

PROPOSAL TUGAS AKHIR

Evaluasi Cacat Sambungan Las SMAW dan FCAW pada Baja ASTM A36 dengan Variasi Arus Pengelasan Melalui Inspeksi Visual dan Magnetic Particle Testing untuk Aplikasi Konstruksi Deck Kapal Tugboat

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Terapan
Teknik pada Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Pengelasan dan Fabrikasi
Jurusan Teknik Mesin —Politeknik Negeri Batam

Diajukan oleh:

Adetya Aprenapa Dongoran
4422201017



Dosen Pembimbing:

Roza Puspita, S.Pd., M.Hum.
NIP. 117191

TEKNOLOGI REKAYASA PENGELASAN DAN FABRIKASI
JURUSAN TEKNIK MESIN
POLITEKNIK NEGERI BATAM
2026

LEMBAR PENGESAHAN

**Evaluasi Cacat Sambungan Las SMAW dan FCAW pada Baja ASTM A36
dengan Variasi Arus Pengelasan Melalui Inspeksi Visual dan Magnetic
Particle Testing untuk Aplikasi Konstruksi Deck Kapal Tugboat**

PROPOSAL TUGAS AKHI

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Terapan
Teknik pada Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Pengelasan dan Fabrikasi
Jurusan Teknik Mesin — Politeknik Negeri Batam

Diajukan oleh:

Adetya Aprenapa Dongoran

4422201017

Telah disetujui oleh Dosen Pembimbing

Batam, Mei 2026

Dosen Pembimbing



Roza Puspita, S.Pd., M. Hum.

NIP. 117191

LEMBAR PENGESAHAN

Evaluasi Cacat Sambungan Las SMAW pada Baja ASTM A36 dengan Variasi Arus Pengelasan Melalui Inspeksi Visual dan *Magnetic Particle Testing* untuk Aplikasi Konstruksi Deck Kapal Tugboat

TUGAS AKHIR

Disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar sarjana terapan teknik pada Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Pengelasan dan Fabrikasi
Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Batam

Disusun oleh :

Adetya Aprenaopa Dongoran
4422201017

Telah diterima dan disetujui pada 18, Agustus, 2026

Penguji I



Nurul Laili Arifin, S.ST, M.T.

Penguji II



Novebriantika, S.T., M.T.

Dosen Pembimbing



Roza Puspita, S.Pd., M. Hum.

Mengetahui,
Koordinator Program Studi
Teknologi Rekayasa Pengelasan dan Fabrikasi



Nurul Laili Arifin, S.ST, M.T.

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Adetya Aprenaopa Dongoran
NIM : 4422201017
Tahun terdaftar : 2022
Program Studi : Teknologi Rekayasa Pengelasan dan Fabrikasi
Jurusan : Teknik Mesin

Menyatakan bahwa dalam dokumen ilmiah Laporan Tugas Akhir ini tidak terdapat bagian dari karya ilmiah lain yang telah diajukan untuk memperoleh gelar akademik di suatu lembaga Pendidikan Tinggi dan juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang/lembaga lain, kecuali yang secara tertulis disitasi dalam dokumen ini dan disebutkan sumbernya secara lengkap dalam daftar pustaka.

Dengan demikian saya menyatakan bahwa dokumen ilmiah ini bebas dari unsur-unsur plagiasi dan apabila dokumen ilmiah Tesis ini dikemudian hari terbukti merupakan plagiasi dari hasil karya penulis lain dan/atau dengan sengaja mengajukan karya atau pendapat yang merupakan hasil karya penulis lain, maka penulis bersedia menerima sanksi akademik dan/atau sanksi hukum yang berlaku.

Batam, 18 Agustus 2026



Adetya Aprenaopa Dongoran
4422201017

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh. Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga laporan ini dapat diselesaikan dengan baik. Penyusunan laporan ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, dan dukungan berbagai pihak. Maka dari itu, penulis mengucapkan terima kasih yang setulusnya kepada dosen pembimbing, wali dosen, teman-teman, serta seluruh pihak yang telah memberikan motivasi, arahan, dan kontribusi baik secara langsung maupun tidak langsung. Penulis menyadari laporan ini masih memiliki keterbatasan, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan. Semoga laporan ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang setulusnya kepada:

1. Kepada Allah SWT yang selalu memberikan kekuatan dan kelancaran kepada saya dalam proses pembuatan tugas akhir ini
2. Kepada orang tua saya, yang telah memberikan kasih dan sayang, dukungan secara moral dan materi, serta selalu mendoakan setiap perjalanan dibalik layar.
3. Kepada ke-2 saudara/i saya, yang selalu memberikan dukungan
4. Kepada Bapak Ir.Bambang Hendrawan, ST., MSM., CIPMP., CISCP, selaku Direktur Utama Politeknik Negeri Batam, yang telah memberikan kesempatan bagi Penulis untuk menimba ilmu di Politeknik Negeri Batam.
5. Kepada Bapak Ari Wibowo, S.T., M.Eng., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin.
6. Kepada Ibu Nurul Laili Arifin, S.S.T.,M.T.selaku Ketua Program Studi Teknologi Rekayasa Pengelasan dan Fabrikasi.
7. Kepada Ibu Roza Puspita, S.Pd., M.Hum selaku wali dosen dan pembimbing, terimakasih atas bimbingan, arahan, dan dukungan yang telah diberikan selama proses perkuliahan hingga penyusunan proposal ini.
8. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada teman-teman yang telah memberikan dukungan, bantuan, dan semangat selama proses perkuliahan hingga penyusunan proposal ini

Batam, 18 Agustus 2026

Penyusun



Adetya Aprenaopa Dongoran
4422201017

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan cacat pada sambungan las yang dihasilkan melalui *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) dan *Flux-Cored Arc Welding* (FCAW) pada baja ASTM A36 dengan ketebalan 10 mm untuk aplikasi konstruksi dek kapal tunda. Penelitian ini didorong oleh fungsi kritis dek kapal tunda, yang menanggung beban siklik dan benturan yang intensif selama operasi penarik dan manuver, sehingga kualitas sambungan las menjadi faktor utama dalam keandalan struktural. Metodologi eksperimental melibatkan persiapan tiga spesimen las untuk setiap proses pengelasan, dengan menggunakan elektroda E7018 untuk SMAW dan kawat inti fluks E71T-1 dengan gas pelindung 100% CO₂ (dengan laju aliran 18–22 L/menit) untuk FCAW. Semua pengelasan dilakukan pada posisi datar (1G) dengan desain sambungan alur V tunggal 60°. Pemeriksaan visual dan Uji Partikel Magnetik (MPT) dilakukan untuk mengevaluasi integritas las pada permukaan dan lapisan dekat permukaan sebelum pengujian mekanis. Temuan ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis awal bagi galangan kapal dalam memilih metode pengelasan yang optimal untuk fabrikasi dek kapal tunda, sehingga berkontribusi pada peningkatan keselamatan operasional dan keandalan struktural. Namun, validasi lebih lanjut direkomendasikan sebelum penerapan langsung di lapangan.

Kata kunci: SMAW, FCAW, ASTM A36, Dek Kapal Tunda, Pemeriksaan Visual, Pengujian Partikel Magnetik, Cacat Las, NDT.

ABSTRACT

This study aims to compare defects of welded joints produced via Shielded Metal Arc Welding (SMAW) and Flux-Cored Arc Welding (FCAW) on 10 mm thick ASTM A36 steel for tugboat deck construction applications. This research is driven by the critical function of tugboat decks, which endure intensive cyclic and impact loads during towing and maneuvering operations, making weld joint quality a primary factor in structural reliability. The experimental methodology involved preparing three welded specimens for each welding process, utilizing E7018 electrodes for SMAW and E71T-1 flux-cored wire with 100% CO₂ shielding gas (at a flow rate of 18–22 L/min) for FCAW. All welds were executed in the flat position (1G) with a 60° single V-groove joint design. Visual inspection and Magnetic Particle Testing (MPT) were conducted to evaluate surface and near-surface weld integrity prior to mechanical testing. The findings are expected to provide initial technical recommendations for shipyards in selecting the optimal welding method for tugboat deck fabrication, thereby contributing to enhanced operational safety and structural reliability. However, further validation is recommended before direct field implementation.

Keywords: SMAW, FCAW, ASTM A36, Tugboat Deck, Visual Inspection, Magnetic Particle Testing, Weld Defects, NDT.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
BAB I — PENDAHULUAN	12
1.1. Latar Belakang	12
1.2. Rumusan Masalah	13
1.3. Batasan Masalah / Ruang Lingkup.....	13
1.4. Tujuan Penelitian.....	14
1.5. Manfaat Penelitian	14
BAB II — TINJAUAN PUSTAKA	15
2.1. Hasil Penelitian Terdahulu.....	15
2.2. Teori dan Konsep Dasar.....	16
BAB III — METODOLOGI	20
3.1. Diagram Alir Penelitian.....	20
3.2. Bahan dan Alat	21
3.3. Parameter Pengelasan.....	21
3.4. Prosedur Pengujian	23
3.5. Teknik Analisis Data.....	24
BAB IV — HASIL DAN PEMBAHASAN	25
4.1. PENGUJIAN VISUAL.....	25
4.1.1. Hasil Pengujian Visual.....	31
4.1.2. Analisis Hasil Pengujian visual SMAW	31
4.1.3. Analisis Hasil Pengujian visual FCAW	33
4.2. Kesimpulan Pengaruh Variasi Arus dan Kualitas Pengerjaan	34
4.3. Evaluasi Keberterimaan Keseluruhan uji visual (Berdasarkan AWS D1.1)	34
4.4 PENGUJIAN NDT (MPT).....	35
4.5. Hasil Pengujian Non-Destructive Testing (NDT)	39
4.5.1 Analisis Hasil Pengujian MPT pada Spesimen SMAW	40

4.5.2. Analisis Hasil Pengujian MPT pada Spesimen FCAW	41
4.5.3 Evaluasi Keberterimaan Berdasarkan Standar AWS D1.1	42
4.6. Rekomendasi Tindakan Lanjutan.....	42
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	44
5.1 Kesimpulan	44
5.2 Saran.....	45
DAFTAR PUSTAKA.....	48

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Parameter sampel 1	22
Tabel 2 Parameter sampel 2	22
Tabel 3 Parameter sampel 3	22
Tabel 4 Parameter sampel 4	22
Tabel 5 Parameter sampel 5	23
Tabel 6 Parameter sampel 6	23
Tabel 7 Parameter acuan sampel 1	25
Tabel 8 Heat input sampel 1	25
Tabel 9 Variatif cacat sampel 1	26
Tabel 10 Parameter acuan sampel 2	26
Tabel 11 Heat input sampel 2	26
Tabel 12 Variatif cacat sampel 2	27
Tabel 13 Parameter acuan sampel 3	27
Tabel 14 Heat input sampel 3	27
Tabel 15 Variatif cacat sampel 3	28
Tabel 17 Parameter acuan sampel 4	28
Tabel 16 Arus aktual root sampel 4	28
Tabel 18 Arus aktual Capping sampel 4	28
Tabel 19 Heat input sampel 4	28
Tabel 20 Variatif cacat sampel 4	29
Tabel 21 Parameter acuan sampel 5	29
Tabel 22. Heat input sampel 5	29
Tabel 23 Variatif cacat sampel 5	30
Tabel 24 Parameter acuan sampel 6	30
Tabel 25 Heat input Sampel 6	30
Tabel 26 Variatif cacat sampel 6	31
Tabel 27 Variatif cacat NDT sampel 1	36
Tabel 28 Variatif cacat NDT sampel 2	36
Tabel 29 Variatif cacat cacat NDT sampel 3	37
Tabel 30 Variatif cacat sampel 4	38
Tabel 31 Variatif cacat sampel 5	38
Tabel 32 Variatif cacat sampel 6	39

