

Deteksi Cacat Undercut pada Hasil Pengelasan FCAW Plat S355 Menggunakan Metode Visual Testing (VT) dan Magnetic Particle Testing (MT)

Alfian Wahyu Septiawan^{1*} and Meschac Timothee Silalahi^{2*}

* Politeknik Negeri Batam

Program Studi Teknik Mesin

Jl. Ahmad Yani, Batam Centre, Batam 29461, Indonesia

¹E-mail: alfianwahyuneng@gmail.com

Abstrak

Cacat las merupakan hasil pengelasan yang tidak memenuhi standar keberterimaan, yang umumnya dipicu oleh prosedur pengelasan yang salah, persiapan sambungan yang kurang baik, serta penggunaan peralatan maupun consumable yang tidak sesuai standar. Mendeteksi cacat las, khususnya jenis undercut, pada struktur industri merupakan aspek krusial dalam mengevaluasi dan mencegah kegagalan sambungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis cacat las undercut pada plat baja S355 hasil pengelasan *Flux-Cored Arc Welding* (FCAW) posisi 3G dan 4G, masing-masing sebanyak 10 spesimen uji (total 20 spesimen). Pengujian dilakukan menggunakan metode Non-Destructive Test (NDT) berupa pengujian visual (*Visual Inspection*) dan uji partikel magnetik (*Magnetic Particle Test*). Hasil penelitian menunjukkan adanya cacat undercut pada spesimen las FCAW 3G dan 4G yang terdeteksi secara jelas melalui uji magnetik. Cacat undercut ini berlokasi di area batas logam las (*weld toe*) pada lapisan pengisian akhir (*capping*), yang mengindikasikan adanya ketidaksesuaian pada parameter input panas (*heat input*) atau kecepatan ayunan elektroda selama proses pengelasan.

Kata kunci: Cacat Las, Pengelasan FCAW, 3G/4G, Plat Baja S355

Abstract

Weld defects are welding outcomes that fail to meet acceptance standards, typically caused by incorrect welding procedures, poor joint preparation, or the use of equipment and consumables that do not meet specifications. Detecting weld defects—specifically undercut—in industrial structures is a critical aspect of evaluating and preventing joint failure. This study aims to identify and analyze undercut defects in S355 steel plates welded using the Flux-Cored Arc Welding (FCAW) process in the 3G and 4G positions, with 10 test specimens prepared for each position (20 specimens in total). Testing was conducted using Non-Destructive Testing (NDT) methods, specifically visual inspection and magnetic particle testing. The results revealed the presence of undercut defects in the 3G and 4G FCAW specimens, which were clearly detected via magnetic particle testing. These undercut defects were located at the weld toe of the capping layer, indicating inconsistencies in heat input parameters or electrode oscillation speed during the welding process.

Keywords: Welding Defects, FCAW Welding, 3G/4G, S355 Steel Plate

1 Pendahuluan

Inspeksi pengelasan merupakan praktik krusial untuk menilai integritas struktur dan komponen pada berbagai aplikasi industri, khususnya di sektor minyak dan gas, energi terbarukan lepas pantai, ketenagalistrikan, dan petrokimia. Cacat las secara umum diklasifikasikan menjadi enam jenis utama, yaitu porositas (PO), retak (CR), terak (SL), fusi tidak lengkap (IF), penetrasi tidak lengkap (IP), dan tanpa cacat (ND). Kegagalan sambungan las dapat dipicu oleh berbagai faktor, mulai dari kualitas baja yang buruk hingga retak akibat regangan yang menyertai perubahan fasa dan penyusutan termal selama proses pendinginan. Cacat-cacat tersebut memengaruhi integritas struktural komponen yang dilas sehingga inspeksi rutin diperlukan untuk memantau dan menilai kondisi sambungan agar tetap layak pakai sebelum kerusakan berkembang menjadi kebocoran atau kegagalan struktur.

