



**PENGARUH KECEPATAN PUTARAN SPINDEL DAN WAKTU GESEK
TERHADAP KEKUATAN SAMBUNGAN *FRICTION WELDING* BAJA
S45C MENGGUNAKAN MESIN BUBUT**

SKRIPSI

Oleh:

Ananda Ferdiansyah

NIM 221910101011

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS JEMBER
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN**

JEMBER

2026



**PENGARUH KECEPATAN PUTARAN SPINDEL DAN WAKTU GESEK
TERHADAP KEKUATAN SAMBUNGAN *FRICTION WELDING* BAJA
S45C MENGGUNAKAN MESIN BUBUT**

*Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana pada
Program studi Strata I Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember*

SKRIPSI

Oleh:

Ananda Ferdiansyah

NIM 221910101011

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS JEMBER
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN**

JEMBER

2026

PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur terhadap Allah SWT, dan dengan segala kerendahan hati saya, skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Allah SWT, yang senantiasa melimpahkan rahmat, hidayah, kesehatan, serta kekuatan lahir dan batin sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
2. Kedua orang tua tercinta, Bapak Siswanto dan Ibu Sulasih, yang tidak pernah berhenti memberikan doa, kasih sayang, dukungan, pengorbanan, dan motivasi kepada penulis.
3. Kakak penulis, Kelin, yang selalu memberikan semangat, nasihat, dan dukungan dalam setiap proses yang penulis lalui.
4. Seluruh dosen Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember, yang telah memberikan ilmu pengetahuan, pengalaman, serta bimbingan selama masa perkuliahan sehingga penulis dapat berkembang hingga saat ini.
5. Dosen Pembimbing Akademik, Dr. Ir. Salahuddin Junus, S.T., M.T. yang telah memberikan arahan, bimbingan, serta dukungan akademik kepada penulis selama menjalani proses studi.
6. Dosen Pembimbing Skripsi, Ir. Danang Yudistiro S.T., M.T., Ph.D. yang dengan penuh kesabaran telah memberikan bimbingan, motivasi, masukan, dan arahan selama proses penyusunan skripsi sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
7. Teman-teman seperjuangan, yang telah memberikan dukungan, bantuan, dan kebersamaan selama proses perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini.
8. Almamater tercinta, Universitas Jember, yang telah menjadi tempat penulis menimba ilmu, mengembangkan potensi, dan meraih pengalaman yang sangat berharga.

MOTTO

*“Hidup adalah pengabdian, dan tidak ada pengabdian tanpa pengorbanan.
Nikmatilah semua susahmu sebelum tercapai nikmatmu. Alam semesta tak pernah
terburu-buru tapi semuanya tercapai”*

(penulis)



PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya yang bertanda tangan disini :

Nama : Ananda Ferdiansyah

NIM : 221910101011

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul: PENGARUH KECEPATAN PUTARAN SPINDEL DAN WAKTU GESEK TERHADAP KEKUATAN SAMBUNGAN *FRICTION WELDING* BAJA S45C MENGGUNAKAN MESIN BUBUT adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 30 Juni 2026

Yang menyatakan,

Ananda Ferdiansyah

NIM. 221910101011

LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi berjudul “PENGARUH KECEPATAN PUTARAN SPINDEL DAN WAKTU GESEK TERHADAP KEKUATAN SAMBUNGAN *FRICTION WELDING* BAJA S45C MENGGUNAKAN MESIN BUBUT” telah diuji dan disahkan pada :

Hari : Selasa
Tanggal : 30 Juni 2026
Tempat : Ruang Rapat IsDB lantai 3, Fakultas Teknik, Universitas Jember

Pembimbing Tanda Tangan

1. Pembimbing Utama

Nama : Ir. Danang Yudistiro S.T., M.T., PhD. (.....)
NIP : 197902072015041001

Penguji

1. Penguji Utama

Nama : Dr. Ir. Robertoes Koekoeh Koentjoro S.T., M.Eng. (.....)
NIP : 196707081994121001

2. Penguji Anggota

Nama : Dr. Ir. Nasrul Ilminnafik S.T., M.T. (.....)
NIP : 197111141999031002

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi kecepatan putaran spindel dan durasi gesekan terhadap kekuatan tarik dan mikrostruktur sambungan *friction welding* baja S45C menggunakan mesin bubut yang dimodifikasi dengan sistem penekan pneumatik. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen dengan variasi kecepatan putaran spindel 1170 rpm dan 1800 rpm serta durasi gesekan 70 detik, 80 detik, dan 90 detik. Pengujian yang dilakukan meliputi uji tarik berdasarkan ASTM E8 dan pengamatan mikrostruktur menggunakan mikroskop optik pada daerah logam induk, *Heat Affected Zone* (HAZ), dan daerah sambungan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan putaran spindel dan durasi gesekan berpengaruh terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur sambungan. Peningkatan putaran spindel meningkatkan panas gesekan dan deformasi plastis sehingga kualitas sambungan menjadi lebih baik. Durasi gesekan optimum diperoleh pada 80 detik, sedangkan durasi 90 detik menyebabkan penurunan kekuatan akibat panas berlebih. Kombinasi parameter terbaik diperoleh pada kecepatan putaran spindel 1800 rpm dan durasi gesekan 80 detik dengan kekuatan tarik sebesar 881,84 MPa, elongasi 11,33%, dan modulus elastisitas 595,02 MPa. Pengamatan mikrostruktur menunjukkan terbentuknya struktur butir yang lebih halus, rapat, dan homogen akibat rekristalisasi dinamis sehingga meningkatkan kualitas ikatan metalurgi dan kekuatan sambungan.

Kata kunci: *Friction welding*, baja S45C, kecepatan putaran spindel, durasi gesekan, kekuatan tarik, mikrostruktur.

ABSTRACT

This study aimed to investigate the effect of spindle rotational speed and friction time on the tensile strength and microstructure of S45C steel friction welded joints using a modified lathe machine equipped with a pneumatic pressing system. An experimental method was employed using spindle rotational speeds of 1170 rpm and 1800 rpm, with friction times of 70, 80, and 90 seconds. Tensile testing was conducted according to ASTM E8, while microstructural observations were performed on the base metal, *Heat Affected Zone* (HAZ), and weld interface using an *optical microscope*.

The results showed that spindle rotational speed and friction time significantly affected the mechanical properties and microstructure of the welded joints. Increasing the spindle speed improved frictional heat generation and plastic deformation, resulting in stronger joints. The optimum friction time was 80 seconds, while a friction time of 90 seconds caused a slight reduction in strength due to excessive heat input. The optimum welding parameters were achieved at 1800 rpm and 80 seconds, producing the highest tensile strength of 881.84 MPa, an elongation of 11.33%, and a modulus of elasticity of 595.02 MPa. Microstructural observations revealed finer and more homogeneous grains due to dynamic recrystallization, resulting in stronger metallurgical bonding and improved joint performance.

Keywords: *Friction welding, S45C steel, spindle rotational speed, friction time, tensile strength, microstructure.*

RINGKASAN

"Pengaruh Kecepatan Putaran Spindel Dan Waktu Gesek Terhadap Kekuatan Sambungan *Friction welding* Baja S45c Menggunakan Mesin Bubut"

Ananda Ferdiansyah., 221910101011; 34 Halaman, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember.

Penelitian ini membahas pengaruh kecepatan putaran spindel dan durasi gesekan terhadap kualitas sambungan *friction welding* baja S45C menggunakan mesin bubut dengan sistem penekan pneumatik. Variasi yang digunakan meliputi putaran spindel 1170 rpm dan 1800 rpm serta durasi gesekan 70, 80, dan 90 detik. Pengujian dilakukan melalui uji tarik sesuai ASTM E8 dan pengamatan mikrostruktur menggunakan mikroskop optik.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan putaran spindel dan durasi gesekan hingga 80 detik mampu meningkatkan kualitas sambungan karena menghasilkan panas gesekan dan deformasi plastis yang optimal. Kombinasi parameter terbaik diperoleh pada 1800 rpm dan 80 detik, dengan kekuatan tarik sebesar 881,84 MPa, elongasi 11,33%, dan modulus elastisitas 595,02 MPa. Sementara itu, durasi gesekan 90 detik menyebabkan sedikit penurunan kekuatan akibat panas berlebih yang memicu pertumbuhan butir.

Pengamatan mikrostruktur menunjukkan bahwa sambungan dengan parameter optimum memiliki struktur butir yang lebih halus, rapat, dan homogen akibat rekristalisasi dinamis. Sebaliknya, parameter yang lebih rendah menghasilkan struktur yang masih kasar sehingga kualitas ikatan metalurgi belum optimal. Berdasarkan hasil tersebut, kombinasi kecepatan putaran spindel 1800 rpm dan durasi gesekan 80 detik direkomendasikan sebagai parameter optimum dalam proses *friction welding* baja S45C karena menghasilkan sifat mekanik dan mikrostruktur terbaik.

PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "Analisis Pengaruh Kecepatan Putaran Spindel Dan Waktu Gesek Terhadap Kekuatan Sambungan *Friction welding* Baja S45c Menggunakan Mesin Bubut". Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember.

Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis memperoleh banyak bantuan, bimbingan, doa, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, hidayah, kesehatan, serta kemudahan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
2. Kedua orang tua tercinta, Bapak Siswanto dan Ibu Sulasih, yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang, dukungan, motivasi, dan pengorbanan yang tiada henti kepada penulis.
3. Seluruh keluarga yang selalu memberikan doa, perhatian, dan semangat selama penulis menempuh pendidikan.
4. Bapak Ir. Danang Yudistiro S.T., M.T., PhD. selaku dosen pembimbing skripsi yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan bimbingan, arahan, motivasi, serta saran yang sangat berarti selama penyusunan skripsi.
5. Bapak Dr. Ir. Salahuddin Junus, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberikan arahan dan bimbingan kepada penulis selama menempuh studi.
6. Bapak Dr. Ir. Robertoes Koekoeh Koentjoro S.T., M.Eng, dan Bapak Dr. Ir. Nasrul Ilminnafik S.T., M.T. selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik, saran, dan masukan yang membangun demi penyempurnaan skripsi ini.

7. Seluruh dosen serta tenaga kependidikan Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember yang telah memberikan ilmu, pengalaman, dan pelayanan kepada penulis selama masa perkuliahan.
8. Teman-teman satu tim penelitian, teman-teman Laboratorium Material Maju CDAST, serta seluruh teman-teman Teknik Mesin angkatan 2022 yang telah memberikan bantuan, semangat, dan kebersamaan selama proses penelitian hingga penyusunan skripsi.
9. Semua pihak yang telah membantu penulis, baik secara langsung maupun tidak langsung, yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi penyempurnaan karya ini. Penulis berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca serta menjadi referensi dalam pengembangan teknologi pengelasan gesek (*friction welding*) pada material baja karbon.

Jember, 30 Juni 2026

Ananda Ferdiansyah

221910101011

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PERSEMBAHAN.....	ii
MOTTO	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
RINGKASAN	viii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xiv
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan dan Manfaat	3
1.3.1 Tujuan.....	3
1.3.2 Manfaat.....	4
1.4 Batasan Masalah	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Penelitian Terdahulu	5
2.2 <i>Friction welding</i>	6
2.2.1 Skema Sebaran Daerah Pengelasan Gesek.....	7
2.2.2 Kelebihan dan Kekurangan <i>Friction welding</i>	8
2.3 Baja S45C	8
2.4 Modifikasi Mesin Bubut untuk <i>Friction welding</i>	9
2.5 Pengujian Material	10
2.5.1 Pengujian Tarik	10
2.5.2 ASTM E8	11
2.5.3 Pengujian Mikrostruktur.....	11
2.6 Hipotesis	12
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	13
3.1 Metode Penelitian	13
3.2 Waktu dan Tempat.....	13
3.3 Variabel Penelitian.....	13
3.3.1 Variabel Bebas	13
3.3.2 Variabel Terikat.....	13
3.3.3 Variabel Kontrol.....	13
3.4 Alat dan Bahan.....	14

3.4.1 Alat	14
3.4.2 Bahan	14
3.5 Skema Alat	14
3.6 Prosedur Penelitian	15
3.5.1 Proses Pembuatan Sambungan Friction Welding	15
3.5.2 Pengujian Tarik	15
3.5.3 Pengujian Mikrostruktur	15
3.7 Diagram Alir	16
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	17
4.1 Hasil Pembuatan Spesimen <i>Friction welding</i>	17
4.1.1 Hasil Pembuatan Sambungan Las Gesek	17
4.1.2 Hasil Pembuatan Spesimen Uji Tarik	17
4.2 Hasil Pengujian Tarik	18
4.2.1 Kekuatan Tarik	19
4.2.2 Elongasi	21
4.2.3 Tegangan Luluh Atas (<i>Upper Yield Point Stress</i>)	22
4.3 Hasil Pengamatan Mikrostruktur	24
4.3.1 Mikrostruktur Logam Induk	25
4.3.2 Daerah HAZ	26
4.3.3 Mikrostruktur Daerah Sambungan Las	27
4.4 Pembahasan Hasil Penelitian Secara Keseluruhan	28
BAB 5. PENUTUP	31
5.1 Kesimpulan	31
5.2 Saran	31
DAFTAR PUSTAKA	32
LAMPIRAN	35

