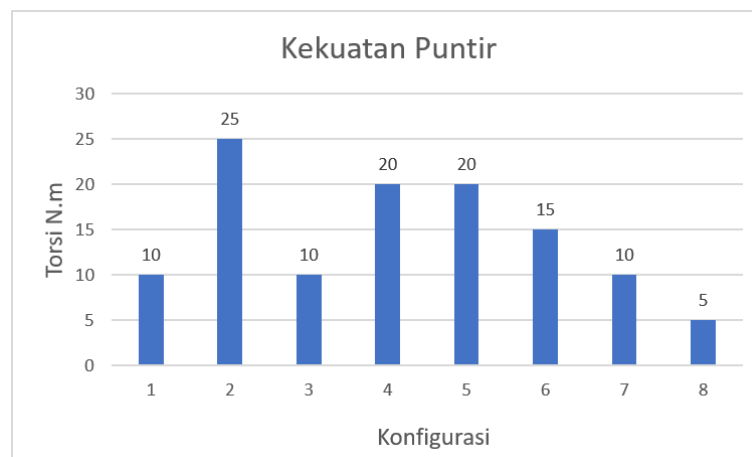
Konfigurasi yang digunakan			
	Putaran, n (RPM)	Waktu, t (s)	Tekanan, F (psi)
+	1000	30	60
-	1400	35	65

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

Tabel 7. Variasi konfigurasi pengujian kedua

Variasi Konfigurasi					
No	n (rpm)	t (s)	F (psi)	Variasi	Torsi (N.m)
1	1000	30	60	+++	10
2	1000	30	65	++-	25
3	1000	35	65	+- -	10
4	1400	30	65	- + -	20
5	1400	35	60	- - +	20
6	1400	35	65	- - -	15
7	1000	35	60	+ - +	10
8	1400	30	60	- + +	5

Pada pengujian kedua, seluruh 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 kedua menunjukkan kinerja terbaik dengan nilai kekuatan torsi mencapai 25 N.m, sedangkan konfigurasi kedelapan menghasilkan kekuatan puntir terendah dengan nilai torsi sebesar 5 N.m. Perbedaan ini mengindikasikan adanya pengaruh signifikan dari variasi parameter terhadap kekuatan sambungan yang dihasilkan.

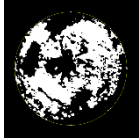
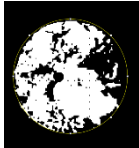
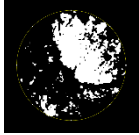
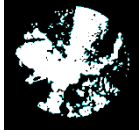
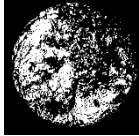


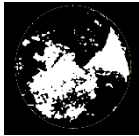
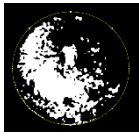
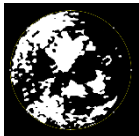
Gambar 21. Grafik pengujian kekuatan torsi

Berdasarkan grafik hasil pengujian kekuatan puntir, terlihat bahwa variasi parameter *friction welding* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan sambungan yang dihasilkan. Nilai torsi mengalami fluktuasi pada setiap variasi parameter, dengan nilai tertinggi sebesar 25 N.m diperoleh pada spesimen 2 yang menggunakan kecepatan putar 1000 rpm, waktu pengelasan 30 detik, dan tekanan 65 psi. Sementara itu, nilai torsi

terendah sebesar 5 N.m diperoleh pada spesimen 8 dengan parameter kecepatan putar 1400 rpm, waktu pengelasan 30 detik, dan tekanan 60 psi. Secara umum, penggunaan tekanan yang lebih tinggi cenderung menghasilkan kekuatan puntir yang lebih baik, sedangkan peningkatan kecepatan putar hingga 1400 rpm tidak selalu meningkatkan kekuatan sambungan. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi parameter pengelasan yang tepat sangat berpengaruh terhadap kualitas sambungan, dan pada penelitian ini parameter 1000 rpm, 30 detik, dan 65 psi merupakan kombinasi yang paling optimal karena menghasilkan nilai kekuatan puntir tertinggi.

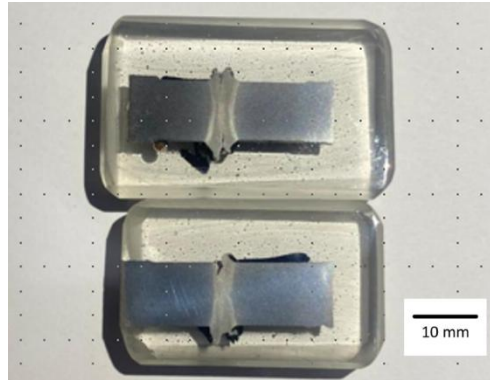
Tabel 8. Spesimen pengujian puntir

No	Parameter	Gambar	Persentase Homogen	Torsi (N.m)
1	n : 1000 rpm t : 30 s F : 60 psi		 56,24%	10
2	n : 1000 rpm t : 30 s F : 65 psi		 70,32%	25
3	n : 1000 rpm t : 35 s F : 65 psi		 41,85%	10
4	n : 1400 rpm t : 30 s F : 65 psi		 53,82%	20
5	n : 1200 rpm t : 35 s F : 60 psi		 47,12%	20

No	Parameter	Gambar	Persentase Homogen	Torsi (N.m)
6	n :1400 rpm t:35 s F :65 psi		 32,15%	15
7	n :1400 rpm t:35 s F :60 psi		 28,42%	10
8	n :1400 rpm t:30 s F :60 psi		 35,61%	5

2. Pengamatan struktur mikro

Pengujian struktur mikro dilakukan dengan memilih dua spesimen yang mewakili hasil pengujian torsi tertinggi dan terendah. Spesimen dengan nilai kekuatan puntir terbesar dipilih untuk mengetahui karakteristik struktur mikro yang berkontribusi terhadap terbentuknya sambungan las dengan kualitas terbaik. Sementara itu, spesimen dengan nilai kekuatan puntir terkecil dipilih untuk menganalisis kemungkinan perubahan struktur mikro yang menyebabkan rendahnya kekuatan sambungan. Dengan demikian, perbandingan struktur mikro dari kedua spesimen tersebut diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai pengaruh parameter pengelasan terhadap kualitas sambungan las yang dihasilkan.