Undercut adalah cacat visual berupa cerukan atau parit pada tepi logam induk di sepanjang jalur las yang umumnya

disebabkan oleh arus listrik terlalu tinggi atau kecepatan ayunan elektroda yang tidak stabil, sehingga logam induk mencair tanpa terisi kembali oleh logam pengisi secara sempurna. Cacat ini berperan sebagai pemicu konsentrasi tegangan (*stress raiser*) yang dapat menurunkan ketahanan lelah (*fatigue strength*) suatu sambungan, khususnya pada struktur yang menerima beban siklik. Berbeda dengan undercut, porosity merupakan cacat berupa rongga-rongga kecil mirip gelembung udara yang terbentuk akibat gas seperti hidrogen, nitrogen, atau oksigen yang terjebak selama pembekuan logam las, sering kali dipicu oleh kontaminasi permukaan benda kerja berupa oli, karat, atau kelembapan pada fluks dan gas pelindung. Sebagai upaya melengkapi metode inspeksi visual, pemantauan proses pengelasan FCAW berbasis data juga telah dikembangkan, misalnya melalui pendekatan Multi Layer Perceptron untuk menganalisis data monitoring proses pengelasan guna mendukung identifikasi kondisi pengelasan secara lebih sistematis [2].

Proses Flux-Cored Arc Welding (FCAW) banyak digunakan pada konstruksi struktural, jalur pipa, pembangunan kapal, serta konstruksi lepas pantai karena laju deposisi yang tinggi dan kemampuannya beradaptasi pada berbagai posisi pengelasan [1], [4]. Meski demikian, variasi parameter pengelasan seperti arus, tegangan, dan kecepatan las yang tidak terkontrol dengan baik berpotensi meningkatkan risiko cacat undercut, khususnya pada posisi pengelasan yang relatif sulit seperti posisi vertikal (3G) dan posisi di atas kepala/overhead (4G). Pada penelitian ini, objek yang diamati adalah pengelasan FCAW-GS pada pelat baja struktural S355 yang digunakan pada proyek konstruksi lepas pantai TenneT 2GW, mengacu pada Welding Procedure Specification (WPS) No. 2GW-STR-FC-31 Rev. 00 dan kode desain DNV-OS-C401:2021. Baja S355 dipilih karena banyak digunakan sebagai material struktural utama pada bangunan lepas pantai berkat kombinasi kekuatan luluh tinggi dan ketangguhan yang memadai [3], [4].

Untuk memastikan sambungan las memenuhi kriteria keberterimaan sebelum struktur dioperasikan, dilakukan pengujian tidak merusak (Non-Destructive Testing/NDT) berupa Visual Inspection (VT) dan Magnetic Particle Testing (MT). Metode MT dipilih karena efektif mendeteksi diskontinuitas permukaan dan dekat-permukaan pada material ferromagnetik seperti baja S355 tanpa merusak struktur benda uji [1]. Efektivitas metode ini turut didukung oleh kajian penerapan Magnetic Particle Testing pada evaluasi hasil praktik pengelasan mengacu pada standar AWS dan ASME, yang menunjukkan konsistensi metode tersebut dalam mengidentifikasi cacat permukaan pada berbagai hasil las [5]. Namun demikian, keberterimaan hasil deteksi cacat undercut tidak selalu konsisten apabila dievaluasi terhadap standar yang berbeda, misalnya ISO 5817 dibandingkan dengan AWS D1.1, sehingga diperlukan kajian yang membandingkan kedua standar tersebut dalam konteks struktur lepas pantai yang menerima beban siklik. Kondisi inilah yang melatarbelakangi penelitian ini, yaitu perlunya identifikasi dan analisis mendalam terhadap cacat undercut pada hasil pengelasan FCAW posisi 3G dan 4G pada pelat baja S355 menggunakan metode NDT.

2 Metodologi Penelitian

Jenis dan Desain Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif dengan pendekatan eksperimental (experimental research), yaitu penelitian yang dilakukan dengan memberikan perlakuan berupa proses pengelasan FCAW pada spesimen uji, kemudian hasilnya diamati dan dianalisis secara kuantitatif melalui pengujian NDT. Data yang diperoleh berupa data primer hasil pengujian visual dan uji partikel magnetik, yang selanjutnya dibandingkan dengan kriteria keberterimaan pada standar ISO 5817 dan AWS D1.1.