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur mikro daerah las dan HAZ hasil <i>friction welding</i> ; (a) logam induk variasi penyambungan 5 detik, (b) daerah HAZ variasi penyambungan 5 detik, (c) logam induk variasi penyambungan 8 detik, (d) daerah HAZ variasi penyambungan 8 detik.....	5
Gambar 2.2 Ilustrasi Pengelasan Gesek	7
Gambar 2.3 Daerah Sambungan Las Gesek (Lin et al., 1999).....	8
Gambar 2.4 Mesin Bubut Modifikasi (Sunyoto et al., 2020).....	10
Gambar 2.5 Spesimen Uji Tarik Standar ASTM E8.....	11
Gambar 2.6 <i>Optical Microscope</i>	12
Gambar 3. 1 Skema sistem penekan pneumatik pada proses <i>friction welding</i> menggunakan mesin bubut.....	14
Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian	16
Gambar 4.1 Hasil sambungan <i>friction welding</i>	17
Gambar 4.2 Spesimen uji tarik hasil <i>friction welding</i> baja S45C: (a) 1170 rpm–70 detik; (b) 1170 rpm–80 detik; (c) 1170 rpm–90 detik; (d) 1800 rpm–70 detik; (e) 1800 rpm–80 detik; (f) 1800 rpm–90 detik.....	18
Gambar 4.3 Grafik hubungan variasi parameter pengelasan terhadap kekuatan tarik	19
Gambar 4.4 Grafik hubungan variasi parameter pengelasan terhadap elongasi ...	21
Gambar 4.5 Grafik hubungan variasi parameter pengelasan terhadap tegangan luluh atas	23
Gambar 4.6 Mikrostruktur Logam Induk Baja S45C perbesaran 1000 x	25
Gambar 4.7 Mikrostruktur daerah HAZ perbesaran 1000x; (a) spesimen 1170 rpm–70 detik dan (b) spesimen 1800 rpm–80 detik.....	26
Gambar 4.8 Mikrostruktur daerah sambungan perbesaran 1000x; (a) spesimen 1170 rpm–70 detik dan (b) spesimen 1800 rpm–80 detik	27

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Kimia S45C	9
Tabel 2.2 Sifat Mekanik Baja S45C.....	9



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengelasan gesek (*friction welding*) merupakan teknologi *solid-state welding* yang banyak digunakan dalam industri manufaktur modern karena mampu menghasilkan sambungan berkualitas tinggi tanpa meleburkan logam induk (Morisada et al., 2020). Tidak adanya fase cair selama proses pengelasan menyebabkan distorsi panas, cacat fusi, serta perubahan mikrostruktur dapat diminimalkan dibandingkan metode pengelasan berbasis pelelehan (Khedr et al., 2023). Keunggulan ini menjadikan *friction welding* banyak diaplikasikan pada komponen yang menuntut integritas struktural tinggi, seperti poros, *gear blank*, dan *axle* (Toramoto et al., 2024).

Meskipun memiliki keunggulan teknis, penerapan mesin *friction welding* konvensional masih terbatas akibat biaya investasi yang relatif tinggi. Oleh karena itu, mesin bubut banyak dimanfaatkan sebagai alternatif media *friction welding* untuk penelitian dan produksi skala kecil (Nasir et al., 2020). Studi eksperimental menunjukkan bahwa mesin bubut mampu menyediakan kecepatan putaran spindel dan tekanan aksial yang memadai untuk menghasilkan sambungan *solid-state* selama parameter proses dikontrol dengan baik (Susanto et al., 2025). Dalam penelitian ini, mesin bubut konvensional dimodifikasi dengan penambahan sistem penekan berupa dongkrak pneumatik yang dioperasikan menggunakan udara bertekanan dari kompresor. Dongkrak pneumatik tersebut digunakan untuk mendorong cekam duduk (*tailstock*) sehingga menghasilkan gaya tekan aksial yang diperlukan selama proses *friction welding* berlangsung. Modifikasi ini dilakukan untuk memperoleh tekanan yang lebih stabil dan konsisten dibandingkan metode penekanan manual, sehingga diharapkan dapat meningkatkan kualitas sambungan yang dihasilkan.

Dalam proses *friction welding*, kecepatan putaran spindel merupakan parameter dominan karena menentukan besarnya panas gesekan dan tingkat plastisitas material pada antarmuka sambungan (Mohan & Wu, 2021). Peningkatan kecepatan putaran dapat meningkatkan temperatur antarmuka dan memperbaiki

ikatan metalurgi, namun kecepatan yang terlalu tinggi berpotensi menyebabkan *burn-off* berlebihan sehingga menurunkan kualitas sambungan (Nasir et al., 2021). Penelitian pada baja karbon menunjukkan adanya rentang kecepatan optimum, umumnya berada pada ratusan hingga ribuan rpm, untuk mencapai kekuatan tarik maksimum sambungan *friction welding* (Lee, 2019).

Selain kecepatan putaran, durasi gesekan juga berpengaruh signifikan terhadap kualitas sambungan karena memengaruhi total panas gesekan dan deformasi plastis material. Pangestu et al. (2023) melaporkan bahwa pada *friction welding* baja S45C menggunakan mesin bubut dengan variasi durasi gesekan 40, 60, dan 90 detik, kekuatan tarik sambungan meningkat seiring bertambahnya durasi gesekan, dengan tren puncak berada pada rentang 60–90 detik. Hal ini mengindikasikan adanya durasi optimum di antara rentang tersebut.

Baja karbon menengah seperti S45C banyak digunakan pada komponen mesin karena memiliki keseimbangan antara kekuatan dan keuletan. Namun, material ini sensitif terhadap gradien termal dan perubahan mikrostruktur di sekitar *heat affected zone* (HAZ) selama proses pengelasan (Arora et al., 2019). Pendinginan yang tidak terkendali dapat memicu terbentuknya martensit getas dan cacat mikrostruktural yang berdampak negatif terhadap performa mekanik sambungan (Toramoto et al., 2024). Oleh karena itu, pengendalian parameter proses *friction welding* menjadi faktor penting dalam menjaga kualitas sambungan.

Kajian pustaka menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian *friction welding* pada baja karbon masih berfokus pada variasi satu parameter utama, terutama kecepatan putaran atau durasi gesekan, dengan rentang waktu gesek umum 40–90 detik (Gao et al., 2021). Namun, kajian yang secara spesifik mengevaluasi kombinasi kecepatan putaran dan durasi gesekan terhadap kekuatan sambungan *friction welding* baja S45C menggunakan mesin bubut masih relatif terbatas (Nasir et al., 2021).

Berdasarkan kajian tersebut, penelitian ini menggunakan variasi kecepatan putaran spindel 1170 rpm dan 1800 rpm, serta durasi gesekan 70 detik, 80 detik, dan 90 detik, yang dipilih berdasarkan tren grafik uji tarik Pangestu et al. (2023) yang menunjukkan puncak kekuatan berada pada rentang 60–90 detik. Penelitian

ini bertujuan menganalisis pengaruh kombinasi kecepatan putaran spindel dan durasi gesekan terhadap kekuatan sambungan *friction welding* baja S45C menggunakan mesin bubut. Selain variasi kecepatan putaran spindel dan durasi gesekan, penelitian ini juga memanfaatkan modifikasi sistem penekan berbasis dongkrak pneumatik sebagai penghasil gaya aksial pada mesin bubut selama proses *friction welding*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang, didapatkan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi kecepatan putaran spindel dan durasi gesekan terhadap kekuatan tarik sambungan *friction welding* baja S45C menggunakan mesin bubut?
2. Bagaimana pengaruh variasi kecepatan putaran spindel dan durasi gesekan terhadap karakteristik mikrostruktur pada sambungan *friction welding* dengan nilai kekuatan tarik tertinggi dan terendah?
3. Bagaimana hubungan antara karakteristik mikrostruktur dengan kekuatan tarik sambungan *friction welding* baja S45C?

1.3 Tujuan dan Manfaat

Adapun tujuan dan manfaat dari penelitian ini yaitu :

1.3.1 Tujuan

- a. Mengetahui pengaruh variasi kecepatan putaran spindel dan durasi gesekan terhadap kekuatan tarik sambungan *friction welding* baja S45C menggunakan mesin bubut.
- b. Mengetahui karakteristik mikrostruktur pada sambungan *friction welding* dengan nilai kekuatan tarik tertinggi dan terendah.
- c. Mengetahui hubungan antara karakteristik mikrostruktur dengan kekuatan tarik sambungan *friction welding* baja S45C.

1.3.2 Manfaat

- a. Bagi perkembangan ilmu pengetahuan: Memberikan data empiris mengenai pengaruh kecepatan putaran spindel dan durasi gesekan terhadap kekuatan tarik dan mikrostruktur sambungan *friction welding* baja S45C.
- b. Bagi aplikasi teknik dan industri kecil: Memberikan acuan parameter proses *friction welding* berbasis mesin bubut untuk menghasilkan sambungan baja S45C dengan kualitas mekanik yang baik.

1.4 Batasan Masalah

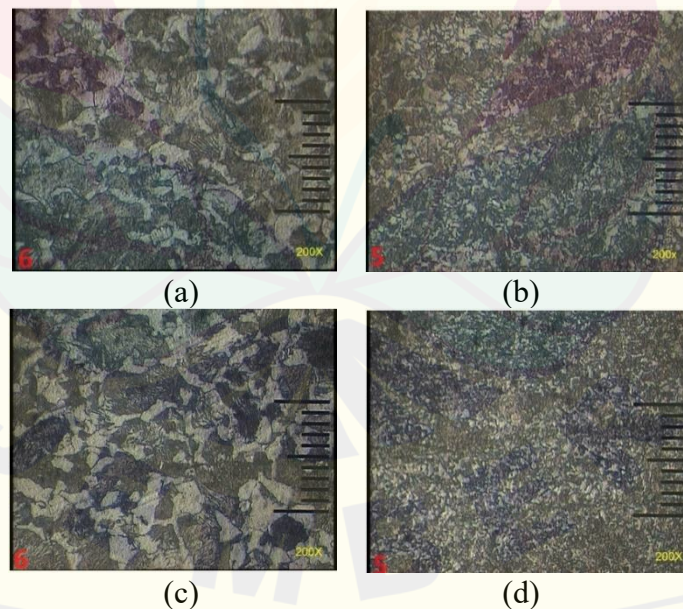
Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pendinginan dilakukan pada suhu ruangan lab manufaktur jam 09.00-12.00
2. Pengamatan mikrostruktur dilakukan pada daerah logam induk, HAZ dan sambungan pada spesimen dengan hasil uji Tarik optimum dan minimum, terbatas pada pengamatan visual fasa ferit dan perlit.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian *friction welding* pada baja karbon medium S45C oleh Pangestu et al., (2023) menganalisis pengaruh variasi putaran 800, 1120, dan 1600 rpm serta waktu gesek 40, 60, dan 90 detik terhadap kekuatan tarik sambungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada 1600 rpm selama 90 detik dengan beban maksimal rata-rata 2.833 N, sedangkan terendah pada 800 rpm selama 40 detik, yang menunjukkan bahwa peningkatan putaran dan waktu gesek meningkatkan kekuatan sambungan. Selain itu, Husodo et al. (2013) menemukan bahwa daerah las memiliki struktur lebih rapat dengan dominasi perlit dibandingkan daerah HAZ akibat pengaruh panas gesekan dan tekanan tempa. Kajian serupa juga dilakukan oleh Sujarwanto et al. (2020) mengenai pengaruh waktu kontak gesekan terhadap sifat fisik dan mekanis sambungan baja S45C dengan *stainless steel* AISI 304, dengan hasil pengamatan mikrostruktur ditunjukkan pada Gambar 2.1.



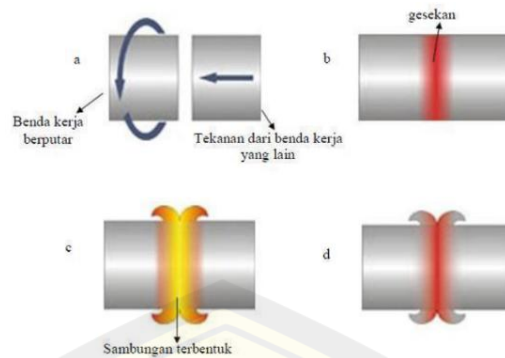
Gambar 2.1 Struktur mikro daerah las dan HAZ hasil *friction welding* ; (a) logam induk variasi penyambungan 5 detik, (b) daerah HAZ variasi penyambungan 5 detik, (c) logam induk variasi penyambungan 8 detik, (d) daerah HAZ variasi penyambungan 8 detik
(Sujarwanto et al., 2020)

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa mikrostruktur pada daerah HAZ mengalami perubahan akibat variasi waktu penyambungan. Pada variasi penyambungan 5 detik, distribusi fasa ferit dan perlit masih tampak kurang merata dengan ukuran butir yang relatif lebih kasar. Sementara itu, pada variasi penyambungan 8 detik, fasa ferit dan perlit terlihat lebih merata dan seragam, menunjukkan bahwa masukan panas yang lebih optimal menghasilkan struktur mikro yang lebih homogen pada daerah HAZ. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa penambahan waktu penyambungan hingga 8 detik memberikan kualitas mikrostruktur yang lebih baik dibandingkan variasi 5 detik.