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Desain sambungan SMAW	17
Gambar 2 Desain sambungan FCAW	18
Gambar 3 Diagram alir penelitian.....	20
Gambar 4 Arus aktual sampel 1	25
Gambar 5 Tegangan aktual sampel 1	25
Gambar 6 Hasil pengelasan root sampel 1	25
Gambar 7 Hasil pengelasan capping sampel 1	25
Gambar 8 Tegangan aktual sampel 2.....	26
Gambar 9 Arus aktual sampel 2.....	26
Gambar 10 Hasil pengelasan capping sampel 2	26
Gambar 11 Hasil Pengelasan Roor sampel 2	26
Gambar 12 Arus aktual sampel 3.....	27
Gambar 13 Tegangan aktual sampel 3.....	27
Gambar 14 Hasil pengelasan capping sampel 3	27
Gambar 15 Hasil pengelasan root sampel 3.....	27
Gambar 17 Arus aktual filler sampel 4	28
Gambar 19 Hasil pengelasan capping sampel 4	28
Gambar 20 Hasil pengelasan root sampel 4.....	28
Gambar 22. Arus aktual filler sampel 5	29
Gambar 23. Arus aktual capping sampel 5	29
Gambar 21. Arus aktual root sampel 5	29
Gambar 24. Hasil pengelasan capping sampel 5	29
Gambar 25. Hasil pengelasan root sampel 5.....	29
Gambar 26 Arus aktual root sampel 6	30
Gambar 27 Arus aktual filler sampel 6	30
Gambar 28 Arus aktual capping sampel 6	30
Gambar 29 Hasil pengelasan capping sampel 6	30
Gambar 30 Hasil pengelasan root sampel 6.....	30
Gambar 31 Hasil MPT capping sampel 1	35
Gambar 32 Hasil MPT root sampel 1	35
Gambar 33 Hasil MPT capping sampel 2	36
Gambar 34 Hasil MPT root sampel 2	36
Gambar 35 Hasil MPT capping sampel 3	37
Gambar 36 Hasil MPT sampel 3.....	37
Gambar 37 Hasil MPT capping sampel 4.....	37
Gambar 38 Hasil MPT root sampel 4	38
Gambar 39 Hasil MPT capping sampel 5	38
Gambar 40 Hasil MPT root sampel 5	38
Gambar 41 Hasil MPT capping sampel 6	39
Gambar 42 Hasil MPT root sampel 6	39

BAB I — PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Transportasi maritim memegang peranan kunci dalam perekonomian global, dengan lebih dari 80% volume perdagangan dunia diangkut melalui laut (UNCTAD, 2022). Di balik kelancaran lalu lintas kapal-kapal besar seperti kontainer, tanker, dan kapal pesiar, terdapat kapal bantu yang tidak kalah krusial perannya, yaitu tugboat. *Tugboat* adalah kapal kecil namun memiliki rasio tenaga terhadap bobot yang sangat tinggi, dirancang khusus untuk menarik (*towing*), mendorong (*pushing*), atau memandu kapal besar yang tidak dapat bermanuver sendiri di perairan sempit seperti pelabuhan, kanal, dan sungai (Molland, 2011).

Menurut IMO dalam MSC/Circ.884 tentang *Guidelines for Escort Tugs*, *tugboat* didefinisikan sebagai kapal yang dirancang dan dilengkapi secara khusus untuk memberikan bantuan propulsi dan manuver kepada kapal lain, khususnya yang memiliki kemampuan manuver terbatas di perairan terbatas. Sementara itu, Biro Klasifikasi Indonesia (BKI, 2020) mendefinisikan tugboat sebagai kapal yang dirancang untuk melakukan penarikan atau pendorongan terhadap kapal lain, tongkang, atau bangunan apung, dengan rasio daya terhadap bobot yang tinggi dan dilengkapi peralatan towing khusus.

Proses pengelasan merupakan metode utama penyambungan pelat deck kapal. Dua metode yang umum digunakan di galangan kapal Indonesia adalah *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) dengan elektroda terbungkus, dan *Flux-Cored Arc Welding* (FCAW) dengan kawat berflux. SMAW dikenal karena fleksibilitas dan biaya peralatan yang rendah, sedangkan FCAW menawarkan kecepatan deposisi lebih tinggi dan penetrasi lebih baik. Penelitian komparasi antara SMAW dan FCAW pada baja konstruksi kapal telah dilakukan beberapa peneliti (Kumar et al., 2018; Siregar et al., 2020), namun penelitian spesifik pada pelat deck tugboat dengan ketebalan 10 mm menggunakan elektroda E7018 versus E71T-1 masih terbatas.

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja ASTM A36 dengan tebal 10 mm. Pemilihan ASTM A36 didasarkan pada kesetaraannya dengan ABS Grade A dari segi kekuatan luluh (250 MPa vs 235 MPa), kekuatan tarik (400–520 MPa), dan elongasi (20–23%) yang hampir identik, serta aksesibilitasnya yang lebih tinggi dibandingkan material bersertifikasi galangan kapal aktual. Penggunaan material standar ini juga bertujuan menjaga independensi dan replikabilitas penelitian.

Deck kapal *tugboat* dirancang untuk menahan beban operasional yang ekstrem dan dinamis. Area geladak utama dan geladak penarik merupakan titik kritis yang menerima dua jenis beban utama. Pertama, beban siklik (*fatigue*) akibat tegangan berulang pada sambungan las setiap kali kapal melakukan siklus tarik-menarik, yang merupakan kondisi klasik penyebab kegagalan lelah. Kedua, beban kejut (*impact*) yang terjadi saat tali penarik tegang secara tiba-tiba atau saat kapal melakukan manuver cepat. Konsekuensi kegagalan struktur pada *deck tugboat* tidak hanya mengakibatkan kerugian materil, tetapi juga membahayakan keselamatan kru dan dapat menyebabkan kecelakaan laut yang fatal. Oleh karena itu, pemilihan metode pengelasan yang tepat berdasarkan data ilmiah yang valid menjadi sangat penting bagi industri galangan kapal.

Jika penelitian sebelumnya banyak berfokus pada pengujian merusak (*destructive testing*) seperti uji tarik dan struktur mikro, penelitian ini akan secara spesifik membandingkan integritas sambungan las SMAW dan FCAW murni berdasarkan metode *Non Destructive Testing* (NDT), yaitu Pengujian Visual dan *Magnetic Particle Testing* (MPT).

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, penelitian ini merumuskan dua pertanyaan penelitian sebagai berikut:

- 1) Bagaimana perbandingan kualitas profil permukaan dan tingkat kecacatan visual (undercut, porositas, dll) pada sambungan las metode SMAW dan FCAW pada pelat baja ASTM A36 tebal 10 mm?
- 2) Bagaimana hasil perbandingan deteksi diskontinuitas permukaan dan sub-permukaan menggunakan *Magnetic Particle Testing* (MPT) antara metode SMAW dan FCAW?

1.3. Batasan Masalah / Ruang Lingkup

- 1) **Material:** Pelat baja ASTM A36 tebal 10 mm.
- 2) **Elektroda:** E7018 (Ø3,2 mm) untuk SMAW; E71T-1 (Ø1,2 mm) dengan gas pelindung CO₂ 100% laju alir 18–22 L/menit untuk FCAW.
- 3) **Posisi pengelasan:** datar (1G) dengan desain kampuh V-groove sudut 60°.

- 4) **Jumlah spesimen:** tiga spesimen per metode (total enam spesimen las). Jumlah ini merupakan persyaratan minimum AWS D1.1 dan dipilih berdasarkan pertimbangan keterbatasan anggaran penelitian; hasil bersifat indikatif sebagai data preliminar.
- 5) **Inspeksi kualifikasi:** inspeksi visual dan *Magnetic Particle Testing* (MPT) sesuai AWS D1.1 Clause 8 Part C.
- 6) Pengujian dilakukan pada posisi datar (1G) di lingkungan laboratorium yang terkendali. Faktor lapangan seperti variasi posisi las, kondisi lingkungan operasional, dan prosedur aktual galangan kapal tidak dicakup dalam penelitian ini.
- 7) Penelitian ini tidak mencakup pengujian impak, pengujian fatik, atau pengujian kekerasan (*hardness test*).

1.4. Tujuan Penelitian

Mengacu pada rumusan masalah yang telah ditetapkan, penelitian ini memiliki dua tujuan utama:

- 1) Mengevaluasi dan membandingkan kualitas hasil lasan secara visual antara metode SMAW dan FCAW.
- 2) Mendeteksi dan membandingkan keberadaan cacat (*defect*) permukaan maupun sub-permukaan menggunakan metode MPT pada kedua jenis proses pengelasan.

1.5. Manfaat Penelitian

- 1) Memberikan referensi teknis yang aplikatif bagi galangan kapal mengenai tingkat kerentanan cacat las antara SMAW dan FCAW, sehingga dapat meminimalisir kegagalan struktur *deck tugboat* melalui pemilihan metode las yang paling stabil dan minim diskontinuitas.
- 2) Menambah literatur ilmiah tentang komparasi SMAW versus FCAW pada baja ASTM A36 dalam konteks penelitian D4 Teknologi Rekayasa Pengelasan dan Fabrikasi Politeknik Negeri Batam.

BAB II — TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Hasil Penelitian Terdahulu

Kumar, Singh, dan Kumar (2018) melakukan studi komparasi antara SMAW dan FCAW pada baja SS400 untuk keperluan konstruksi baja struktural. Penelitian tersebut menggunakan spesimen *butt joint* dengan posisi pengelasan datar dan mengukur kekuatan tarik serta kekerasan sambungan las dari kedua metode. Hasil penelitian menunjukkan bahwa FCAW menghasilkan kekuatan tarik rata-rata sekitar 7% lebih tinggi dibandingkan SMAW pada kondisi parameter yang setara. Penulis mengaitkan keunggulan ini dengan laju deposisi FCAW yang lebih stabil sehingga menghasilkan struktur butir yang lebih seragam pada *weld metal*. Keterbatasan penelitian ini adalah tidak adanya inspeksi NDT sebelum pengujian merusak, sehingga kemungkinan cacat internal yang mempengaruhi hasil tidak dapat disingkirkan sepenuhnya.

Siregar, Nugroho, dan Putra (2020) melakukan penelitian yang relevan secara langsung dengan penelitian ini, yaitu perbandingan sifat mekanis sambungan las SMAW dan FCAW pada baja ASTM A36 dengan ketebalan 10 mm. Elektroda yang digunakan adalah E7016 untuk SMAW dan E71T-1 untuk FCAW, dengan posisi pengelasan datar (1G). Hasil pengujian menunjukkan bahwa kekuatan tarik kedua metode tidak berbeda secara signifikan pada parameter yang diuji, namun FCAW menunjukkan keunggulan yang lebih jelas pada nilai ketangguhan impak. Penelitian ini menjadi acuan yang paling relevan, namun terdapat dua perbedaan penting yang membuka ruang bagi penelitian lanjutan: pertama, elektroda SMAW yang digunakan adalah E7016, bukan E7018 yang merupakan elektroda hidrogen rendah standar konstruksi kapal; dan kedua, ketebalan material 10 mm belum merepresentasikan ketebalan aktual pelat *deck tugboat* yang umumnya berkisar 12–16 mm.

Rahman dan Wahyudi (2019) meneliti pengaruh variasi arus pengelasan FCAW terhadap mikrostruktur baja kapal Grade A. Penelitian ini berfokus pada optimasi parameter dalam satu metode (FCAW) dengan tiga variasi arus: 160A, 180A, dan 200A. Hasil pengamatan mikroskop optik menunjukkan bahwa arus 180A menghasilkan morfologi butir ferit yang paling halus dengan distribusi ferit akikular yang paling merata di antara ketiga variasi. Temuan ini menjadi dasar penentuan rentang arus pada parameter FCAW dalam penelitian ini.

Kim, Kang, dan Kim (2014) secara khusus mengkaji hubungan antara besar masukan panas (*heat input*) pada proses FCAW dengan proporsi ferit akikular yang terbentuk

pada *weld metal* baja konstruksi. Penelitian ini menemukan bahwa *heat input* yang terkontrol pada rentang sedang menghasilkan proporsi ferit akikular yang lebih besar. Ferit akikular memiliki morfologi butir acak dan saling mengunci (*interlocking*) yang secara metalurgi meningkatkan ketangguhan dan ketahanan retak pada sambungan las. Temuan ini menjadi landasan teori yang menghubungkan karakteristik mikrostruktur dengan performa kekuatan tarik dalam penelitian ini.