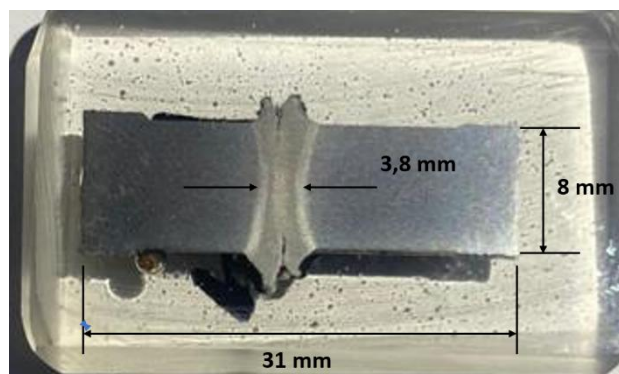


Gambar 22. Spesimen pengujian struktur mikro

Gambar spesimen di atas merupakan spesimen yang akan digunakan dalam pengujian struktur mikro. Pemilihan spesimen dilakukan berdasarkan hasil pengujian kekuatan puntir, yaitu spesimen dengan nilai torsi tertinggi dan terendah. Pada spesimen tersebut, area sambungan hasil pengelasan telah terlihat dengan jelas, yang ditunjukkan oleh adanya perbedaan lebar daerah pengelasan. Daerah ini selanjutnya akan menjadi fokus pengamatan struktur mikro untuk menganalisis pengaruh parameter pengelasan terhadap karakteristik sambungan las yang dihasilkan.

A. Spesimen 1 (25 N.m)

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, spesimen 1 menunjukkan nilai kekuatan torsi tertinggi dibandingkan dengan spesimen lainnya. Spesimen tersebut menggunakan parameter pengelasan berupa kecepatan putar sebesar 1000 rpm, tekanan sebesar 65 Psi, dan waktu pengelasan selama 30 detik. Dengan konfigurasi parameter tersebut, diperoleh nilai kekuatan puntir maksimum sebesar 25 N.m.

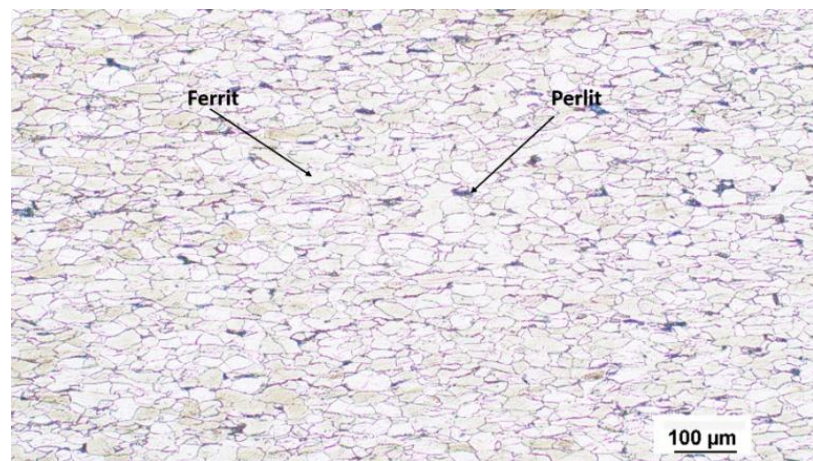


Gambar 23. Spesimen 1 (25 N.m)

Pada spesimen 1, daerah sambungan hasil pengelasan terlihat dengan jelas. Berdasarkan hasil pengamatan visual, lebar daerah pengelasan yang terbentuk adalah 3,8 mm. Lebar daerah sambungan tersebut menunjukkan area terjadinya proses penyambungan

antara kedua material akibat pengaruh gesekan dan tekanan selama proses pengelasan berlangsung. Oleh karena itu, daerah pengelasan tersebut dipilih sebagai fokus pengamatan dalam pengujian struktur mikro untuk mengetahui karakteristik mikrostruktur yang terbentuk pada area sambungan las.

Pada spesimen pertama, panjang total spesimen sebelum proses pengelasan adalah 33,4 mm. Setelah proses pengelasan selesai dilakukan, panjang spesimen berkurang menjadi 31 mm. Dengan demikian, terjadi pengurangan panjang sebesar 2,4 mm. Pengurangan panjang ini menunjukkan bahwa selama proses pengelasan berlangsung terjadi pemadatan material pada daerah sambungan akibat pengaruh gesekan dan tekanan yang diberikan, sehingga dimensi akhir spesimen menjadi lebih pendek dibandingkan sebelum proses pengelasan.