Gambar 1 : Flowchart penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

1. MULAI (Start)

Tahap ini merupakan langkah awal atau pembukaan dari seluruh rangkaian kegiatan. Di sini, dilakukan penetapan tujuan pemeriksaan dan penentuan ruang lingkup pekerjaan agar proses evaluasi memiliki batasan yang jelas dan terarah.

2. Studi literature

Proses dimulai dengan melakukan penelusuran komprehensif terhadap teori dasar pengelasan FCAW, karakteristik material baja S355, serta standar inspeksi NDT (seperti ASME Section V atau AWS D1.1). Tahap ini bertujuan untuk menentukan parameter keberterimaan (acceptance criteria) yang akan digunakan sebagai acuan evaluasi cacat.

3. Persiapkan Material dan Peralatan

Pada tahap ini, teknisi mengumpulkan semua kebutuhan logistik yang diperlukan. Hal ini mencakup pemilihan benda uji (material) serta penyiapan alat-alat teknis yang telah dikalibrasi untuk memastikan hasil pengukuran nantinya akurat dan sesuai dengan standar keselamatan kerja.

4. Inspeksi dan Pengujian NDT

Langkah ini adalah inti dari proses, di mana dilakukan pemeriksaan menggunakan metode Non-Destructive Testing (NDT). Pengujian ini bertujuan untuk mendeteksi adanya cacat, diskontinuitas, atau kerusakan pada material tanpa merusak struktur benda tersebut sedikit pun.

5. Analisis Data

Setelah pengujian selesai, semua data dan temuan lapangan diolah secara mendalam. Hasil deteksi dibandingkan dengan standar atau kriteria keberterimaan yang berlaku untuk menentukan apakah kondisi material tersebut masih layak pakai atau memerlukan tindakan perbaikan.

6. Kesimpulan dan Saran

Tahap akhir berupa penarikan kesimpulan mengenai integritas struktur hasil lasan FCAW pada plat S355 tersebut. Berdasarkan hasil analisis, diberikan saran teknis terkait optimalisasi parameter las untuk meminimalisir cacat serupa di masa mendatang serta menentukan status kelayakan komponen (Accept/Reject).

7. Selesai

Sebagai penutup, dilakukan sign-off oleh inspektur yang berwenang sebagai bukti otentik bahwa prosedur pengujian telah memenuhi standar mutu dan keselamatan konstruksi yang dipersyaratkan.

Parameter Pengelasan (*Welding Procedure Specification*)

Spesimen uji pada penelitian ini dibuat berdasarkan Welding Procedure Specification (WPS) No. 2GW-STR-FC-31 Rev. 00 yang diterbitkan untuk proyek TenneT 2GW, mengacu pada kode konstruksi struktural DNV-OS-C401:2021 dan ISO 15614-1:2017 sesuai spesifikasi SPE.04.131-2GW Rev-2. Proses pengelasan yang digunakan adalah Flux-Cored Arc Welding – Gas Shielded (FCAW-GS/136) secara semi-otomatis, dengan aplikasi bersifat sementara (temporary). Parameter utama dari WPS tersebut dirangkum pada tabel berikut.

Tabel 1.
Parameter Utama WPS 2GW-STR-FC-31

Parameter	Nilai
Proses & tipe pengelasan	FCAW-GS (136), Semi-Automatic
Spesifikasi & jenis material dasar	EN 10025-1/2/3/4, EN 10225-1, EN 10210-1 — baja S355 (Carbon Equivalent $\leq 0,43$)
Tebal material (BW / FW)	25 – 100 mm
Suhu preheat (minimum)	55 °C
Suhu interpass (maksimum)	220 °C
Gas pelindung (shielding)	CO ₂ 99,8%, laju alir 15 – 25 L/menit
Logam pengisi (filler metal)	Flux Cored Wire, klasifikasi E71T-9C-J (AWS A5.20 / ISO 17632), diameter 1,2 mm
Posisi pengelasan	All Positions (termasuk 3G dan 4G)
Arah pengelasan	Uphill untuk posisi vertikal
Jenis bead & teknik ayunan	String & Weave, multi-pass, single electrode
Efficiency Factor (EF) proses FCAW-GS	0,8 (menurut EN 1011-1)