Kou (2003) dalam bukunya *Welding Metallurgy* edisi kedua menyajikan referensi metalurgi las yang komprehensif dan menjadi acuan standar untuk pemahaman tentang pembentukan zona las (*weld metal*, *HAZ*, dan *base metal*), mekanisme siklus termal pada HAZ, serta hubungan antara laju pendinginan dengan fasa-fasa metalurgi yang terbentuk pada baja karbon rendah. Konsep-konsep dari Kou (2003) digunakan sebagai landasan interpretasi hasil pengamatan mikrostruktur pada pembahasan penelitian ini.

Berdasarkan kajian terhadap kelima penelitian terdahulu tersebut, dapat diidentifikasi gap penelitian yang belum terisi sebagai berikut: pertama, belum ada data komparatif SMAW E7018 versus FCAW E71T-1 secara spesifik pada baja ASTM A36 tebal 10 mm; kedua, belum ada penelitian yang mengintegrasikan inspeksi NDT berupa *Magnetic Particle Testing* sebagai tahap kualifikasi wajib sebelum uji merusak dalam studi komparasi serupa; dan ketiga, belum ada penelitian yang secara eksplisit mengorientasikan hasil komparasi sebagai rekomendasi teknis untuk konstruksi deck kapal tugboat. Penelitian ini dirancang untuk mengisi ketiga gap tersebut sekaligus.

2.2. Teori dan Konsep Dasar

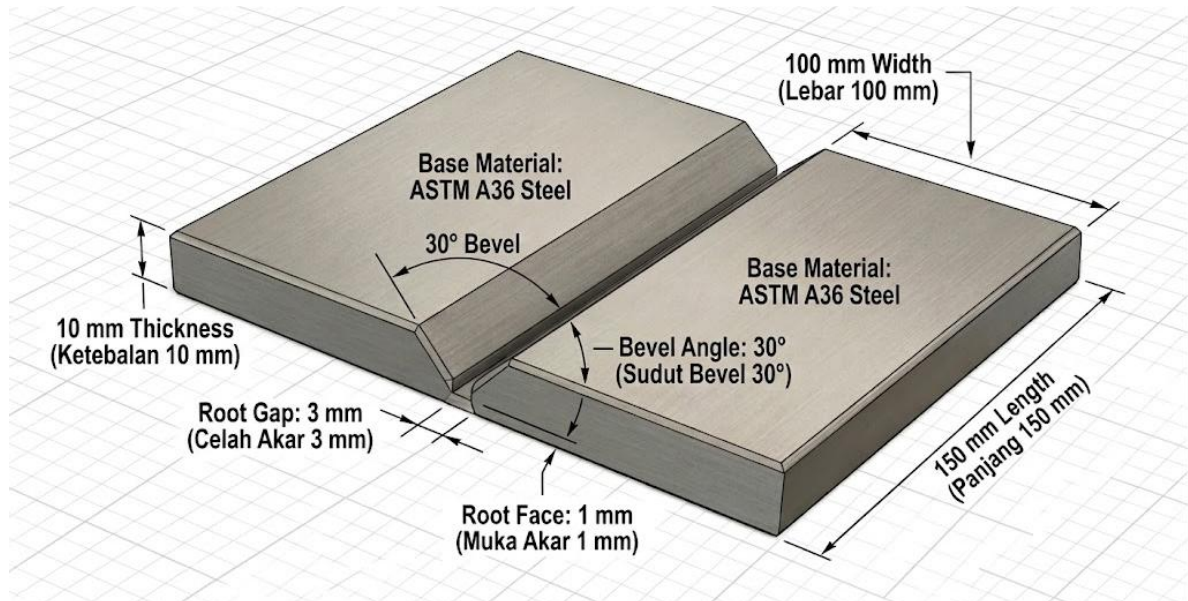
2.2.1. Kapal Tugboat dan Konstruksi Deck

Kapal *tugboat* memiliki *deck* yang diperkuat (*reinforced deck*) karena menerima beban *towing* dari *winch* dan *bollard pull* (BKI, 2020). Pelat *deck* umumnya menggunakan baja karbon rendah (*mild steel*) dengan kadar karbon 0,14–0,22% seperti ABS Grade A, dengan ketebalan area utama berkisar 10–16 mm. Pada penelitian ini digunakan baja ASTM A36 sebagai material representatif dengan pertimbangan kesetaraan sifat mekanis dan kemudahan akses penelitian.

2.2.2. Proses Pengelasan SMAW

SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) menggunakan elektroda yang dilapisi fluks. Saat busur listrik terjadi, fluks meleleh membentuk terak dan gas pelindung yang mencegah kontaminasi atmosfer pada weld pool. Elektroda E7018 adalah elektroda hidrogen rendah

(*low-hydrogen*) yang umum digunakan untuk konstruksi kapal karena memberikan ketangguhan dan ketahanan retak dingin yang baik (AWS A5.1, 2015). Kode E7018 dibaca sebagai berikut: '70' menyatakan kekuatan tarik minimum deposit las sebesar 70 ksi (483 MPa); '1' menyatakan dapat digunakan pada semua posisi las; dan '8' menyatakan jenis lapisan fluks hidrogen rendah dengan arus DCEP atau AC. Kelebihan SMAW adalah peralatan murah dan portabel. Kekurangannya adalah kecepatan deposisi rendah dan terak harus dibersihkan setiap selesai satu manik las

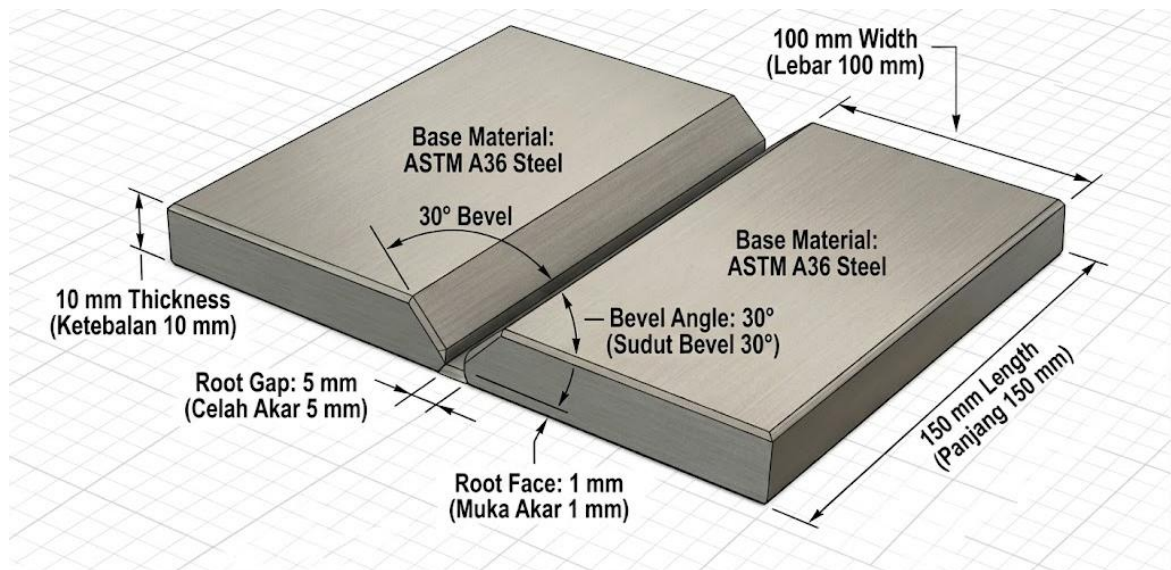


Gambar 1 Desain sambungan SMAW

*) setiap proses menggunakan proses *backweld*

2.2.3. Proses Pengelasan FCAW

FCAW (*Flux-Cored Arc Welding*) menggunakan kawat tubular berisi fluks. Gas pelindung CO₂ atau campuran Ar/CO₂ ditambahkan dari luar (FCAW-G). Elektroda E71T-1 untuk FCAW-G menghasilkan deposit las dengan sifat mekanis yang baik, penetrasi dalam, dan kecepatan deposisi tinggi (AWS A5.20, 2012). Kode E71T-1 dibaca: 'E' = elektroda; '7' = UTS minimum 70 ksi (483 MPa); '1' = semua posisi; 'T' = tubular (kawat berfluks); '1' = klasifikasi fluks yang kompatibel dengan gas pelindung CO₂ atau campuran Ar/CO₂. Kelebihan FCAW adalah produktivitas tinggi dan cocok untuk pengelasan pelat tebal. Kekurangannya adalah peralatan lebih mahal dan portabilitas lebih rendah dibanding SMAW.



Gambar 2 Desain sambungan FCAW

*) setiap proses menggunakan *backing ceramic*

2.2.5. Masukan Panas (Heat Input)

Masukan panas (*heat input*) adalah energi panas yang masuk ke dalam material per satuan panjang lasan. *Heat input* merupakan variabel kunci yang menentukan karakteristik mikrostruktur, lebar HAZ, dan laju pendinginan sambungan las. Rumus perhitungan heat input adalah :

$$HI = (V \times I \times 60) / (TS \times 1000) \text{ [kJ/mm]}$$

Di mana V = tegangan pengelasan (Volt), I = arus pengelasan (*Ampere*), dan TS = *travel speed* (mm/menit). *Heat input* yang tinggi menyebabkan pendinginan lebih lambat, mendorong pembentukan ferit batas butir dan ferit Widmanstätten yang dapat menurunkan ketangguhan. Sebaliknya, heat input terlalu rendah dapat menyebabkan *lack of fusion* dan peningkatan tegangan sisa.

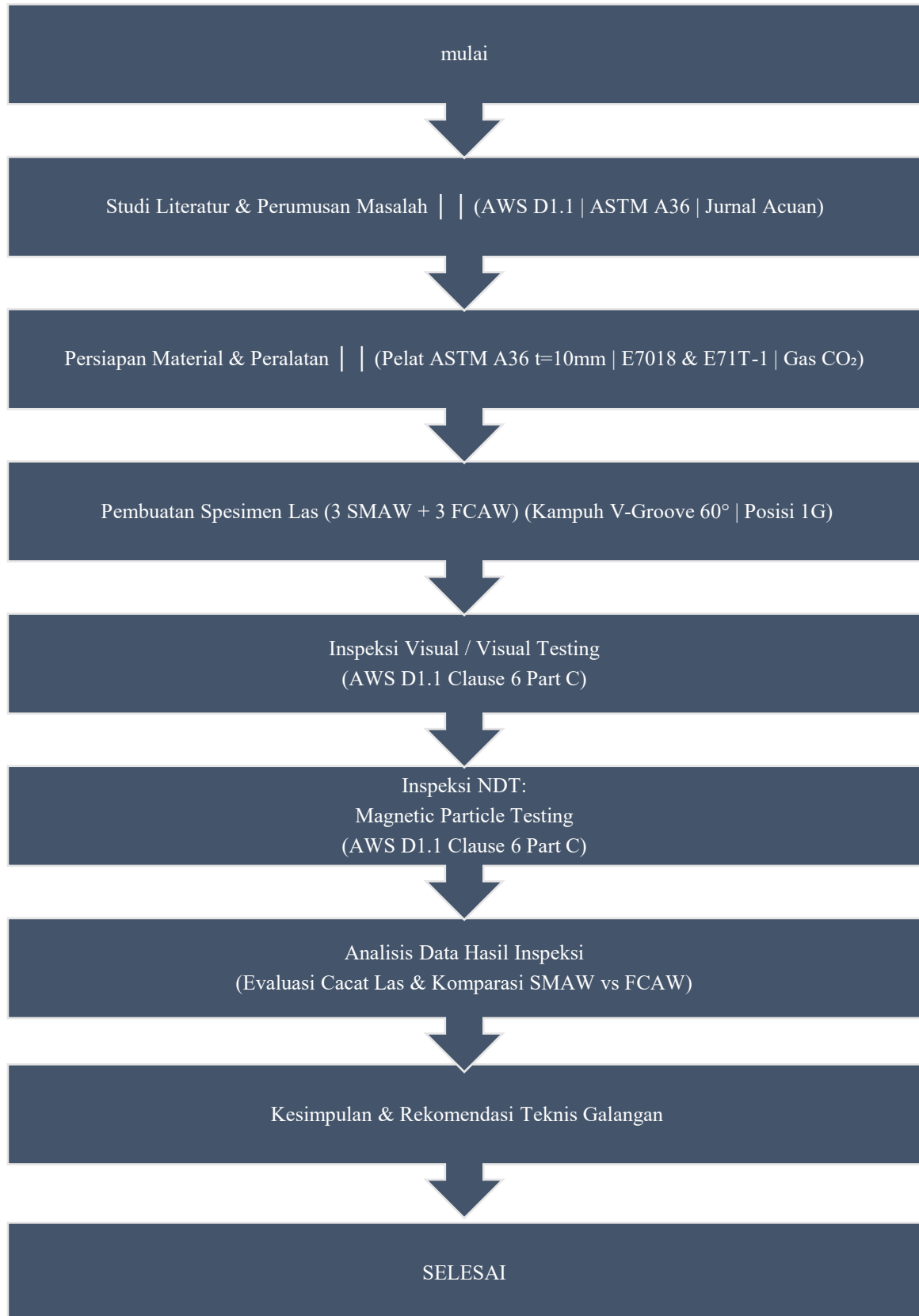
2.2.7. Inspeksi NDT dengan Magnetic Particle Testing (MPT)