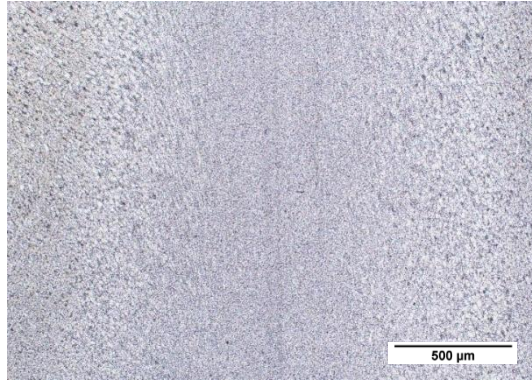


Gambar 24. Struktur mikro *base metal* pada spesimen 1

Gambar di atas merupakan gambar struktur mikro material dasar (*base metal*) yang digunakan dalam penelitian ini. Pengamatan struktur mikro *base metal* dilakukan pada area baja yang tidak mengalami proses pengelasan atau tidak terpengaruh oleh panas pengelasan. Struktur mikro tersebut digunakan sebagai acuan untuk membandingkan perubahan yang terjadi pada daerah sambungan las dan daerah yang terpengaruh panas *thermo-mechanically affected zone* (TMAZ) akibat proses pengelasan.

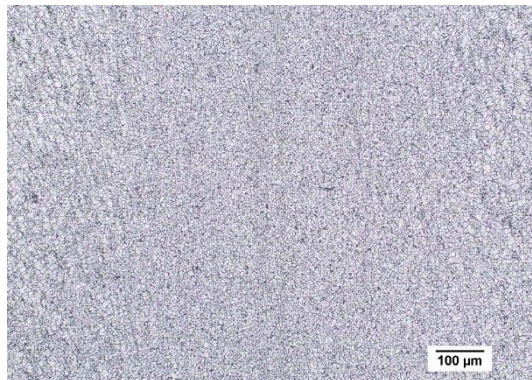
Berdasarkan hasil pengamatan struktur mikro pada *base metal*, diketahui bahwa material tersusun atas dua fasa utama, yaitu fasa ferrit dan perlit. Hasil analisis menunjukkan bahwa fasa ferrit memiliki persentase sebesar 87,36%, sedangkan fasa perlit sebesar 12,64%. Dominasi fasa ferrit menunjukkan bahwa material memiliki karakteristik yang ulet dan lunak, sedangkan keberadaan fasa perlit berperan dalam meningkatkan kekuatan dan kekerasan material. Berdasarkan komposisi fasa tersebut, kandungan karbon material diperkirakan sebesar 0,13% C, sehingga material yang digunakan dalam penelitian

ini dapat diklasifikasikan sebagai baja karbon rendah (*low carbon steel*). Hasil pengamatan struktur mikro pada base metal ini selanjutnya digunakan sebagai acuan untuk membandingkan perubahan struktur mikro yang terjadi pada daerah sambungan las dan *thermo-mechanically affected zone* (TMAZ) setelah proses *friction welding*.



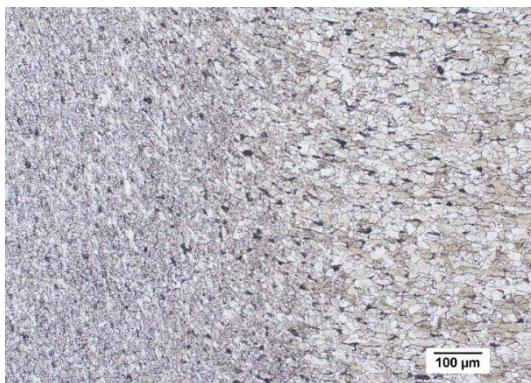
Gambar 25. Struktur mikro titik sambungan pada spesimen 1

Gambar di atas menunjukkan daerah sambungan hasil pengelasan antara kedua material. Pada gambar terlihat dua garis vertikal yang menandai batas pertemuan antara material yang disambungkan. Area diantara garis tersebut merupakan daerah sambungan las yang terbentuk akibat proses pengelasan gesek. Daerah ini menjadi fokus pengamatan struktur mikro karena merupakan lokasi terjadinya ikatan antar material serta mengalami pengaruh panas dan tekanan selama proses pengelasan berlangsung.



Gambar 26. Struktur mikro pada sambungan spesimen 1

Gambar di atas menunjukkan hasil pembesaran pada daerah sambungan las untuk mengamati karakteristik struktur mikro secara lebih detail. Berdasarkan hasil pengamatan, terlihat bahwa ukuran butir pada daerah pengelasan cenderung lebih kecil dan lebih rapat dibandingkan dengan ukuran butir pada material dasar (*base metal*). Perbedaan ukuran butir tersebut menunjukkan adanya perubahan struktur mikro pada daerah sambungan akibat pengaruh panas dan tekanan yang terjadi selama proses pengelasan gesek berlangsung.

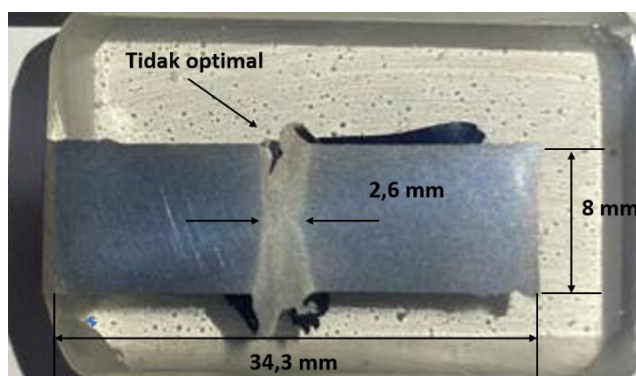


Gambar 27. Struktur mikro pada *area base metal* dan TMAZ

Gambar di atas menunjukkan struktur mikro pada *area base metal* yang berdekatan dengan daerah pengelasan. Berdasarkan hasil pengamatan, terlihat adanya perbedaan ukuran butir antara *area base metal* dan daerah yang terkena pengaruh proses pengelasan. Butir pada *area base metal* tampak lebih besar dibandingkan dengan butir pada daerah pengelasan yang cenderung lebih halus. Perbedaan ini menunjukkan bahwa proses pengelasan memberikan pengaruh terhadap karakteristik struktur mikro material di sekitar daerah sambungan.