Tabel 2.
Parameter Arus, Tegangan, Kecepatan Las, dan Heat Input per Lapisan (Pass)

Lapisan (Pass)	Arus (A)	Tegangan (V)	Kecepatan Las (mm/menit)	Heat Input (kJ/mm)
----------------	----------	--------------	--------------------------	--------------------

Root	153 – 200	22 – 26	123 – 185	0,87 – 1,78
Fill	168 – 230	21 – 27	157 – 210	0,81 – 2,02
Cap	155 – 235	22 – 27	183 – 259	0,63 – 1,74

Parameter tersebut menunjukkan bahwa input panas (heat input) dihitung menggunakan rumus $HI = (Volt \times Amp \times 0,06 / Travel\ Speed) \times EF$, dengan $EF = 0,8$ untuk proses FCAW-GS sesuai EN 1011-1. Nilai heat input bervariasi antar-lapisan, dengan rentang terendah pada lapisan cap (0,63 kJ/mm) akibat kecepatan las yang lebih tinggi (183 – 259 mm/menit), namun batas atasnya (hingga 1,74 kJ/mm) tetap berpotensi menghasilkan energi busur yang besar apabila arus mendekati batas atas (235 A) sementara kecepatan ayunan elektroda tidak meningkat secara proporsional. Kombinasi arus tinggi dengan kecepatan translasi elektroda yang kurang stabil pada lapisan pengisian akhir (capping) inilah yang secara teoretis konsisten dengan temuan cacat undercut pada penelitian ini, yang lokasinya terkonsentrasi di weld toe lapisan capping sebagaimana disampaikan pada bagian abstrak. Adapun suhu preheat 55°C dan interpass maksimum 220°C ditujukan untuk mengendalikan laju pendinginan pada material S355 tebal (25 – 100 mm) guna mencegah retak akibat hidrogen, meskipun parameter ini tidak secara langsung memengaruhi pembentukan undercut yang lebih dipengaruhi oleh arus dan kecepatan las.

Alat dan Bahan Penelitian

Alat-alat yang digunakan mencakup perangkat pengelasan utama dan instrumen pengujian tidak merusak (Non-Destructive Test):

1. Magnetic Yoke (AC): Alat utama untuk menginduksi medan magnet pada benda kerja.
2. Partikel Magnetik: Bisa berupa serbuk kering (dry powder) atau partikel basah (wet particle) dalam suspensi, biasanya berwarna kontras (hitam/merah) atau fluoresens.
3. White Contrast Paint (WCP): Cat dasar putih tipis untuk meningkatkan visibilitas partikel jika menggunakan metode non-fluoresens.
4. Cleaning Tools: Sikat baja, grinder, dan cairan pembersih (cleaner/degreaser).
5. Alat Ukur: Light meter (untuk memastikan intensitas cahaya cukup) dan Pie Gauge/Berthold Ring (untuk verifikasi arah medan magnet). •Alat Pelindung Diri (APD): Masker, sarung tangan, dan kaca mata pelindung.

Bahan yang digunakan terdiri dari material utama (base metal) dan bahan konsumsi untuk pengujian:

1. Plat Baja S355: Material utama (low carbon steel) yang akan dilas dan diuji.
2. Kawat Las (Filler Metal): Elektroda flux-cored yang sesuai dengan spesifikasi material S355.
3. Gas Pelindung (CO₂ atau Campuran): Digunakan dalam proses pengelasan FCAW untuk melindungi busur las dari kontaminasi udara.
4. Magnetic Powder (Partikel Magnetik):
 - WCP-2 (White Contrast Paint): Cat dasar putih untuk memberikan kontras warna.
 - 7HF (Black Magnetic Ink): Serbuk magnetik hitam cair untuk mendeteksi indikasi cacat permukaan.
5. Cleaner/Degreaser: Cairan pembersih untuk menghilangkan oli atau lemak yang dapat menghambat aliran partikel magnetik.