Parameter proses seperti tekanan aksial dan suhu *preheating* merupakan faktor penting yang memengaruhi kualitas sambungan pada proses *friction welding*. Rohman & Hudaya (2021) melaporkan bahwa penggunaan tekanan pneumatik 4 bar menghasilkan *flash* yang paling sempurna tanpa ditemukan tekstur retak pada spesimen *stainless steel* 304, sehingga menunjukkan bahwa tekanan tersebut mampu menghasilkan deformasi plastis dan ikatan sambungan yang baik. Sementara itu, Saputro & Rahmadiano (2022) menunjukkan bahwa variasi suhu *preheat* 200°C, 300°C, dan 400°C memengaruhi kekuatan tarik sambungan, di mana suhu 200°C menghasilkan nilai kekuatan tarik tertinggi dibandingkan variasi lainnya.

2.2 *Friction welding*

Pengelasan gesek (*friction welding*) merupakan metode penyambungan logam dalam kondisi padat tanpa menggunakan logam pengisi. Proses ini memanfaatkan panas yang dihasilkan dari gesekan antara dua permukaan logam, di mana satu spesimen berputar dan spesimen lainnya diberi tekanan aksial. Panas akibat gesekan menyebabkan permukaan kontak mencapai suhu tinggi hingga terbentuk ikatan metalurgi tanpa melewati proses peleburan. Metode ini mampu menghasilkan sambungan yang kuat serta menjaga keselarasan sumbu komponen yang dilas (Krispamuji, 2020). Ilustrasi proses *friction welding* ditunjukkan pada Gambar 2.2.



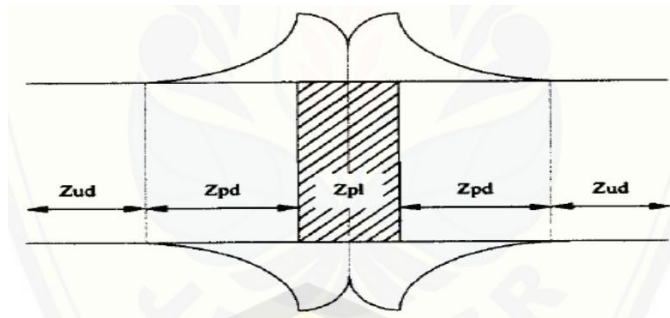
Gambar 2.2 Ilustrasi Pengelasan Gesek

Friction welding tidak hanya unggul karena tidak memerlukan logam pengisi, tetapi juga karena efisiensinya dalam mengubah energi mekanik menjadi panas las. Proses ini telah diterapkan secara luas dalam industri dengan mengacu pada standar internasional ISO 15620 yang mengatur pengelasan gesek pada material logam. Di samping itu, beberapa standar nasional juga digunakan, seperti ANSI/AWS C6.1–1989 dari Amerika Serikat dan JIS Z 3607 (1994) dari Jepang yang secara khusus mengatur prosedur pengelasan gesek pada baja karbon (Prasetyono & Subiyanto, 2012). Standar-standar ini menjadi acuan penting dalam menjamin kualitas dan keamanan sambungan las dalam berbagai aplikasi industri.

2.2.1 Skema Sebaran Daerah Pengelasan Gesek

Pada sambungan *friction welding* terdapat daerah efek dari terjadinya pengelasan atau *heat affected zone* (HAZ). Dari *heat affected zone*, dapat mengetahui seberapa besar pengaruh panas terhadap perubahan struktur material di sekitar sambungan, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3. Lin et al. (1999) membagi tiga daerah sambungan las pada *friction welding* yaitu:

1. *Fully Plasticized (Zpl)* merupakan daerah sambungan las gesek yang mengalami penyatuan secara sempurna saat proses las.
2. *Partially deformed (Zpd)* merupakan daerah yang mengalami *heat affected zone* (HAZ).
3. *Undeformed regions (Zud)* merupakan daerah yang tidak terpengaruh oleh panas.



Gambar 2.3 Daerah Sambungan Las Gesek (Lin et al., 1999)

2.2.2 Kelebihan dan Kekurangan *Friction welding*

Friction welding menawarkan banyak keuntungan karena pengelasan ini tidak memerlukan fluks, logam pengisi, dan gas pelindung selama proses pengelasan (Winiczenko, 2016). Oleh karena itu, inklusi slag dan porositas dalam *friction welding* dapat diminimalisasi. Selain itu, *friction welding* lebih ramah lingkungan karena tidak menghasilkan gas berlebih. Biaya pemeliharaan mesin *friction welding* terbatas. *Friction welding* memiliki toleransi pengelasan yang baik dan dapat menghubungkan dua logam yang berbeda.

Namun, *friction welding* juga memiliki kekurangan. Meskipun biaya proses pengelasan rendah, harga mesin *friction welding* tinggi. Meskipun *friction welding* memiliki toleransi yang baik, kontrol prosesnya lebih rumit daripada pengelasan peleburan karena bergantung pada durasi gesekan, kecepatan gesekan, dan beban kompresif (Shubhavardhan & Surendran, 2012). Meskipun dua logam yang berbeda dapat disatukan, pengelasan dua logam dengan perbedaan properti yang signifikan, misalnya titik leleh dan konduktivitas termal.

2.3 Baja S45C

Baja S45C merupakan baja karbon menengah (medium carbon steel) berstandar JIS G4051 dengan kandungan karbon 0,42–0,48% yang secara alami memiliki struktur mikro ferrite dan pearlite. Menurut Susanto et al. (2025), baja ini banyak digunakan pada komponen mekanik seperti poros engkol dan head suspension karena memiliki kombinasi kekuatan dan keuletan yang baik. Pada kondisi *as-received*, baja S45C memiliki kekuatan tarik sekitar 675 MPa (Susanto

et al., 2025), sedangkan Morisada et al. (2020) melaporkan logam induk S45C dengan kekuatan tarik sekitar 810 MPa dan elongasi sekitar 15%, menunjukkan bahwa sifat mekanik baja ini dapat bervariasi tergantung kondisi material.

Sebagai pembandingan terhadap sambungan hasil *friction welding*, material awal (raw material) pada penelitian ini juga diuji tarik dan menghasilkan *ultimate tensile strength* sebesar **806,55 MPa** dengan elongasi **17,584%**. Nilai tersebut menunjukkan bahwa material yang digunakan memiliki karakteristik mekanik yang sesuai dengan rentang sifat baja S45C yang dilaporkan pada penelitian terdahulu.

Studi Sujarwanto et al. (2020) menunjukkan bahwa variasi *friction time* berpengaruh terhadap kekerasan dan luas daerah terpengaruh panas (HAZ), sehingga S45C menjadi material yang sesuai untuk kajian optimasi parameter *friction welding* guna memperoleh sifat mekanik dan mikrostruktur yang optimal. Sebagai acuan, komposisi kimia dan sifat mekanik baja S45C ditampilkan pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2.

Tabel 2.1 Komposisi Kimia S45C (Susanto et al., 2025)

komposisi kimia S45C (wt.%)								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	B
0.44	0.27	0.64	0.015	0.014	0.34	0.09	0.02	0.0021

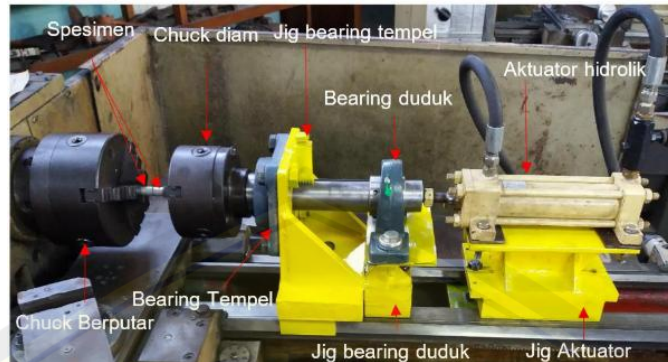
Tabel 2.2 Sifat Mekanik Baja S45C (Morisada et al., 2020; Susanto et al., 2025)

Properti Mekanik	Nilai
<i>Tensile Strength</i>	675 - 810 MPa
<i>Yield Strength</i>	420 MPa
<i>Elongation</i>	15- 22,50%
<i>Reduction of Area</i>	42%
<i>Hardness</i>	167 - 229 HB

2.4 Modifikasi Mesin Bubut untuk *Friction welding*

Dalam penelitian ini, mesin bubut digunakan sebagai media untuk melakukan proses *friction welding*. Penggunaan mesin bubut sebagai alat *friction welding* telah dilaporkan oleh (Sunnyoto et al., 2020), yang memodifikasi mesin bubut dengan penambahan jig dan sistem hidrolik untuk meningkatkan kestabilan

serta kualitas sambungan las. Gambar mesin bubut yang telah di modifikasi dalam penelitian Sunyoto et al. (2020) ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Mesin Bubut Modifikasi (Sunyoto et al., 2020)

Berbeda dengan penelitian tersebut, pada penelitian ini mesin bubut tidak mengalami modifikasi pada sistem utamanya. Modifikasi hanya dilakukan pada sistem pemberian gaya tekan aksial dengan menggunakan dongkrak pneumatik yang dihubungkan dengan kompresor udara. Sistem ini terdiri dari dua cekam duduk (*tailstock*), dimana cekam duduk bagian depan digunakan untuk menjepit *friction welding* berlangsung.

2.5 Pengujian Material

Pengujian material adalah perlakuan lanjutan pada sampel untuk menentukan sifat mekanik pada sampel.

2.5.1 Pengujian Tarik

Pengujian uji tarik digunakan untuk mengukur ketahanan suatu material terhadap gaya statis yang diberikan secara lambat. Salah satu cara untuk mengetahui besaran sifat mekanik dari logam adalah dengan uji tarik. Sifat mekanik yang dapat diketahui adalah kekuatan dan elastisitas dari logam tersebut. Uji ini menghitung energi yang digunakan untuk mematahkan benda uji tersebut (Prasetyono & Subiyanto, 2012).

Tegangan normal yang diakibatkan gaya tarik dapat ditentukan dengan persamaan

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \dots \dots \dots (2.1)$$

dimana:

σ = Tegangan tarik (MPa)

F = Gaya tarik (N)

A_0 = Luas penampang spesimen mula-mula (mm^2)

Regangan perbandingan dari jumlah pertambahan panjang spesimen akibat gaya tarik yang diberikan dengan Panjang daerah ukur yang dinyatakan dalam persamaan

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \dots \dots \dots (2.2)$$

dimana:

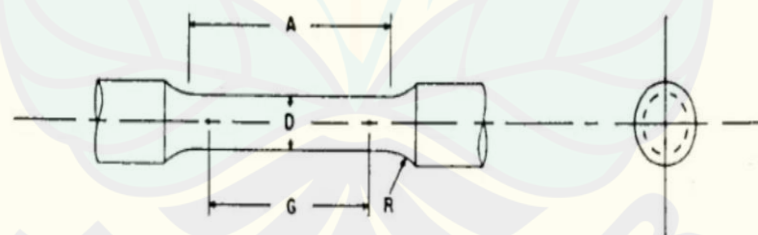
ε = Regangan (mm/mm)

Δl = Pertambahan Panjang (mm)

l_0 = Panjang mula-mula (mm)

2.5.2 ASTM E8

ASTM E8 merupakan standar internasional yang mengatur metode pengujian tarik pada material logam untuk menentukan sifat mekanik seperti kekuatan tarik, tegangan luluh, dan regangan. Pada penelitian ini, pengujian tarik sambungan *friction welding* baja S45C mengacu pada standar ASTM E8, dengan bentuk dan dimensi spesimen uji sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.5 Spesimen Uji Tarik Standar ASTM E8

2.5.3 Pengujian Mikrostruktur

Pengujian struktur mikro dilakukan untuk mengetahui isi unsur kandungan yang terdapat didalam spesimen yang akan diuji. Dengan menggunakan spesimen uji yang telah dihaluskan agar dapat terlihat kandungan didalam benda uji tersebut

untuk pengujian tarik dan impak mengalami perpatahan dilihat pada uji mikro. Gambar mikroskop optik ditampilkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.6 *Optical Microscope*

2.6 Hipotesis

Kecepatan putaran spindel dan durasi gesekan pada proses *friction welding* memengaruhi kekuatan tarik dan karakteristik mikrostruktur sambungan baja S45C. Peningkatan kedua parameter hingga kondisi optimum diperkirakan dapat meningkatkan kualitas ikatan metalurgi, sehingga menghasilkan kekuatan tarik yang lebih tinggi serta mikrostruktur yang lebih halus dan homogen. Sebaliknya, parameter yang terlalu tinggi dapat menyebabkan pertumbuhan butir dan pelebaran daerah *Heat Affected Zone* (HAZ), sehingga menurunkan kualitas sambungan.

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk menganalisis pengaruh variasi kecepatan putaran spindel dan durasi gesekan terhadap hasil *friction welding* baja S45C. Penelitian meliputi pembuatan spesimen, pengujian, dan analisis data.

3.2 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Proses Produksi dan Laboratorium Uji Material, Fakultas Teknik, Universitas Jember, pada periode Februari hingga Mei 2026. Tahapan penelitian meliputi pembuatan spesimen dan pengujian.

3.3 Variabel Penelitian

Variabel pengukuran yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

3.3.1 Variabel Bebas

- a. Kecepatan putaran spindel: 1170 rpm dan 1800 rpm.
- b. Durasi gesekan: 70 detik, 80 detik, dan 90 detik.

3.3.2 Variabel Terikat

- a. Kekuatan tarik sambungan.
- b. Struktur mikro daerah sambungan.

3.3.3 Variabel Kontrol

- a. Material: baja karbon menengah S45C.
- b. Tekanan aksial: 4 bar.
- c. Suhu pengujian: suhu ruang.
- d. Dimensi spesimen: diameter 12 mm dengan panjang sesuai kebutuhan pengelasan.