Magnetic Particle Testing (MPT) adalah metode *Non-Destructive Testing* yang digunakan untuk mendeteksi cacat permukaan dan sub-permukaan pada material ferromagnetik. Prinsip kerja MPT didasarkan pada magnetisasi benda uji: cacat seperti retak, porositas, atau *lack of fusion* akan membentuk kebocoran medan magnet yang menarik partikel magnetik halus ke lokasi cacat sehingga cacat dapat divisualisasikan (AWS D1.1, 2015; ASNT, 2016). Prosedur MPT dalam penelitian ini menggunakan *magnetic yoke* (AC)

dengan teknik *wet visible*. Tahapan mencakup pembersihan permukaan, pengaplikasian white contrast paint, magnetisasi dengan *magnetic yoke*, pengaplikasian *black ink*, dan interpretasi indikasi berdasarkan kriteria AWS D1.1 Clause 8 Part C. Spesimen dengan indikasi cacat linier ≥ 2 mm atau cacat melingkar ≥ 3 mm dinyatakan ditolak (reject) dan dikembalikan ke tahap pengelasan ulang.

BAB III — METODOLOGI

3.1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3 Diagram alir penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui tahapan yang sistematis sebagaimana ditunjukkan dalam diagram alir pada Gambar 1. Alur penelitian dirancang untuk memastikan validitas dan ketertelusuran data dari tahap persiapan material hingga penarikan kesimpulan. Salah satu aspek penting dalam alur ini adalah adanya tahap inspeksi NDT sebagai *decision node* — spesimen yang dinyatakan reject akibat cacat las akan dikembalikan ke tahap pengelasan ulang dan tidak dilanjutkan ke pengujian merusak, sehingga seluruh spesimen yang diuji dapat dipastikan bebas dari cacat makro yang dapat mempengaruhi validitas data.

3.2. Bahan dan Alat

3.2.1. Bahan

- ❖ Pelat baja ASTM A36, tebal 10 mm, dimensi 100 × 150 mm per sambungan (total 6 pelat untuk 6 spesimen las)
- ❖ Elektroda SMAW: E7018, diameter 3,2 mm (spesifikasi sesuai AWS A5.1)
- ❖ Kawat FCAW: E71T-1, diameter 1,2 mm (spesifikasi sesuai AWS A5.20)
- ❖ Gas pelindung CO₂ 100%, laju alir 18–22 L/menit
- ❖ Backing ceramic 12 mm

3.2.2. Alat

- ❖ Mesin las SMAW: Lincoln Electric AC/DC
- ❖ Mesin las FCAW: Lincoln Power Wave 355M (DC+)
- ❖ Alat penerangan inspeksi visual (minimal 1.000 lumen)
- ❖ *Magnetic Yoke* (AC) dan perlengkapan MPT (*white contrast paint, black magnetic ink*)
- ❖ *Stopwatch* dan penanda jarak untuk pengukuran *travel speed* SMAW aktual
- ❖ Perangkat lunak Microsoft Excel untuk pengolahan data dan pembuatan grafik

3.3. Parameter Pengelasan

3.3.1. Parameter Pengelasan SMAW

Tiga spesimen SMAW dibuat dengan variasi arus pengelasan (80A, 100A, 120A) untuk melihat pengaruh arus terhadap karakteristik sambungan las. *Travel speed* pada pengelasan SMAW bersifat manual sehingga diestimasi pada rentang 100–150 mm/menit berdasarkan rekomendasi elektroda E7018 Ø3,2 mm; nilai aktual diukur saat pelaksanaan

menggunakan stopwatch dan penanda jarak pada material untuk kemudian digunakan dalam perhitungan heat input aktual.

Sampel	Arus (A)	Tegangan (V)	Travel Speed (mm/min)*	Polarity	Elektroda
SMAW-1	80	22–26	100–150 *)	DCEP	E7018 (Ø3,2mm)

Tabel 1 Parameter sampel 1

Sampel	Arus (A)	Tegangan (V)	Travel Speed (mm/min)*	Polarity	Elektroda
SMAW-2	100	22–26	100–150 *)	DCEP	E7018 (Ø3,2mm)

Tabel 2 Parameter sampel 2

Sampel	Arus (A)	Tegangan (V)	Travel Speed (mm/min)*	Polarity	Elektroda
SMAW-3	120	22–26	100–150 *)	DCEP	E7018 (Ø3,2mm)

Tabel 3 Parameter sampel 3

*) *Travel speed SMAW bersifat manual. Nilai aktual diukur saat pelaksanaan dan digunakan untuk menghitung heat input aktual: $HI = (V \times I \times 60) / (TS \times 1000)$ [kJ/mm].*

*) *Semua proses menggunakan proses back weld*

3.3.2. Parameter Pengelasan FCAW

Tiga spesimen FCAW dibuat dengan variasi arus pengelasan per pass (rendah, sedang, tinggi). Setiap spesimen dilas dalam tiga pass: *root*, *filler*, dan *capping*, mengikuti prosedur *multi-pass* yang sesuai untuk tebal material 10 mm.

Pass	Arus (A)	Tegangan (V)	TS (mm/min)	Polarity	Gas	Elektroda
Root	80–100	18–23	160–200	DCEP	CO ₂ 100%	E71T-1 (Ø1,2mm)
Filler	100–120	18–23	160–200	DCEP	CO ₂ 100%	E71T-1 (Ø1,2mm)
Capping	120–140	18–23	160–200	DCEP	CO ₂ 100%	E71T-1 (Ø1,2mm)

Tabel 4 Parameter sampel 4

*) *Gas flow rate: 18–22 L/menit pada seluruh pass.*

*) *proses menggunakan Backing ceramic 12 mm*

Pass	Arus (A)	Tegangan (V)	TS (mm/min)	Polarity	Gas	Elektroda
Root	100–120	20–25	160–200	DCEP	CO ₂ 100%	E71T-1 (Ø1,2mm)
Filler	120–140	20–25	160–200	DCEP	CO ₂ 100%	E71T-1 (Ø1,2mm)
Capping	140–160	20–25	160–200	DCEP	CO ₂ 100%	E71T-1 (Ø1,2mm)

Tabel 5 Parameter sampel 5

*) Gas flow rate: 18–22 L/menit pada seluruh pass.

*) proses menggunakan Backing ceramic 12 mm

Pass	Arus (A)	Tegangan (V)	TS (mm/min)	Polarity	Gas	Elektroda
Root	120–140	22–30	160–200	DCEP	CO ₂ 100%	E71T-1 (Ø1,2mm)
Filler	140–160	22–30	160–200	DCEP	CO ₂ 100%	E71T-1 (Ø1,2mm)
Capping	160–180	22–30	160–200	DCEP	CO ₂ 100%	E71T-1 (Ø1,2mm)

Tabel 6 Parameter sampel 6

*) Gas flow rate: 18–22 L/menit pada seluruh pass.

*) proses menggunakan Backing ceramic 12 mm

3.4. Prosedur Pengujian

3.4.1. Inspeksi Visual dan NDT

Setelah proses pengelasan selesai, seluruh spesimen menjalani inspeksi visual terlebih dahulu sesuai AWS D1.1 Clause 8 Part C dengan pencahayaan minimum 1.000 lumen. Aspek yang diperiksa meliputi profil manik las, *undercut*, *overlap*, retak permukaan, porositas permukaan, dan *crater crack*. Spesimen yang lulus inspeksi visual dilanjutkan ke *Magnetic Particle Testing* (MPT). Prosedur MPT menggunakan *magnetic yoke* (AC) dengan teknik *wet visible*: permukaan dibersihkan, diaplikasikan *white contrast paint*, dimagnetisasi, diaplikasikan *black ink*, dan indikasi diinterpretasikan berdasarkan AWS D1.1 Clause 8 Part C. Spesimen yang dinyatakan reject dikembalikan ke tahap pengelasan ulang.

3.5. Teknik Analisis Data

Seluruh data hasil pengujian dianalisis secara komparatif menggunakan pendekatan analisis grafik. Pendekatan ini dipilih karena dengan jumlah spesimen $n=3$ per kelompok, perbandingan visual melalui grafik yang disertai penjelasan deskriptif lebih jujur dan lebih mudah dipertanggungjawabkan saat sidang. Seluruh grafik dibuat menggunakan Microsoft Excel dan disajikan berdampingan untuk memudahkan perbandingan langsung antara metode SMAW dan FCAW.

3.5.1. Perhitungan Heat Input

Heat input dihitung untuk setiap spesimen menggunakan nilai tegangan dan arus aktual yang tercatat saat pengelasan serta *travel speed* aktual yang diukur di lapangan:

$$HI = (V \times I \times 60) / (TS \times 1000) \text{ [kJ/mm]}$$

Nilai *heat input* per spesimen disajikan dalam grafik batang untuk membandingkan masukan panas antar spesimen SMAW dan FCAW. *Heat input* menjadi variabel penjelas yang menghubungkan parameter pengelasan dengan hasil UTS dan karakteristik mikrostruktur yang terbentuk.