Tahapan dan Metode Pengujian: Visual Testing (VT) ke Magnetic Particle Testing (MT)

Setiap spesimen las pada penelitian ini diperiksa melalui dua tahap NDT yang dilaksanakan secara berurutan. Tahap pertama adalah Visual Testing (VT) yang berfungsi sebagai skrining awal untuk mendeteksi indikasi cacat permukaan yang tampak langsung oleh mata. Tahap kedua adalah Magnetic Particle Testing (MT) yang dilaksanakan pada seluruh spesimen—baik yang menunjukkan indikasi maupun yang tidak menunjukkan indikasi pada tahap VT—sebagai konfirmasi akhir, mengingat sensitivitas MT terhadap diskontinuitas permukaan dan dekat-permukaan lebih tinggi dibanding VT.

A. Metode dan Tahapan Visual Testing (VT)

Visual Testing (VT) dilaksanakan mengacu pada ASME Section V Article 9 dan AWS D1.1, berupa pengamatan langsung permukaan lasan tanpa bantuan alat pendeteksi tambahan. Tahapan pelaksanaan VT adalah sebagai berikut:

1. Preparasi permukaan: membersihkan area lasan dan Heat Affected Zone (HAZ) dari debu, spatter, karat, dan kontaminan lain yang dapat menutupi indikasi cacat.
2. Verifikasi kondisi pencahayaan: memastikan intensitas cahaya pada permukaan yang diperiksa minimal 1000 lux menggunakan light meter.

3. Pemeriksaan geometri las: memeriksa bentuk manik las (reinforcement, kerataan permukaan, sudut toe) menggunakan welding gauge Cambridge.
4. Pengamatan visual langsung: inspektur mengamati permukaan dan tepi lasan (weld toe) di sepanjang jalur las untuk mengidentifikasi indikasi cacat permukaan seperti undercut, spatter, atau ketidaksempurnaan bentuk manik las.
5. Pencatatan dan penandaan awal: lokasi indikasi yang teramati dicatat dan diberi tanda sementara sebagai acuan pada tahap konfirmasi menggunakan MT. Hasil rekapitulasi VT pada seluruh spesimen disajikan pada Tabel 6 (bagian Analisa Data dan Pembahasan).

B. Metode dan Tahapan Magnetic Particle Testing (MT)

1. Preparasi Permukaan (*Surface Preparation*) Langkah awal adalah melakukan pembersihan mekanis pada area weldment (hasil lasan) dan Heat Affected Zone (HAZ). Permukaan harus disterilisasi dari kontaminan seperti slag, spatter, karat, atau lapisan pelumas menggunakan sikat baja atau pelarut kimia (cleaner). Hal ini bertujuan agar diskontinuitas permukaan tidak tertutup dan memastikan mobilitas partikel magnetik tidak terhambat.
2. Persiapan Instrumentasi dan Media Uji Menyiapkan peralatan Electromagnetic Yoke sebagai sumber induksi medan magnet. Selain itu, disiapkan media kontras berupa (White Contrast Paint WCP) untuk meningkatkan sensitivitas visual, serta Magnetic Ink (sering disebut Black Ink) yang mengandung partikel feromagnetik halus sebagai indikator keberadaan cacat.
3. Aplikasi Media Kontras dan Indikator Magnetik Proses dimulai dengan menyemprotkan White Contrast Paint (WCP) secara tipis dan merata di atas permukaan lasan. Setelah kering, alat Yoke diletakkan pada posisi yang ditentukan (biasanya sudut 90° untuk cakupan penuh) dan diaktivasi untuk menciptakan medan magnet. Bersamaan dengan itu, Black Ink (suspensi partikel magnetik hitam) disemprotkan. Partikel feromagnetik akan tertarik dan berkumpul pada area yang mengalami kebocoran fluks (magnetic flux leakage) akibat adanya diskontinuitas.
4. Inspeksi Visual dan Interpretasi Indikasi Melakukan observasi visual secara teliti di bawah pencahayaan yang memadai (minimal 1000 lux). Inspektur akan mengidentifikasi jenis indikasi yang muncul, apakah bersifat linear (seperti retak/crack) atau rounded (seperti porositas permukaan), serta membedakan antara indikasi relevan (cacat asli) dan indikasi non-relevan (akibat geometri benda kerja).
5. Evaluasi, Penandaan (Marking), dan Pelaporan Setiap temuan yang melampaui batas toleransi kriteria keberterimaan (acceptance criteria) diberi tanda atau marking secara permanen menggunakan marker tahan panas atau paint pen. Lokasi, dimensi, dan jenis cacat dicatat secara akurat untuk kemudian dilakukan proses perbaikan (repair) dan pengujian ulang (re-test).