B. Spesimen 2 (5 N.m)

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, spesimen dengan parameter pengelasan berupa kecepatan putar sebesar 1400 rpm, tekanan sebesar 60 psi, dan waktu pengelasan selama 30 detik menunjukkan nilai kekuatan torsi terendah. Meskipun proses pengelasan berhasil menghasilkan sambungan, nilai kekuatan puntir yang diperoleh hanya sebesar 5 N·m. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi parameter pengelasan yang digunakan pada spesimen ini belum mampu menghasilkan kekuatan sambungan yang optimal.

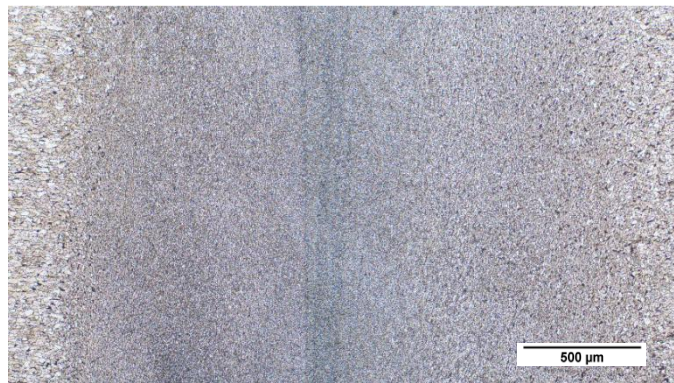


Gambar 28. Spesimen 1 (25 N.m)

Pada spesimen 2, daerah sambungan hasil pengelasan terlihat dengan jelas. Berdasarkan hasil pengamatan visual, lebar daerah pengelasan yang terbentuk adalah 2,6

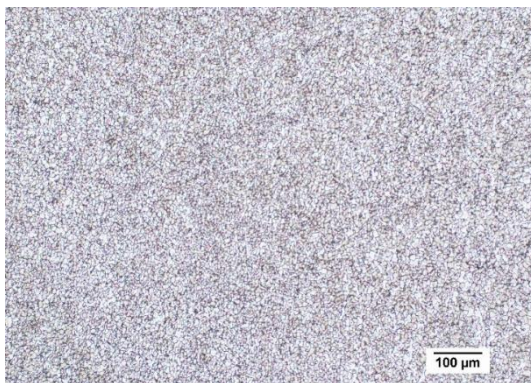
mm. Lebar daerah sambungan ini lebih kecil dibandingkan dengan spesimen 1 yang memiliki lebar daerah pengelasan sebesar 3 mm. Perbedaan lebar daerah pengelasan tersebut menunjukkan adanya pengaruh variasi parameter pengelasan terhadap area sambungan yang terbentuk. Oleh karena itu, daerah pengelasan pada spesimen 2 digunakan sebagai fokus pengamatan dalam pengujian struktur mikro untuk mengetahui karakteristik struktur mikro yang terbentuk pada area sambungan las.

Pada spesimen 2, panjang total spesimen sebelum proses pengelasan adalah 36 mm, sedangkan setelah proses pengelasan panjangnya menjadi 34,3 mm. Dengan demikian, terjadi pengurangan panjang sebesar 1,7 mm. Nilai ini lebih kecil dibandingkan dengan spesimen 1 yang mengalami pengurangan panjang sebesar 2,4 mm. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa tingkat pemadatan material pada daerah sambungan yang terjadi selama proses pengelasan berbeda pada masing-masing spesimen akibat variasi parameter pengelasan yang digunakan.



Gambar 29. Struktur mikro titik sambungan pada spesimen 2

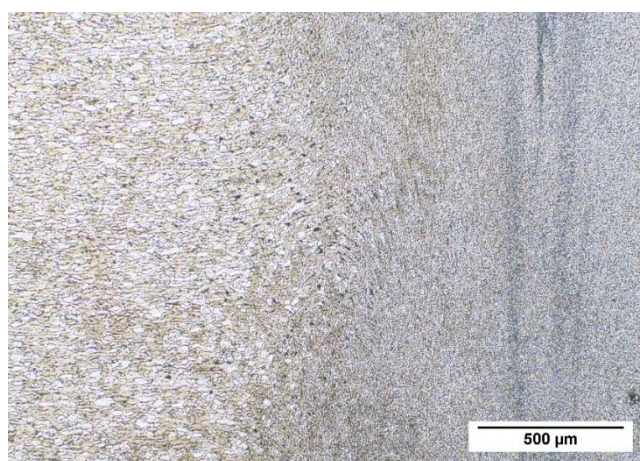
Gambar di atas menunjukkan daerah sambungan hasil pengelasan pada spesimen 2. Pada gambar terlihat dua garis vertikal yang menandai batas pertemuan antara kedua material yang disambungkan. Area diantara kedua garis tersebut merupakan daerah sambungan las yang terbentuk akibat proses pengelasan gesek. Dibandingkan dengan spesimen 1, daerah sambungan pada spesimen 2 tampak lebih sempit dengan lebar pengelasan sebesar 2,5 mm. Daerah ini menjadi fokus pengamatan struktur mikro karena merupakan lokasi terjadinya ikatan antar material serta area yang mengalami pengaruh panas dan tekanan selama proses pengelasan berlangsung.



