

**Pengujian kinerja alat *friction welding portable*
untuk perbaikan kebocoran pada tangki timbun
bahan bakar**

*Performance testing of a friction welding portable machine for fuel
storage tank leakage repair*

SKRIPSI

Oleh:

Nama: Rianki Febrianta

NPM: 223030019



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

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini,

N a m a : Rianki Febrianta

Nomor Pokok Mahasiswa : 223030019

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,



Rianki Febrianta

SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

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

N a m a : Rianki Febrianta

NPM : 223030019

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:

“Pengujian kinerja alat *friction welding portable* untuk perbaikan kebocoran pada tangki timbun bahan bakar”

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,



Rianki Febrianta

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Pengujian kinerja alat *friction welding portable* untuk perbaikan kebocoran pada tangki timbun bahan bakar



Nama: Rianki Febrianta
NPM: 223030019

Pembimbing Utama

Dr. Ir. Sugiharto, M.T.

Pembimbing Pendamping

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

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Pengujian kinerja alat *friction welding portable* untuk perbaikan kebocoran pada tangki timbun bahan bakar



Nama: Rianki Febrianta
NPM: 223030019

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 segala rahmat, karunia, serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "**Pengujian kinerja alat *friction welding portable* untuk perbaikan kebocoran pada tangki timbun bahan bakar**" dengan baik. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan tugas akhir guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis telah berupaya semaksimal mungkin agar penelitian yang dilakukan dapat tersusun dengan baik. Penulis berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat, menambah wawasan, serta menjadi referensi bagi pengembangan penelitian di bidang *friction welding portable* pada masa yang akan datang.

Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa hormat dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Untuk kedua orang tercinta, terutama Ibu Nina Herlina, Papah Moch Aam Resmana, Adik tercinta Reina Aprilianti, Nenek Nani Rosini, Almarhum Kakek Karma Suherman, serta seluruh keluarga tercinta yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang, dukungan moral maupun material, serta motivasi yang tiada henti kepada penulis selama menempuh pendidikan hingga menyelesaikan skripsi ini,
2. Bapak Dr. Ir. Sugiharto, M.T. selaku Dosen Pembimbing I, dan Bapak Dr. Ir. Muki Satya Permana, M.T. selaku Dosen Pembimbing II, yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan arahan, bimbingan, saran, serta motivasi kepada penulis selama proses penelitian hingga penyusunan skripsi ini,
3. Seluruh dosen dan staf Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan yang telah memberikan ilmu, pengalaman, bimbingan, serta pelayanan akademik kepada penulis selama menempuh pendidikan,
4. Rekan-rekan mahasiswa Program Studi Teknik Mesin Universitas Pasundan, khususnya Rodiana, Muhammad Athfal, Akbar Daya Utama, Ramdan Sidiq, serta teman-teman Pasgabat, yang telah memberikan bantuan, dukungan, semangat, serta menjadi teman berdiskusi dan berbagi pengalaman selama masa perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini,

5. Seseorang yang belum dapat penulis sebutkan namanya, yang senantiasa memberikan doa, dukungan, semangat, motivasi, serta menemani penulis dalam berbagai proses selama masa perkuliahan hingga penyelesaian skripsi ini. Penulis mengucapkan terima kasih atas segala perhatian dan dukungan yang telah diberikan,
6. Sahabat-sahabat penulis, khususnya Khalid Abdul Sadiq, Muhammad Aswaeni Muldea, Rangga Mulya Putra dan Yogi Andrean yang senantiasa memberikan dukungan, semangat, motivasi, serta menjadi tempat berbagi cerita dan berdiskusi selama masa perkuliahan hingga penyelesaian skripsi ini,
7. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu yang telah memberikan bantuan, doa, dan dukungan, baik secara langsung maupun tidak langsung, sehingga penelitian dan penyusunan skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki keterbatasan dan belum sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan sebagai bahan evaluasi dan penyempurnaan pada penelitian selanjutnya,

Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang teknik pengelasan (*friction welding*), serta menjadi referensi bagi penelitian dan pengembangan alat *friction welding portable* pada masa yang akan datang.

Bandung, 24 Juni 2026

Penulis,



Rianki Febrianta

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	XI
ABSTRAK	XII
<i>ABSTRACT</i>.....	XIII
BAB I PENDAHULUAN.....	14
1. Latar belakang	14
2. Rumusan masalah	15
3. Tujuan	15
4. Manfaat.....	15
5. Lingkup masalah.....	15
6. Sistematika penulisan	16
BAB II STUDI LITERATUR	18
1. Kajian pustaka	18
A. Penelitian Winiczenko (2016).....	18
B. Penelitian H. Firmanto, S. Candra, M. A. Hidayat, Y. P. Triastomo, dan I. Wirawan. (2023).....	19
C. Penelitian H. Ma, X. Wang (2015).....	19

D. Penelitian Z. Akbar (2025).....	20
2. Tangki bahan bakar (tangki timbun).....	20
3. Korosi pada tangki bahan bakar	22
A. Korosi internal.....	23
B. Korosi eksternal	23
4. Pengelasan (<i>welding</i>).....	23
5. <i>Friction welding</i>	25
6. Baja karbon rendah.....	26
7. <i>Stainless steel</i> AISI 304.....	27
A. <i>Austenitic stainless steel</i>	27
B. <i>Ferritic stainless steel</i>	28
C. <i>Martensitic stainless steel</i>	28
D. (<i>Precipitation-hardened stainless steel</i>).....	28
8. <i>Slenderness ratio</i>	29
BAB III METODOLOGI.....	30
1. Tahapan penelitian.....	30
2. Tempat penelitian	30
3. Perancangan eksperimen	31
A. Pembuatan spesimen	31
B. Pengujian menggunakan <i>friction welding portable</i>	32
BAB IV HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN	34
1. Pengujian kinerja alat <i>friction welding portable</i>	34
2. Evaluasi hasil pengujian menggunakan acuan penelitian sebelumnya.....	35
A. Material baja karbon rendah terhadap baja karbon rendah	36
B. Material <i>stainless steel</i> terhadap baja karbon rendah.....	38
3. Evaluasi hasil pengujian menggunakan parameter modifikasi.....	40
A. Baja karbon rendah terhadap baja karbon rendah	40

B.	<i>Stainless steel</i> AISI 304 terhadap baja karbon rendah	43
4.	Penyebab kegagalan pada sambungan	45
A.	Pengaruh putaran <i>spindle</i> terhadap pembentukan sambungan	45
B.	Perhitungan persentase penurunan putaran <i>spindle</i>	46
C.	Pengaruh gaya tekan pneumatic terhadap pembentukan sambungan	47
D.	Pengaruh diameter spesimen terhadap keberhasilan <i>friction welding</i>	50
E.	Ringkasan penyebab kegagalan pembentukan sambungan	52
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		55
1.	Kesimpulan	55
2.	Saran	55
DAFTAR PUSTAKA		56
LAMPIRAN		58
1.	Jadwal kegiatan	58
2.	Anggaran kegiatan	58
3.	Foto foto kegiatan	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Percobaan pengelasan gesek	18
Gambar 2. Hasil dari <i>friction welding</i>	19
Gambar 3. Karakterisasi sambungan <i>friction welding</i>	20
Gambar 4. Perbedaan <i>aboveground tank</i> dan <i>underground tank</i>	21
Gambar 5. Perbedaan <i>fixed roof tank</i> dan <i>floating roof tank</i>	22
Gambar 6. Korosi pada tangka timbun (<i>storage tank</i>)	22
Gambar 7. Perbedaan <i>fusion welding</i> dan <i>solid state welding</i>	24
Gambar 8. Jenis <i>friction welding</i>	25
Gambar 9. Diagram fasa Fe-Fe ₃ C	26
Gambar 10. <i>Stainless steel</i>	27
Gambar 11. Alur diagram penelitian.....	30
Gambar 12. Laboratorium Teknik Mesin Universitas Pasundan Bandung.....	31
Gambar 13. Dimensi spesimen pengujian <i>friction welding portable</i>	31
Gambar 14. Pengujian menggunakan alat <i>friction welding</i>	32
Gambar 15. Alat <i>friction welding portable</i> yang digunakan pada proses pengujian	34
Gambar 16. Grafik nilai torsi pada parameter acuan peneliti sebelumnya	37
Gambar 17. Hasil pengujian menggunakan alat <i>friction welding portable</i>	37
Gambar 18. Grafik nilai torsi pada parameter acuan penelitian sebelumnya.....	38
Gambar 19. Hasil pengujian menggunakan alat <i>friction welding portable</i>	39
Gambar 20. Proses <i>friction welding portable</i>	44
Gambar 21. Pengukuran putaran <i>spindle</i> tanpa beban menggunakan stroboscope.....	45
Gambar 22. Pengukuran putaran <i>spindle</i> saat proses <i>friction welding</i> berlangsung.....	45

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Persentasi unsur baja karbon.....	26
Tabel 2. Hasil pemeriksaan awal kinerja alat <i>friction welding portable</i>	35
Tabel 3. Hasil pengujian pada <i>friction welding</i>	36
Tabel 4. Hasil pengujian pada <i>friction welding portable</i>	36
Tabel 5. Hasil pengujian pada <i>friction welding</i>	38
Tabel 6. Hasil pengujian pada <i>friction welding portable</i>	38
Tabel 7. Pengujian parameter modifikasi	40
Tabel 8. Dokumentasi hasil pengujian menggunakan parameter modifikasi.....	41
Tabel 9. Pengujian menggunakan parameter modifikasi	43
Tabel 10. Perbandingan silinder pneumatik yang digunakan	47
Tabel 11. Gambar perbandingan spesimen dengan diameter 8 mm dan diameter 3 mm .	50
Tabel 12. Ringkasan faktor penyebab kegagalan pembentukan sambungan	53

ABSTRAK

Kebocoran pada tangki timbun bahan bakar memerlukan metode perbaikan yang mempertimbangkan aspek keselamatan, terutama terhadap risiko penggunaan proses pengelasan yang menghasilkan percikan api. *Friction welding* merupakan metode pengelasan *solid-state* yang memanfaatkan panas akibat gesekan dan gaya tekan untuk membentuk sambungan tanpa mencairkan material. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja alat *friction welding portable* dalam proses penyambungan baja karbon rendah terhadap baja karbon rendah dan *stainless steel* AISI 304 terhadap baja karbon rendah, serta menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi kegagalan pembentukan sambungan. Pengujian dilakukan menggunakan parameter yang mengacu pada penelitian sebelumnya dan dilanjutkan dengan modifikasi diameter spesimen, tekanan pneumatik, serta waktu gesekan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat *friction welding portable* mampu beroperasi secara mekanis, tetapi belum mampu menghasilkan sambungan permanen. Putaran *spindle* tanpa beban mencapai 1340 rpm dan mengalami penurunan menjadi sekitar 1090 rpm selama proses pengelasan. Pada pengujian parameter modifikasi, spesimen baja karbon rendah berdiameter 4 mm dan 5 mm sempat membentuk sambungan tetapi kembali terlepas. Pada pengujian *stainless steel* AISI 304 berdiameter 5 mm dengan tekanan 150 psi terbentuk *flash* berbentuk cincin, namun sambungan permanen belum berhasil diperoleh. Hasil analisis menunjukkan bahwa pembentukan sambungan dipengaruhi oleh penurunan putaran *spindle* saat pembebanan, kemampuan gaya tekan sistem pneumatik, diameter spesimen, serta kombinasi parameter proses yang digunakan. Oleh karena itu, pengembangan alat selanjutnya perlu mempertimbangkan peningkatan dan kestabilan putaran *spindle* serta kapasitas gaya tekan sistem pneumatik.

Kata kunci: *friction welding portable*, baja karbon rendah, *stainless steel* AISI 304, putaran *spindle*, sistem pneumatik.

ABSTRACT

Fuel storage tank leakage requires a repair method that considers safety aspects, particularly the risks associated with welding processes that generate sparks. Friction welding is a solid-state welding method that utilizes heat generated by friction and axial pressure to form a joint without melting the materials. This study aims to evaluate the performance of a friction welding portable device in joining low-carbon steel to low-carbon steel and stainless steel AISI 304 to low-carbon steel, as well as to analyze the factors affecting joint formation failure. The tests were conducted using parameters based on previous research, followed by modifications to specimen diameter, pneumatic pressure, and friction time. The results showed that the friction welding portable device was mechanically operational but was unable to produce a permanent joint. The spindle speed reached 1340 rpm under no-load conditions and decreased to approximately 1090 rpm during the welding process. In the modified-parameter tests, the 4 mm and 5 mm low-carbon steel specimens temporarily formed joints but separated after the process. For the 5 mm stainless steel AISI 304 specimen tested at 150 psi, a ring-shaped flash was formed, although a permanent joint was not achieved. The analysis indicated that joint formation was affected by the decrease in spindle speed under load, the force capacity of the pneumatic system, specimen diameter, and the combination of process parameters. Therefore, further development of the device should consider increasing and stabilizing the spindle speed as well as increasing the force capacity of the pneumatic system.