BAB IV — HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. PENGUJIAN VISUAL

SAMPEL 1

Sampel	Arus (A)	Tegangan (V)	Travel Speed (mm/min)*	Polarity	Elektroda
SMAW-1	80	22-26	100-150 *)	DCEP	E7018 (Ø3,2mm)

Tabel 7 Parameter acuan sampel 1



Gambar 4 Arus aktual sampel 1



Gambar 5 Tegangan aktual sampel 1

Heat Input			
Proses	Root	Filler	Capping
Waktu aktual	01.27 min	01.18 min	01.02 min
Koefisiensi termal	0,8		
Heat input	0.93 kJ/mm	0.83 kJ/mm	0.66 kJ/mm

Tabel 8 Heat input sampel 1

CAPPING :



Gambar 6 Hasil pengelasan root sampel 1

ROOT



Gambar 7 Hasil pengelasan capping sampel 1

porosity	Mechanical damage	Spatter	Arc strike
----------	-------------------	---------	------------

Variatif cacat	
Root	Capping
Mechanical Damage 2x	Porosity 2x
Arc Strike	Mechanical Damage 2x
Spatter 3x	Spatter 3x
Total : 13 Defects	

Tabel 9 Variatif cacat sampel 1

SAMPEL 2

Sampel	Arus (A)	Tegangan (V)	Travel Speed (mm/min)*	Polarity	Elektroda
SMAW-2	100	22-26	100-150 *)	DCEP	E7018 (Ø3,2mm)

Tabel 10 Parameter acuan sampel 2



Gambar 9 Arus aktual sampel 2



Gambar 8 Tegangan aktual sampel 2

Heat Input			
Proses	Root	Filler	Capping
Waktu aktual	01.10 min	01.08 min	00.59 min
Koefisiensi termal	0,8		
Heat input	0.94 kJ/mm	0.91 kJ/mm	0.79 kJ/mm

Tabel 11 Heat input sampel 2

CAPPING :



Gambar 10 Hasil pengelasan capping sampel 2

ROOT :



Gambar 11 Hasil Pengelasan Roor sampel 2

Undercut	Spatter	Arc strike	Mechanical damage	Overlap
----------	---------	------------	-------------------	---------

Variatif cacat	
Root	Capping
Mechanical Damage 2x	Undercut 3x
Overlap	Mechanical Damage
Spatter	Spatter 2x
	Arc strike
Total : 11 Defects	

Tabel 12 Variatif cacat sampel 2

SAMPEL 3

Sampel	Arus (A)	Tegangan (V)	Travel Speed (mm/min)*	Polarity	Elektroda
SMAW-3	120	22-26	100-150 *)	DCEP	E7018 (Ø3,2mm)

Tabel 13 Parameter acuan sampel 3



Gambar 12 Arus aktual sampel 3



Gambar 13 Tegangan aktual sampel 3

Heat Input			
Proses	Root	Filler	Capping
Waktu aktual	0.59 min	01.12 min	01.05 min
Koefisiensi termal	0,8		
Heat input	0.79 kJ/mm	1.15 kJ/mm	1.04 kJ/mm

Tabel 14 Heat input sampel 3

CAPPING ;



Gambar 14 Hasil pengelasan capping sampel 3

ROOT :



Gambar 15 Hasil pengelasan root sampel 3

porosity	spatter	Arc strike	Mechanical damage
----------	---------	------------	-------------------

Variatif cacat	
Root	Capping
Mechanical Damage 2x	Arc Strike
Arc Strike	Spatter 3x
Spatter	
Porosity	
Total : 9 Defects	

Tabel 15 Variatif cacat sampel 3

SAMPEL 4

Pass	Arus (A)	Tegangan (V)	TS (mm/min)	Polarity	Gas	Elektroda
Root	80–100	18–23	160–200	DCEP	CO ₂ 100%	E71T-1 (Ø1,2mm)
Filler	100–120	18–23	160–200	DCEP	CO ₂ 100%	E71T-1 (Ø1,2mm)
Capping	120–140	18–23	160–200	DCEP	CO ₂ 100%	E71T-1 (Ø1,2mm)

Tabel 16 Parameter acuan sampel 4



Tabel 17 Arus aktual root sampel 4



Gambar 16 Arus aktual filler sampel 4

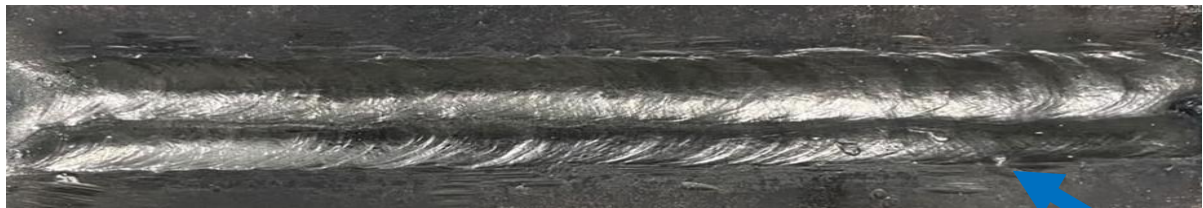


Tabel 18 Arus aktual Capping sampel 4

Heat Input			
Proses	Root	Filler	Capping
Waktu aktual	01.40 min	01.39 min	01.15 min
Koefisiensi termal	0,8		
Heat input	1.24 kJ/mm	1.56 kJ/mm	1.37 kJ/mm

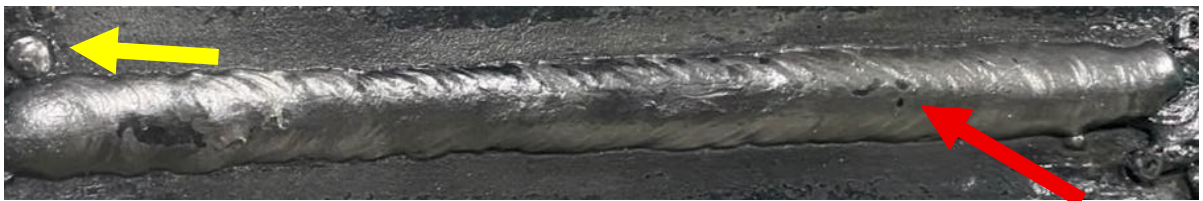
Tabel 19 Heat input sampel 4

CAPPING



Gambar 17 Hasil pengelasan capping sampel 4

ROOT



Gambar 18 Hasil pengelasan root sampel 4

Underfill

spatter

Porosity

Variatif cacat	
Root	Capping
Spatter	Underfill
Porosity	
Total : 3 Defects	

Tabel 20 Variatif cacat sampel 4

SAMPEL 5

Pass	Arus (A)	Tegangan (V)	TS (mm/min)	Polarity	Gas	Elektroda
Root	100–120	20–25	160–200	DCEP	CO ₂ 100%	E71T-1 (Ø1,2mm)
Filler	120–140	20–25	160–200	DCEP	CO ₂ 100%	E71T-1 (Ø1,2mm)
Capping	140–160	20–25	160–200	DCEP	CO ₂ 100%	E71T-1 (Ø1,2mm)

Tabel 21 Parameter acuan sampel 5



Gambar 21. Arus aktual root sampel 5



Gambar 19. Arus aktual filler sampel 5

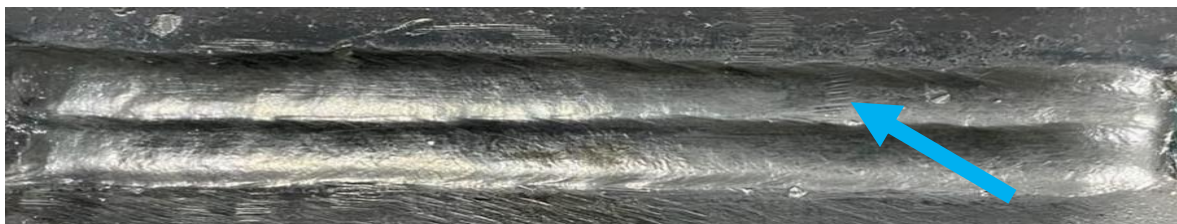


Gambar 20. Arus aktual capping sampel 5

Heat Input			
Proses	Root	Filler	Capping
Waktu aktual	01.35 min	01.23 min	0.49 min
Koefisiensi termal	0,8		
Heat input	1.53 kJ/mm	1.54 kJ/mm	0.98 kJ/mm

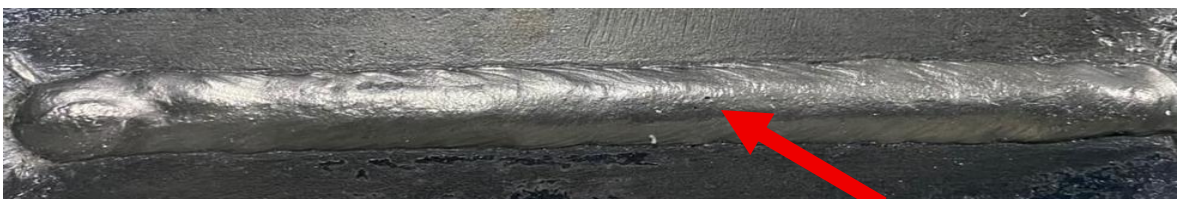
Tabel 22. Heat input sampel 5

CAPPING :



Gambar 22. Hasil pengelasan capping sampel 5

ROOT :



Gambar 23. Hasil pengelasan root sampel 5

Mechanical damage

Porosity

Variatif cacat	
Root	Capping
Porosity	Mechanical Damage
Total : 2 Defects	

Tabel 23 Variatif cacat sampel 5

SAMPEL 6

Pass	Arus (A)	Tegangan (V)	TS (mm/min)	Polarity	Gas	Elektroda
Root	120–140	22–30	160–200	DCEP	CO ₂ 100%	E71T-1 (Ø1,2mm)
Filler	140–160	22–30	160–200	DCEP	CO ₂ 100%	E71T-1 (Ø1,2mm)
Capping	160–180	22–30	160–200	DCEP	CO ₂ 100%	E71T-1 (Ø1,2mm)

Tabel 24 Parameter acuan sampel 6



Gambar 24 Arus aktual root sampel 6



Gambar 25 Arus aktual filler sampel 6

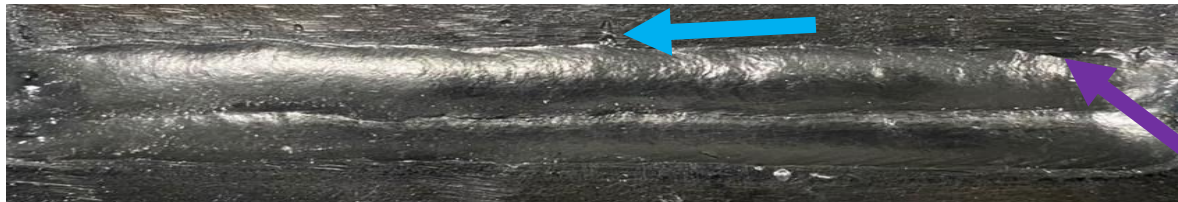


Gambar 26 Arus aktual capping sampel 6

Heat Input			
Proses	Root	Filler	Capping
Waktu aktual	01.40 min	01.09 min	01.03 min
Koefisiensi termal	0,8		
Heat input	1.84 kJ/mm	1.46 kJ/mm	1.41 kJ/mm

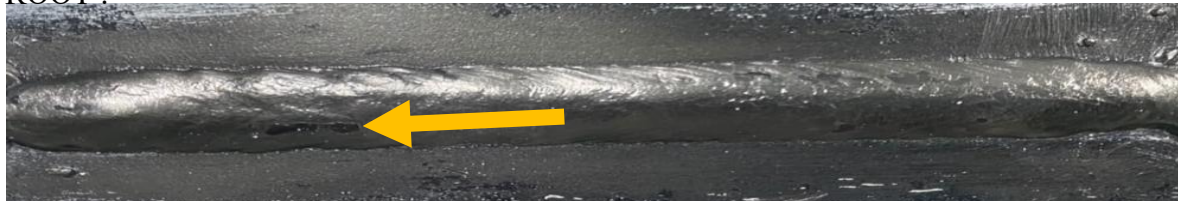
Tabel 25 Heat input Sampel 6

CAPPING :



Gambar 27 Hasil pengelasan capping sampel 6

ROOT :



Gambar 28 Hasil pengelasan root sampel 6

Mechanical damage

Incomplete fusion

Slag inclusion

Variatif cacat	
Root	Capping
Slag inclusion	Mechanical damage
	Incomplete fusion
Total : 3 Defects	

Tabel 26 Variatif cacat sampel 6

4.1.1. Hasil Pengujian Visual

Berdasarkan hasil pengamatan visual secara makroskopis pada permukaan lasan, baik pada sisi *capping* maupun *root*, pengujian dilakukan terhadap spesimen yang disambung menggunakan proses *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) dan *Flux-Cored Arc Welding* (FCAW-G).

Pada spesimen SMAW, ditemukan beberapa jenis diskontinuitas atau cacat las (*weld defect*) yang meliputi porositas permukaan (*surface porosity*), percikan las (*spatter*), kerusakan mekanis (*mechanical damage*), dan goresan busur (*arc strike*). Sementara itu, pada spesimen FCAW (menggunakan kawat tubular E71T-1 berdiameter 1,2 mm dan gas pelindung 100%), parameter arus dievaluasi secara bertingkat pada setiap *pass* (*root*, *filler*, *capping*) untuk menganalisis pengaruh besaran arus terhadap pembentukan diskontinuitas las.

4.1.2. Analisis Hasil Pengujian visual SMAW

Evaluasi terhadap diskontinuitas yang ditemukan pada spesimen uji SMAW dianalisis merujuk pada standar *American Welding Society* (AWS) D1.1 *Structural Welding Code - Steel*. Secara spesifik, analisis ini merujuk pada Clause 6 Part C yang mengatur kriteria keberterimaan pengujian visual (Tabel 6.1), serta kriteria *workmanship* pada Clause 5.