3.4 Alat dan Bahan

3.4.1 Alat

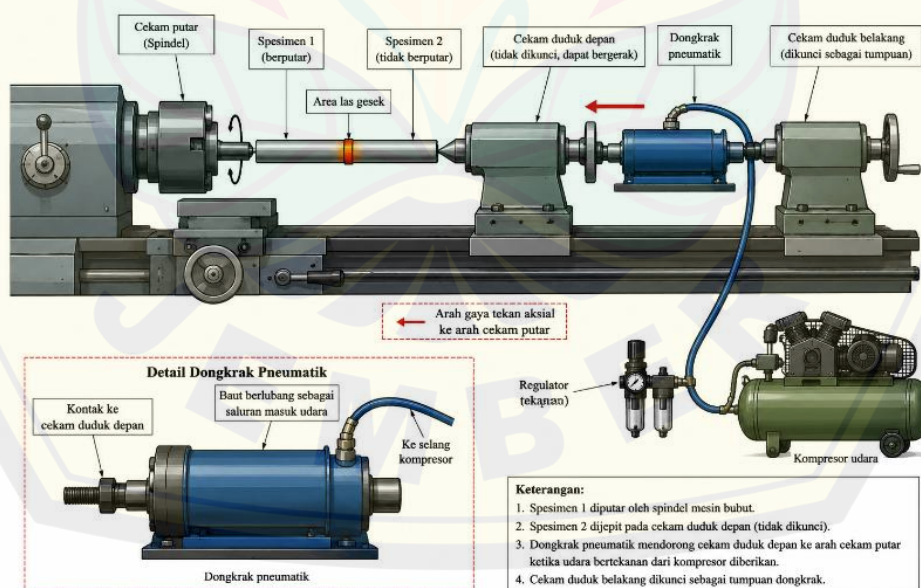
- | | |
|----------------------------|---------------------------|
| 1) Mesin Bubut | 8) Sarung tangan |
| 2) <i>Grinder Polisher</i> | 9) Kacamata <i>Safety</i> |
| 3) Jangka Sorong | 10) Kompresor Udara |
| 4) <i>Stopwatch</i> | 11) Dongkrak Pneumatik |
| 5) Gerinda | 12) Alat Uji Tarik |
| 6) Tang | 13) Alat Uji Mikro |
| 7) <i>Thermal Gun</i> | |

3.4.2 Bahan

- 1) Baja Pejal S45C
- 2) Resin
- 3) Larutan etsa
- 4) Pasta poles

3.5 Skema Alat

Skema sistem penekan pneumatik yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.1



Gambar 3. 1 Skema sistem penekan pneumatik pada proses *friction welding* menggunakan mesin bubut

3.6 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dipakai meliputi persiapan bahan hingga karakterisasi sampel setelah jadi.

3.5.1 Proses Pembuatan Sambungan Friction Welding

- a. Menyiapkan spesimen baja S45C berdiameter 12 mm dan panjang 100 mm, kemudian membubut ujung spesimen dengan profil chamfer radius (R5).
- b. Memasang spesimen pada cekam utama dan cekam duduk mesin bubut hingga sejajar, kemudian mengatur sistem penekan pneumatik dengan tekanan aksial sebesar 4 bar.
- c. Melakukan pemanasan awal melalui gesekan tanpa tekanan aksial hingga suhu mencapai 200°C menggunakan variasi putaran spindel 1170 rpm dan 1800 rpm.
- d. Memberikan tekanan aksial dan melakukan proses *friction welding* dengan variasi waktu gesek 70, 80, dan 90 detik.
- e. Lepas spesimen dan dinginkan di suhu ruang.
- f. Memeriksa kesejajaran (*alignment*) spesimen menggunakan dial indicator. Penyimpangan maksimum yang diizinkan adalah 3 mm. Spesimen dengan penyimpangan lebih dari 3 mm dinyatakan gagal dan tidak digunakan dalam proses pengujian.
- g. Membentuk hasil sambungan menjadi spesimen uji sesuai standar ASTM E8 untuk pengujian selanjutnya.

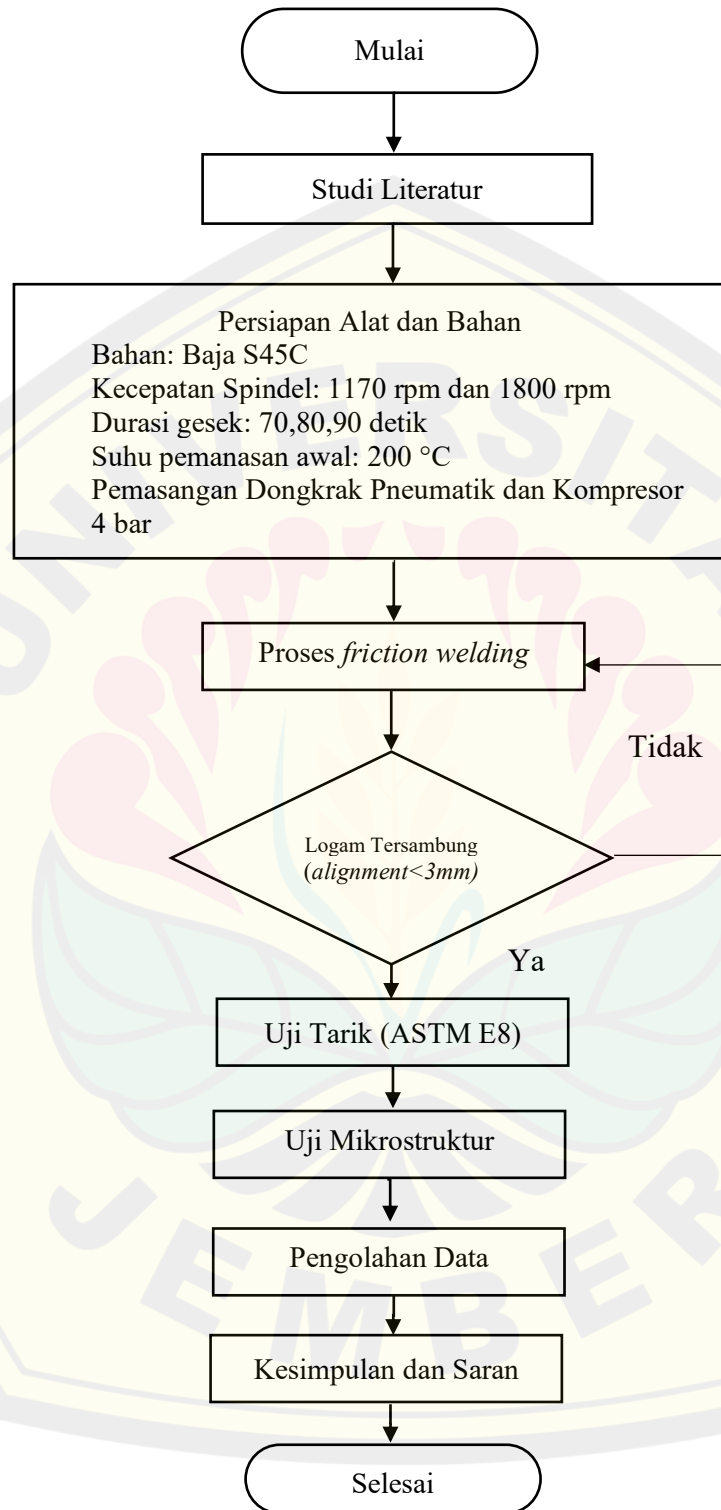
3.5.2 Pengujian Tarik

Spesimen uji tarik berdasarkan ASTM E8 (*Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*)

3.5.3 Pengujian Mikrostruktur

- a. Memotong dan *mounting* spesimen menggunakan resin epoksi.
- b. Mengamplas, memoles, dan melakukan *etching*.
- c. Mengamati mikrostruktur pada daerah logam induk (*base metal*), HAZ, dan daerah sambungan (*weld zone*) menggunakan mikroskop optik.

3.7 Diagram Alir



Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian

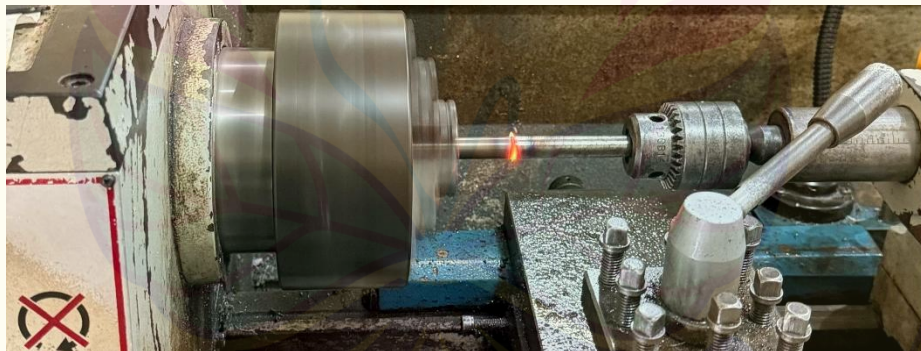
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pembuatan Spesimen *Friction welding*

4.1.1 Hasil Pembuatan Sambungan Las Gesek

Proses *friction welding* pada penelitian ini dilakukan menggunakan mesin bubut konvensional dengan variasi kecepatan putaran spindel sebesar 1170 rpm dan 1800 rpm serta variasi durasi gesekan 70 detik, 80 detik, dan 90 detik. Seluruh spesimen berhasil tersambung dengan baik dan menunjukkan terbentuknya *flash* pada daerah sambungan sebagai indikasi terjadinya deformasi plastis selama proses pengelasan.

Berdasarkan pengamatan visual, bentuk *flash* yang dihasilkan pada setiap variasi parameter menunjukkan perbedaan ukuran dan distribusi material yang keluar dari daerah sambungan. Semakin tinggi kecepatan putaran dan semakin lama durasi gesekan, *flash* yang terbentuk cenderung semakin besar akibat peningkatan panas gesekan yang dihasilkan selama proses pengelasan. Gambar 4.1 menunjukkan hasil spesimen *friction welding* yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 4.1 Hasil sambungan *friction welding*

4.1.2 Hasil Pembuatan Spesimen Uji Tarik

Setelah proses *friction welding* selesai dilakukan, sambungan baja S45C kemudian dibentuk menjadi spesimen uji tarik sesuai dimensi yang telah ditentukan. Pembentukan spesimen dilakukan menggunakan mesin bubut untuk menghasilkan geometri yang seragam sehingga hasil pengujian tarik dapat merepresentasikan kekuatan sambungan secara akurat.

Spesimen uji tarik dibuat dengan posisi daerah sambungan berada tepat pada bagian tengah daerah ukur (*gauge length*). Penempatan ini bertujuan agar beban tarik yang diberikan saat pengujian dapat secara langsung menguji kekuatan sambungan hasil *friction welding*.

Hasil pembuatan spesimen uji tarik menunjukkan bahwa seluruh sambungan berhasil dibentuk sesuai dimensi yang direncanakan dan siap digunakan untuk pengujian tarik. Spesimen uji tarik hasil *friction welding* ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Spesimen uji tarik hasil *friction welding* baja S45C: (a) 1170 rpm–70 detik; (b) 1170 rpm–80 detik; (c) 1170 rpm–90 detik; (d) 1800 rpm–70 detik; (e) 1800 rpm–80 detik; (f) 1800 rpm–90 detik.

4.2 Hasil Pengujian Tarik

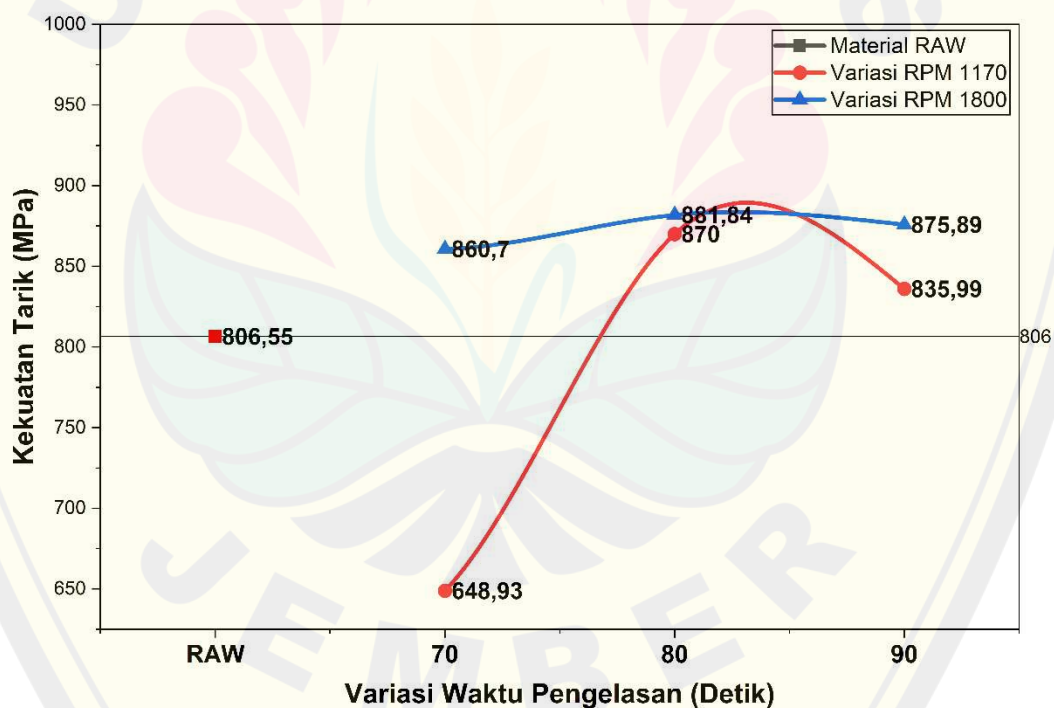
Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui kemampuan sambungan hasil *friction welding* dalam menahan beban tarik hingga terjadi kegagalan. Pengujian dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine (UTM)* sesuai standar ASTM E8. Parameter yang diamati meliputi kekuatan tarik (*Ultimate Tensile Strength*), elongasi, dan modulus elastisitas. Ketiga parameter tersebut digunakan untuk

mengevaluasi kualitas sambungan hasil pengelasan gesek berdasarkan kemampuan material dalam menahan beban, mengalami deformasi plastis, dan mempertahankan kekakuan setelah proses pengelasan.