Keywords: *friction welding portable , low-carbon steel, stainless steel AISI 304, spindle speed, pneumatic system.*

BAB I PENDAHULUAN

1. Latar belakang

Masalah kebocoran pada tangki penyimpanan bahan bakar di PT Pertamina merupakan kejadian yang kerap muncul dan menuntut penanganan yang cepat. Kondisi ini tidak bisa dianggap sepele karena berisiko memicu kebakaran, mengganggu jalannya operasional, hingga menimbulkan dampak pencemaran lingkungan. Salah satu kasus nyata terjadi di Fuel Terminal Tuban PT Pertamina pada 10 Juni 2024, di mana kebocoran yang terjadi menyebabkan penyebaran gas berbahaya hingga ke area permukiman warga [1]. Situasi tersebut menunjukkan bahwa diperlukan langkah penanganan yang sigap dan tepat guna meminimalkan risiko yang lebih besar.

Perbaikan kebocoran pada tangki bahan bakar bukanlah pekerjaan yang sederhana, mengingat di dalamnya terdapat zat yang sangat mudah terbakar. Penggunaan metode konvensional seperti pengelasan busur listrik justru berpotensi menimbulkan percikan api yang dapat memicu kebakaran bahkan ledakan. Oleh karena itu, setiap proses perbaikan harus benar-benar memperhatikan aspek keselamatan, menjaga kekuatan struktur tangki, serta memastikan tangki tetap dapat digunakan dengan aman setelah diperbaiki.

Langkah awal yang tidak boleh diabaikan adalah memastikan kondisi tangki sudah aman untuk diperbaiki. Operasi tangki harus dihentikan terlebih dahulu, kemudian isinya dikosongkan dan dilakukan pembersihan secara menyeluruh. Selain itu, tangki juga harus dipastikan sudah bebas dari uap atau gas yang mudah terbakar sebelum pekerjaan perbaikan dimulai [2].

Untuk mendukung proses penanganan kebocoran tangki timbun secara cepat tanpa memerlukan persiapan area yang kompleks, diperlukan metode pengelasan yang lebih aman. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah pengelasan berbasis (*solid-state*), karena proses ini tidak menimbulkan percikan api sehingga lebih aman diterapkan pada lingkungan yang mengandung bahan mudah terbakar.

Metode *friction welding* menjadi salah satu pilihan yang relevan untuk perbaikan tangki timbun, karena memanfaatkan kombinasi gaya tekanan dan gesekan untuk menghasilkan panas yang diperlukan dalam proses penyambungan material.

2. Rumusan masalah

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

- a. Bagaimana kinerja alat *friction welding portable* dalam menghasilkan sambungan pada material baja karbon rendah dengan baja karbon rendah serta *stainless steel* AISI 304 dengan baja karbon rendah?
- b. Bagaimana hasil pengujian alat *friction welding portable* menggunakan parameter acuan penelitian sebelumnya dan parameter modifikasi?
- c. Faktor-faktor apa saja yang menyebabkan kegagalan sambungan pada pengujian menggunakan alat *friction welding portable*?

3. Tujuan

- a. Mengevaluasi kinerja alat *friction welding portable* dalam menghasilkan sambungan pada material baja karbon rendah dengan baja karbon rendah serta *stainless steel* AISI 304 dengan baja karbon rendah.
- b. Mengevaluasi hasil pengujian alat *friction welding portable* menggunakan parameter acuan penelitian sebelumnya dan parameter modifikasi.
- c. Menganalisis faktor-faktor yang menyebabkan kegagalan sambungan pada proses *friction welding portable*.

4. Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan tambahan informasi dan data mengenai pengujian alat *friction welding portable* dalam proses penyambungan material baja karbon rendah dan *stainless steel* AISI 304. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan evaluasi dan referensi dalam pengembangan alat *friction welding portable* pada penelitian selanjutnya, serta memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi *friction welding* untuk aplikasi perbaikan kebocoran tangki timbun bahan bakar.

5. Lingkup masalah

Untuk menjaga supaya penelitian tetap terarah dan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Mengevaluasi kinerja alat *friction welding portable* pada penyambungan baja karbon rendah terhadap baja karbon rendah serta baja karbon rendah terhadap *stainless steel* AISI 304.
- b. Mengevaluasi hasil pengelasan menggunakan parameter acuan penelitian sebelumnya dan parameter modifikasi.
- c. Menganalisis faktor penyebab kegagalan sambungan pada proses *friction welding portable*.

6. Sistematika penulisan

Sistematika penulisan dalam penelitian ini disusun untuk memudahkan pembaca dalam memahami isi laporan skripsi secara keseluruhan. Adapun sistematika penulisan yang digunakan adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

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

BAB II STUDI LITERATUR

Pada bab ini menjelaskan tentang kajian pustaka, tangki bahan bakar (tangki timbun), korosi pada tangki bahan bakar, pengelasan (*welding*), *friction welding*, baja karbon rendah, *stainless steel* AISI 304, *slenderness ratio*.

BAB III METODOLOGI

Bab ini menjelaskan tahapan penelitian yang digunakan, tempat penelitian, serta perancangan eksperimen. Yang mencakup pembuatan spesimen dan pengujian menggunakan alat *friction welding portable*.

BAB IV HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini menjelaskan tentang pengujian kinerja alat *friction welding portable*, evaluasi hasil menggunakan parameter acuan penelitian sebelumnya, evaluasi hasil pengujian menggunakan parameter modifikasi, serta penyebab kegagalan pada sambungan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini menjelaskan tentang kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan serta saran yang dapat digunakan sebagai bahan pengembangan dan penyempurnaan penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

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

LAMPIRAN

Pada lampiran ini menjelaskan 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.

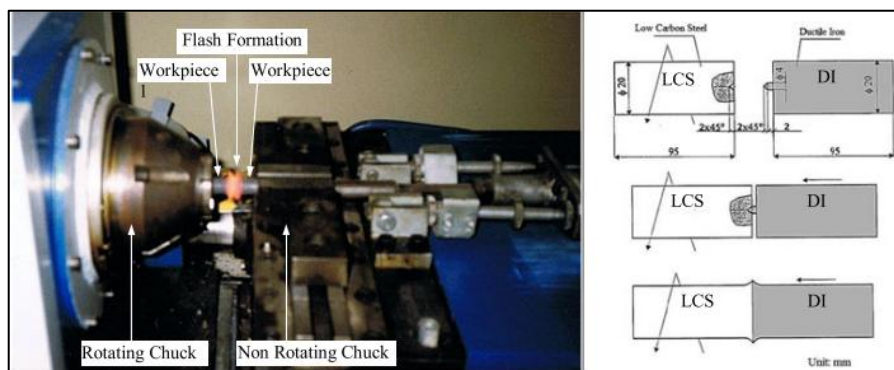
BAB II STUDI LITERATUR

1. Kajian pustaka

Penelitian ini didasarkan pada berbagai penelitian terdahulu yang relevan dengan topik yang dibahas. Kajian penelitian terdahulu digunakan sebagai landasan dalam memahami perkembangan penelitian mengenai *friction welding*, sekaligus sebagai referensi dan pembandingan dalam pelaksanaan penelitian ini. Salah satu penelitian yang dijadikan referensi adalah penelitian yang dilakukan oleh Winiczenko (2016), Penelitian Hudiyo Firmanto, Susila Candra, Mochammad Arbi Hidayat, Yesa priscilla Triastomo, dan Ivan Wirawan. (2023), Penelitian Hong Ma, Xiangdong Wang dkk. (2015). yang membahas karakteristik sambungan hasil *friction welding* serta pengaruh parameter proses terhadap kualitas sambungan. Penelitian tersebut menjadi salah satu acuan dalam penyusunan metode dan analisis pada penelitian ini.

A. Penelitian Winiczenko (2016)

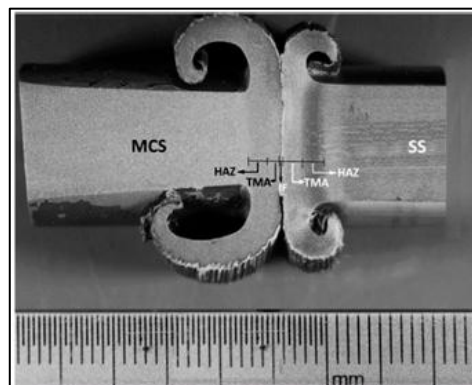
Penelitian yang dilakukan oleh winiczenko membahas pengaruh parameter proses *friction welding* terhadap sambungan material berbeda yaitu baja karbon AISI 1020. Variabel yang diteliti meliputi tekanan tempa (*upset pressure*), tekanan gesek (*friction pressure*), dan waktu pengelasan. Evaluasi hasil sambungan dilakukan melalui pengujian tarik serta pengamatan struktur mikro pada daerah las. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi parameter yang tepat mampu meningkatkan kekuatan tarik sambungan dan menghasilkan struktur mikro yang lebih homogen pada daerah antarmuka las. Selain itu, Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi parameter proses yang tepat mampu meningkatkan kekuatan tarik sambungan, menghasilkan struktur mikro yang lebih homogen, serta memengaruhi pembentukan *flash* pada daerah sambungan. [3]



Gambar 1. Percobaan pengelasan gesek

B. Penelitian Hudiyo Firmanto, Susila Candra, Mochammad Arbi Hidayat, Yesa priscilla Triastomo, dan Ivan Wirawan (2023)

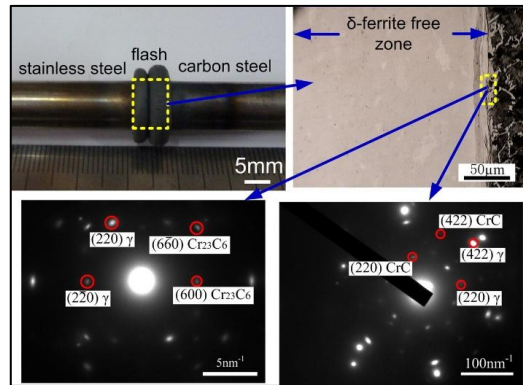
Penelitian yang dilakukan oleh Hudiyo Firmanto dkk. Pada tahun 2023 meneliti penyambungan baja karbon dan *stainless steel* AISI 304 menggunakan *metode rotary friction welding*. Penelitian dilakukan untuk menganalisis pengaruh parameter pengelasan terhadap kekuatan tarik dan mikrostruktur sambungan. Pengujian yang digunakan meliputi uji tarik dan pengamatan mikrostruktur menggunakan mikroskop metalografi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi parameter pengelasan berpengaruh terhadap kualitas sambungan, di mana terbentuk struktur antarmuka yang mampu meningkatkan kekuatan mekanik hasil las. Penelitian ini membuktikan bahwa *rotary friction welding* efektif diterapkan untuk menyambung logam tidak sejenis pada aplikasi industri.[4]



Gambar 2. Hasil dari *friction welding*

C. Penelitian Hong Ma, Xiangdong Wang dkk. (2015)

Penelitian yang dilakukan oleh Ma dkk. Pada tahun 2015 mengkaji struktur mikro dan sifat mekanik sambungan antara baja karbon AISI 1045 dan *stainless steel* AISI 304 yang disambung menggunakan metode *friction welding*. Penelitian dilakukan melalui pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik dan SEM, analisis unsur menggunakan EDS, pengujian kekerasan mikro *Vickers*, serta uji tarik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada daerah antarmuka terjadi deformasi plastis yang tinggi sehingga terbentuk zona *mechanical mixing* dan penyempurnaan ukuran butir.[5] Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa proses *friction welding* mampu menghasilkan sambungan logam tidak sejenis dengan karakteristik mikrostruktur yang baik apabila menggunakan kombinasi parameter proses yang sesuai.



Gambar 3. Karakterisasi sambungan *friction welding*

D. Penelitian Zaenudin Akbar (2025)

Penelitian yang dilakukan oleh Zaenudin akbar Program Studi Teknik Mesin Universitas Pasundan melakukan penelitian berjudul "*Analisis Pengaruh Waktu Pengelasan Gesek Material Baja ST37 terhadap Kekuatan Fatigue*". Penelitian tersebut bertujuan menganalisis pengaruh variasi waktu pengelasan gesek terhadap kekuatan fatigue baja ST37. Pengujian dilakukan menggunakan variasi waktu pengelasan 90 detik, 120 detik, dan 150 detik dengan kecepatan putar 1400 rpm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu pengelasan berpengaruh terhadap ketahanan fatigue sambungan, sehingga pemilihan parameter pengelasan yang tepat menjadi faktor penting dalam meningkatkan kualitas sambungan hasil *friction welding*. [6]

Penelitian tersebut berfokus pada pengaruh waktu pengelasan terhadap kekuatan fatigue sambungan yang telah berhasil terbentuk, sedangkan penelitian ini berfokus pada evaluasi kinerja alat *friction welding portable* dalam menghasilkan sambungan serta menganalisis faktor-faktor yang menyebabkan kegagalan pembentukan sambungan.