Gambar 30. Struktur mikro titik sambungan pada spesimen 2 yang diperjelas

Gambar di atas merupakan hasil pembesaran dari daerah sambungan las yang telah ditunjukkan pada gambar sebelumnya. Pembesaran dilakukan untuk memudahkan pengamatan karakteristik struktur mikro pada area pengelasan secara lebih detail. Dengan pembesaran tersebut, perbedaan ukuran dan bentuk butir pada daerah sambungan dapat diamati dengan lebih jelas sehingga mempermudah analisis perubahan struktur mikro akibat proses pengelasan.

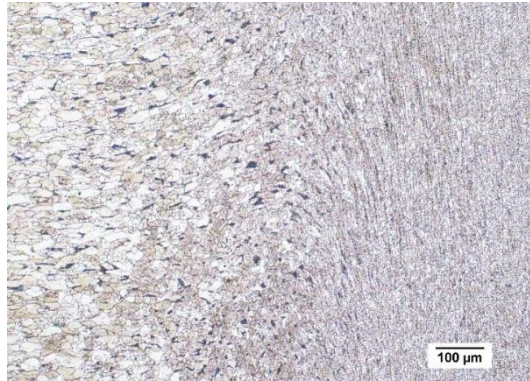
Berdasarkan hasil pengamatan, terlihat bahwa ukuran butir pada daerah sambungan las cenderung lebih kecil dan lebih rapat dibandingkan dengan ukuran butir pada material dasar (*base metal*). Perbedaan ukuran butir tersebut menunjukkan terjadinya perubahan struktur mikro akibat kombinasi panas dan tekanan selama proses *friction welding*. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa deformasi plastis dan kenaikan temperatur pada daerah sambungan telah memicu terjadinya penyempurnaan butir (*grain refinement*), sehingga menghasilkan struktur mikro yang lebih halus dibandingkan material dasar.



Gambar 31. Struktur mikro pada area pengelasan dan *base metal*

Gambar di atas menunjukkan struktur mikro pada daerah pengelasan dan *base metal*. Berdasarkan hasil pengamatan, batas antara kedua daerah tersebut masih dapat terlihat

dengan cukup jelas, sehingga area sambungan dapat diidentifikasi dengan mudah. Selain itu, tampak adanya perbedaan karakteristik struktur mikro antara *base metal* dan daerah pengelasan, terutama pada ukuran butir yang terbentuk. Perbedaan ini menunjukkan bahwa proses pengelasan memberikan pengaruh terhadap struktur mikro material pada daerah sambungan.



Gambar 32. Pembesaran struktur mikro pada area area pengelasan dan *base metal*

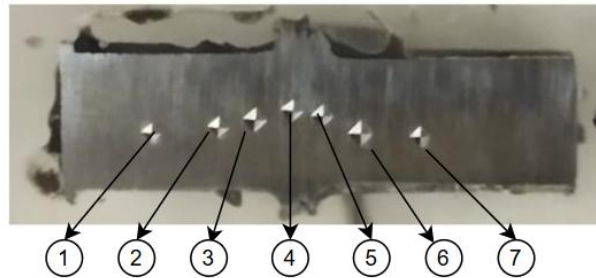
Gambar di atas merupakan hasil pembesaran dari gambar sebelumnya pada area *base metal* dan daerah pengelasan. Berdasarkan hasil pengamatan, struktur mikro pada area base metal didominasi oleh fasa ferrit dan perlit yang terlihat jelas. Sementara itu, pada daerah pengelasan terlihat adanya perubahan karakteristik struktur mikro dibandingkan dengan base metal. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa proses pengelasan memberikan pengaruh terhadap struktur mikro material pada daerah sambungan akibat panas dan tekanan yang terjadi selama proses pengelasan berlangsung.

3. Pengujian keras

Tujuan utama dari pengujian kekerasan pada hasil sambungan *friction welding* adalah untuk mengevaluasi kualitas sambungan mekanis dengan cara memetakan perubahan struktur mikro dan sifat mekanis material akibat pengaruh masukan panas (*heat input*) serta tekanan tempa (*upsetting force*). Melalui pengujian ini, peneliti dapat mendeteksi keberadaan zona pelunakan (*softening zone*) pada area TMAZ yang berpotensi menjadi titik lemah (*critical point*) kegagalan struktur, sekaligus mengonfirmasi terjadinya rekristalisasi dinamis (*grain refinement*) dipusat sambungan yang berfungsi menjaga integritas kekuatan lasan. Pada akhirnya, data distribusi kekerasan ini digunakan sebagai indikator valid untuk menentukan dan mengoptimalkan parameter proses pengelasan seperti kecepatan putar, tekanan gesek, dan waktu penekanan agar menghasilkan sambungan las yang tangguh.

A. Spesimen 1 (25 N.m)

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, spesimen 1 menunjukkan nilai kekuatan torsi tertinggi dibandingkan dengan spesimen lainnya. Spesimen tersebut menggunakan parameter pengelasan berupa kecepatan putar sebesar 1000 rpm, tekanan sebesar 65 psi, dan waktu pengelasan selama 30 detik. Dengan konfigurasi parameter tersebut, diperoleh nilai kekuatan puntir maksimum sebesar 25 N.m. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi parameter pengelasan yang digunakan mampu menghasilkan kualitas sambungan yang lebih baik dibandingkan variasi parameter lainnya. Untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai karakteristik sambungan las yang dihasilkan, selanjutnya akan dilakukan pengujian kekerasan. Pengujian kekerasan bertujuan untuk mengetahui distribusi nilai kekerasan pada daerah sambungan las serta menganalisis pengaruh parameter pengelasan terhadap sifat mekanik material setelah proses pengelasan.