Variasi parameter yang digunakan pada penelitian ini meliputi kecepatan putaran spindel sebesar 1170 rpm dan 1800 rpm dengan durasi gesekan 70 detik, 80 detik, dan 90 detik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan kecepatan putaran spindel dan durasi gesekan memberikan pengaruh terhadap sifat mekanik sambungan *friction welding* baja S45C.

4.2.1 Kekuatan Tarik

Kekuatan tarik merupakan parameter yang menunjukkan kemampuan maksimum sambungan dalam menahan beban tarik sebelum mengalami patah. Hasil pengujian kekuatan tarik rata-rata pada berbagai variasi parameter *friction welding* ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Grafik hubungan variasi parameter pengelasan terhadap kekuatan tarik

Berdasarkan Gambar 4.3, hasil pengujian menunjukkan bahwa material awal (*raw material*) baja S45C memiliki kekuatan tarik sebesar 806,55 MPa. Setelah dilakukan proses *friction welding*, nilai kekuatan tarik bervariasi sesuai

kombinasi parameter pengelasan yang digunakan. Pada putaran spindel 1170 rpm, kekuatan tarik berturut-turut sebesar 648,93 MPa, 870,83 MPa, dan 835,99 MPa untuk durasi gesekan 70, 80, dan 90 detik. Sementara itu, pada putaran 1800 rpm, diperoleh kekuatan tarik sebesar 860,70 MPa, 881,84 MPa, dan 875,90 MPa. Dibandingkan dengan material awal, hanya variasi 1170 rpm–70 detik yang menghasilkan kekuatan tarik lebih rendah, sedangkan seluruh variasi lainnya memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi.

Peningkatan kekuatan tarik hingga durasi gesekan 80 detik menunjukkan bahwa panas gesekan yang dihasilkan semakin optimal untuk membentuk ikatan metalurgi pada daerah sambungan. Panas yang cukup meningkatkan deformasi plastis dan rekristalisasi dinamis sehingga menghasilkan struktur yang lebih homogen. Pangestu et al. (2023) menyatakan bahwa peningkatan energi gesekan selama proses *friction welding* dapat meningkatkan kualitas sambungan dan kekuatan tarik. Hasil serupa juga dilaporkan oleh Winiczenko (2016), yang menyebutkan bahwa kombinasi putaran dan waktu gesek yang optimum menghasilkan ikatan sambungan yang lebih baik.

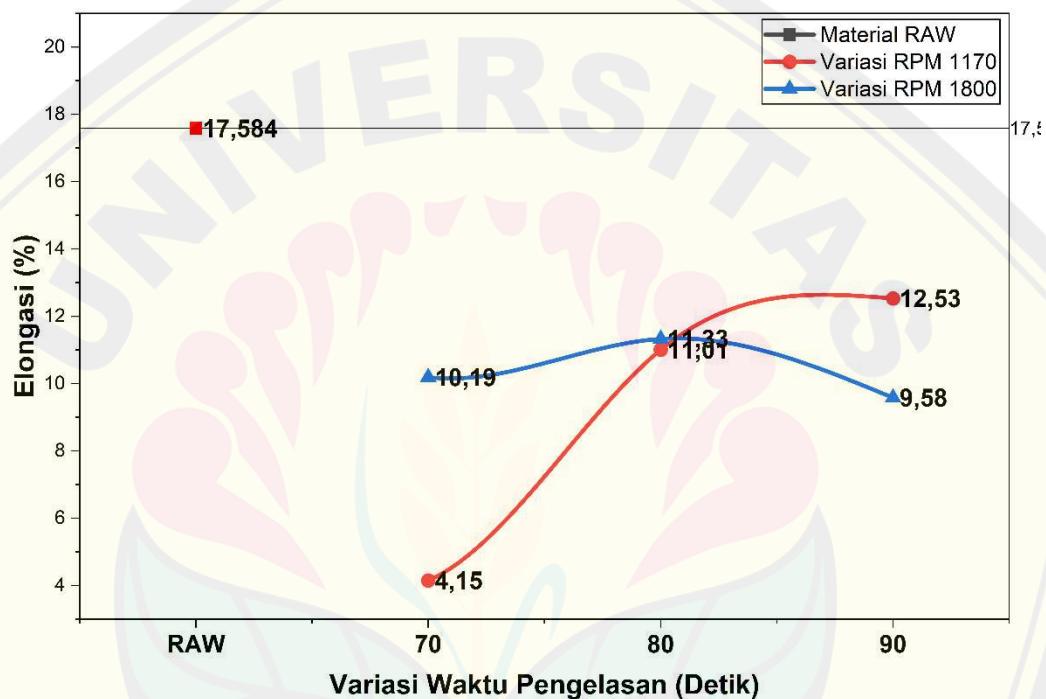
Namun, pada durasi gesekan 90 detik terjadi sedikit penurunan kekuatan tarik pada kedua variasi putaran spindel. Kondisi ini diduga disebabkan oleh masukan panas (*heat input*) yang berlebihan sehingga memicu pertumbuhan butir dan pelebaran daerah *Heat Affected Zone* (HAZ), yang berdampak pada penurunan sifat mekanik sambungan. Sujarwanto et al. (2020) juga melaporkan bahwa peningkatan waktu gesek memengaruhi karakteristik mikrostruktur daerah HAZ dan berpengaruh terhadap sifat mekanik hasil sambungan.

Kombinasi parameter terbaik diperoleh pada putaran 1800 rpm dengan durasi gesekan 80 detik, yang menghasilkan kekuatan tarik sebesar 881,84 MPa, atau sekitar 9,3% lebih tinggi dibandingkan material awal (806,55 MPa). Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa proses *friction welding* mampu menghasilkan sambungan dengan kualitas mekanik yang sangat baik melalui penghalusan butir (*grain refinement*) dan rekristalisasi dinamis. Temuan ini sejalan dengan penelitian Morisada et al. (2020), yang melaporkan bahwa proses *friction*

welding pada baja S45C menghasilkan struktur mikro yang lebih halus sehingga meningkatkan kekuatan tarik sambungan.

4.2.2 Elongasi

Elongasi menunjukkan kemampuan material mengalami deformasi plastis sebelum terjadi patah. Semakin tinggi nilai elongasi, semakin besar kemampuan sambungan untuk mengalami perpanjangan sebelum mengalami kegagalan. Hasil pengujian elongasi rata-rata ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Grafik hubungan variasi parameter pengelasan terhadap elongasi

Berdasarkan Gambar 4.4, hasil pengujian menunjukkan bahwa material awal (*raw material*) baja S45C memiliki nilai elongasi sebesar 17,584%. Setelah dilakukan proses *friction welding*, seluruh variasi menunjukkan nilai elongasi yang lebih rendah dibandingkan material awal. Pada putaran 1170 rpm, nilai elongasi berturut-turut sebesar 4,75%, 10,28%, dan 12,53% untuk durasi gesekan 70, 80, dan 90 detik. Sementara itu, pada putaran 1800 rpm, nilai elongasi yang diperoleh sebesar 10,19%, 11,33%, dan 9,58%.

Peningkatan nilai elongasi hingga kondisi tertentu menunjukkan bahwa panas gesekan dan tekanan aksial yang dihasilkan selama proses *friction welding* mampu meningkatkan deformasi plastis pada daerah sambungan sehingga material dapat mengalami regangan yang lebih besar sebelum patah. Shubhavardhan & Surendran (2012) menyatakan bahwa kombinasi panas dan tekanan tempa yang optimum dapat meningkatkan keuletan sambungan melalui terbentuknya ikatan metalurgi yang lebih baik. Selain itu, Kalsi & Sharma (2011) melaporkan bahwa optimasi parameter *friction welding* pada baja karbon mampu meningkatkan kekuatan tarik dan elongasi hingga mencapai kondisi proses yang optimum.

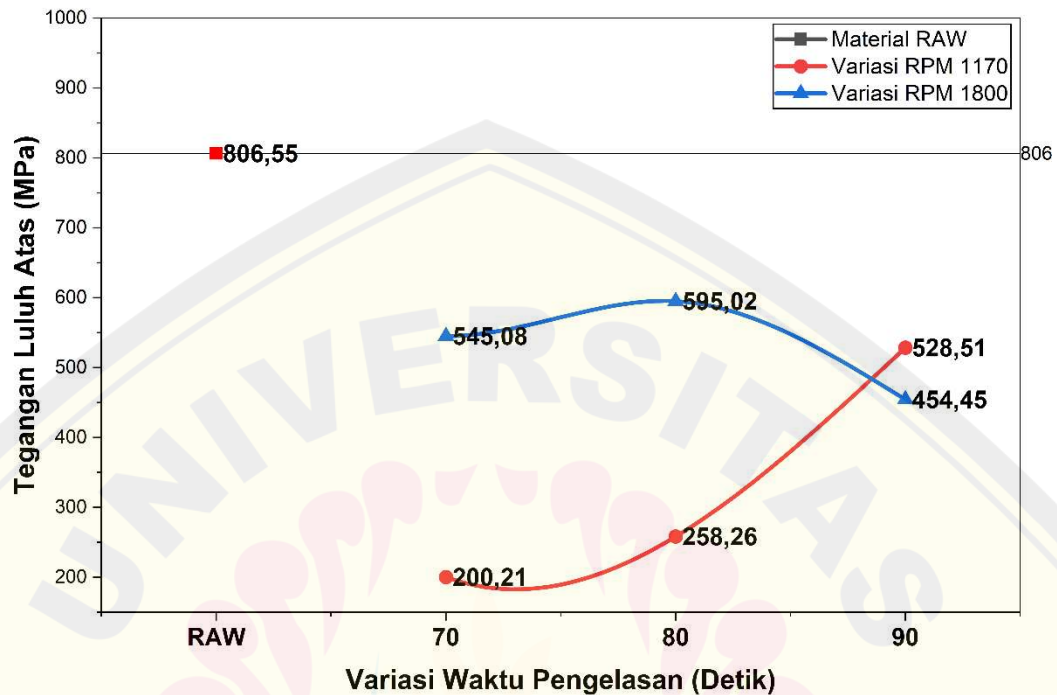
Meskipun demikian, nilai elongasi seluruh sambungan masih lebih rendah dibandingkan material awal (17,584%). Penurunan ini menunjukkan bahwa proses *friction welding* meningkatkan kekuatan sambungan dengan konsekuensi berkurangnya kemampuan deformasi plastis. Morisada et al. (2020) menjelaskan bahwa rekristalisasi dinamis dan penghalusan butir pada sambungan baja S45C menghasilkan peningkatan kekuatan, namun distribusi regangan menjadi lebih terlokalisasi pada daerah sambungan sehingga elongasi total cenderung menurun dibandingkan logam induk.

Variasi 1170 rpm dengan durasi gesekan 90 detik menghasilkan elongasi tertinggi sebesar 12,53%, sedangkan kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada variasi 1800 rpm dengan durasi 80 detik sebesar 881,84 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan keuletan tidak selalu diikuti oleh peningkatan kekuatan tarik, sehingga diperlukan keseimbangan parameter proses untuk memperoleh kombinasi sifat mekanik yang optimum. Fenomena serupa juga dilaporkan oleh Winiczenko (2016) Winiczenko (2016), yang menyatakan bahwa parameter *friction welding* yang optimum harus mampu menghasilkan keseimbangan antara kekuatan dan keuletan sambungan.

4.2.3 Tegangan Luluh Atas (*Upper Yield Point Stress*)

Upper yield point stress merupakan parameter yang menunjukkan tegangan saat material mulai mengalami deformasi plastis permanen. Semakin tinggi nilai *upper yield point stress*, semakin besar kemampuan material dalam

menahan pembebanan sebelum terjadi deformasi permanen. Hasil pengujian *upper yield point stress* rata-rata ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Grafik hubungan variasi parameter pengelasan terhadap tegangan luluh atas

Berdasarkan Gambar 4.5, hasil pengujian menunjukkan bahwa material awal (*raw material*) baja S45C memiliki nilai *upper yield point stress* sebesar 806,55 MPa. Setelah dilakukan proses *friction welding*, nilai *upper yield point stress* bervariasi pada setiap kombinasi parameter pengelasan. Nilai terendah diperoleh pada variasi 1170 rpm dengan durasi gesekan 80 detik sebesar 258,26 MPa, sedangkan nilai tertinggi diperoleh pada variasi 1800 rpm dengan durasi gesekan 80 detik sebesar 595,02 MPa. Pada variasi lainnya, nilai *upper yield point stress* berada pada rentang 258,26–545,08 MPa.