2. Tangki bahan bakar (tangki timbun)

Dalam industri perminyakan, keberadaan tangki timbun (*storage tank*) menjadi elemen yang sangat vital dalam menunjang kelancaran proses produksi. Fungsinya tidak hanya sebagai tempat penyimpanan, tetapi juga sebagai sarana penimbunan berbagai jenis fluida, mulai dari minyak mentah, bahan bakar minyak (BBM), produk hasil pengolahan, hingga bahan kimia lainnya. Tangki timbun sendiri memiliki variasi bentuk dan tipe yang beragam, di mana masing-masing dirancang dengan karakteristik, keunggulan, serta keterbatasan yang berbeda sesuai kebutuhan operasional. Ditinjau dari tekanan kerjanya, tangki penyimpanan umumnya diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama, yaitu tangki

atmosferik yang beroperasi pada tekanan rendah dan tangki bertekanan (*pressure tank*) yang digunakan pada tekanan di atas 11,1 psi [7].

Seiring dengan pentingnya peran tangki tersebut, aspek pemeliharaan dan perbaikannya juga menjadi hal yang tidak kalah krusial. Salah satu pendekatan yang mulai dikembangkan adalah pemanfaatan alat *friction welding portable* sebagai metode perbaikan, yang kemudian perlu diuji kinerjanya untuk memastikan keamanan serta efektivitasnya dalam aplikasi di lapangan.

Jika ditinjau dari lokasi pemasangannya, tangki penyimpanan dapat dikelompokkan menjadi dua jenis utama, yaitu tangki yang berada di atas permukaan tanah dan tangki yang ditanam di bawah permukaan tanah. Tangki yang dipasang di atas tanah umumnya dimanfaatkan untuk menyimpan minyak seperti fuel oil serta berbagai cairan yang mengandung bahan kimia. Sementara itu, tangki yang ditempatkan di bawah tanah lebih banyak digunakan sebagai sarana penyimpanan bahan bakar minyak, khususnya pada fasilitas stasiun pengisian bahan bakar umum [7].



Aboveground tank



Underground tank

Gambar 4. Perbedaan *aboveground tank* dan *underground tank*

Dilihat dari konstruksi atapnya, tangki penyimpanan umumnya dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *fixed roof tank* dan *floating roof tank*. Pada *fixed roof tank*, bagian atap menyatu dengan dinding tangki dan biasanya memiliki bentuk kerucut (*cone*) atau kubah (*dome*). Sementara itu, *floating roof tank* dirancang dengan atap yang dapat bergerak mengikuti permukaan cairan di dalam tangki. Untuk meminimalkan keluarnya uap minyak melalui celah antara atap dan dinding, tangki jenis ini dilengkapi dengan sistem *seal* sebagai penahan uap [7].

Dalam industri minyak dan gas, tangki timbun (*storage tank*) memegang peranan penting sebagai sarana penyimpanan berbagai fluida, mulai dari bahan bakar, minyak mentah, pelumas, hingga produk kimia lainnya.



fixed roof tank



floating roof tank

Gambar 5. Perbedaan *fixed roof tank* dan *floating roof tank*

Dalam pembuatannya, material yang sering digunakan adalah baja karbon rendah (*low carbon steel*), karena dinilai memiliki kombinasi kekuatan dan ketahanan yang memadai untuk kebutuhan operasional. Salah satu jenis baja yang banyak diaplikasikan pada konstruksi tangki adalah ASTM A283 Grade C [4]. Meskipun konstruksi tangki timbun pada industri umumnya menggunakan ASTM A283 Grade C, pada penelitian ini material pengujian menggunakan ASTM A36 sebagai representasi baja karbon rendah yang memiliki karakteristik mekanik sejenis dan lebih mudah diperoleh untuk keperluan penelitian laboratorium.

3. Korosi pada tangki bahan bakar

Korosi adalah fenomena penurunan mutu material yang terjadi akibat interaksi kimia maupun elektrokimia dengan lingkungan di sekitarnya. Pada tangki timbun (*storage tank*), masalah kebocoran sering kali muncul sebagai dampak dari proses tersebut, yang pada akhirnya dapat mengganggu kinerja tangki sekaligus menurunkan mutu minyak bumi yang disimpan. Selain itu, kandungan pengotor (*impurities*) dalam minyak mentah juga menjadi salah satu faktor yang mempercepat terjadinya korosi pada bagian dinding tangki [8].



Gambar 6. Korosi pada tangka timbun (*storage tank*)

Material yang digunakan dalam konstruksi tangki timbun pada umumnya berupa baja, yang pada kondisi tertentu cukup rentan terhadap serangan korosi. Korosi sendiri merupakan bentuk kerusakan pada logam yang disebabkan oleh reaksi kimia maupun elektrokimia dengan lingkungan di sekitarnya. Laju terjadinya korosi dapat meningkat

akibat pengaruh faktor eksternal, seperti adanya kontak dengan komponen lain yang saling terhubung serta kondisi lingkungan yang memiliki sifat korosif. Secara umum, korosi pada tangki timbun dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu:

A. Korosi internal

Korosi jenis ini terjadi pada permukaan bagian dalam tangki dan umumnya dipicu oleh keberadaan gas seperti CO₂ dan H₂S yang terkandung dalam minyak bumi. Ketika gas tersebut beraksi dengan air, dapat terbentuk senyawa asam yang bersifat korosif, sehingga mempercepat penurunan kualitas material dan dinding bagian dalam tangki.

B. Korosi eksternal

Korosi eksternal terjadi pada sisi luar tangki yang berinteraksi langsung dengan lingkungan, seperti udara, tanah, maupun air, sehingga berpotensi menimbulkan kerusakan pada permukaan luar tangki [9].

Apabila tangki timbun mengalami kebocoran akibat korosi, maka diperlukan tindakan perbaikan, salah satunya melalui metode penambalan pada bagian yang rusak. Proses ini tidak dapat dilakukan secara sembarangan, mengingat tingkat risikonya cukup tinggi. Tangki yang masih mengandung sisa bahan mudah terbakar berpotensi menimbulkan kebakaran bahkan ledakan apabila prosedur perbaikan tidak dilaksanakan sesuai dengan standar yang berlaku.

4. Pengelasan (*welding*)

Berdasarkan standar DIN (*Deutsche Industrie Norm*), pengelasan diartikan sebagai proses terbentuknya ikatan metalurgi pada sambungan logam atau paduannya yang berlangsung dalam kondisi mencair. Secara umum, pengelasan dapat dipahami sebagai metode penyambung dua material logam melalui pemanasan hingga bagian yang disambungkan mengalami peleburan, yang biasanya diperoleh dari sumber panas seperti busur listrik [10]. Ditinjau dari kondisi material selama proses penyambungan, teknik pengelasan secara garis besar dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu pengelasan fusi (*fusion welding*) dan pengelasan dalam keadaan padat (*solid-state welding*).



Fusion welding



Solid state welding

Gambar 7. Perbedaan *fusion welding* dan *solid state welding*

Pengelasan fusi (*fusion welding*) adalah metode penyambungan yang dilakukan dengan cara melelehkan sebagian logam induk, kemudian diikuti oleh proses pembekuan kembali (*solidifikasi*) sehingga terbentuk ikatan antar material. Pada proses ini, panas yang digunakan umumnya berasal dari busur listrik yang muncul antara elektroda dan logam yang akan disambung [11]. Dalam praktiknya, teknik ini banyak digunakan untuk menyambung berbagai bentuk material seperti pelat datar, pelat bersudut, hingga pipa. Beberapa jenis pengelasan fusi yang umum diterapkan di antaranya adalah *gas tungsten arc welding* (GTAW), *shielded metal arc welding* (SMAW), serta *metal inert gas* (MIG).

Pengelasan *solid state* merupakan metode penyambungan material yang terjadi akibat pemberian tekanan, atau kombinasi antara tekanan dan panas, tanpa melewati fase cair. Apabila panas digunakan dalam proses ini, suhu yang diterapkan tetap berada di bawah titik leleh material yang disambung.

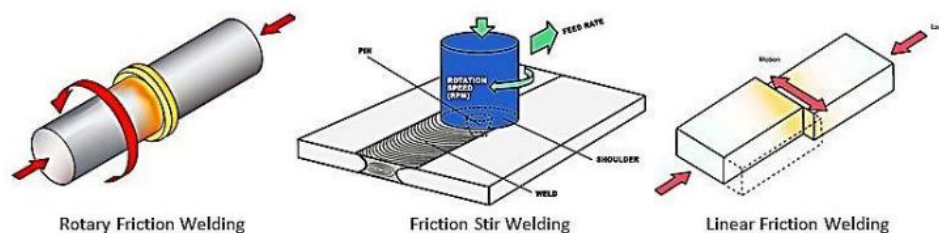
Salah satu jenisnya adalah *diffusion welding* (DFW), yaitu proses penyambungan dengan cara mempertemukan dua permukaan material kemudian diberi tekanan pada suhu tinggi, sehingga terjadi perpindahan atom (*difusi*) di area kontak. Berbeda dengan pengelasan fusi, proses ini berlangsung tanpa mencairkan material, sehingga tidak melibatkan tahap peleburan selama pembentukan sambungan.

Karakteristik pada *solid state welding* memungkinkan metode ini, khususnya pengelasan difusi, digunakan pada material yang memiliki titik leleh tinggi atau mudah mengalami deformasi akibat panas. Teknik ini banyak dimanfaatkan pada sektor industri yang menuntut kekuatan sambungan dan kualitas performa yang tinggi, seperti pada bidang kedirgantaraan dan otomotif [12]. Beberapa jenis pengelasan *solid state* yang umumnya dijumpai antara lain *friction welding* (FRW), *friction stir welding* (FSW), *diffusion welding* (DFW), *ultrasonic welding* (USW), serta metode lainnya.

5. Friction welding

Dalam proses pengelasan modern, *friction welding* (FRW) atau pengelasan gesek termasuk ke dalam kategori *solid-state* yang memanfaatkan panas akibat gesekan untuk menyambungkan logam. Panas tersebut dihasilkan dari interaksi langsung antara dua material yang saling bergesekan, tanpa memerlukan sumber panas tambahan seperti listrik maupun pembakaran.

Energi mekanik yang diberikan selama proses akan dikonversi menjadi energi panas pada area kontak. Kenaikan temperatur yang terjadi bersifat lokal pada permukaan antarmuka, sehingga material tidak sampai melebur. Penyambungan berlangsung ketika kondisi temperatur masih berada di bawah titik leleh, di mana tekanan yang diberikan menyebabkan *deformasi plastis* serta memungkinkan terjadinya difusi antar material hingga terbentuk ikatan yang kuat. Secara umum metode *friction welding* terdiri atas beberapa jenis yang sering digunakan, di antaranya *rotary friction welding*, *friction stir welding*, dan *linear friction welding*.



Gambar 8. Jenis *friction welding*

Dalam penerapan *friction welding*, keberhasilan proses penyambungan tidak terlepas dari beberapa faktor yang berkaitan dengan kondisi kerja maupun karakteristik material yang digunakan. Di sisi pengujian, diperlukan sejumlah alat ukur untuk memastikan parameter proses dapat terkontrol dengan baik, seperti:

- Tachometer* : untuk mengetahui kecepatan putaran,
- Pressure gauge* : untuk memantau tekanan yang diberikan,
- Stop Watch* : untuk mengukur durasi proses,
- Thermo gun* dan *thermocouple* : untuk mengetahui temperatur pada permukaan sambungan.

Selain itu, sifat material juga memiliki peran penting. Material yang digunakan sebaiknya memiliki kemampuan tempa (*forgeability*) yang baik serta mampu menghasilkan gesekan yang cukup pada area kontak. Sebaliknya, material yang bersifat getas atau memiliki

karakteristik pelumasan kering (*dry lubrication*), seperti besi tuang, keramik, dan material berbasis karbida, umumnya kurang cocok untuk proses *friction welding* [5]. Adapun parameter hasil yang biasanya dianalisis dalam pengujian meliputi kekuatan puntir, kekuatan tarik, serta karakteristik mikrostruktur pada daerah sambungan.

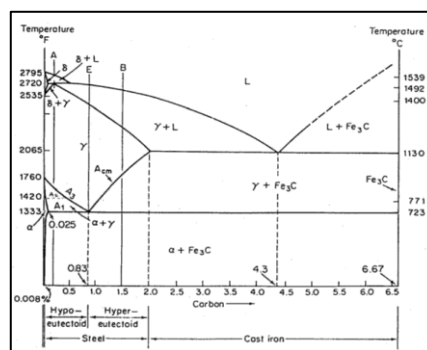
6. Baja karbon rendah

Dalam dunia material, baja karbon rendah dikenal sebagai baja dengan kandungan karbon di bawah 0,25%. Untuk memahami komposisi dan karakteristiknya secara lebih rinci, klasifikasi baja karbon umumnya disajikan berdasarkan kandungan unsur karbon dalam bentuk tabel sebagai acuan pembahasan.