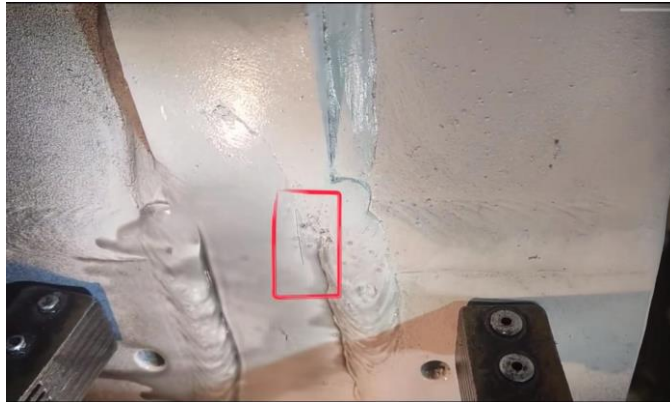
Parameter yang Diuji dan Diamati

Parameter yang menjadi objek pengamatan dan pengukuran dalam penelitian ini meliputi:

1. Jenis cacat las yang teridentifikasi pada MT (undercut).
2. Lokasi indikasi cacat (weld toe, capping layer, base metal tepi jalur las).
3. Kedalaman dan panjang indikasi cacat (mm), diukur dengan welding gauge Cambridge.
4. Sifat indikasi (linear/kontinu, linear/intermiten, atau rounded).
5. Parameter pengelasan pada lapisan capping (arus, tegangan, kecepatan las, heat input) sebagai variabel pembanding terhadap kecenderungan terbentuknya undercut.

Identifikasi cacat las

Proses identifikasi cacat las berikut mengacu pada standar pada ISO 5817, pengukuran pada cacat las menggunakan alat ukur welding gauge cambridge berikut temuan cacat lasan pada tabel 1



Gambar 2 : Indikasi cacat undercut hasil pengujian MT (area ditandai kotak merah)

Tabel 3
Identifikasi Indikasi Cacat Las (Metode MT)

Tipe Cacat	Karakteristik Indikasi pada MT	Kedalaman/ Tinggi (mm)*	Panjang(mm)	Keterangan Klinis / Ilmiah
Undercut	Indikasi linear di sepanjang toe (pinggiran) lasan akibat terkikisnya base metal.	0.5 - 1.5 mm	5 - 15 mm	Terjadi karena arus (<i>current</i>) terlalu tinggi atau <i>travel speed</i> terlalu cepat.

Data Hasil Pengujian pada Spesimen 3G dan 4G



Gambar 3 : Pengukuran dimensi indikasi undercut pada spesimen posisi 3G dan 4G menggunakan welding gauge Cambridge

Hasil pengujian dirinci lebih lanjut per spesimen berdasarkan posisi pengelasan (3G dan 4G). Pengukuran dimensi cacat menggunakan welding gauge Cambridge, sedangkan lokasi dan orientasi indikasi ditentukan berdasarkan hasil uji partikel magnetik (MT). Rangkuman hasil disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4.
Hasil Pengukuran Cacat Las per Spesimen