❖ Porositas Permukaan (*Surface Porosity*)

Pada pengamatan sisi *capping*, teridentifikasi adanya cacat porositas yang menembus hingga ke permukaan kampuh las. Berdasarkan kriteria penerimaan Tabel 6.1 AWS D1.1, keberadaan porositas dievaluasi berdasarkan ukuran diameter dan jumlah akumulasinya per inchi persegi. Jika melebihi batas toleransi untuk pembebanan statis maupun siklis, cacat ini menjadi dasar penolakan (*rejection*). Kemunculan porositas pada spesimen ini sangat berkorelasi kuat dengan penggunaan parameter arus 80 A. Untuk elektroda E7018 berukuran 3,2 mm, arus 80 A berada di bawah rentang operasional ideal. Panas masukan (*heat input*) yang rendah menyebabkan

kolam las (*weld pool*) membeku terlalu cepat (*fast freezing*) sebelum gas pelindung yang terperangkap dapat naik ke permukaan, memicu terjadinya porositas.

❖ ***Arc Strike (Goresan Busur)***

Pada area *root* spesimen uji, ditemukan indikasi *arc strike* yang terletak di luar jalur kampuh lasan (*base metal*). Menurut standar AWS D1.1 Clause 5.29, *arc strike* di luar area lasan permanen sangat dilarang. Hal ini menciptakan siklus pemanasan dan pendinginan lokal yang sangat cepat, yang dapat mengubah struktur mikro baja menjadi *martensite* yang getas serta memicu inisiasi retak (*micro-fissures*). Standar mensyaratkan area tersebut wajib dihaluskan secara mekanis (*digerinda*) hingga permukaannya menyatu dengan material dasar dan diuji untuk memastikan bebas dari retak.

❖ ***Kerusakan Mekanis (Mechanical Damage)***

Analisis visual mengidentifikasi kerusakan mekanis pada material induk di sekitar *capping* maupun *root*, yang kemungkinan besar diakibatkan oleh proses pembersihan terak (*slag*) menggunakan palu las (*chipping hammer*) atau batu gerinda yang menyentuh material dasar terlalu dalam. Walaupun Tabel 6.1 tidak spesifik mencantumkan *mechanical damage* ringan, kondisi ini melanggar standar kualitas pengerjaan (*workmanship*) AWS D1.1. Takik (*notch*) dapat mengurangi ketebalan nominal plat dan menciptakan konsentrasi tegangan (*stress concentration*).

❖ ***Percikan Las (Spatter)***

Teramati akumulasi percikan las pada area sekitar kampuh las. Kehadiran *spatter* tidak secara eksplisit diatur sebagai cacat penyebab penolakan dalam Tabel 6.1, kecuali menutupi cacat krusial, mengganggu pengujian tak merusak (NDT), atau menghalangi aplikasi pelapisan. Namun, intensitas *spatter* yang tinggi mengonfirmasi indikasi ketidakstabilan busur las. Arus rendah (80 A) menyebabkan elektroda lengket atau fluktuasi panjang busur (*arc length*) yang sulit dikendalikan operator.

❖ ***Undercut dan Overlap***

Pada sisi permukaan lasan, ditemukan *undercut* dan *overlap*. Berdasarkan Tabel 6.1, batas *undercut* maksimal 1 mm (0.04 in) untuk material tebal. Namun, *overlap* secara tegas tidak dapat diterima (Clause 5.23 *Weld Profiles*). *Overlap* menghasilkan sudut *re-entrant* tajam pada pertemuan logam las dan material dasar, menjadi titik konsentrasi tegangan (*stress riser*) kritis pemicu retak lelah (*fatigue crack*). Terjadinya *overlap* dan *undercut* secara bersamaan pada arus 100 A diindikasikan

akibat teknik ayunan (*weaving technique*) dan sudut penahan (*work angle*) yang tidak konsisten.

4.1.3. Analisis Hasil Pengujian visual FCAW

Sama halnya dengan SMAW, evaluasi spesimen pengelasan FCAW juga merujuk pada standar AWS D1.1 berdasarkan variasi penggunaan arus bertingkat.

❖ Spesimen FCAW-1 (Arus Rendah)

Spesimen FCAW-1 dilas dengan rentang arus 93,2 A (*root*), 118,7 A (*filler*), dan 137,1 A (*capping*) pada tegangan 18–23 V. Pengamatan makroskopis mengidentifikasi cacat *underfill* pada permukaan *capping*, serta *spatter* dan *porosity* pada area *root*.

Pembahasan Cacat:

Cacat *underfill* menandakan ceruk kampuh las tidak terisi penuh akibat laju deposisi yang kurang mencukupi (arus *capping* 137,1 A terlalu rendah) atau laju pengelasan yang terlalu cepat. Sesuai AWS D1.1 Clause 5.23 dan Tabel 6.1, *underfill* yang mengurangi ketebalan nominal plat tidak diperbolehkan. *Porosity* pada *root* mengindikasikan gangguan perlindungan gas saat arus rendah (93,2 A) di mana kestabilan busur belum optimal mencairkan fluks.

❖ Spesimen FCAW-2 (Arus Sedang)

Spesimen FCAW-2 menggunakan arus 120,0 A (*root*), 137,0 A (*filler*), dan 149,1 A (*capping*) pada tegangan 20–25 V. Pengamatan *capping* mengidentifikasi *mechanical damage*, sedangkan pada *root* ditemukan *porosity*.

Pembahasan Cacat:

Peningkatan arus sedang berhasil menghilangkan *underfill* dan menghasilkan kontur manik las yang terisi penuh. Namun, ditemukan *mechanical damage* akibat goresan alat pembersih terak yang melanggar kriteria *workmanship* karena menciptakan takik tajam pencetus konsentrasi tegangan. *Porosity* pada *root* mengindikasikan kontaminasi permukaan atau fluktuasi jarak nosel ke benda kerja (*stick-out*) yang menjebak gas.

❖ Spesimen FCAW-3 (Arus Tinggi)

Spesimen FCAW-3 dilas menggunakan parameter tertinggi: 138,2 A (*root*), 158,8 A (*filler*), dan 167,0 A (*capping*) pada tegangan 22–30 V. Visual menunjukkan profil masif, namun ditemukan cacat kritis *incomplete fusion* dan *mechanical damage* pada *capping*, serta *slag inclusion* pada *root*.

Pembahasan Cacat:

Terjadinya *incomplete fusion* dan *slag inclusion* adalah dampak panas masukan dan laju deposisi yang sangat tinggi (167,0 A). Cairan logam las mendahului busur (*slumping*) atau melangkahi terak cair, sehingga terak terperangkap (*slag inclusion*) dan menghalangi penyatuan sempurna dinding kampuh. Merujuk Clause 6 Part C, *incomplete fusion* adalah cacat planar kritis yang mutlak *rejectable* tanpa batas toleransi.

4.2. Kesimpulan Pengaruh Variasi Arus dan Kualitas Pengerjaan

❖ **Pengaruh *Heat Input* Terhadap Karakteristik Cacat**

Variasi arus secara langsung memengaruhi besaran panas masukan (*heat input*). Pada SMAW arus rendah (80 A), *heat input* memicu pembekuan terlalu cepat (*fast freezing*) yang bermanifestasi menjadi porositas. Peningkatan ke 100 A memperbaiki masalah pembekuan namun memunculkan *overlap/undercut* akibat teknik ayunan. Pada arus tinggi (120 A), gaya dorong busur (*arc force*) memicu kolam *root* terlalu panas (*fluid*), menyebabkan porositas akar dan *spatter* masif. Fenomena serupa terjadi pada FCAW, di mana arus rendah memicu *underfill*, dan arus terlalu tinggi memicu cacat kritis seperti *incomplete fusion* dan jebakan *slag*.

❖ **Konsistensi Cacat *Workmanship***

Terlepas dari variasi arus dan metode pengelasan yang diterapkan, analisis visual menunjukkan pola cacat yang konsisten pada spesimen, yaitu *arc strike* dan *mechanical damage*. Hal ini mengonfirmasi bahwa diskontinuitas ini bukan disebabkan oleh fluktuasi parameter kelistrikan, melainkan tingkat keterampilan, kedisiplinan, dan kebiasaan kerja (*workmanship*) operator las. Agresivitas dalam membersihkan terak menggunakan *chipping hammer* atau gerinda menjadi penyumbang utama cacat mekanis ini

4.3. Evaluasi Keberterimaan Keseluruhan uji visual (Berdasarkan AWS D1.1)

Merujuk pada kriteria inspeksi visual AWS D1.1 *Structural Welding Code - Steel* (Clause 5 terkait *Workmanship* dan Clause 6 Part C terkait Kriteria Inspeksi Visual), seluruh spesimen dievaluasi sebagai berikut:

❖ **Evaluasi Spesimen SMAW (SMAW-1, SMAW-2, SMAW-3)**

Secara keseluruhan dinyatakan **tidak dapat diterima (*unacceptable / rejected*)**. Ketiganya gagal memenuhi batas toleransi profil las dan standar kualitas pengerjaan, sehingga memerlukan tindakan perbaikan (*repair*) komprehensif (penggerindaan,

perbaiki kontur, dan penghalusan *arc strike*) sebelum dapat dilanjutkan ke tahap *Non-Destructive Testing*.

❖ **Evaluasi Spesimen FCAW (FCAW-1, FCAW-2, FCAW-3)**

FCAW-1: Ditolak (*Unacceptable*) akibat *underfill* pada *capping* yang mengurangi penampang plat serta *porosity* pada *root*.

FCAW-2: Ditolak (*Unacceptable*) akibat pelanggaran standar *workmanship* berupa *mechanical damage* pada material dasar serta *porosity* pada *root*.

FCAW-3: Ditolak Mutlak (*Unacceptable*) akibat ditemukannya cacat kritis *incomplete fusion* pada *capping* dan indikasi *slag inclusion* pada area *root pass*.

4.4 PENGUJIAN NDT (MPT)

SAMPEL 1

CAPPING :



Gambar 29 Hasil MPT capping sampel 1

ROOT :



Gambar 30 Hasil MPT root sampel 1

porosity

undercut

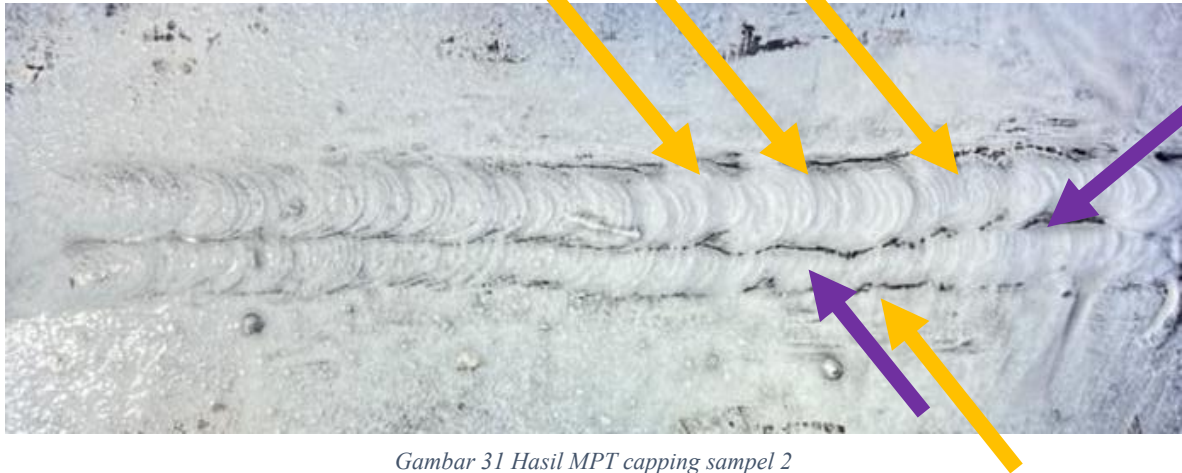
Incomplete fusion

Variatif cacat	
Root	Capping
Undercut 2x	Incomplete fusion
	Porosity
	Undercut
Total : 7 Defects	