Tabel 1. Persentasi unsur baja karbon

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

Selain kandungan karbon, keberadaan unsur paduan lain dalam baja juga memiliki batasan tertentu, seperti mangan (Mn) yang umumnya dibatasi hingga 0,8%, silikon (Si) maksimal 0,5% serta tembaga (Cu) tidak lebih dari 0,6%. Pengelompokan baja karbon sendiri didasarkan pada kadar karbon yang terkandung di dalamnya, yang dapat dipahami melalui diagram fasa Fe- Fe₃C.



Gambar 9. Diagram fasa Fe-Fe₃C

Berdasarkan diagram tersebut, baja karbon rendah termasuk dalam kategori hipoeutektoid, karena kandungan karbonnya berada di bawah 0,8%, bahkan pada kasus ini hanya sekitar 0,112% C [13].

7. *Stainless steel* AISI 304

Stainless steel merupakan salah satu jenis baja paduan yang mengandung unsur kromium (Cr) sedikitnya 10,5%. Kandungan kromium tersebut berperan dalam membentuk lapisan pelindung pasif pada permukaan material, sehingga membuatnya lebih tahan terhadap serangan korosi dibandingkan baja biasa. Berdasarkan struktur mikronya, *stainless steel* secara umum dibedakan menjadi empat kelompok, yaitu *austenitik stainless steel*, *Ferritic*, *duplex* (gabungan *Ferritic* dan *austenitik*), serta *martensitik*.



Gambar 10. *Stainless steel*

A. *Austenitic stainless steel*

Austenitik stainless steel merupakan jenis baja tahan karat yang paling banyak digunakan karena memiliki ketahanan korosi yang sangat baik serta sifat mekanik yang tinggi. Material ini umumnya mengandung kromium (Cr) sekitar 16–26%, nikel (Ni) sekitar 8–22%, mangan (Mn) hingga 2%, karbon (C) maksimum 0,08%, serta sejumlah kecil nitrogen (N) yang berperan dalam menjaga kestabilan fasa austenit pada berbagai temperatur.

Pada kelompok *austenitik stainless steel* seri 2xx (Cr–Mn–Ni), kandungan mangan dan nitrogen dibuat lebih tinggi untuk menggantikan sebagian kandungan nikel, dengan kadar mangan berkisar antara 5,5–15,5% dan kandungan nikel umumnya hingga sekitar 6%. Sementara itu, seri 3xx (Cr–Ni) memiliki kandungan nikel yang lebih tinggi, sedangkan kandungan mangan umumnya tidak melebihi 2%.

Untuk meningkatkan performa material, beberapa unsur paduan tambahan sering digunakan. Molibdenum (Mo), tembaga (Cu), dan silikon (Si) ditambahkan untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi. Sementara itu, titanium (Ti) dan niobium (Nb) berfungsi meningkatkan stabilitas struktur material serta mengurangi risiko terjadinya korosi intergranular pada batas butir material [14].

B. *Ferritic stainless steel*

Ferritic stainless steel merupakan jenis baja tahan karat yang memiliki kandungan kromium (Cr) sekitar 10,5-30% dan dapat dipadukan dengan beberapa unsur lain, seperti niobium (Nb), silikon (Si), molibdenum (Mo), nikel (Ni), aluminium (Al), serta titanium (Ti). Material ini umumnya memiliki kekuatan luluh (yield strength) pada kisaran 275-415 MPa. Selain itu, *ferritic stainless steel* dikenal memiliki sifat mekanik yang cukup baik, ketahanan terhadap korosi dalam lingkungan cair, kemampuan menahan oksidasi pada suhu tinggi, serta ketahanan yang baik terhadap korosi sumuran (*pitting corrosion*) [14].

C. *Martensitic stainless steel*

Martensitic stainless steel merupakan kelompok baja tahan karat yang mengandung kromium (Cr) sekitar 11,5-18% dan karbon (C) berkisar antara 0,08-1,20%. Selain kedua unsur tersebut, material ini juga mengandung unsur paduan lain dalam jumlah yang relatif kecil, umumnya kurang dari 2-3%. Kandungan karbon yang lebih tinggi dibandingkan jenis *stainless steel* lainnya memberikan kemampuan pengerasan yang baik, sehingga material ini sering digunakan pada komponen yang memerlukan kekuatan dan ketahanan aus yang tinggi [14].

D. (*Precipitation-hardened stainless steel*)

Stainless steel pengerasan presipitasi merupakan jenis baja tahan karat yang memiliki kombinasi kekuatan tinggi, keuletan yang baik, serta ketahanan korosi yang cukup baik. Karakteristik tersebut diperoleh melalui proses perlakuan panas yang melibatkan pembentukan struktur martensit dan dilanjutkan dengan proses aging pada temperatur tertentu. Untuk meningkatkan kekuatan material, baja ini umumnya mengandung unsur paduan seperti molibdenum (Mo), tembaga (Cu), aluminium (Al), titanium (Ti), niobium (Nb), dan nitrogen (N) yang berperan dalam pembentukan presipitat penguat.

Salah satu jenis *austenitik stainless steel* yang paling banyak digunakan di dunia industri adalah *stainless steel* AISI 304. Material ini memiliki kandungan karbon maksimum 0,08%, kromium (Cr) sebesar 18–20%, nikel (Ni) sebesar 8–10,5%, mangan (Mn) maksimum 2%, silikon (Si) maksimum 1%, fosfor (P) maksimum 0,045%, sulfur (S) maksimum 0,03%, serta unsur besi (Fe) sebagai unsur utama. Kombinasi unsur tersebut menghasilkan material dengan ketahanan korosi yang baik, kemudahan dalam proses fabrikasi dan pengelasan, serta sifat mekanik yang tinggi. Secara umum, *stainless steel* AISI 304 memiliki kekuatan luluh (*yield strength*) sekitar 205 MPa, kekuatan tarik (*tensile strength*) sekitar 515 MPa, dan regangan (*elongation*) mencapai sekitar 40%. Oleh karena

itu, material ini banyak digunakan pada berbagai aplikasi yang membutuhkan ketahanan korosi serta keandalan struktur yang baik [14].

8. *Slenderness ratio*

Slenderness ratio merupakan perbandingan antara panjang efektif suatu batang terhadap jari-jari girasi (*radius of gyration*) penampangnya. Nilai *slenderness ratio* digunakan untuk menunjukkan tingkat kelangsingan suatu batang tekan (*compression member*) serta untuk mengevaluasi kecenderungan batang mengalami kegagalan akibat *buckling*. Semakin besar nilai *slenderness ratio*, maka semakin besar pula kecenderungan batang mengalami ketidakstabilan ketika menerima beban tekan. Sebaliknya, batang dengan nilai *slenderness ratio* yang kecil memiliki kekakuan yang lebih tinggi sehingga kecenderungan mengalami *buckling* menjadi lebih kecil.[15]

Menurut Shigley, *slenderness ratio* dinyatakan sebagai perbandingan antara panjang efektif batang (L_e) terhadap *radius of gyration* (r) penampang, yang dirumuskan sebagai berikut.

$$\lambda = \frac{L_e}{r} \quad (1)$$

dengan:

λ = *Slenderness ratio*

L_e = panjang efektif batang (mm)

r = *radius of gyration* penampang (mm)

Untuk penampang silinder pejal, *radius of gyration* diperoleh dari hubungan antara momen inersia penampang dan luas penampang, yaitu

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (2)$$

dengan:

I = momen inersia penampang

A = luas penampang

Pada penampang lingkaran pejal, persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi

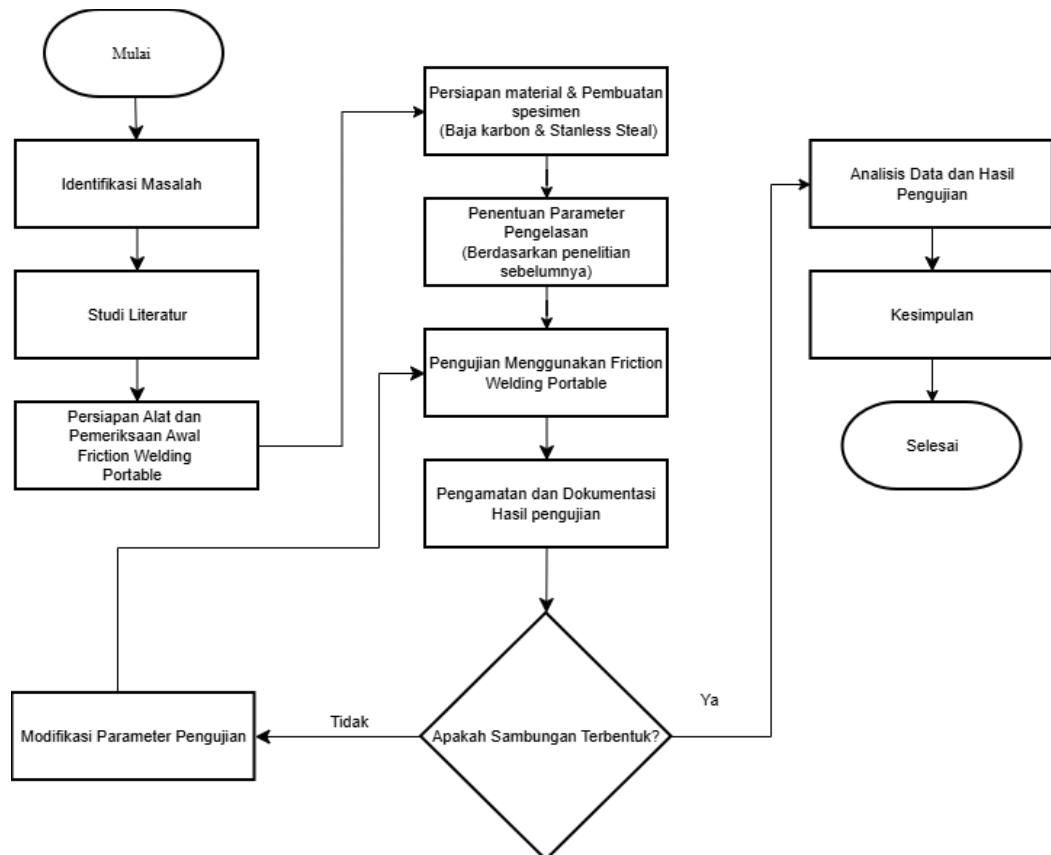
$$r = \frac{D}{4} \quad (3)$$

sehingga nilai *slenderness ratio* dapat dihitung berdasarkan panjang efektif dan diameter spesimen.[15]

BAB III METODOLOGI

1. Tahapan penelitian

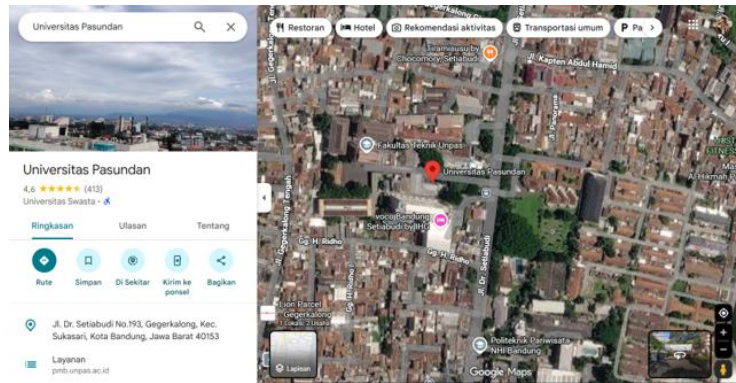
Tahapan penelitian yang dilakukan pada penelitian ini disusun secara sistematis mulai dari identifikasi masalah hingga penyusunan kesimpulan. Alur tahapan penelitian ditunjukkan pada gambar 11.



Gambar 11. Alur diagram penelitian

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. Tempat penelitian dapat dilihat pada gambar 13.



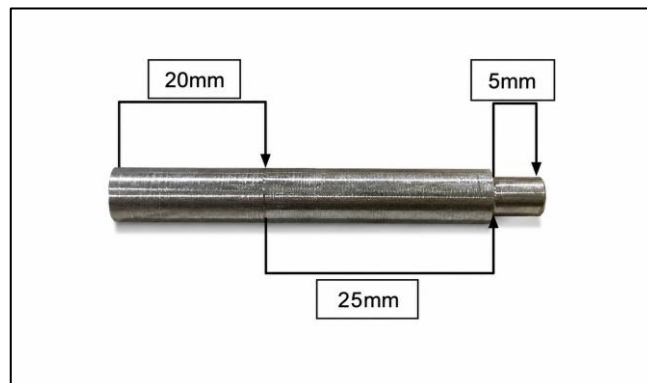
Gambar 12. Laboratorium Teknik Mesin Universitas Pasundan Bandung

3. Perancangan eksperimen

Perancangan eksperimen pada penelitian ini disusun secara sistematis untuk memperoleh data yang digunakan dalam mengevaluasi kinerja alat *friction welding portable*. Tahapan eksperimen meliputi pembuatan spesimen, pelaksanaan pengujian menggunakan alat *friction welding portable*, serta pengamatan dan dokumentasi hasil pengujian. Pengujian dilakukan menggunakan material ASTM A36 (baja karbon rendah) dan *stainless steel* AISI 304 dengan parameter pengujian yang mengacu pada penelitian sebelumnya serta parameter modifikasi yang telah ditentukan dalam penelitian ini.