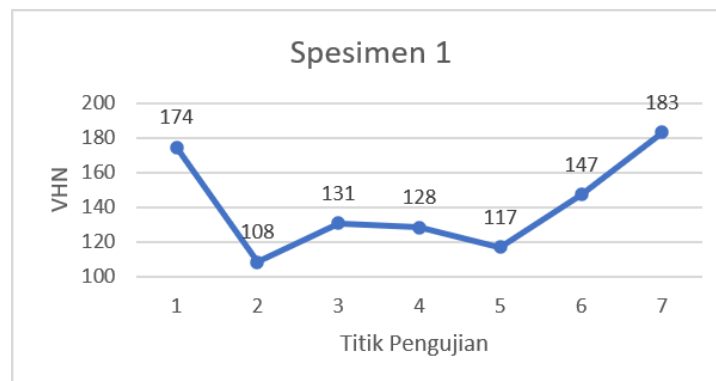
Gambar 33. Spesimen uji keras spesimen 1

Gambar di atas menunjukkan spesimen 1 yang telah dipersiapkan untuk pengujian kekerasan *Vickers* setelah proses *friction welding*. Pengujian dilakukan pada tujuh titik pengukuran yang melintang dari material dasar (*base metal*), melewati daerah *Thermo-Mechanically Affected Zone* (TMAZ), hingga pusat sambungan las (*weld zone*). Penempatan titik-titik pengujian tersebut bertujuan untuk mengetahui distribusi nilai kekerasan serta menganalisis perubahan sifat mekanik pada setiap daerah akibat proses pengelasan gesek.

Tabel 9. Data hasil uji keras spesimen 1

No	D1			D2			D rata-rata	VHN
	D	D	Jumlah	D	D	Jumlah		
1	568	293	275	549	269	280	77006	174
2	601	255	346	598	240	358	123904	108
3	556	239	317	554	230	324	102720	131
4	624	292	332	557	242	315	104652	128
5	578	242	336	557	215	342	114921	117
6	533	228	305	549	250	299	91204	147
7	523	249	274	513	245	268	73441	183

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan *Vickers* (VHN) pada sambungan *friction welding* tersebut, terlihat adanya variasi nilai kekerasan yang signifikan di sepanjang profil pengelasan (titik 1 hingga 7). Logam induk (*base metal*) pada kedua ujung spesimen menunjukkan tingkat kekerasan tertinggi, masing-masing sebesar 174,35 VHN pada titik 1 dan 182,81 VHN pada titik 7. Namun, saat mendekati zona terpengaruh panas *Thermo-Mechanically Affected Zone* (TMAZ) dan pusat sambungan, terjadi penurunan kekerasan (*softening effect*) akibat siklus termal proses pengelasan gesek, di mana nilai terendah tercatat pada titik 2 sebesar 108,36 VHN, dipusat sambungan las (*weld interface* atau titik 4), nilai kekerasan sedikit mengalami stabilisasi atau kenaikan menjadi 128,29 VHN, yang mengindikasikan terjadinya rekristalisasi dinamis akibat kombinasi panas gesek dan tekanan tempa (*upsetting pressure*) selama proses *friction welding* berlangsung.

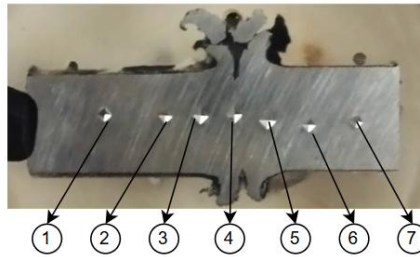


Gambar 34. Grafik hasil uji keras spesimen 1

Grafik distribusi kekerasan pada Spesimen 1 secara visual mempertegas fenomena perubahan struktur mikro yang khas pada sambungan *friction welding*, membentuk profil kurva yang menyerupai huruf W atau mangkuk melandai. Penurunan tajam grafik dari titik 1 (174,35 VHN) menuju titik 2 (108,36 VHN) mengonfirmasi terjadinya pelunakan material (*softening zone*) pada area *Heat Affected Zone* (HAZ) akibat akumulasi panas yang merusak struktur penguatan awal logam induk. Namun, grafik kembali merangkak naik dan cenderung stabil di area tengah, yaitu pada titik 3 (130,70 VHN) hingga titik 4 (128,29 VHN); tren kenaikan lokal dipusat sambungan ini menjadi bukti nyata terjadinya deformasi plastis yang parah disertai rekristalisasi dinamis menghasilkan butir-butir kristal baru yang lebih halus (*grain refinement*). Setelah melewati titik pusat, grafik kembali melandai di titik 5 (116,83 VHN) sebelum akhirnya naik secara konstan menuju kekerasan asli logam induk di titik 7 sebesar 182,81 VHN.

B. Spesimen 2 (5 N.m)

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, spesimen dengan parameter pengelasan berupa kecepatan putar sebesar 1400 rpm, tekanan sebesar 60 psi, dan waktu pengelasan selama 30 detik menghasilkan nilai kekuatan torsi terendah. Pada konfigurasi parameter tersebut, sambungan las yang dihasilkan hanya mampu menahan beban puntir sebesar 5 N.m. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi parameter pengelasan tersebut belum mampu menghasilkan kualitas sambungan yang optimal dibandingkan dengan variasi parameter lainnya. Untuk mengetahui karakteristik sifat mekanik dari sambungan las yang dihasilkan, tahap selanjutnya dilakukan pengujian kekerasan. Pengujian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi nilai kekerasan pada daerah sambungan las serta mengevaluasi pengaruh parameter pengelasan terhadap perubahan sifat material setelah proses pengelasan.