Perbedaan nilai *upper yield point stress* menunjukkan bahwa variasi parameter *friction welding* memengaruhi kemampuan sambungan dalam menahan deformasi plastis awal sebelum mengalami deformasi permanen. Semakin tinggi nilai *upper yield point stress*, semakin besar tegangan yang mampu ditahan material sebelum memasuki daerah plastis. Menurut Callister & Rethwisch (2009), nilai

yield strength merupakan indikator penting ketahanan material terhadap deformasi permanen dan sangat dipengaruhi oleh ukuran butir serta kualitas struktur mikro. Selain itu, Winiczenko (2016) menyatakan bahwa kualitas ikatan metalurgi yang baik pada proses *friction welding* berkontribusi terhadap peningkatan sifat mekanik sambungan, termasuk kemampuan material menahan beban sebelum terjadi deformasi plastis.

Nilai *upper yield point stress* tertinggi diperoleh pada variasi 1800 rpm–80 detik, yang menunjukkan bahwa kombinasi parameter tersebut menghasilkan kondisi penyambungan yang paling optimum. Sebaliknya, pada variasi 1800 rpm–90 detik terjadi penurunan nilai *upper yield point stress*, yang diduga disebabkan oleh masukan panas yang berlebihan sehingga memicu perubahan mikrostruktur, seperti pertumbuhan butir dan pelebaran daerah *Heat Affected Zone* (HAZ). Fenomena serupa juga dilaporkan oleh Pangestu et al. (2023), yang menyatakan bahwa peningkatan parameter proses melebihi kondisi optimum dapat menurunkan kualitas sambungan akibat perubahan struktur mikro.

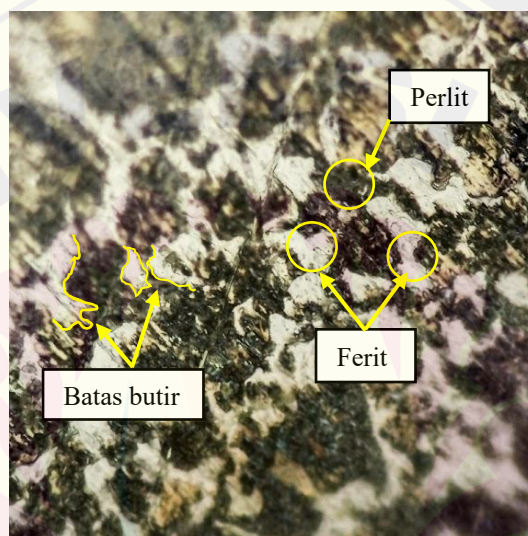
Secara keseluruhan, variasi 1800 rpm dengan durasi gesekan 80 detik menghasilkan kombinasi sifat mekanik terbaik, ditunjukkan oleh nilai kekuatan tarik tertinggi, elongasi yang relatif tinggi, dan *upper yield point stress* terbesar. Oleh karena itu, kombinasi parameter tersebut dapat direkomendasikan sebagai kondisi optimum pada proses *friction welding* baja S45C menggunakan mesin bubut.

4.3 Hasil Pengamatan Mikrostruktur

Pengamatan mikrostruktur dilakukan untuk mengetahui perubahan struktur mikro yang terjadi pada material akibat proses *friction welding*. Pengamatan dilakukan menggunakan mikroskop optik pada beberapa daerah pengamatan yang meliputi logam induk (*base metal*), daerah pengaruh panas (*Heat Affected Zone/HAZ*), dan daerah sambungan (*weld zone*). Analisis mikrostruktur dilakukan untuk mengetahui hubungan antara perubahan struktur mikro dengan sifat mekanik yang diperoleh dari hasil pengujian tarik.

4.3.1 Mikrostruktur Logam Induk

Pengamatan mikrostruktur logam induk dilakukan sebagai pembandingan terhadap perubahan struktur mikro yang terjadi setelah proses *friction welding*. Struktur mikro awal baja S45C didominasi oleh fasa ferit dan *perlit* yang tersebar merata pada material. Gambar 4.6 menunjukkan mikrostruktur logam induk baja S45C sebelum proses pengelasan.



Gambar 4.6 Mikrostruktur Logam Induk Baja S45C perbesaran 1000 x

Berdasarkan hasil pengamatan pada Gambar 4.6, mikrostruktur logam induk baja S45C terdiri atas fasa *ferrit* yang tampak berwarna terang dan fasa *perlit* yang berwarna lebih gelap. Struktur tersebut merupakan karakteristik umum baja karbon menengah yang memiliki kandungan karbon sekitar 0,45%, sehingga menghasilkan kombinasi antara kekuatan dan keuletan yang cukup baik.

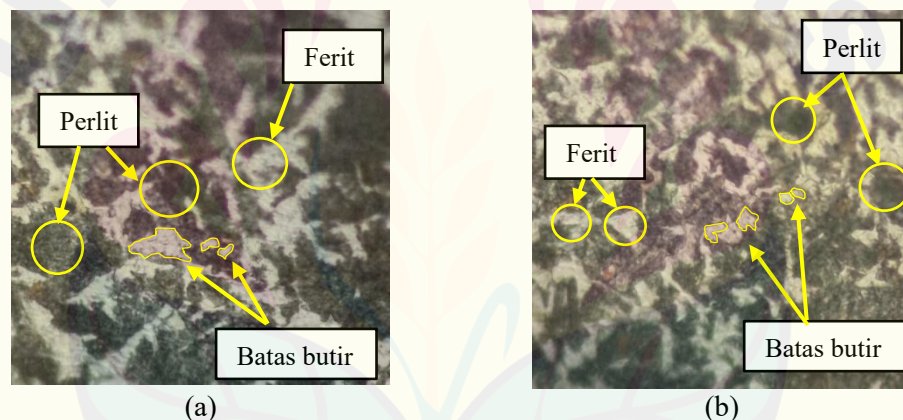
Distribusi *ferrit* dan *perlit* terlihat relatif merata pada seluruh permukaan pengamatan. Fasa *ferrit* berperan memberikan sifat ulet pada material, sedangkan fasa *perlit* berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan dan kekerasan. Struktur mikro logam induk ini digunakan sebagai kondisi awal untuk membandingkan

perubahan yang terjadi pada daerah HAZ dan daerah sambungan setelah proses *friction welding*.

Menurut Callister & Rethwisch (2009), proporsi *ferrit* dan *perlit* pada baja karbon menengah sangat memengaruhi sifat mekanik material. Semakin tinggi fraksi *perlit*, maka kekuatan material cenderung meningkat, sedangkan keberadaan *ferrit* berkontribusi terhadap peningkatan keuletan material.

4.3.2 Daerah HAZ

Daerah *Heat Affected Zone (HAZ)* merupakan daerah yang mengalami pengaruh panas selama proses *friction welding* tanpa mengalami pencairan. Pengamatan mikrostruktur menunjukkan adanya perubahan ukuran dan distribusi butir dibandingkan logam induk. Gambar 4.7 menunjukkan mikrostruktur daerah HAZ spesimen



Gambar 4.7 Mikrostruktur daerah HAZ perbesaran 1000x; (a) spesimen 1170 rpm–70 detik dan (b) spesimen 1800 rpm–80 detik

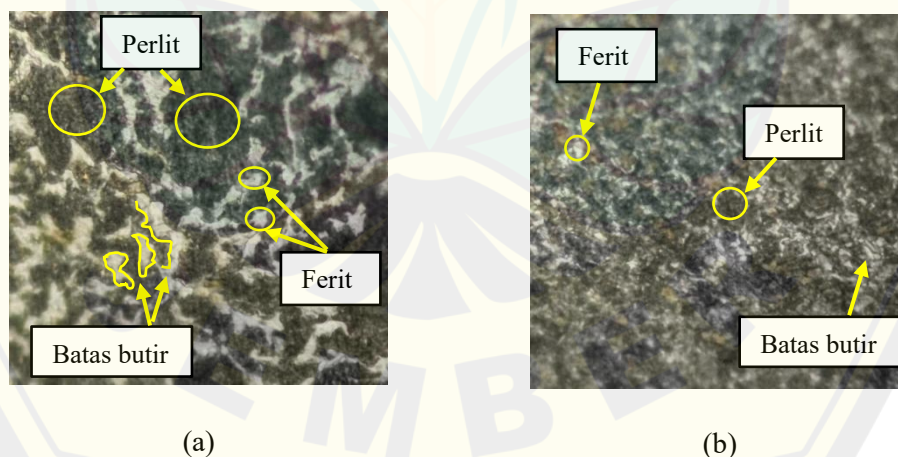
Berdasarkan Gambar 4.7, terlihat adanya perbedaan karakteristik mikrostruktur pada daerah HAZ antara spesimen dengan kekuatan tarik terendah dan tertinggi. Pada Gambar 4.7(a), yaitu spesimen 1170 rpm dan 70 detik dengan kekuatan tarik 568,51 MPa, struktur mikro masih menunjukkan ukuran butir yang relatif lebih kasar dan perubahan struktur yang tidak terlalu signifikan dibandingkan logam induk. Kondisi ini menunjukkan bahwa panas yang dihasilkan selama proses *friction welding* belum cukup untuk menghasilkan deformasi plastis dan rekristalisasi secara optimal.

Sementara itu, pada Gambar 4.7(b), yaitu spesimen 1800 rpm dan 80 detik dengan kekuatan tarik 881,84 MPa, terlihat struktur mikro yang lebih homogen dan cenderung lebih halus. Peningkatan putaran spindel dan durasi gesekan menghasilkan input panas yang lebih besar sehingga proses rekristalisasi berlangsung lebih efektif. Struktur yang lebih halus menunjukkan bahwa energi panas yang diterima material mampu memperbaiki kualitas daerah HAZ tanpa menyebabkan pertumbuhan butir yang berlebihan.

Perbedaan mikrostruktur tersebut menunjukkan bahwa parameter pengelasan memiliki pengaruh langsung terhadap perubahan struktur pada daerah HAZ. Semakin optimal input panas yang diberikan, semakin baik proses rekristalisasi yang terjadi sehingga menghasilkan struktur yang lebih homogen dan mendukung peningkatan sifat mekanik sambungan.

4.3.3 Mikrostruktur Daerah Sambungan Las

Pada daerah sambungan las terlihat struktur mikro yang lebih rapat dibandingkan logam induk maupun daerah HAZ. Struktur yang lebih rapat menunjukkan terjadinya deformasi plastis akibat kombinasi panas gesekan dan tekanan tanpa selama proses *friction welding*. Ditunjukkan mikrostruktur daerah sambungan dalam Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Mikrostruktur daerah sambungan perbesaran 1000x; (a) spesimen 1170 rpm–70 detik dan (b) spesimen 1800 rpm–80 detik

Daerah sambungan merupakan area yang mengalami pengaruh terbesar selama proses *friction welding* karena menerima panas gesekan dan tekanan aksial

secara langsung. Berdasarkan Gambar 4.8(a), mikrostruktur daerah sambungan pada spesimen dengan kekuatan tarik terendah masih menunjukkan struktur yang relatif kasar dan kurang homogen. Kondisi ini mengindikasikan bahwa deformasi plastis yang terjadi selama proses pengelasan belum berlangsung secara maksimal sehingga ikatan metalurgi yang terbentuk pada daerah sambungan masih kurang sempurna.

Sebaliknya, pada Gambar 4.8(b) terlihat struktur mikro yang lebih rapat dan homogen. Ukuran butir yang lebih halus menunjukkan terjadinya rekristalisasi dinamis akibat kombinasi panas gesekan dan tekanan tempa selama proses *friction welding*. Rekristalisasi tersebut menghasilkan butir-butir baru yang lebih kecil sehingga meningkatkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi dan berdampak pada peningkatan kekuatan tarik material.

Menurut Winiczenko (2016), penghalusan butir yang terjadi selama *friction welding* berkontribusi terhadap peningkatan sifat mekanik sambungan melalui mekanisme *grain refinement*. Hasil pengamatan mikrostruktur pada penelitian ini menunjukkan bahwa spesimen dengan kekuatan tarik tertinggi memiliki struktur mikro yang lebih halus dan homogen dibandingkan spesimen dengan kekuatan tarik terendah, sehingga mendukung hasil pengujian tarik yang telah diperoleh.

4.4 Pembahasan Hasil Penelitian Secara Keseluruhan

Berdasarkan hasil pengujian tarik dan pengamatan mikrostruktur, dapat diketahui bahwa variasi kecepatan putaran spindel dan durasi gesekan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kualitas sambungan *friction welding* baja S45C menggunakan mesin bubut. Perubahan kedua parameter tersebut memengaruhi besarnya *heat input* selama proses pengelasan sehingga berdampak langsung terhadap pembentukan ikatan metalurgi, deformasi plastis, perubahan struktur mikro, serta sifat mekanik sambungan yang dihasilkan.

Hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan putaran spindel dari 1170 rpm menjadi 1800 rpm secara umum meningkatkan kekuatan tarik sambungan. Pada putaran 1170 rpm, kekuatan tarik meningkat dari 648,93

MPa pada durasi gesekan 70 detik menjadi 870,83 MPa pada durasi 80 detik, kemudian sedikit menurun menjadi 835,99 MPa pada durasi 90 detik. Tren serupa juga terjadi pada putaran 1800 rpm, di mana kekuatan tarik meningkat dari 860,70 MPa menjadi 881,84 MPa pada durasi 80 detik, kemudian sedikit menurun menjadi 875,90 MPa pada durasi 90 detik. Dibandingkan dengan material awal (*raw material*) yang memiliki kekuatan tarik sebesar 806,55 MPa, seluruh variasi sambungan kecuali 1170 rpm–70 detik menunjukkan nilai kekuatan tarik yang lebih tinggi. Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan (Haryadi et al., 2025), yang menunjukkan bahwa sambungan *rotary friction welding* baja JIS S45C pada kondisi *as-welded* memiliki kekuatan tarik 737,16 MPa, atau sekitar 2,5% lebih tinggi dibandingkan logam induk, meskipun elongasinya menurun sekitar 5,5%. Hal tersebut mengindikasikan bahwa parameter *friction welding* yang tepat mampu membentuk ikatan metalurgi yang kuat melalui deformasi plastis dan rekristalisasi dinamis. Pada penelitian ini, kecenderungan yang sama juga diperoleh, di mana kombinasi putaran spindel 1800 rpm dan durasi gesekan 80 s menghasilkan kekuatan tarik tertinggi sebesar 881,84 MPa, sehingga menunjukkan bahwa optimasi parameter proses berperan penting dalam meningkatkan kualitas sambungan. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi parameter yang tepat mampu menghasilkan sambungan dengan kualitas mekanik yang setara bahkan melampaui material awal.

Kombinasi parameter terbaik diperoleh pada kecepatan putaran spindel 1800 rpm dan durasi gesekan 80 detik, yang menghasilkan kekuatan tarik sebesar 881,84 MPa, elongasi sebesar 11,33%, dan *upper yield point stress* sebesar 595,02 MPa. Meskipun nilai elongasi masih lebih rendah dibandingkan material awal (17,584%), kombinasi parameter tersebut memberikan keseimbangan terbaik antara kekuatan, keuletan, dan kemampuan material menahan deformasi plastis awal. Hasil ini menunjukkan bahwa proses *friction welding* mampu meningkatkan kekuatan sambungan dengan sedikit mengorbankan keuletan akibat perubahan struktur mikro pada daerah las.

Hasil pengamatan mikrostruktur mendukung hasil pengujian mekanik yang diperoleh. Pada spesimen dengan kekuatan tarik terendah (1170 rpm–70

detik), daerah HAZ dan daerah sambungan masih menunjukkan struktur yang relatif kasar dan kurang homogen. Kondisi ini mengindikasikan bahwa panas gesekan dan deformasi plastis yang terjadi belum cukup untuk menghasilkan rekristalisasi dinamis secara optimal sehingga ikatan metalurgi yang terbentuk masih kurang sempurna. Sebaliknya, pada spesimen dengan kekuatan tarik tertinggi (1800 rpm–80 detik), terlihat struktur mikro yang lebih halus, rapat, dan homogen pada daerah HAZ maupun daerah sambungan. Struktur tersebut menunjukkan bahwa kombinasi panas gesekan dan tekanan aksial yang optimum mampu menghasilkan rekristalisasi dinamis dan penghalusan butir (*grain refinement*) yang lebih efektif.

Hasil penelitian ini sejalan dengan Morisada et al. (2020), yang melaporkan bahwa proses *friction welding* pada baja S45C menghasilkan penghalusan butir akibat rekristalisasi dinamis sehingga meningkatkan kekuatan sambungan. Selain itu, Pangestu et al. (2023) menyatakan bahwa peningkatan kecepatan putaran dan durasi gesekan hingga kondisi optimum mampu meningkatkan kualitas ikatan metalurgi dan kekuatan tarik sambungan. Winiczenko (2016) juga menjelaskan bahwa keseimbangan antara kecepatan putaran, waktu gesek, dan tekanan tempa merupakan faktor utama dalam menghasilkan sambungan *friction welding* dengan sifat mekanik yang optimal.

Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa kualitas sambungan *friction welding* baja S45C sangat dipengaruhi oleh kombinasi kecepatan putaran spindel dan durasi gesekan. Parameter yang terlalu rendah menghasilkan *heat input* yang tidak mencukupi sehingga ikatan metalurgi belum terbentuk secara optimal, sedangkan parameter yang terlalu tinggi berpotensi menimbulkan panas berlebih yang menyebabkan pertumbuhan butir dan penurunan sifat mekanik. Oleh karena itu, kombinasi kecepatan putaran spindel 1800 rpm dan durasi gesekan 80 detik dapat direkomendasikan sebagai parameter optimum pada proses *friction welding* baja S45C menggunakan mesin bubut dengan sistem penekan pneumatik karena menghasilkan sifat mekanik terbaik yang didukung oleh struktur mikro yang lebih halus, rapat, dan homogen.

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Variasi kecepatan putaran spindel dan durasi gesekan memengaruhi kekuatan tarik sambungan. Baja S45C sebagai material awal memiliki kekuatan tarik 806,55 MPa dengan elongasi 17,584%, sedangkan parameter optimum 1800 rpm dan 80 detik menghasilkan kekuatan tarik 881,84 MPa atau meningkat sekitar 9,3%, meskipun elongasinya menurun menjadi 11,33%. Peningkatan tersebut disebabkan oleh terbentuknya ikatan metalurgi yang lebih baik akibat panas gesekan yang optimum.
2. Karakteristik mikrostruktur pada kondisi optimum (1800 rpm–80 detik) menunjukkan struktur yang lebih halus, rapat, dan homogen dibandingkan kondisi 1170 rpm–70 detik, baik pada daerah sambungan maupun *heat affected zone* (HAZ). Kondisi ini menunjukkan terbentuknya mikrostruktur yang lebih seragam sehingga kualitas sambungan meningkat.
3. Karakteristik mikrostruktur berhubungan erat dengan kekuatan tarik sambungan. Struktur mikro yang lebih halus menghasilkan kekuatan tarik yang lebih tinggi karena ukuran butir yang lebih kecil meningkatkan jumlah batas butir yang menghambat pergerakan dislokasi (*mekanisme Hall–Petch*) sehingga beban tarik dapat terdistribusi secara lebih seragam pada daerah sambungan.. Oleh karena itu, kondisi terbaik diperoleh pada 1800 rpm dan 80 detik dengan kekuatan tarik sebesar 881,84 MPa.

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan variasi parameter lain seperti tekanan aksial dan suhu pendinginan.
2. Pengujian tambahan seperti uji kekerasan, impak, dan fatigue perlu dilakukan untuk melengkapi karakterisasi sifat mekanik sambungan.
3. Pengamatan mikrostruktur menggunakan SEM disarankan untuk memperoleh analisis yang lebih detail terhadap perubahan struktur dan mekanisme perpatahan.

DAFTAR PUSTAKA

- Arora, H., Singh, R., & Brar, G. S. (2019). Thermal and structural modelling of arc welding processes: A literature review. *Measurement and Control (United Kingdom)*, 52(7–8), 955–969. <https://doi.org/10.1177/0020294019857747>
- Callister, W. D. ., & Rethwisch, D. G. . (2009). *Materials science and engineering : an introduction*. John Wiley.
- Gao, K., Zhang, S., Mondal, M., Basak, S., Hong, S. T., & Shim, H. (2021). Friction stir spot butt welding of dissimilar S45C steel and 6061-T6 aluminum alloy. *Metals*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/met11081252>
- Haryadi, G. D., Haryanto, I., Suryo Utomo, M. T., Eka Susanto, A., & Ekaputra, I. M. W. (2025). Study of Normalizing Post – Treatment Effect on the Mechanical Characteristics and Microstructure of the Joint Rotary Friction Welded JIS S45C Medium Carbon Steel. *International Current Journal of Engineering and Science*, 04(11), 87–95. <https://doi.org/10.47001/icjes/2025.411011>
- Husodo, N., Sanyoto, B. L., Setyawati, B., & Mursid, M. (2013). Penerapan Teknologi Las Gesek (Friction Welding) dalam Rangka Penyambungan Dua Buah Logam Baja Karbon St41 pada Produk Back Spring Pin. *Jurnal Energi Dan Manufaktur*, 6(1), 1–94.
- Kalsi, N. S., & Sharma, V. S. (2011). A statistical analysis of rotary friction welding of steel with varying carbon in workpieces. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 57(9–12), 957–967. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3361-z>
- Khedr, M., Hamada, A., Järvenpää, A., Elkatatny, S., & Abd-Elaziem, W. (2023). Review on the Solid-State Welding of Steels: Diffusion Bonding and Friction Stir Welding Processes. In *Metals* (Vol. 13, Number 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/met13010054>
- Krispamuji, E. (2020). *Analisis Pengaruh Variasi Penekanan Hidrolik Dan Pemanasan Terhadap Sifat Mekanik Hasil Pengelasan Gesek Baja St 37 Dengan Metode Taguchi*. Institut Teknologi Nasional Malang.
- Lee, S. H. (2019). A hot cracking on dissimilar metal weld between A106Gr.B and A312 TP316L with buttering ERNiCr-3. *Metals*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/met9050533>

- Lin, H. W., Ku, S. Y., Su, H. C., Huang, C. W., Lin, Y. T., Wong, K. T., & Wu, C. C. (1999). The effect of joint design and volume fraction on friction welding properties of A360/SiC (p). *Welding Journal-New York*, 78(100). <https://doi.org/10.1002/adma.200401622>
- Mohan, D. G., & Wu, C. S. (2021). A Review on Friction Stir Welding of Steels. In *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)* (Vol. 34, Number 1). Springer. <https://doi.org/10.1186/s10033-021-00655-3>
- Morisada, Y., Shirasawa, T., & Fujii, H. (2020). Medium and high carbon steel joints formed by friction welding below A1 temperature. *Science and Technology of Welding and Joining*, 25(5), 438–445. <https://doi.org/10.1080/13621718.2020.1738663>
- Nasir, T., Asmael, Mohammed., Zeeshan, Q., & Solyali, D. (2020). Applications of Machine Learning to Friction Stir Welding Process Optimization. *Jurnal Kejuruteraan*, 32(2), 171–186. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2020-32\(2\)-01](https://doi.org/10.17576/jkukm-2020-32(2)-01)
- Nasir, T., Kalaf, O., & Asmael, M. (2021). Effect of rotational speed, and dwell time on the mechanical properties and microstructure of dissimilar aa5754 and aa7075-t651 aluminum sheet alloys by friction stir spot welding. *Medziagotyra*, 27(3), 308–312. <https://doi.org/10.5755/j02.ms.26860>
- Pangestu, F. I., Hartono, P., & Lesmanah, U. (2023). Pengaruh Durasi Gesekan Pada Pengelasan Gesek (Friction Welding) Terhadap Kekuatan Tarik Pada Material S45c Standart Jis.
- Prasetyono, S., & Subiyanto, H. (2012). Pengaruh Durasi Gesek, Tekanan Gesek dan Tekanan Tempa Terhadap Impact Strenght Sambungan Lasan Gesek Langsung Pada Baja Karbon AISI 1045. *Jurnal Sains Dan Seni Pomits*, 1(1), 1–5.
- Rohman, F., & Hudaya, A. Z. (2021). Pembuatan Mesin Las Gesek Tipe Pneumatik Bertenaga Motor Listrik Dengan Daya 1 HP. *Jurnal CRANKSHAFT*, 4(2).
- Saputro, A. D., & Rahmadiano, F. (2022). Analisis Pengaruh Variasi Sudut Chamfer dan Variasi Preheating Terhadap Uji Tarik Hasil Pengelasan Gesek Baja St 60 dengan Metode Taguchi. *Seminar Nasional 2022 METAVERSE: Peluang Dan Tantangan Pendidikan Tinggi Di Era Industri 5.0*, 13, 2022.
- Shubhavardhan, R., & Surendran, S. (2012). Friction Welding to Join Dissimilar Metals. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(5), 1–11. www.ijetae.com

- Sujarwanto, Rusianto, T., & Lestari, N. (2020). Pengaruh Variasi Waktu Kontak Friction Welding (Frw) Terhadap Sifat Fisik Dan Mekanis Baja S45c Dan Stainless Steel Aisi 304. *Jurnal Teknologi*.
- Sunyoto, Nugroho, G., Subarjan, & Sasmito, A. (2020). Optimalisasi Fungsi Mesin Bubut untuk Proses Pengelasan Rotary Friction Welding dengan Menambah Jig dan Pendorong Hidrolik. *Journal Of Laboratory Issn*, 2(3), 17–26.
- Susanto, A. E., Haryadi, G. D., Haryanto, I., Nugroho, S., & Ekaputra, I. M. W. (2025). Evaluation of stress-relieving heat treatment on mechanical properties and microstructure of friction-welded JIS S45C steel. *Disseminating Information on the Research of Mechanical Engineering- Jurnal Polimesin*, 23(3). <http://e-jurnal.pnl.ac.id/polimesin>
- Toramoto, R., Yamashita, T., Ushioda, K., Omura, T., & Fujii, H. (2024). Hydrogen Embrittlement Susceptibility of Linear Friction Welded Medium Carbon Steel Joints. *ISIJ International*, 64(7), 1185–1196. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-016>
- Winiczenko, R. (2016). Effect of friction welding parameters on the tensile strength and microstructural properties of dissimilar AISI 1020-ASTM A536 joints. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(5–8), 941–955. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7751-5>