A. Pembuatan spesimen

Pembuatan spesimen merupakan tahap awal yang dilakukan sebelum proses pengujian menggunakan alat *friction welding portable*. Spesimen dibuat menggunakan mesin bubut di Laboratorium Proses Manufaktur Universitas Pasundan dengan mengacu pada dimensi yang telah direncanakan. Material yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari ASTM A36 (baja karbon rendah) dan *stainless steel* AISI 304 sebagai benda uji pada proses *friction welding*.



Gambar 13. Dimensi spesimen pengujian *friction welding portable*

Spesimen dibuat dengan panjang total 50 mm. Bagian yang dijepit oleh *chuck* memiliki diameter tetap sebesar 6 mm, sedangkan bagian ujung spesimen yang digunakan sebagai daerah pengelasan dibuat dengan variasi diameter 8 mm, 5 mm, 4 mm, dan 3 mm sepanjang 5 mm. Variasi diameter tersebut digunakan untuk mengetahui pengaruh ukuran spesimen terhadap proses pembentukan sambungan pada alat *friction welding portable*. Dimensi spesimen yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Gambar 13. Berdasarkan dimensi tersebut, seluruh spesimen dibuat dengan bentuk yang sama, sedangkan perbedaan hanya terletak pada variasi diameter daerah pengelasan. Variasi ini digunakan untuk mengetahui pengaruh ukuran diameter terhadap proses pembentukan sambungan pada alat *friction welding portable*.

B. Pengujian menggunakan *friction welding portable*

Pengujian menggunakan alat *friction welding portable* dilakukan untuk mengetahui kemampuan alat dalam menghasilkan sambungan pada material baja karbon rendah dan *stainless steel* AISI 304. Sebelum pengujian dilakukan, seluruh komponen alat diperiksa terlebih dahulu untuk memastikan sistem penggerak, sistem pneumatik, serta sistem penjepit dapat beroperasi dengan baik.



Gambar 14. Pengujian menggunakan alat *friction welding*

- a. Memastikan seluruh komponen alat *friction welding portable* dalam kondisi baik dan siap digunakan.
- b. Memasang spesimen pada chuck pemutar dan sistem penekan sesuai dengan posisi pengujian.
- c. Mengatur tekanan udara pada sistem pneumatik sesuai parameter pengujian.
- d. Menjalankan motor listrik sehingga *spindle* berputar pada putaran kerja.

- e. Mengukur putaran spinder menggunakan *stroboscope* sebelum proses pengelasan dimulai.
- f. Melakukan proses *friction welding* dengan memberikan gaya tekan sesuai parameter yang ditentukan.
- g. Mengamati proses pembentukan sambungan serta mendokumentasikan kondisi spesimen setelah pengujian.
- h. Mengulangi proses pengujian untuk setiap variasi material dan parameter yang digunakan.

Seluruh hasil pengujian kemudian didokumentasikan dan dianalisis untuk mengetahui kinerja alat *friction welding portable* dalam membentuk sambungan pada masing-masing variasi parameter pengujian. Hasil analisis tersebut disajikan pada Bab IV.

BAB IV HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

1. Pengujian kinerja alat *friction welding portable*

Pengujian kinerja alat *friction welding portable* dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan alat yang telah dibuat dalam melaksanakan proses penyambungan menggunakan metode *friction welding*. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan operasional alat sebelum dilakukan proses pengelasan menggunakan parameter acuan dari penelitian sebelumnya. Selain itu, pengujian dilakukan untuk memperoleh gambaran awal mengenai kemampuan alat dalam menghasilkan sambungan pada material baja karbon rendah terhadap baja karbon rendah serta *stainless steel* AISI 304 terhadap baja karbon rendah.

Sebelum proses pengujian dilakukan, alat *friction welding portable* diperiksa untuk memastikan seluruh sistem utama dapat berfungsi dengan baik. Pemeriksaan meliputi sistem pemutar, sistem penekanan pneumatik, mekanisme penjepitan spesimen, serta kondisi rangka dan komponen pendukung lainnya. Pemeriksaan awal dilakukan untuk memastikan alat berada dalam kondisi yang dapat digunakan sebelum proses pengujian dilaksanakan.

Selama proses pengujian dilakukan pengamatan terhadap kemampuan sistem pemutar dalam memutar spesimen, sistem pneumatik dalam memberikan gaya tekan, serta kondisi spesimen setelah proses *friction welding*. Hasil pengamatan tersebut digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi kinerja alat dan menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi pembentukan sambungan.



Gambar 15. Alat *friction welding portable* yang digunakan pada proses pengujian

Gambar 15 menunjukkan alat *friction welding portable* yang digunakan pada penelitian ini. Alat tersebut merupakan hasil rancang bangun penelitian sebelumnya dan digunakan sebagai objek pengujian untuk mengevaluasi kemampuannya dalam menghasilkan

sambungan menggunakan metode *friction welding*. Penelitian ini tidak membahas aspek perancangan alat, tetapi difokuskan pada pengujian kinerja menggunakan parameter proses yang mengacu pada penelitian sebelumnya.

Tabel 2. Hasil pemeriksaan awal kinerja alat *friction welding portable*

No	Komponen yang diperiksa	Tujuan pemeriksaan	Keterangan
1.	Sistem Pemutar	Memastikan poros dapat berputar	Berfungsi dengan baik
2.	Sistem penekanan pneumatik	Memastikan silinder dapat memberikan gaya tekan	Berfungsi dengan baik
3.	Mekanisme penjepit spesimen/cup	Memastikan spesimen terpasang dengan baik	Berfungsi dengan baik
4.	Rangka alat	Memastikan alat stabil saat pengujian	Berfungsi dengan baik

Berdasarkan Tabel 2, seluruh komponen utama alat *friction welding portable* dapat berfungsi sesuai dengan fungsinya masing-masing. Sistem pemutar mampu menggerakkan *spindle*, sistem penekanan pneumatik dapat bekerja, mekanisme penjepit mampu menahan spesimen, serta rangka alat tetap stabil selama pengoperasian. Hasil pemeriksaan awal menunjukkan bahwa alat dapat digunakan untuk melaksanakan proses pengujian menggunakan parameter acuan penelitian sebelumnya.

Setelah pemeriksaan awal dilakukan, pengujian dilanjutkan menggunakan parameter proses yang mengacu pada penelitian sebelumnya. Parameter tersebut diterapkan pada alat *friction welding portable* untuk mengevaluasi kemampuannya dalam menghasilkan sambungan pada material baja karbon rendah terhadap baja karbon rendah serta *stainless steel* AISI 304 terhadap baja karbon rendah.

2. Evaluasi hasil pengujian menggunakan acuan penelitian sebelumnya

Pengujian pada tahap ini dilakukan dengan mengacu pada parameter proses penelitian sebelumnya yang telah berhasil menghasilkan sambungan menggunakan mesin *friction welding* laboratorium. Parameter waktu gesekan dan tekanan kemudian diterapkan pada alat *friction welding portable* sedangkan putaran *spindle* mengikuti kondisi aktual alat selama proses pengujian. Evaluasi dilakukan terhadap dua kombinasi material, yaitu baja karbon rendah terhadap baja karbon rendah serta *stainless steel* AISI 304 terhadap baja karbon rendah. Hasil pengujian kemudian dibandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya untuk mengevaluasi kemampuan alat *friction welding portable* dalam menghasilkan sambungan.

A. Material baja karbon rendah terhadap baja karbon rendah

Tabel 3. Hasil pengujian pada *friction welding*

No	Kecepatan (RPM)	Waktu (detik)	Tekanan (Psi)	Torsi N.m	Mesin <i>Friction Welding</i>
1.	1000	30	60	10	Berhasil
2.	1000	30	65	25	Berhasil
3.	1000	35	65	10	Berhasil
4.	1400	30	65	20	Berhasil
5.	1200	35	60	20	Berhasil
6.	1400	35	65	15	Berhasil
7.	1400	35	60	10	Berhasil
8.	1400	30	60	5	Berhasil

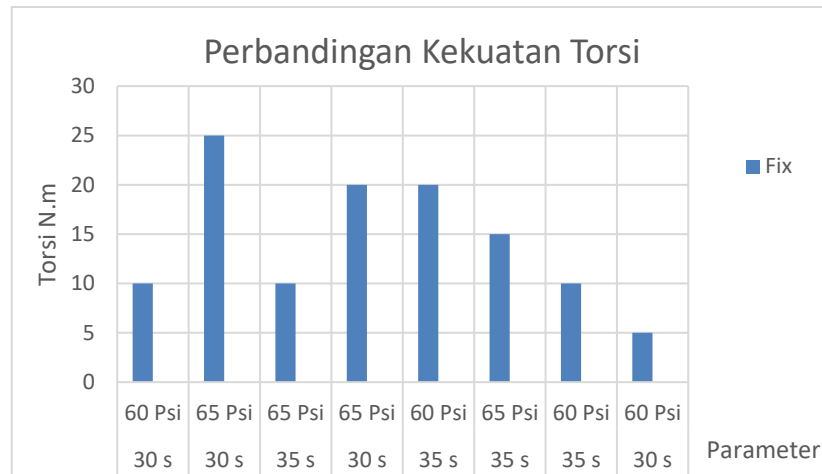
Berdasarkan Tabel 3, seluruh variasi parameter proses yang digunakan pada penelitian sebelumnya berhasil menghasilkan sambungan menggunakan mesin *friction welding* laboratorium. Variasi parameter meliputi putaran 1000–1400 rpm, waktu gesekan 30–35 detik, tekanan 60–65 psi, serta torsi sebesar 5–25 N·m. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi parameter yang digunakan pada mesin laboratorium mampu menghasilkan kondisi proses yang diperlukan untuk membentuk sambungan.

Tabel 4. Hasil pengujian pada *friction welding portable*

No	Kecepatan (RPM)	Waktu (detik)	Tekanan (Psi)	<i>Friction welding portable</i>
1.	1090	30	60	Gagal
2.	1090	30	65	Gagal
3.	1090	35	65	Gagal
4.	1090	30	65	Gagal
5.	1090	35	60	Gagal
6.	1090	35	65	Gagal
7.	1090	35	60	Gagal
8.	1090	30	60	Gagal

Parameter proses yang sama kemudian diterapkan pada alat *friction welding portable* untuk mengetahui kemampuan alat dalam menghasilkan sambungan. Berdasarkan Tabel 4

seluruh pengujian yang dilakukan menggunakan parameter acuan penelitian sebelumnya belum mampu menghasilkan sambungan pada material baja karbon rendah terhadap baja karbon rendah. Meskipun parameter proses yang digunakan sama, hasil yang diperoleh berbeda dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan mesin *friction welding* laboratorium.



Gambar 16. Grafik nilai torsi pada parameter acuan peneliti sebelumnya

Nilai torsi pada Gambar 16 merupakan hasil pengujian torsi sambungan yang diperoleh pada penelitian sebelumnya menggunakan mesin *friction welding* laboratorium. Pada pengujian menggunakan alat *friction welding portable* nilai torsi tidak diperoleh karena spesimen belum berhasil membentuk sambungan permanen. Oleh karena itu, pengujian torsi terhadap hasil sambungan pada alat *friction welding portable* tidak dapat dilakukan.



Gambar 17. Hasil pengujian menggunakan alat *friction welding portable*

Berdasarkan Gambar 17, permukaan spesimen menunjukkan bekas gesekan pada daerah kontak tanpa terbentuk sambungan permanen antara kedua spesimen. Selama proses *friction welding* terjadi pemanasan pada daerah kontak akibat gesekan antara kedua spesimen. Namun, kondisi proses yang dihasilkan belum mampu membentuk deformasi plastis dan ikatan sambungan yang dapat bertahan setelah proses pengelasan selesai.

Setelah gaya tekan dilepaskan, kedua spesimen kembali terpisah sehingga sambungan permanen tidak terbentuk.