Tabel 27 Variatif cacat NDT sampel 1

SAMPEL 2

CAPPING :



Gambar 31 Hasil MPT capping sampel 2

Incomplete fusion

undercut

ROOT :



Gambar 32 Hasil MPT root sampel 2

*)Tidak ada indikasi

*)No indication

Variatif cacat	
Root	Capping
	Incomplete fussion 2x
	Undercut 4x
Total : 6 Defects	

Tabel 28 Variatif cacat NDT sampel 2

SAMPEL 3

CAPPING :



Gambar 33 Hasil MPT capping sampel 3

ROOT :



Gambar 34 Hasil MPT sampel 3

porosity

Variatif cacat	
Root	Capping
Porosity	Porosity 2x
Total : 3 Defects	

Tabel 29 Variatif cacat cacat NDT sampel 3

SAMPEL 4

CAPPING :



Gambar 35 Hasil MPT capping sampel 4

*) No Indication

ROOT :



Gambar 36 Hasil MPT root sampel 4

*) No Indication

Variatif cacat	
Root	Capping
Total : 0 Defects	

Tabel 30 Variatif cacat sampel 4

SAMPEL 5

CAPPING :



Gambar 37 Hasil MPT capping sampel 5

*) No Indication

ROOT :



Gambar 38 Hasil MPT root sampel 5

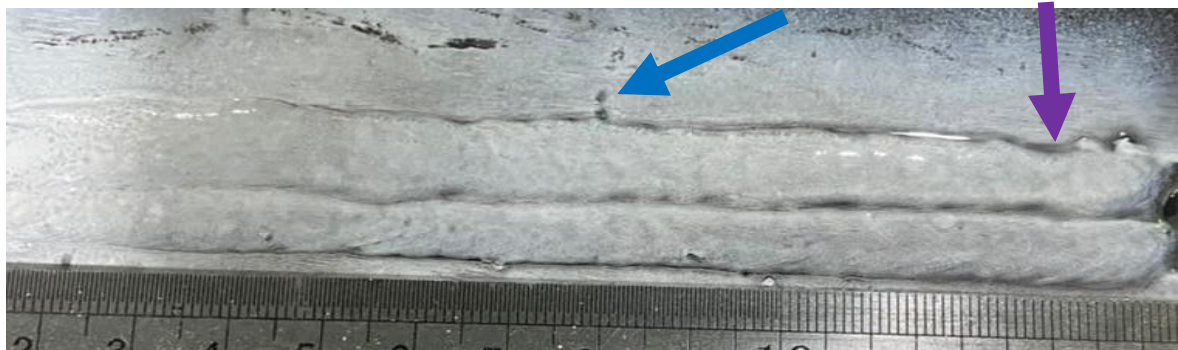
*) No Indication

Variatif cacat	
Root	Capping
Total : 0 Defects	

Tabel 31 Variatif cacat sampel 5

SAMPEL 6

CAPPING :

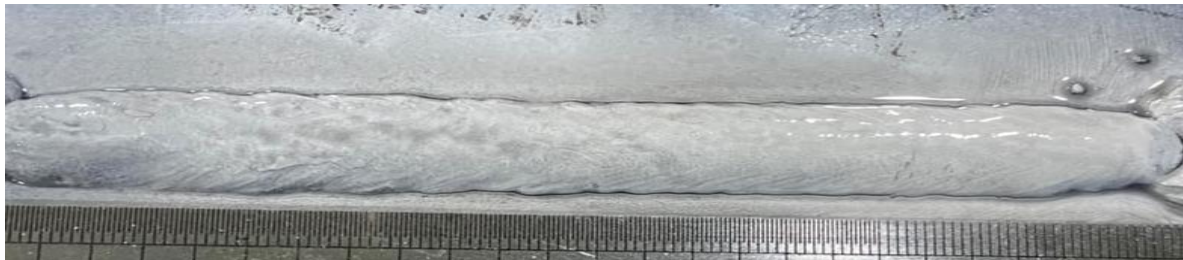


Gambar 39 Hasil MPT capping sampel 6

Mechanical damage

Incomplete fusion

ROOT :



Gambar 40 Hasil MPT root sampel 6

*) No Indication

Variatif cacat	
Root	Capping
	Mechanical damage
	Incomplete fusion
Total : 2 Defects	

Tabel 32 Variatif cacat sampel 6

4.5. Hasil Pengujian Non-Destructive Testing (NDT)

Setelah tahap pengujian visual (VT) selesai dilakukan, evaluasi terhadap integritas sambungan las dilanjutkan ke tahap *Non-Destructive Testing* (NDT) menggunakan metode *Magnetic Particle Testing* (MPT). Metode ini diaplikasikan sebagai langkah verifikasi tingkat lanjut untuk mendeteksi diskontinuitas yang sangat halus, retak mikro, atau cacat linier yang berada tepat di permukaan (*surface*) maupun sedikit di bawah permukaan (*near-surface*), yang seringkali luput dari pengamatan mata telanjang pada saat uji visual.

Pengujian ini mengandalkan prinsip kebocoran fluks magnetik (*magnetic flux leakage*). Dengan mengaplikasikan teknik kontras warna—menggunakan cat dasar putih (*white*

contrast paint) untuk memberikan latar belakang yang terang, serta semprotan partikel magnetik berwarna hitam (*black magnetic ink/particles*)—setiap diskontinuitas pada material feromagnetik akan memotong garis gaya magnet, memaksa partikel hitam berkumpul di area cacat dan membentuk indikasi visual yang sangat jelas.

4.5.1 Analisis Hasil Pengujian MPT pada Spesimen SMAW

Pengujian partikel magnetik pada ketiga spesimen yang dilas menggunakan metode *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) mengonfirmasi keberadaan berbagai diskontinuitas struktural yang signifikan, yang dipengaruhi oleh fluktuasi parameter arus (*heat input*) dan faktor *workmanship*:

❖ ***Incomplete Fusion* (Peleburan Tidak Sempurna):**

Indikasi ini tertangkap dengan sangat tajam berupa garis hitam linier pada sisi *capping* spesimen SMAW-1 (arus rendah) dan SMAW-2 (arus sedang). Secara metalurgi, cacat ini terjadi ketika energi panas yang dihasilkan oleh busur listrik tidak cukup untuk mencairkan material dasar secara sempurna, atau akibat sudut elektroda yang salah sehingga cairan logam las hanya menempel ("*mengalir dingin*") di atas *base metal* tanpa terjadi penyatuan atomik. Keberadaan *incomplete fusion* menciptakan diskontinuitas planar (dua dimensi) internal. Dalam aplikasi rekayasa struktur, cacat planar adalah yang paling berbahaya karena bertindak sebagai takik internal yang sangat tajam, menciptakan titik konsentrasi tegangan (*stress raiser*) ekstrim yang dapat memicu perambatan retak tiba-tiba (patah getas) saat struktur menerima beban tarik atau dinamis.

❖ ***Undercut* (Takik Las):**

Pengujian MPT menegaskan dan memperjelas keparahan indikasi *undercut* pada spesimen SMAW-1 (*capping* dan *root*) serta SMAW-2 (*capping*). Meskipun secara visual kedalaman *undercut* mungkin terlihat samar atau masih berada di sekitar batas 1 mm, serbuk magnetik menunjukkan bahwa dasar dari ceruk *undercut* tersebut sangat tajam. Ketika cacat yang bersifat geometris seperti *undercut* ini berkombinasi dengan cacat internal seperti *incomplete fusion*, ketahanan sambungan las terhadap beban fatik (*fatigue strength*) akan turun drastis. Tegangan sisa (*residual stress*) akibat pengelasan akan secara alami terakumulasi pada dasar takik *undercut* tersebut.

❖ **Porosity (Porositas / Rongga Gas):**

Indikasi porositas yang letaknya sangat dekat dengan permukaan (*near-surface*) berhasil ditangkap oleh serbuk magnetik pada spesimen SMAW-1 (*capping*) dan SMAW-3 (*capping* dan *root*). Pada SMAW-1, porositas terjadi karena fenomena *fast freezing* (pembekuan cepat akibat kurangnya panas masukan) yang menjebak gas pelindung. Sebaliknya, pada SMAW-3 (arus tinggi 120 A), porositas di area *root* terjadi akibat turbulensi kolam las cair dan rusaknya perlindungan terak karena dorongan busur (*arc force*) yang terlalu agresif. Munculnya kluster porositas ini amat krusial karena secara langsung mendiskon (mengurangi) luasan penampang efektif material dalam menahan beban tarik (tegangan penampang).

4.5.2. Analisis Hasil Pengujian MPT pada Spesimen FCAW

Evaluasi pada spesimen hasil metode *Flux-Cored Arc Welding* (FCAW) menunjukkan korelasi yang sangat kuat antara pengaturan rentang arus (ampere) dengan probabilitas terbentuknya cacat linier di permukaan.

❖ **Spesimen FCAW-1 (Arus Rendah) & FCAW-2 (Arus Sedang):**

Kedua spesimen ini menunjukkan hasil yang sangat baik pada pengujian MPT, dengan formasi partikel magnetik menyebar merata tanpa adanya penumpukan. Status ini dideklarasikan sebagai **nihil indikasi (*no indication*)** di seluruh jalur lasan, baik pada sisi *capping* maupun *root*. Hal ini secara ilmiah membuktikan bahwa garis gaya fluks magnetik mengalir secara halus tanpa ada interupsi dari takik atau retak. Logam las menyatu dengan cukup baik di area permukaan pada rentang arus ini, sehingga terbebas dari cacat planar makro yang dapat memicu retak permukaan.

❖ **Spesimen FCAW-3 (Arus Tinggi):**

Berbanding terbalik dengan spesimen lainnya, pengujian MPT pada FCAW-3 menunjukkan adanya gangguan struktural yang parah di sisi permukaan (*capping*), meskipun sisi akarnya (*root*) bersih. Konsentrasi serbuk magnetik yang tebal dan memanjang mengonfirmasi secara absolut adanya cacat *incomplete fusion*. Arus yang terlalu tinggi (mencapai 167,0 A pada *capping*) menyebabkan cairan logam melaju mendahului busur (*slumping*) dan menutupi dinding kampuh yang belum sempat mencair. Selain itu, serbuk magnetik juga mendeteksi *mechanical damage*—jejak hantaman alat pembersih terak (*chipping hammer*) atau mata gerinda—yang terbukti

meninggalkan takik mikro yang cukup dalam hingga mampu membocorkan fluks magnetik.

4.5.3 Evaluasi Keberterimaan Berdasarkan Standar AWS D1.1

Analisis akhir dan keputusan kelayakan (*acceptance/rejection criteria*) terhadap seluruh spesimen uji didasarkan secara ketat pada standar **AWS D1.1 Structural Welding Code - Steel**, secara spesifik merujuk pada *Clause 6 Part C* (Kriteria Inspeksi Visual dan NDT) serta *Clause 5* (Kualitas Pengerjaan / *Workmanship*).

1. Keputusan Evaluasi Spesimen SMAW (Ditolak Secara Mutlak):

Ketiga spesimen SMAW (SMAW-1, 2, dan 3) secara keseluruhan dinyatakan **TIDAK LULUS UJI (*REJECTED*)**. AWS D1.1 menetapkan aturan *zero tolerance* (tanpa toleransi ukuran) terhadap segala bentuk diskontinuitas planar. Penemuan *incomplete fusion* pada spesimen ini merupakan pelanggaran kode kritis yang mewajibkan spesimen tersebut ditolak. Hal ini diperburuk dengan akumulasi cacat *undercut* tajam dan kluster porositas yang secara kumulatif jauh melampaui batas aman yang diizinkan untuk struktur yang memikul beban statis maupun siklis.

2. Keputusan Evaluasi Spesimen FCAW:

❖ **FCAW-1 dan FCAW-2:** Khusus dalam ranah pengujian MPT, kedua spesimen ini dinyatakan **LULUS (*ACCEPTABLE*)** karena terbukti bersih dari indikasi cacat permukaan dan retak (*no indication*). Namun, secara holistik (jika digabungkan dengan hasil uji visual sebelumnya di mana terdapat *underfill* dan kerusakan mekanis), spesimen ini tetap memerlukan tindakan perbaikan *repair* permukaan.