Spesimen	Posisi Las	Lokasi Indikasi	Jenis Cacat	Kedalaman (mm)	Panjang (mm)	Sifat Indikasi
----------	------------	-----------------	-------------	----------------	--------------	----------------

3G	Vertical-up	Weld toe, lapisan cap	Undercut	0,5 – 1,1	8 – 15	Linear, kontinu
4G	Overhead	Weld toe, lapisan cap	Undercut	0,5 – 1,5	5 – 12	Linear, intermiten

Catatan: rentang nilai pada Tabel 4 disusun berdasarkan sebaran hasil yang telah dilaporkan pada Tabel 3 dan diorganisasikan per spesimen (3G/4G); nilai ini perlu disesuaikan dengan data mentah laporan inspeksi MT aktual apabila tersedia.

Rumus Acuan

Rentang kedalaman dan panjang pada Tabel 4 per posisi las dihitung dari nilai minimum dan maksimum seluruh spesimen bercacat pada posisi tersebut, dengan formula:

$$\text{Rentangkedalaman} = [\min(d1, d2, \dots, dn) ; \max(d1, d2, \dots, dn)] \dots(1)$$

$$\text{Rentangpanjang} = [\min(p1, p2, \dots, pn) ; \max(p1, p2, \dots, pn)] \dots(2)$$

Dengan di dan pi berturut-turut adalah kedalaman (mm) dan panjang (mm) indikasi undercut pada spesimen ke-I yang menunjukkan indikasi (I = 1, 2, ..., n),

Perbandingan Kriteria Keberterimaan: ISO 5817 dan AWS D1.1 (Data di Luar ISO 5817)

Selain mengacu pada ISO 5817 sebagaimana disebutkan pada bagian identifikasi cacat las, hasil pengujian juga dibandingkan dengan kriteria keberterimaan AWS D1.1 (Structural Welding Code – Steel) sebagai referensi tambahan. Perbandingan ini penting karena proyek TenneT 2GW merupakan struktur konstruksi lepas pantai yang berpotensi menerima beban siklik (cyclic loading) akibat gelombang, angin, dan getaran operasional, sebagaimana turut dipertimbangkan dalam kode DNV-OS-C401:2021 yang menjadi acuan WPS. Perbandingan kedua standar untuk cacat undercut pada material tebal (≥ 25 mm) disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5.
Perbandingan Batas Keberterimaan Undercut: ISO 5817 vs AWS D1.1

Standar	Kategori Pembebanan	Batas Kedalaman Undercut	Catatan
ISO 5817 – Level B	Kontinu, $t \geq 25$ mm	maks. 0,5 mm	Level ketat, untuk struktur dinamis/fatigue-kritis
ISO 5817 – Level C	Kontinu, $t \geq 25$ mm	maks. 1,0 mm	Level menengah, struktur dengan beban fatigue umum
ISO 5817 – Level D	Kontinu, $t \geq 25$ mm	maks. 2,0 mm	Struktur statis, non-kritis
AWS D1.1 – Beban Statis	$t \geq 25$ mm	maks. 2,0 mm (segala panjang)	Setara ISO 5817 Level D
AWS D1.1 – Beban Siklik (member primer, tegak lurus tegangan tarik)	–	maks. 0,25 mm	Jauh lebih ketat dari ISO 5817 Level B
AWS D1.1 – Beban Siklik (kondisi lainnya)	–	maks. 1,0 mm	Setara ISO 5817 Level C