B. Material *stainless steel* terhadap baja karbon rendah.

Tabel 5. Hasil pengujian pada *friction welding*

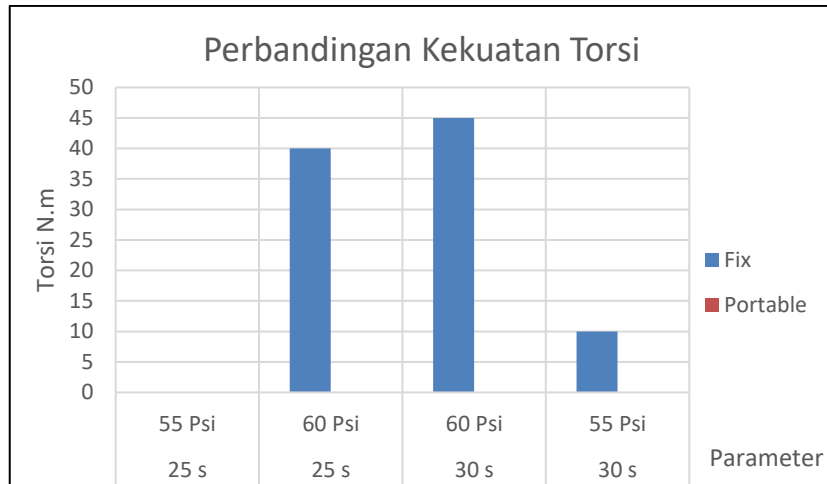
No	Kecepatan (RPM)	Waktu (detik)	Tekanan (Psi)	Torsi (N.m)	Mesin <i>Friction welding</i>
1.	1330	25	55	0	Gagal
2.	1330	25	60	40	Berhasil
3.	1330	30	60	45	Berhasil
4.	1330	30	55	10	Berhasil

Berdasarkan Tabel 5, hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa sebagian besar variasi parameter proses berhasil menghasilkan sambungan pada material *stainless steel* AISI 304 terhadap baja karbon rendah menggunakan mesin *friction welding* laboratorium. Dari empat variasi parameter yang digunakan, satu pengujian tidak menghasilkan sambungan, sedangkan tiga pengujian lainnya berhasil membentuk sambungan.

Tabel 6. Hasil pengujian pada *friction welding portable*

No	Kecepatan (RPM)	Waktu (detik)	Tekanan (Psi)	Hasil <i>Friction welding portable</i>
1.	1090	25	55	Gagal
2.	1090	25	60	Gagal
3.	1090	30	60	Gagal
4.	1090	30	55	Gagal

Parameter proses yang sama kemudian diterapkan pada alat *friction welding portable* untuk mengetahui kemampuan alat dalam menghasilkan sambungan. Berdasarkan Tabel 6 seluruh pengujian yang dilakukan menggunakan parameter acuan penelitian sebelumnya belum mampu menghasilkan sambungan pada material *stainless steel* AISI 304 terhadap baja karbon rendah. Meskipun parameter proses yang digunakan sama, hasil yang diperoleh berbeda dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan mesin *friction welding* laboratorium.



Gambar 18. Grafik nilai torsi pada parameter acuan penelitian sebelumnya

Nilai torsi pada Gambar 18 merupakan hasil pengujian torsi sambungan yang diperoleh pada penelitian sebelumnya menggunakan mesin *friction welding* laboratorium. Pada pengujian menggunakan alat *friction welding portable* nilai torsi tidak diperoleh karena spesimen belum berhasil membentuk sambungan permanen. Oleh karena itu, pengujian torsi terhadap hasil sambungan pada alat *friction welding portable* tidak dapat dilakukan.



Gambar 19. Hasil pengujian menggunakan alat *friction welding portable*

Berdasarkan Gambar 19 hasil pengamatan visual menunjukkan adanya bekas gesekan pada daerah kontak spesimen tanpa terbentuk sambungan permanen. Selama proses *friction welding* terjadi pemanasan pada daerah kontak akibat gesekan antara kedua spesimen. Namun, kondisi proses yang dihasilkan belum mampu membentuk deformasi plastis dan ikatan sambungan yang dapat bertahan setelah proses pengelasan selesai. Setelah gaya tekan dilepaskan, kedua spesimen kembali terpisah sehingga sambungan permanen tidak terbentuk.

Berdasarkan hasil pengujian menggunakan parameter yang mengacu pada penelitian sebelumnya, alat *friction welding portable* belum mampu menghasilkan sambungan

permanen pada kombinasi baja karbon rendah terhadap baja karbon rendah maupun *stainless steel* AISI 304 terhadap baja karbon rendah. Perbedaan hasil antara mesin *friction welding* laboratorium dan alat *friction welding portable* menunjukkan bahwa penerapan parameter acuan pada alat dengan karakteristik kerja yang berbeda belum menghasilkan kondisi proses yang setara. Oleh karena itu, pada tahap berikutnya dilakukan pengujian menggunakan parameter modifikasi untuk mengevaluasi pengaruh perubahan parameter terhadap proses pembentukan sambungan.

3. Evaluasi hasil pengujian menggunakan parameter modifikasi

A. Baja karbon rendah terhadap baja karbon rendah

Setelah pengujian menggunakan parameter acuan penelitian sebelumnya belum mampu menghasilkan sambungan, dilakukan pengujian lanjutan dengan memodifikasi beberapa parameter proses. Modifikasi dilakukan terhadap diameter spesimen, tekanan pneumatik, dan waktu gesekan untuk mengevaluasi pengaruh perubahan parameter terhadap kemampuan alat *friction welding portable* dalam menghasilkan sambungan. Pada tahap ini, putaran spindle mengikuti kondisi aktual selama proses pengujian, yaitu sekitar 1050 rpm.

Tabel 7. Pengujian parameter modifikasi

No	Diameter Spesimen	Kecepatan Rpm	Tekanan Psi	Waktu	Hasil
1.	8mm	1050	150	1 menit 42 detik	Gagal
2.	5mm	1050	150	1 menit 10 detik	Berhasil
3.	4mm	1050	110	1 menit 24 detik	Berhasil
4.	3mm	1050	120	1 menit 07 detik	Gagal

Berdasarkan Tabel 7, dilakukan empat variasi pengujian menggunakan spesimen baja karbon rendah terhadap baja karbon rendah dengan diameter 8 mm, 5 mm, 4 mm, dan 3 mm. Tekanan pneumatik divariasikan antara 110–150 psi dengan waktu gesekan berkisar antara 1 menit 07 detik hingga 1 menit 42 detik. Variasi parameter tersebut dilakukan untuk mengevaluasi respons proses terhadap perubahan diameter spesimen, tekanan pneumatik, dan waktu gesekan.

Pada spesimen berdiameter 8 mm, sambungan belum berhasil terbentuk meskipun tekanan pneumatik diberikan sebesar 150 psi. Setelah proses pengujian, permukaan spesimen hanya menunjukkan bekas gesekan tanpa terbentuk sambungan permanen.

Pada spesimen berdiameter 5 mm diperoleh hasil yang berbeda dibandingkan diameter 8 mm. Pada tekanan 150 psi, sambungan sempat terbentuk selama proses

pengujian, namun kembali terlepas setelah proses selesai. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa parameter yang digunakan telah mampu menghasilkan kondisi awal pembentukan sambungan, tetapi sambungan yang terbentuk belum memiliki kekuatan yang cukup untuk bertahan setelah proses pengelasan selesai.

Hasil serupa diperoleh pada spesimen berdiameter 4 mm dengan tekanan 110 psi. Sambungan sempit terbentuk selama proses pengujian, tetapi kembali terlepas setelah proses selesai. Hal tersebut menunjukkan bahwa proses gesekan dan pemberian gaya tekan telah menghasilkan kondisi awal pembentukan sambungan, namun belum menghasilkan ikatan yang permanen.

Pada spesimen berdiameter 3 mm dengan tekanan 120 psi, sambungan tidak berhasil terbentuk. Meskipun diameter spesimen lebih kecil dibandingkan variasi lainnya, kombinasi parameter yang digunakan pada pengujian ini belum menghasilkan sambungan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pengecilan diameter spesimen tidak secara langsung menjamin keberhasilan proses penyambungan, karena hasil pengujian juga dipengaruhi oleh kombinasi tekanan, waktu gesekan, putaran *spindle*, serta karakteristik kerja alat.

Berdasarkan hasil visual pada Tabel 8, setiap variasi parameter menghasilkan kondisi yang berbeda setelah proses *friction welding*. Pada spesimen berdiameter 8 mm dan 3 mm tidak terbentuk sambungan, sedangkan pada spesimen berdiameter 5 mm dan 4 mm sambungan sempit terbentuk tetapi kembali terlepas setelah proses pengujian selesai. Pada permukaan beberapa spesimen juga terlihat perubahan kondisi permukaan pada daerah kontak akibat proses gesekan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa parameter modifikasi telah memberikan respons yang lebih baik pada beberapa variasi dibandingkan parameter acuan, tetapi belum mampu menghasilkan sambungan permanen

Tabel 8. Dokumentasi hasil pengujian menggunakan parameter modifikasi

Foto hasil pengujian	Ukuran spesimen
	Diameter 8mm Baja karbon rendah Tidak terjadi sambungan

	Diameter 5mm Baja karbon rendah Terjadi sambungan tetapi terlepas
	Diameter 4mm Baja karbon rendah Terjadi sambungan tetapi terlepas
	Diameter 3mm Baja karbon rendah Tidak terjadi sambungan

Berdasarkan hasil pengujian parameter modifikasi pada material baja karbon rendah terhadap baja karbon rendah, variasi diameter spesimen, tekanan pneumatik, dan waktu gesekan memberikan respons yang berbeda terhadap proses pembentukan sambungan. Hasil yang paling mendekati terbentuknya sambungan permanen diperoleh pada spesimen berdiameter 5 mm dan 4 mm, di mana sambungan sempat terbentuk tetapi kembali terlepas setelah proses pengujian selesai. Sementara itu, spesimen berdiameter 8 mm dan 3 mm

tidak berhasil membentuk sambungan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa keberhasilan proses *friction welding* tidak ditentukan oleh diameter spesimen saja, tetapi dipengaruhi oleh kombinasi parameter proses dan karakteristik kerja alat *friction welding portable*.

B. *Stainless steel* AISI 304 terhadap baja karbon rendah

Setelah dilakukan pengujian menggunakan parameter modifikasi pada material baja karbon rendah terhadap baja karbon rendah, pengujian dilanjutkan pada material *stainless steel* AISI 304 terhadap baja karbon rendah. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan alat *friction welding portable* dalam menghasilkan sambungan pada material dengan karakteristik yang berbeda. Jumlah variasi pengujian dibatasi sebanyak tiga kali karena hasil pengujian sebelumnya belum menunjukkan terbentuknya sambungan permanen. Oleh karena itu, pengujian *stainless steel* AISI 304 terhadap baja karbon rendah difokuskan pada evaluasi penerapan parameter modifikasi pada kombinasi material yang berbeda.

Tabel 9. Pengujian menggunakan parameter modifikasi

No	Diameter Spesimen	Kecepatan Rpm	Tekanan Psi	Waktu	Hasil
1.	8mm	1050	150	1 menit 25 detik	Gagal
2.	5mm	1050	150	1 menit 16 detik	Berhasil
3.	3mm	1050	150	1 menit 09 detik	Gagal

Berdasarkan Tabel 9, dilakukan tiga variasi pengujian pada material *stainless steel* AISI 304 terhadap baja karbon rendah dengan diameter spesimen 8 mm, 5 mm, dan 3 mm. Seluruh pengujian dilakukan pada putaran aktual sekitar 1050 rpm dengan tekanan pneumatik sebesar 150 psi serta waktu gesekan antara 1 menit 09 detik hingga 1 menit 25 detik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa spesimen berdiameter 8 mm tidak menghasilkan sambungan setelah proses *friction welding* selesai. Pada spesimen berdiameter 5 mm terbentuk *flash* berbentuk cincin pada daerah kontak dan sambungan sempit terbentuk, namun kembali terlepas setelah proses selesai. Sementara itu, pada spesimen berdiameter 3 mm terjadi pemendekan (*upsetting*) secara cepat ketika material mengalami deformasi akibat panas gesekan sehingga sambungan tidak berhasil terbentuk.

Pada spesimen berdiameter 3 mm, pemendekan (*upsetting*) terjadi lebih cepat dibandingkan pada diameter yang lebih besar. Pada kondisi pengujian dengan tekanan pneumatik sebesar 150 psi, luas bidang kontak yang lebih kecil menyebabkan tekanan kontak pada spesimen menjadi lebih besar. Kondisi tersebut menyebabkan deformasi berlangsung lebih cepat sehingga sambungan permanen tidak berhasil terbentuk.

Berdasarkan hasil tersebut, perubahan diameter spesimen memberikan pengaruh terhadap kondisi deformasi pada daerah kontak. Diameter yang lebih kecil menghasilkan luas bidang kontak yang lebih kecil sehingga pada gaya tekan yang sama tekanan kontak menjadi lebih besar dan deformasi lebih mudah terjadi. Namun, apabila diameter terlalu kecil dengan tekanan pneumatik yang tinggi, deformasi dapat berlangsung terlalu cepat sehingga pembentukan sambungan menjadi kurang optimal. Berdasarkan parameter yang digunakan pada penelitian ini, spesimen berdiameter 5 mm memberikan respons yang paling mendekati terbentuknya sambungan permanen dibandingkan variasi diameter lainnya.