❖ **FCAW-3:** Dinyatakan **TIDAK LULUS (*REJECTED*)**. Konfirmasi adanya *incomplete fusion* linier pada *capping* langsung menggugurkan kelayakan spesimen ini. Di samping itu, terdeteksinya kerusakan mekanis (*mechanical damage*) oleh MPT menjadi bukti pelanggaran nyata terhadap standar *workmanship* (Clause 5).

4.6. Rekomendasi Tindakan Lanjutan

Berdasarkan masifnya indikasi cacat kritis (terutama *incomplete fusion*) yang dikonfirmasi oleh pengujian MPT, diperlukan tindakan evaluasi menyeluruh sebelum proses produksi struktur baja dilanjutkan. Tindakan perbaikan (*repair*) wajib dilakukan dengan cara

mencungkil/menggerinda (*gouging/grinding*) area yang mengandung cacat hingga batas logam yang sehat, lalu dilakukan pengelasan ulang. Selain itu, temuan ini sangat merekomendasikan perlunya kaji ulang terhadap pengaturan rentang parameter kelistrikan di dalam *Welding Procedure Specification* (WPS), serta program pelatihan ulang (peningkatan *welder skill & performance*) guna memastikan konsistensi teknik ayunan, kecepatan gerak (*travel speed*), dan kedisiplinan dalam membersihkan area las.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan serangkaian tahapan pengujian, observasi makroskopis, dan analisis komprehensif yang telah dilakukan terhadap kualitas fisik sambungan las *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) dan *Flux-Cored Arc Welding* (FCAW) dengan variasi parameter arus pengelasan, serta mengacu pada standar keberterimaan *American Welding Society* (AWS) D1.1 *Structural Welding Code - Steel*, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan pokok sebagai berikut:

1. Korelasi Parameter Arus terhadap Diskontinuitas pada Proses SMAW:

Penggunaan variasi arus memberikan dampak langsung terhadap laju panas masukan (*heat input*) dan karakteristik cacat fisik pada spesimen. Pada rentang arus rendah (80 A), fenomena pembekuan cairan las yang terlalu cepat (*fast freezing*) mengakibatkan terjebaknya gas pelindung sebelum sempat keluar ke permukaan, sehingga memicu cacat porositas permukaan secara masif. Sebaliknya, pada rentang arus tinggi (120 A), panas berlebih menyebabkan kolam las menjadi sangat cair (*fluid*), yang memicu terjadinya porositas pada akar las (*root pass*) serta memproduksi percikan las (*spatter*) dengan volume yang tidak terkendali.

2. Hasil Evaluasi Keberterimaan Spesimen SMAW:

Berdasarkan hasil inspeksi Visual dan pengujian *Magnetic Particle Testing* (MPT) merujuk pada standar AWS D1.1 *Clause 6 Part C*, seluruh spesimen SMAW (dengan variasi arus 80 A, 100 A, dan 120 A) secara mutlak dinyatakan **tidak dapat diterima (*rejected*)**. Penolakan ini didasari oleh temuan cacat planar yang kritis berupa *incomplete fusion* yang tertangkap jelas pada pengujian MPT, kehadiran *overlap* dan *undercut* yang menyalahi regulasi profil las, serta akumulasi cacat porositas yang melampaui batas toleransi pembebanan.

3. Korelasi Parameter Arus terhadap Diskontinuitas pada Proses FCAW:

Pada proses pengelasan FCAW, variasi arus sangat memengaruhi tingkat deposisi logam dan fusi material dasar. Aplikasi arus yang terlalu rendah (berkisar antara 93,2 A hingga 137,1 A) terbukti tidak mampu mengisi kampuh las secara sempurna sehingga menghasilkan cacat *underfill* yang mengurangi ketebalan nominal plat. Di sisi lain, pengaplikasian arus yang terlampaui tinggi (mencapai 167,0 A pada tahapan *capping*) menyebabkan logam cair mendahului laju busur las (*slumping*),

yang berakibat langsung pada terjebaknya terak (*slag inclusion*) dan peleburan yang tidak memadai (*incomplete fusion*).

4. Hasil Evaluasi Keberterimaan Spesimen FCAW:

Tinjauan spesifik dari pengujian MPT pada spesimen FCAW arus rendah dan sedang menunjukkan status nihil indikasi (*no indication*). Hal ini membuktikan spesimen tersebut bersih dari retak permukaan maupun cacat linier (*near-surface*), sehingga dinyatakan lulus (*acceptable*) pada tahapan MPT. Namun, spesimen FCAW dengan arus tinggi menunjukkan indikasi *incomplete fusion* sehingga dinyatakan tidak lulus (*rejected*). Secara kumulatif, evaluasi akhir yang menggabungkan pengujian visual dan MPT menyimpulkan bahwa keseluruhan spesimen uji FCAW tidak memenuhi kriteria penerimaan akibat masih ditemukannya pelanggaran profil las dan kerusakan material dasar.

5. Faktor Kritis Kualitas Pengerjaan (*Workmanship*):

Temuan penyimpangan yang paling konsisten pada seluruh spesimen uji, baik pada spesimen SMAW maupun FCAW, adalah tingginya tingkat cacat yang diakibatkan oleh kurangnya kontrol operasional atau *workmanship*. Keberadaan goresan busur (*arc strike*) di luar area kampuh las permanen serta kerusakan mekanis (*mechanical damage*) akibat pembersihan terak yang terlalu agresif menjadi bukti pelanggaran krusial terhadap klausul kualitas pengerjaan (AWS D1.1 *Clause 5*). Kondisi ini mengonfirmasi bahwa kedisiplinan dan kompetensi operator memiliki andil yang sama besarnya—bahkan lebih mendasar—dibandingkan pengaturan fluktuasi parameter kelistrikan mesin las.

5.2 Saran

Berangkat dari kesimpulan, analisis kegagalan, serta kendala teknis yang ditemukan selama proses pelaksanaan penelitian ini, terdapat beberapa saran strategis yang direkomendasikan untuk optimalisasi kualitas pengelasan maupun untuk penyempurnaan pengembangan penelitian akademis di masa mendatang:

1. **Peningkatan Pengawasan dan Standardisasi Kualitas Pengerjaan (*Workmanship*):** Direkomendasikan adanya simulasi, pelatihan intensif, dan pengawasan yang lebih ketat terhadap prosedur operasional standar bagi operator las. Operator harus dibiasakan untuk tidak menyalakan busur (*arc strike*) di luar area kampuh lasan untuk mencegah inisiasi retak mikro akibat transformasi fasa *martensite*. Selain itu, prosedur pembersihan terak (*slag removal*) harus dilakukan

menggunakan alat penyerpih yang sesuai (seperti sikat kawat baja dan gerinda dengan tekanan terukur) agar tidak menimbulkan takik tajam (*mechanical damage*) yang akan menjadi titik konsentrasi tegangan (*stress concentration*) pada benda kerja.

2. **Optimalisasi Parameter *Welding Procedure Specification* (WPS) secara Multivariabel:** Bagi riset lanjutan, disarankan agar tidak hanya berfokus pada variasi parameter arus kelistrikan secara tunggal. Diperlukan kalibrasi parameter eksperimental yang lebih holistik dengan turut mengontrol variabel kecepatan pengelasan (*travel speed*), jarak ujung *contact tube* ke benda kerja (*stick-out*), serta penerapan teknik ayunan (*weaving technique*) yang tepat. Kombinasi interaksi antar parameter ini sangat krusial guna mengeliminasi kemunculan cacat geometris seperti *underfill*, *overlap*, maupun penetrasi berlebih.
3. **•Pengembangan Metode Pengujian Tak Merusak (NDT) Berbasis Volumetrik:** Mengingat metode *Magnetic Particle Testing* (MPT) memiliki keterbatasan fisik mekanika kuantum karena hanya mampu mendeteksi diskontinuitas linier di area permukaan (*surface*) dan kedalaman dangkal di bawah permukaan (*near-surface*), sangat direkomendasikan agar kajian berikutnya menyertakan metode NDT berbasis volumetrik. Pengaplikasian *Radiographic Testing* (RT) atau *Phased Array Ultrasonic Testing* (PAUT) akan memberikan analisis keandalan yang lebih tajam dalam memetakan cacat-cacat internal (*internal defects*) yang bersembunyi di dalam badan lasan (*weld metal*).
4. **•Penyelesaian Tahapan Pengujian Merusak (*Destructive Testing*) dan Analisis Metalografi:** Untuk menjawab rumusan masalah secara komprehensif serta menuntaskan desain studi komparasi yang tertuang pada judul awal tugas akhir ini, tahapan pengujian fisik secara destruktif mutlak direalisasikan. Peneliti selanjutnya disarankan untuk melangsungkan pengujian Tarik (*Tensile Test*) untuk mengevaluasi Kekuatan Luluh (*Yield Strength*) dan Kekuatan Tarik Maksimum (*Ultimate Tensile Strength*). Di samping itu, observasi mikrostruktur pada titik-titik transisi *Weld Metal* (WM), *Heat Affected Zone* (HAZ), dan *Base Metal* (BM) harus dilakukan untuk membuktikan secara metalurgi pergeseran butir yang diakibatkan oleh komparasi paparan *heat input* antara metode SMAW dan FCAW.
5. **Pengendalian Material Habis Pakai (*Consumables*) dan Lingkungan Las:** Disarankan untuk meningkatkan kehati-hatian dalam manajemen *consumables*. Khusus pada metode SMAW yang menggunakan elektroda tipe *Low Hydrogen*

(E7018), material harus disimpan di dalam oven pemanas (*holding oven*) pada temperatur standar yang direkomendasikan agar tidak menyerap kelembapan udara yang berisiko fatal memicu hidrogen retak dingin (*cold cracking*) maupun porositas. Sedangkan pada aplikasi FCAW, perlindungan area pengelasan dari hembusan angin (menggunakan penutup/barikade) sangat krusial untuk menjaga stabilitas *flow rate* gas pelindung CO₂ agar area cairan las tidak terkontaminasi atmosfer sekitarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- American Welding Society (AWS). (2015). D1.1/D1.1M: Structural Welding Code — Steel (23rd ed.). American Welding Society.
- American Welding Society (AWS). (2015). A5.1/A5.1M: Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding. American Welding Society.
- American Welding Society (AWS). (2012). A5.20/A5.20M: Specification for Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding. American Welding Society.
- American Society for Nondestructive Testing (ASNT). (2016). NDT Handbook, Volume 7: Magnetic Particle Testing (3rd ed.). ASNT.
- ASTM International. (2022). ASTM E8/E8M-22: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM International.
- ASTM International. (2019). ASTM A36/A36M-19: Standard Specification for Carbon Structural Steel. ASTM International.
- ASM International. (2011). ASM Handbook Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering. ASM International.
- Biro Klasifikasi Indonesia (BKI). (2020). Rules for Tugboats and Towing Vessels. Biro Klasifikasi Indonesia.
- Kim, S., Kang, D., & Kim, T. W. (2014). Effect of heat input on acicular ferrite formation and mechanical properties of FCAW weld metal. *Journal of Materials Science*, 49(12), 4346–4357. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8134-3>
- Kou, S. (2003). *Welding metallurgy* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Kumar, R., Singh, R., & Kumar, S. (2018). Comparative analysis of SMAW and FCAW welding processes for structural steel. *International Journal of Mechanical Engineering*, 7(4), 112–120.
- Lancaster, J. F. (2014). *Metallurgy of welding* (6th ed.). Abington Publishing.
- Molland, A. F. (2011). *The maritime engineering reference book: A guide to ship design, construction and operation*. Butterworth-Heinemann.
- Rahman, A., & Wahyudi, H. (2019). Pengaruh arus las FCAW terhadap mikrostruktur baja kapal grade A. *Jurnal Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro*, 7(3), 88–96.
- Siregar, T., Nugroho, S., & Putra, R. (2020). Perbandingan sifat mekanis sambungan las SMAW dan FCAW pada baja ASTM A36. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 11(2), 45–53.

UNCTAD. (2022). Review of Maritime Transport 2022. United Nations Conference on Trade and Development.