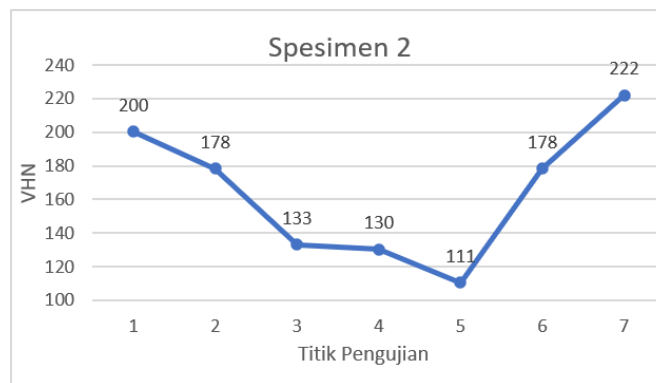
Gambar 35. Spesimen uji keras spesimen 2

Gambar di atas menunjukkan spesimen 2 yang telah dipersiapkan untuk pengujian kekerasan Vickers setelah proses *friction welding*. Pengujian dilakukan pada tujuh titik pengukuran yang tersebar dari material dasar (*base metal*), melalui daerah *thermomechanically affected zone* (TMAZ), hingga pusat sambungan las (*weld zone*). Penentuan titik-titik pengujian ini bertujuan untuk membandingkan distribusi nilai kekerasan antara setiap daerah pada spesimen 2, sehingga pengaruh proses pengelasan terhadap perubahan sifat mekanik material dapat dievaluasi dan dibandingkan dengan hasil yang diperoleh pada spesimen 1.

Tabel 10. Data hasil uji keras spesimen 2

No	D1			D2			D rata-rata	VHN
	D	D	Jumlah	D	D	Jumlah		
1	364	115	249	557	288	269	67081	200
2	687	409	278	516	245	271	75350	178
3	701	381	320	561	246	315	100806	133
4	596	280	316	527	201	326	103041	130
5	619	261	358	534	195	339	121452	111
6	525	246	279	520	250	270	75350	178
7	615	362	253	502	263	239	60516	222

Analisis profil kekerasan *Vickers* (VHN) pada Spesimen 2 hasil proses *friction welding* ini menunjukkan tren penurunan kekerasan yang asimetris dari arah logam induk menuju pusat sambungan. Nilai kekerasan tertinggi ditemukan pada area *base metal* di kedua ujung spesimen, yaitu sebesar 200,14 VHN pada titik 1 dan mencapai puncaknya sebesar 221,86 VHN pada titik 7. Memasuki area terdampak panas, material mengalami pelunakan (*softening*) yang cukup signifikan akibat siklus termal pengelasan gesek, di mana nilai kekerasan terus menurun melewati titik pusat sambungan (titik 4 sebesar 130,30 VHN) hingga mencapai titik terendahnya pada titik 5 dengan nilai 110,54 VHN. Perbedaan distribusi kekerasan yang agak bergeser ke sisi kanan ini mengindikasikan adanya gradien termal atau laju pendinginan (*cooling rate*) yang sedikit berbeda di antara kedua sisi material selama proses penekanan dan pembentukan sambungan las berlangsung.



Gambar 36. Grafik hasil uji keras spesimen 2

Grafik distribusi kekerasan pada Spesimen 2 menunjukkan tren penurunan asimetris dari logam induk menuju pusat sambungan. Penurunan nilai kekerasan dimulai secara konstan dari titik 1 (200,14 VHN) melewati titik 2 (178,18 VHN), lalu melandai di area tengah antara titik 3 (133,18 VHN) dan titik 4 (130,30 VHN). Nilai kekerasan terendah justru tercatat setelah melewati pusat sambungan, yaitu pada titik 5 sebesar 110,54 VHN, yang mengindikasikan bahwa zona pelunakan akibat panas (*softening zone*) bergeser atau lebih luas pada area TMAZ sisi kanan. Selanjutnya, grafik melonjak tajam melewati titik 6 (178,18 VHN) hingga mencapai nilai kekerasan tertinggi logam induk di titik 7 sebesar 221,86 VHN. Profil kurva yang tidak simetris ini mengonfirmasi adanya gradien termal yang tidak seragam disepanjang spesimen selama proses *friction welding* berlangsung.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

1. Kesimpulan

Nilai kekuatan puntir tertinggi didapatkan sebesar 25 N.m diperoleh pada parameter putaran 1000 rpm, waktu pengelasan 30 detik, dan tekanan 65 psi, sehingga parameter tersebut merupakan konfigurasi terbaik dalam penelitian ini. Sebaliknya, nilai kekuatan puntir terendah sebesar 5 N.m diperoleh pada parameter putaran 1400 rpm, waktu pengelasan 30 detik, dan tekanan 60 psi.

Hasil pengamatan struktur mikro menunjukkan bahwa daerah pengelasan memiliki ukuran butir yang lebih halus dibandingkan base metal yang didominasi fasa ferrit dan perlit. Spesimen dengan kekuatan puntir tertinggi juga memiliki lebar daerah pengelasan yang lebih lebar, menunjukkan kualitas sambungan yang lebih baik.

Hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa daerah sambungan memiliki nilai kekerasan yang lebih rendah dibandingkan *base metal* akibat *softening effect*. Meskipun demikian, pada pusat sambungan terjadi peningkatan kekerasan hingga 128,29 VHN dan 130,30 VHN yang mengindikasikan terjadinya *dynamic recrystallization* dan *grain refinement*. Berdasarkan kajian literatur, fenomena tersebut diduga dipengaruhi oleh temperatur selama proses *friction welding*.

2. Saran

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

- a. Melakukan pengukuran temperatur selama proses *friction welding* pada setiap variasi parameter pengelasan agar hubungan antara temperatur, perubahan struktur mikro, dan sifat mekanik material dapat dianalisis secara lebih komprehensif,
- b. Melakukan pengamatan struktur mikro dengan pembesaran objektif yang lebih tinggi (misalnya 200×, 500×, atau sesuai kebutuhan) agar perubahan ukuran butir, distribusi fasa, dan daerah transisi pada TMAZ, serta *weld center* dapat diamati dengan lebih jelas,
- c. Menggunakan pengujian kekerasan mikro (*micro vickers hardness test*) dengan beban yang sesuai serta jarak antar titik pengujian yang lebih rapat untuk memperoleh distribusi kekerasan yang lebih detail dan akurat, terutama pada daerah sambungan yang memiliki lebar relatif sempit.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. S. S. Nadiawati, “*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(*Tank 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] V. A. Tanuwijaya and A. H. A. Rasyid, “Analisa kekuatan tarik dan struktur mikro sambungan *friction welding* alloy 6061 T6 dan carbon steel AISI 1018,” vol. 11, 2023, Accessed: Jun. 11, 2026. [Online]. Available: <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/jtm-unesa/article/view/51232/41909>
- [4] A. Meilianto, M. Riva, T. Mesin dan Manufaktur, and P. Manufaktur Negeri Bangka Belitung, “Pengaruh variasi waktu gesek pada pengelasan gesek (*friction welding*) terhadap kekuatan impact baja ST37.” Accessed: Jun. 11, 2026. [Online]. Available: <https://snitt.polman-babel.ac.id/index.php/snitt/article/view/202/127>
- [5] B. L. Sanyoto, N. Husodo, B. Setyawati, and M. Mursid, “Penerapan teknologi las gesek (*friction welding*) dalam proses penyambungan dua buah pipa logam baja karbon rendah.” Accessed: Jun. 11, 2026. [Online]. Available: <https://www.academia.edu/download/88570779/4840.pdf>
- [6] Z. Akbar, “Analisis pengaruh waktu pengelasan gesek material baja ST 37 terhadap kekuatan fatigue,” Universitas Pasundan, Bandung, 2025.
- [7] A. Setiawan, Lilipaly Eka R.M.A.P., E. Effendi, and B. Pelasulan, “Analisis ketebalan dinding pelat dan sisa umur pada tangki 11-15000kl di PT Pertamina Patra Niaga Integrated Terminal Wayame Kota Ambon,” *Mechanical Engineering*, vol. Vol 1, p. 182, Dec. 2023, Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: <https://ejournal-polnam.ac.id/index.php/JME/article/download/2102/988/8324>
- [8] B. Pristiyawan and M. Amin, “Prediksi umur pakai material ASTM A283 Grade C sebagai tangki timbun bahan bakar Pertamina menggunakan metode NDT,” vol. 7,

- Oct. 2024, Accessed: Aug. 03, 2026. [Online]. Available: <https://prosiding.unimus.ac.id/index.php/semnas/article/view/1798>
- [9] I. P. Astuti and R. R. Wahyu, "Analisa laju korosi tangki t-03 kapasitas 35000 m³ di perusahaan x," *Jurnal Ilmiah Indonesia*, vol. 4, p. 87, Feb. 2019, Accessed: Jan. 28, 2026. [Online]. Available: https://www.academia.edu/download/108504583/555-Article_Text-1482-1-10-20190301.pdf
- [10] R. Alida and A. A. Pajar, "Penentuan waktu pemakaian storage tank melalui analisa data hasil pengukuran ultrasonic thickness pada tangki tep-028 di stasiun pengumpul jemenang pt pertamina ep asset 2 field limau," *Jurnal Teknik Patra Akademika*, vol. 11, pp. 26–27, Oct. 2020.
- [11] Y. Miranda and M. A. Malik, "Analisa perbedaan temperatur pada material baja karbon rendah s355jo terhadap distorsi pada pengelasan smaw," vol. 9, Apr. 2018, Accessed: Jan. 29, 2026. [Online]. Available: <https://ejurnal.univbatam.ac.id/index.php/Mesin/article/view/149>
- [12] B. A. Sunar, P. D. Ubaszti, and R. D. Benhur, "*The Effect of Welding Parameters on Microstructure in Dissimilar Welding of Stainless Steel 316L and Structural Steel on Gas Metal Arc Welding (GMAW)*," Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, p. 1, Oct. 2019.
- [13] A. Amir, "Pengantar teknologi pengelasan," vol. 13, 2024, Accessed: Apr. 14, 2026. [Online]. Available: <https://repository.unsri.ac.id/143347/1/Buku%20Ajar-Pengantar%20Teknologi%20Pengelasan>
- [14] W. J. Tri, "Metode peningkatan tegangan tarik dan kekerasan pada baja karbon rendah melalui baja fasa ganda," vol. 10, Sep. 2005.

LAMPIRAN

1. Jadwal kegiatan

No	Kegiatan	WAKTU KEGIATAN																			
		2025				2026															
		Desember				Januari				Februari				Maret				April			
		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 kegiatan

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	Selang kang	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. Pembuatan spesimen



4. Persiapan mesin *friction welding*



5. Pengujian *friction welding*