Gambar 20. Proses *friction welding portable*

Gambar 20 menunjukkan terbentuknya *flash* pada daerah kontak spesimen *stainless steel* AISI 304 terhadap baja karbon rendah berdiameter 5 mm selama proses *friction welding*. Terbentuknya *flash* menunjukkan bahwa proses gesekan dan gaya tekan telah menyebabkan deformasi plastis pada daerah kontak. Meskipun sambungan sempat terbentuk, sambungan tersebut kembali terlepas setelah proses pengujian selesai sehingga belum dapat dikategorikan sebagai sambungan permanen. Berdasarkan hasil pengujian menggunakan parameter modifikasi pada material *stainless steel* AISI 304 terhadap baja karbon rendah, perubahan diameter spesimen memberikan pengaruh terhadap proses pembentukan sambungan. Pada parameter yang digunakan dalam penelitian ini, spesimen berdiameter 5 mm menunjukkan hasil yang paling mendekati terbentuknya sambungan permanen, ditandai dengan terbentuknya *flash* dan sambungan sementara yang kemudian terlepas. Sementara itu, spesimen berdiameter 3 mm mengalami *upsetting* yang lebih cepat pada tekanan 150 psi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pembentukan sambungan pada alat *friction welding portable* dipengaruhi oleh kesesuaian antara diameter spesimen, putaran spindle, dan gaya tekan pneumatik.

4. Penyebab kegagalan pada sambungan

A. Pengaruh putaran *spindle* terhadap pembentukan sambungan

Salah satu faktor yang memengaruhi keberhasilan proses *friction welding* adalah putaran *spindle*. Putaran *spindle* berperan dalam menghasilkan gesekan pada permukaan kontak kedua spesimen sehingga terbentuk panas yang diperlukan untuk menghasilkan deformasi plastis dan pembentukan sambungan. Oleh karena itu, pengukuran putaran *spindle* dilakukan untuk mengetahui kondisi putaran aktual alat *friction welding portable* sebelum dan selama proses pengelasan berlangsung.



Gambar 21. Pengukuran putaran *spindle* tanpa beban menggunakan stroboscope

Berdasarkan hasil pengukuran menggunakan *stroboscope*, putaran *spindle* tanpa beban berada pada kisaran 1310–1340 rpm, sedangkan putaran yang ditargetkan berdasarkan parameter pengujian adalah 1400 rpm. Selama proses *friction welding* berlangsung dan spesimen mulai diberikan gaya tekan oleh sistem pneumatik, putaran *spindle* mengalami penurunan menjadi sekitar 1050–1090 rpm. Penurunan putaran tersebut menunjukkan adanya peningkatan beban pada sistem pemutar akibat kontak, gesekan, dan gaya tekan antara kedua spesimen.



Gambar 22. Pengukuran putaran *spindle* saat proses *friction welding* berlangsung

Penurunan putaran *spindle* menyebabkan kecepatan relatif pada permukaan kontak kedua spesimen menjadi lebih rendah dibandingkan kondisi tanpa beban. Kondisi tersebut dapat memengaruhi pembangkitan panas akibat gesekan dan proses deformasi plastis pada daerah kontak. Hal ini sejalan dengan hasil pengujian, di mana sebagian besar spesimen hanya menunjukkan bekas gesekan, sedangkan pada beberapa variasi diameter mulai terbentuk *flash* dan sambungan sementara, namun sambungan tersebut belum mampu bertahan setelah proses pengelasan selesai.

B. Perhitungan persentase penurunan putaran *spindle*

Berdasarkan hasil pengukuran menggunakan *stroboscope*, putaran *spindle* tanpa beban berada pada kisaran 1310–1340 rpm. Pada saat proses *friction welding* berlangsung dan spesimen mulai diberikan gaya tekan oleh sistem pneumatik, putaran *spindle* mengalami penurunan menjadi 1050–1090 rpm. Untuk mengetahui besarnya penurunan putaran akibat pembebanan selama proses pengelasan, persentase penurunan putaran dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\Delta n = \frac{n_0 - n}{n_0} \times 100\% \quad (4)$$

Δn = Persentase penurunan putaran (%)

n_0 = Putaran awal/putaran acuan (rpm)

n = Putaran saat proses pengelasan (rpm)

Untuk putaran 1050 rpm,

$$\Delta n = \frac{1340 - 1050}{1340} \times 100\%$$

$$= \frac{290}{1340} \times 100\%$$

$$= 21,64\%$$

Untuk putaran 1090 rpm,

$$\Delta n = \frac{1340 - 1090}{1340} \times 100\%$$

$$= \frac{250}{1340} \times 100\%$$

$$= 18,66\%$$

Berdasarkan hasil perhitungan, putaran *spindle* mengalami penurunan sebesar 18,66–21,64% setelah spesimen diberikan gaya tekan selama proses *friction welding*. Penurunan putaran tersebut menunjukkan adanya peningkatan beban pada sistem pemutar akibat kontak, gesekan, dan gaya tekan antara kedua spesimen sehingga putaran awal tidak dapat dipertahankan secara konstan.

Penurunan putaran *spindle* menyebabkan kecepatan relatif pada permukaan kontak spesimen ikut berkurang dan dapat memengaruhi pembangkitan panas akibat gesekan serta proses deformasi plastis pada daerah sambungan. Kondisi tersebut sejalan dengan hasil pengujian menggunakan parameter acuan penelitian sebelumnya, di mana seluruh spesimen pada alat *friction welding portable* belum berhasil membentuk sambungan permanen. Pada pengujian dengan parameter modifikasi, beberapa spesimen telah menunjukkan deformasi dan pembentukan flash, namun sambungan yang terbentuk belum mampu bertahan setelah proses pengujian selesai.

C. Pengaruh gaya tekan pneumatic terhadap pembentukan sambungan

Selain putaran *spindle*, gaya tekan yang dihasilkan oleh sistem pneumatik juga merupakan parameter penting dalam proses *friction welding*. Gaya tekan berfungsi memberikan beban aksial pada kedua spesimen sehingga terjadi kontak dan gesekan pada permukaan sambungan serta mendukung terjadinya deformasi plastis. Besarnya gaya tekan yang dihasilkan silinder pneumatik dipengaruhi oleh tekanan udara dan luas penampang piston. Oleh karena itu, perbedaan spesifikasi silinder pneumatik yang digunakan pada alat *friction welding portable* dan mesin *friction welding* laboratorium dianalisis untuk mengetahui perbedaan kemampuan gaya tekan yang dihasilkan.

Tabel 10. Perbandingan silinder pneumatik yang digunakan

SC40x25 (Portable)	SC63x200 (Mesin Friction)
	

Berdasarkan Tabel 9, alat *friction welding portable* menggunakan silinder pneumatik tipe SC40×25, sedangkan mesin *friction welding* laboratorium menggunakan silinder pneumatik tipe SC63×200. Silinder SC40×25 memiliki diameter piston 40 mm dan *stroke* 25 mm, sedangkan silinder SC63×200 memiliki diameter piston 63 mm dan *stroke* 200 mm. Perbedaan diameter piston menghasilkan luas penampang piston yang berbeda sehingga pada tekanan udara yang sama, kedua silinder menghasilkan gaya tekan yang berbeda.

1. Perhitungan gaya tekan pneumatik

Besarnya gaya tekan yang dihasilkan oleh silinder pneumatik dihitung berdasarkan tekanan udara yang diberikan dan luas penampang piston. Perhitungan gaya tekan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$F = P \times A \quad (5)$$

Keterangan:

F = Gaya tekan (N)

P = Tekanan udara (Pa)

A = Luas penampang piston (m²)

Luas penampang piston dihitung menggunakan persamaan:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (6)$$

Keterangan:

A = Luas penampang piston (m²)

D = Diameter piston (m)

1. Perhitungan Silinder Pneumatik SC40×25 (Portable)

Diketahui:

Diameter piston = **40 mm = 0,04 m**

Tekanan = **65 psi = 448.159 Pa**

Luas penampang piston:

$$A = \frac{\pi(0.04)^2}{4}$$

$$A = 0,001257 \text{ m}^2$$

Gaya tekan:

$$F = 448.159 \times 0,001257$$

$$F = 563,46 \text{ N}$$

Konversi ke kilogram gaya:

$$\frac{563,46}{9,81} = 57,44 \text{ kg}$$

$$563,46 \text{ N } (\approx 57,44 \text{ kgf})$$

Jadi gaya tekan yang dihasilkan silinder pneumatik SC40×25 pada tekanan 65 psi adalah sebesar 563,46 N atau sekitar 57,44 kg.

2. Perhitungan Silinder Pneumatik SC63×200 (Laboratorium)

Diketahui:

$$\text{Diameter piston} = 63 \text{ mm} = 0,063 \text{ m}$$

$$\text{Tekanan} = 65 \text{ psi} = 448.159 \text{ Pa}$$

Luas penampang piston:

$$A = \frac{\pi(0.063)^2}{4}$$

$$A = 0,003117 \text{ m}^2$$

Gaya tekan:

$$F = 448.159 \times 0,003117$$

$$F = 1.396,41 \text{ N}$$

Konversi ke kilogram gaya:

$$\frac{1.396,41}{9,81} = 142,35 \text{ kg}$$

$$1.396,41 \text{ N } (\approx 142,35 \text{ kgf})$$

Jadi gaya tekan yang dihasilkan silinder pneumatik SC63×200 pada tekanan 65 psi adalah sebesar 1.396,41 N atau sekitar 142,35 kg.

Berdasarkan hasil perhitungan, pada tekanan udara yang sama sebesar 65 psi, silinder pneumatik SC40×25 pada alat *friction welding portable* secara teoritis menghasilkan gaya tekan sekitar 563,46 N atau 57,44 kgf, sedangkan silinder SC63×200 pada mesin *friction welding* laboratorium menghasilkan gaya tekan sekitar 1.396,41 N atau 142,35 kgf. Dengan demikian, pada tekanan udara yang sama, gaya tekan teoritis yang dihasilkan silinder SC63×200 sekitar 2,48 kali lebih besar dibandingkan silinder SC40×25.

Pada pengujian menggunakan parameter acuan penelitian sebelumnya, penggunaan tekanan udara yang sama pada alat *friction welding portable* menghasilkan gaya tekan teoritis yang lebih rendah karena diameter piston yang digunakan lebih kecil. Kondisi ini diduga menjadi salah satu faktor yang menyebabkan kondisi proses pada alat portable berbeda dengan mesin laboratorium. Namun, hasil pengujian parameter modifikasi juga menunjukkan bahwa peningkatan tekanan yang terlalu tinggi pada spesimen berdiameter kecil dapat menyebabkan deformasi atau *upsetting* yang berlangsung terlalu cepat. Oleh karena itu, keberhasilan pembentukan sambungan tidak hanya ditentukan oleh besarnya gaya tekan, tetapi juga oleh kesesuaiannya dengan putaran *spindle*, diameter spesimen, dan parameter proses lainnya.

D. Pengaruh diameter spesimen terhadap keberhasilan *friction welding*

Diameter spesimen merupakan salah satu faktor yang memengaruhi proses *friction welding* karena berkaitan dengan luas bidang kontak dan kondisi deformasi yang terjadi selama proses pengelasan. Pada penelitian ini digunakan variasi diameter bagian uji sebesar 8 mm, 5 mm, 4 mm, dan 3 mm untuk mengevaluasi pengaruh perubahan diameter terhadap pembentukan sambungan pada alat *friction welding portable*. Panjang total spesimen tetap sebesar 50 mm, sedangkan bagian yang digunakan sebagai daerah kontak pengelasan memiliki panjang 5 mm.

Tabel 11. Gambar perbandingan spesimen dengan diameter 8 mm dan diameter 3 mm

Spesimen diameter 8 mm	Spesimen diameter 3 mm
	

Berdasarkan hasil pengujian, perubahan diameter spesimen memberikan pengaruh terhadap kondisi deformasi pada daerah kontak. Pada diameter yang lebih besar, luas bidang kontak menjadi lebih besar sehingga diperlukan kondisi proses yang sesuai untuk menghasilkan deformasi plastis pada daerah sambungan. Sebaliknya, pada diameter yang lebih kecil, luas bidang kontak menjadi lebih kecil sehingga gaya tekan yang diberikan bekerja pada area kontak yang lebih kecil dan deformasi dapat berlangsung lebih cepat.

Pada pengujian spesimen berdiameter 3 mm dengan tekanan 150 psi, deformasi terjadi lebih cepat selama proses *friction welding*. Kondisi tersebut menyebabkan spesimen mengalami pemendekan (*upsetting*) yang lebih besar sehingga pembentukan sambungan tidak berlangsung secara optimal. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan diameter yang lebih kecil perlu disesuaikan dengan gaya tekan yang diberikan agar deformasi pada daerah kontak tidak berlangsung terlalu cepat.

Berdasarkan hasil pengamatan selama pengujian, spesimen dengan diameter 4–8 mm menunjukkan kondisi deformasi yang lebih stabil dibandingkan spesimen berdiameter 3 mm. Meskipun demikian, pada rentang diameter tersebut belum seluruhnya menghasilkan sambungan permanen. Oleh karena itu, diameter spesimen bukan merupakan satu-satunya faktor yang menentukan keberhasilan pembentukan sambungan, tetapi perlu disesuaikan dengan parameter proses lainnya, terutama putaran *spindle* dan gaya tekan pneumatik.