LAMPIRAN

LAMPIRAN 1. Alat Penelitian

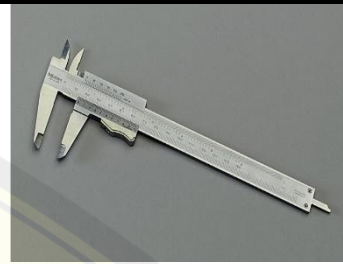
Alat



Mesin Bubut



Grinder Polisher



Jangka Sorong



Stop Watch



Gerinda



Tang



Termal Gun



Kaca mata safety



Sarung tangan



*Ultimate Tensile
Machine (UTM)*



Kompresor udara



Mikroskop optik



Dongkrak pneumatik



Kertas Amplas

LAMPIRAN 2. Bahan Penelitian

Bahan



Baja pejal S45C



Resin + katalis



Cairan etsa
(HNO₃+Ethanol)



Pasta poles

LAMPIRAN 3. Proses *friction welding*

Proses *friction welding*



Menyiapkan material



Memasang spesimen pada cekam



Mengatur tekanan pneumatik sebesar 4 bar



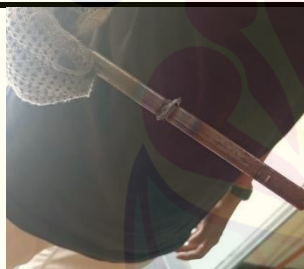
Melakukan pemanasan awal hingga 200°C



Melakukan *friction welding*



Menghentikan putaran



Melepas dan mendinginkan spesimen



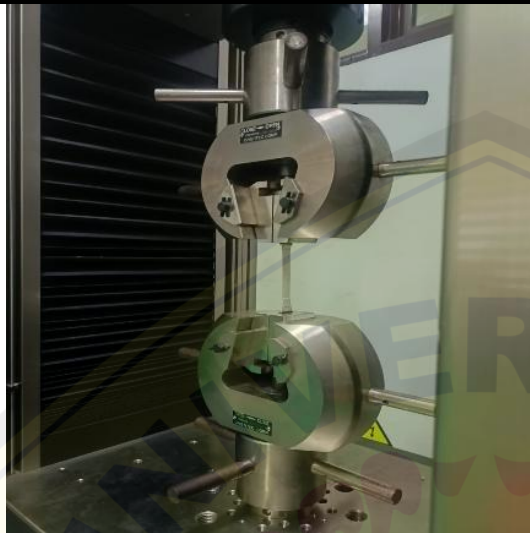
Menguji kesejajaran logam dengan *dial indicator*



Membentuk spesimen uji sesuai standar ASTM E8.

LAMPIRAN 7. Proses Pengujian Sampel *friction welding*

Proses Pengujian Sampel *friction welding*



Proses pengujian tarik dengan mesin UTM (*Universal Testing Machine*)



Proses pengujian Metalografi

LAMPIRAN 8. Hasil Pengujian *friction welding*

a. Hasil Pengujian Tarik

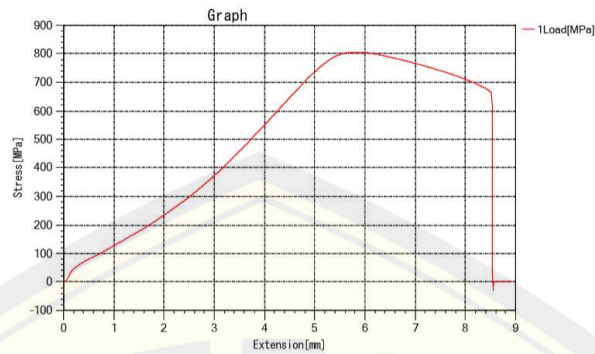
Hasil Data Pengujian Tarik Spesimen Material RAW

C:\FACT\LotData\lot00000548

7/13/2026

Laboratorium Pengujian Material
Universitas Jember

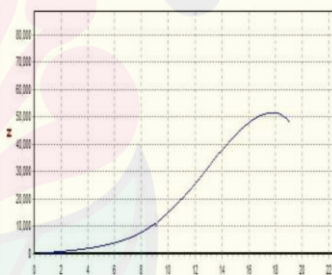
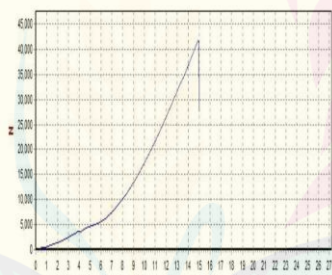
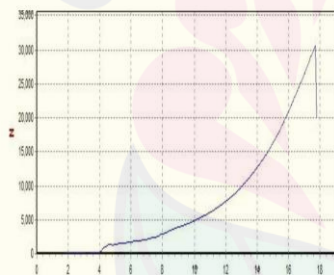
Kekuatan Tarik Baja S45C



	Section area mm ²	Upper yield point Load N	Max point Load N	Upper yield point Stress MPa	Max point Stress MPa	Break point Stress MPa	Max point Elongation %GL
1	63.617	51310	51310	806.55	806.55	515.8	17.584

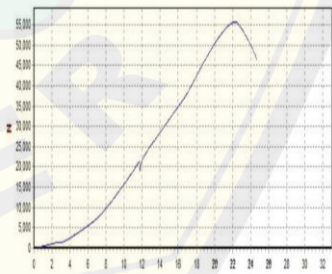
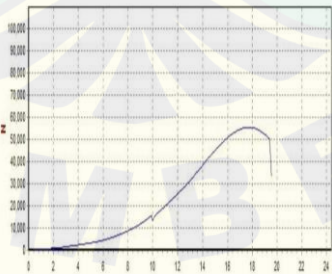
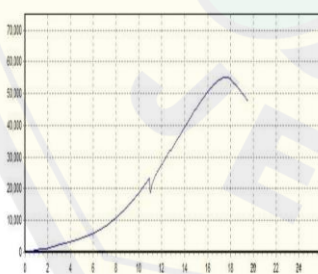
Hasil Data Pengujian Tarik Spesimen *friction welding* Variasi 1

URUKAN								URUKAN								URUKAN							
Specimen	Area	Yield Load	Peak Load	Yield	Tensile	Elongation	Ratio	Specimen	Area	Yield Load	Peak Load	Yield	Tensile	Elongation	Ratio	Specimen	Area	Yield Load	Peak Load	Yield	Tensile	Elongation	Ratio
SAMPLE A1	63.617	10500.0	30583.33	165.05	480.74	8.68	2.913	SAMPLE A2	63.617	14071.3	41750.00	235.37	656.27	7.63	2.768	SAMPLE A3	63.617	31200.0	51310.00	304.81	806.55	5.95	1.008

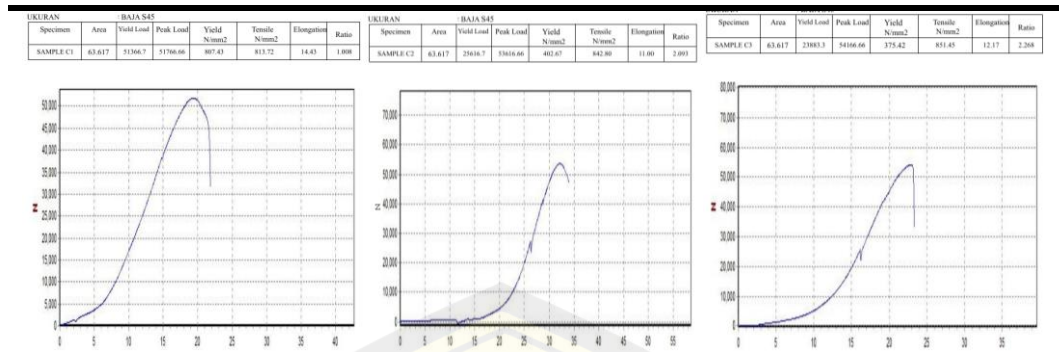


Hasil Data Pengujian Tarik Spesimen *friction welding* Variasi 2

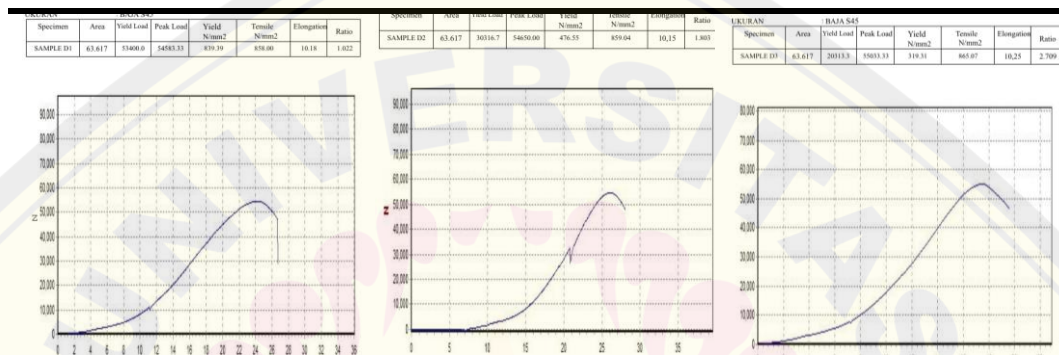
URUKAN								URUKAN								URUKAN							
Specimen	Area	Yield Load	Peak Load	Yield	Tensile	Elongation	Ratio	Specimen	Area	Yield Load	Peak Load	Yield	Tensile	Elongation	Ratio	Specimen	Area	Yield Load	Peak Load	Yield	Tensile	Elongation	Ratio
SAMPLE B1	63.617	22385.3	55200.00	351.88	867.09	12.58	2.466	SAMPLE B2	63.617	13453.3	51400.00	211.47	878.83	10.23	4.118	SAMPLE B3	63.617	20300.0	55000.00	320.35	875.96	10.23	2.728



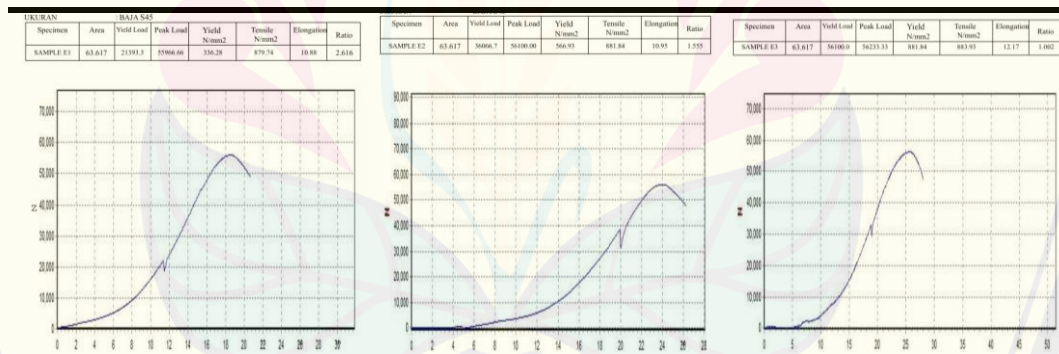
Hasil Data Pengujian Tarik Spesimen *friction welding* Variasi 3



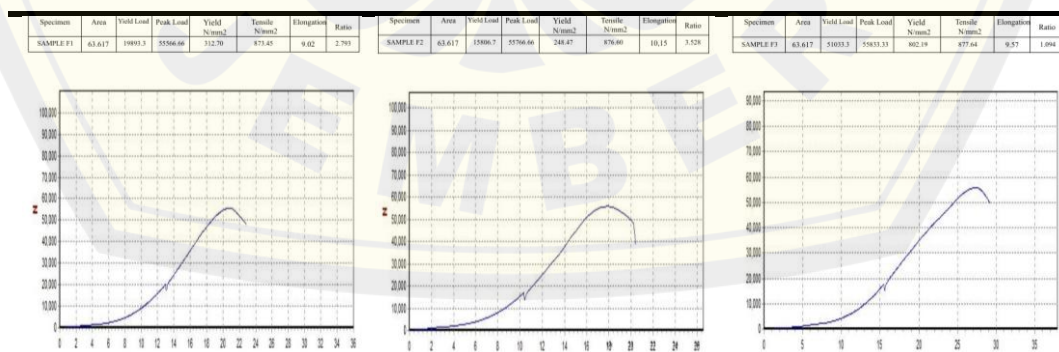
Hasil Data Pengujian Tarik Spesimen *friction welding* Variasi 4



Hasil Data Pengujian Tarik Spesimen *friction welding* Variasi 5



Hasil Data Pengujian Tarik Spesimen *friction welding* Variasi 6



Hasil Pengujian Tarik

Variasi RPM	Variasi Waktu	No	Kekuatan Tarik (Mpa)	Elongasi (%)	Modulus Elastisitas (Mpa)	Kekuatan Tarik Rata-Rata (Mpa)	Elongasi Rata-Rata (%)	Modulus Elastisitas Rata-Rata (Mpa)
1170	70	A1	480,74	0,68	165,05	648,93	4,75	401,74
		A2	656,27	7,63	235,37			
		A3	809,79	5,95	804,81			
	80	B1	867,69	12,58	351,84	870,83	11,01	258,26
		B2	870,83	10,23	211,47			
		B3	873,98	10,23	211,47			
	90	C1	813,72	14,43	807,43	835,99	12,53	528,51
		C2	842,8	11	402,67			
		C3	851,45	12,17	375,42			
1800	70	D1	858	10,18	839,39	860,70	10,19	545,08
		D2	859,04	10,15	476,55			
		D3	865,07	10,25	319,31			
	80	E1	879,74	10,88	336,28	881,84	11,33	595,02
		E2	881,84	10,95	566,93			
		E3	883,93	12,17	881,84			
	90	F1	873,45	9,02	312,7	875,90	9,58	454,45
		F2	876,6	10,15	248,47			
		F3	877,64	9,57	802,19			