3. Perhitungan *slenderness ratio*

Untuk mengevaluasi tingkat kelangsingan spesimen terhadap kemungkinan terjadinya *buckling* selama pembebanan, dilakukan perhitungan *slenderness ratio* pada bagian uji yang memiliki panjang 5 mm. Perhitungan dilakukan pada spesimen berdiameter 3 mm karena memiliki diameter terkecil dari seluruh variasi yang digunakan sehingga memberikan nilai *slenderness ratio* terbesar pada panjang yang sama.

Slenderness ratio dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\lambda = \frac{L_e}{r} \quad (7)$$

Keterangan:

λ = *Lamda*

L_e = Panjang efektif spesimen (mm)

r = Radius of gyration (mm)

Untuk penampang silinder pejal, nilai *radius of gyration* dihitung menggunakan persamaan:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (8)$$

dengan:

$$I = \frac{\pi D^4}{64}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

sehingga diperoleh:

$$r = \frac{D}{4} \quad (9)$$

Diketahui:

Panjang efektif spesimen = **5 mm**

Diameter spesimen = **3 mm**

Maka:

$$r = \frac{3}{4} = 0,75 \text{ mm}$$

$$\lambda = \frac{5}{0,75} = 6,67$$

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh nilai *slenderness ratio* sebesar 6,67 pada spesimen berdiameter 3 mm dengan panjang bagian uji 5 mm. Nilai tersebut menunjukkan bahwa bagian spesimen yang dianalisis memiliki tingkat kelangsingan yang rendah. Hasil pengamatan selama proses pengujian juga tidak menunjukkan terjadinya pembengkokan lateral yang mengindikasikan *buckling*. Deformasi yang terlihat pada spesimen berdiameter 3 mm lebih dominan berupa pemendekan aksial (*upsetting*) selama proses *friction welding*.

Dengan demikian, berdasarkan nilai *slenderness ratio* dan hasil pengamatan selama pengujian, *buckling* tidak teridentifikasi sebagai faktor penyebab kegagalan pembentukan sambungan pada spesimen. Kegagalan sambungan lebih berkaitan dengan kondisi parameter proses yang belum sesuai, terutama penurunan putaran *spindle* selama pembebanan, kemampuan gaya tekan pneumatik, serta kesesuaian diameter spesimen dengan parameter pengujian yang digunakan.

E. Ringakasan penyebab kegagalan pembentukan sambungan

Berdasarkan seluruh hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, kegagalan pembentukan sambungan pada alat *friction welding portable* tidak disebabkan oleh satu

faktor tunggal, melainkan dipengaruhi oleh kombinasi beberapa kondisi proses yang saling berkaitan. Pengujian menggunakan parameter acuan penelitian sebelumnya maupun parameter modifikasi belum mampu menghasilkan sambungan permanen pada material baja karbon rendah terhadap baja karbon rendah maupun *stainless steel* AISI 304 terhadap baja karbon rendah. Oleh karena itu, dilakukan perangkuman terhadap faktor-faktor yang teridentifikasi selama proses pengujian sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 12.

Tabel 12. Ringkasan faktor penyebab kegagalan pembentukan sambungan

No	Faktor Penyebab	Hasil Pengamatan	Dampak terhadap sambungan
1.	Putaran <i>spindle</i>	Putaran tanpa beban sebesar 1310–1340 rpm mengalami penurunan menjadi 1050–1090 rpm saat proses pengelasan.	Penurunan putaran menyebabkan kecepatan gesek pada daerah kontak berkurang sehingga kondisi proses berbeda dari kondisi awal tanpa beban.
2.	Sistem pneumatik	Alat menggunakan silinder SC40×25 yang secara teoritis menghasilkan gaya tekan lebih kecil dibandingkan SC63×200 pada mesin laboratorium pada tekanan udara yang sama.	Kemampuan pemberian gaya aksial pada alat portable lebih rendah dibandingkan mesin laboratorium pada tekanan udara yang sama.
3.	Diameter spesimen	Diameter 3 mm mengalami <i>upsetting</i> yang cepat pada pengujian 150 psi, sedangkan diameter 4–8 mm menunjukkan kondisi deformasi yang lebih stabil.	Diameter spesimen perlu disesuaikan dengan gaya tekan dan putaran <i>spindle</i> agar deformasi berlangsung secara terkendali.
4.	<i>Slenderness ratio</i>	Spesimen diameter 3 mm dengan panjang bagian uji 5 mm memiliki <i>slenderness ratio</i> sebesar 6,67 dan tidak menunjukkan pembengkokan lateral selama pengujian.	<i>Buckling</i> tidak teridentifikasi sebagai penyebab kegagalan pembentukan sambungan.

5.	Parameter proses	Kombinasi putaran spindle, gaya tekan pneumatik, diameter spesimen, dan waktu gesekan yang digunakan belum menghasilkan sambungan permanen.	Sambungan permanen belum berhasil terbentuk pada kondisi pengujian yang dilakukan.
----	------------------	---	--

Berdasarkan ringkasan pada Tabel 12, kegagalan pembentukan sambungan berkaitan dengan kombinasi kondisi kerja sistem pemutar, sistem pneumatik, diameter spesimen, dan parameter proses yang digunakan. Putaran *spindle* mengalami penurunan dari 1310–1340 rpm pada kondisi tanpa beban menjadi 1050–1090 rpm ketika proses *friction welding* berlangsung. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa sistem penggerak belum mampu mempertahankan putaran secara konstan ketika menerima beban gesekan dan gaya tekan. Di sisi lain, silinder pneumatik SC40×25 pada alat *friction welding portable* secara teoritis menghasilkan gaya tekan yang lebih rendah dibandingkan silinder SC63×200 pada mesin *friction welding* laboratorium pada tekanan udara yang sama.

Variasi diameter spesimen juga memberikan pengaruh terhadap kondisi deformasi selama proses pengujian. Pada pengujian *stainless steel* AISI 304 terhadap baja karbon rendah, spesimen berdiameter 3 mm dengan tekanan 150 psi mengalami *upsetting* secara cepat, sedangkan spesimen dengan diameter yang lebih besar menunjukkan kondisi deformasi yang lebih stabil. Pada diameter 5 mm bahkan telah terbentuk *flash* berbentuk cincin, meskipun sambungan yang dihasilkan belum mampu bertahan setelah proses selesai. Sementara itu, hasil perhitungan *slenderness ratio* pada spesimen berdiameter 3 mm diperoleh sebesar 6,67 dan selama pengujian tidak ditemukan pembengkokan lateral yang mengindikasikan *buckling*. Dengan demikian, *buckling* tidak teridentifikasi sebagai penyebab kegagalan pembentukan sambungan pada pengujian yang dilakukan.

Selain faktor-faktor tersebut, selama proses pengujian masih ditemukan getaran pada sistem pemutar. Getaran yang terjadi relatif kecil dan tidak menyebabkan spesimen terlepas atau mengalami pergeseran pada mekanisme penjepit. Meskipun demikian, keberadaan getaran menunjukkan bahwa kestabilan sistem pemutar masih dapat ditingkatkan pada pengembangan alat selanjutnya.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

1. Kesimpulan

Alat *friction welding portable* telah mampu beroperasi secara mekanis melalui sistem pemutar, sistem transmisi, dan sistem pneumatik. Namun, putaran *spindle* mengalami penurunan dari 1340 rpm menjadi sekitar 1090 rpm saat proses *friction welding* berlangsung.

Pada pengujian parameter modifikasi, spesimen baja karbon rendah dengan diameter 4 mm dan 5 mm sempat membentuk sambungan, tetapi sambungan kembali terlepas setelah proses. Sementara itu, pada pengujian stainless steel AISI 304 diameter 5 mm dengan tekanan 150 psi terbentuk flash berbentuk cincin, namun belum menghasilkan sambungan permanen.

Belum terbentuknya sambungan dipengaruhi oleh penurunan putaran *spindle*, keterbatasan gaya tekan sistem pneumatik, serta belum optimalnya kombinasi parameter pengelasan pada alat *friction welding portable*. Hasil perhitungan *slenderness ratio* juga menunjukkan bahwa buckling tidak teridentifikasi sebagai penyebab kegagalan sambungan.

2. Saran

- a. Menggunakan sistem penggerak dengan putaran *spindle* yang lebih tinggi dan stabil, sehingga mampu mencapai putaran sekitar 1.800 rpm atau sesuai kebutuhan proses *friction welding*, agar panas akibat gesekan yang dihasilkan lebih optimal.
- b. Menggunakan sistem pneumatik dengan kapasitas gaya tekan yang lebih besar atau mekanisme penekanan yang lebih stabil sehingga tekanan selama proses pengelasan dapat dipertahankan secara konsisten.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. E. S. Silviana, “Implementasi efektivitas corporate social responsibility (csr) pada pt pertamina patra niaga fuel terminal tuban ditinjau dari perspektif akuntansi manajemen,” *Ef. Implementasi Soc. Corp. Fuel, Niaga Tuban, Termin. Dari, Ditinjau Manajemen, Perspekt. Akunt. \ Jur. Ekon. Fak. Malik, Maulana Malang, Ibrahim*, 2025, [Online]. Available: <http://etheses.uin-malang.ac.id/78547/1/210502110010.pdf>
- [2] T. H. E. United and S. of america Of, “API 653: Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction,” *Am. Pet. Inst.*, vol. 552, [Online]. Available: <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/api.653.2003.pdf>
- [3] O. Article, “Effect of friction welding parameters on the tensile strength and microstructural properties of dissimilar AISI 1020-ASTM A536 joints,” *Winiczenko*, pp. 941–955, 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7751-5.
- [4] 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,” *Manuf. Mater. Process.*, 2023, [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2504-4494/7/1/7>
- [5] H. Ma, X. Wang, “Microstructure and Mechanical Properties of Friction Welded Joint between AISI 304 stainless steel and AISI 1045 Carbon steel,” 2015, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264127515301374>
- [6] Z. Akbar, “Analisis pengaruh waktu pengelasan gesek material baja St 37 terhadap kekuatan fatigue,” Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan, 2025.
- [7] E. E. A. Setiawan, E. R. M. A. P. Lilipaly, “Journal Mechanical Engineering (JME).,” *Berthy Pelasula Ketebalan, Anal. Pelat, Dinding Sisa, D A N Pada, Umur Termin. Integr. Kota, Wayame*, vol. 1, no. 3, pp. 181–185, 2023, [Online]. Available: <https://ejournal-polnam.ac.id/index.php/JME/article/download/2102/988/8324>
- [8] B. Pristyan and M. Amin, “Prediksi Umur Pakai Material ASTM A283 Grade C sebagai Tangki Timbun Bahan Bakar Peralite Menggunakan Metode NDT

- Prediction of Lifetime of ASTM A283 Grade C Material as a Peralite Fuel Storage Tank Using NDT Methods dalam berbagai sektor industri , khusus,”* pp. 1002–1012, [Online]. Available: <https://prosiding.unimus.ac.id/index.php/semnas/article/download/1798/1803>
- [9] P. A. Ibrahim dan R. W. Ramadhan, “*Syntax Literate ;*,” *Minyak, Akad. Balongan, Akamigas*, vol. 4, no. 2, pp. 86–98, 2019, [Online]. Available: https://www.academia.edu/download/108504583/555-Article_Text-1482-1-10-20190301.pdf
- [10] P. Jemenang, R. alida et al., “*of ultrasonic thickness calculation result on tank TEP-028 AT jemenang*,” vol. 11, no. 02, pp. 26–33, 2020.
- [11] A. S. Baskoro, D. Ubaszti, and 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),” pp. 9–10, 2019.
- [12] A. Arifin, “Pengantar Teknologi Pengelasan,” *Univ. Sriwij.*, 2024, [Online]. Available: https://repository.unsri.ac.id/143347/1/Buku_Ajar-Pengantar_Teknologi_Pengelasan
- [13] J. T. Wardoyo, “Metode peningkatan tegangan tarik dan kekerasan pada baja karbon rendah melalui baja fasa ganda,” *Jur. Tek. Mesin Politek. Negeri Semarang Jl. Prof. H. Sudarto, SH Tembalang Semarang*, vol. 10, no. 3, pp. 237–248, 2005, [Online]. Available: <https://journal.uui.ac.id/index.php/jurnal-teknoin/article/view/214/0>
- [14] F. N. Alifah and V. P. Fahrani, “*Enhancing Corrosion Resistance : A Comprehensive Study on Stainless steel AISI 304*,” *Univ. Singaperbangsa Karawang, Indones.*, vol. 10, no. 1, pp. 60–70, 2025, doi: 10.21831/dinamika.v10i1.77644.
- [15] J. K. N. G. R. Budynas, “*Shigley’s Mechanical Engineering Design 11th Edition Textbook*,” *Shigley’s Mech. Eng. Des. 11th Ed. Textb.*, [Online]. Available: <https://studylib.net/doc/28453903/shigley-s-mechanical-engineering-design-11th-ed>

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 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	Selangkang	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. Foto foto kegiatan