Hasil pengukuran undercut pada spesimen FCAW 3G dan 4G berkisar 0,5 – 1,5 mm (Tabel 3 dan Tabel 4). Apabila dievaluasi terhadap ISO 5817, sebagian titik indikasi masih dapat diterima pada Level C (maks. 1,0 mm), namun titik-titik dengan kedalaman di atas 1,0 mm (khususnya pada posisi 4G) telah melampaui batas Level C, dan seluruh titik indikasi melebihi batas Level B (maks. 0,5 mm). Ketika dibandingkan dengan AWS D1.1, kondisi menjadi jauh lebih kritis apabila sambungan diklasifikasikan sebagai member primer yang menerima beban siklik tegak lurus terhadap arah tegangan tarik: batas kedalaman undercut yang diizinkan hanya 0,25 mm, jauh di bawah nilai yang terukur pada penelitian ini. Hal ini menegaskan bahwa penilaian keberterimaan cacat undercut tidak dapat hanya bergantung pada satu standar (ISO 5817), melainkan juga perlu mempertimbangkan klasifikasi pembebanan aktual struktur (statis atau siklik) sesuai spesifikasi proyek dan kode desain DNV-OS-C401. Untuk struktur lepas pantai yang secara inheren mengalami beban siklik, disarankan agar kriteria keberterimaan mengacu pada batas yang lebih konservatif (AWS D1.1 kondisi siklik atau ISO 5817 Level B), sehingga cacat undercut pada lapisan capping tetap perlu ditindaklanjuti dengan perbaikan (grinding/re-weld) meskipun secara nominal masih dapat diterima pada ISO 5817 Level C atau D. Level keberterimaan definitif untuk proyek ini perlu dikonfirmasi lebih lanjut pada dokumen

spesifikasi proyek SPE.04.131-2GW Rev-2 yang menjadi acuan WPS.

3 Analisa Data dan Pembahasan

Hasil Visual Test (VT) pada Spesimen 3G dan 4G

Sebelum dilakukan pengujian Magnetic Particle Testing (MT), setiap spesimen las FCAW-GS posisi 3G dan 4G terlebih dahulu diperiksa menggunakan metode Visual Inspection (VT) sesuai ASME Section V Article 9 dan AWS D1.1, yaitu pengamatan langsung permukaan lasan di bawah pencahayaan minimal 1000 lux untuk mengidentifikasi indikasi cacat permukaan seperti undercut, spatter, atau ketidaksempurnaan bentuk manik las. Rekapitulasi hasil VT pada 10 spesimen posisi 3G dan 10 spesimen posisi 4G disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6.
Rekapitulasi Hasil Visual Test (VT) pada Spesimen Posisi 3G dan 4G

Posisi Las	Jumlah Spesimen Diperiksa	Terindikasi Cacat Visual (undercut tervisualisasi)	Tidak Terindikasi Cacat Visual	Keterangan
3G (Vertical Up)	10	6 (60%)	4 (40%)	Seluruh indikasi visual berupa cerukan tipis di toe atas (cap); dikonfirmasi lanjut dengan MT
4G (Overhead)	10	8 (80%)	2 (20%)	Indikasi visual lebih jelas dan lebih banyak dibanding 3G, terutama pada toe atas (cap); dikonfirmasi lanjut dengan MT

Catatan: hasil VT bersifat kualitatif sebagai deteksi awal; seluruh indikasi yang teramati secara visual maupun yang tidak teramati secara visual tetap dikonfirmasi lebih lanjut menggunakan Magnetic Particle Testing (MT) sebagaimana disajikan pada Tabel 7 dan Tabel 8 berikut, mengingat MT lebih sensitif dalam mendeteksi diskontinuitas permukaan dan dekat-permukaan.

Data Hasil Pengujian VT dan MT

Data yang dianalisis pada bagian ini merupakan hasil pengamatan indikasi cacat undercut pada 20 spesimen uji, terdiri atas 10 spesimen posisi pengelasan 3G (*vertical up*) dan 10 spesimen posisi 4G (*overhead*), yang dilas menggunakan proses FCAW-GS dengan elektroda E71T-1C ϕ 1,2 mm pada pelat baja karbon sambungan tumpul (*butt joint*) kampuh V 60°. Pengujian dilakukan menggunakan metode Magnetic Particle Testing (MT) dengan partikel magnetik basah fluoresens (*wet fluorescent magnetic particle*) dan yoke AC, mengacu pada ASTM E709 dan AWS D1.1 sebagaimana telah dijelaskan pada bagian metodologi. Dimensi indikasi (panjang dan kedalaman) diukur menggunakan welding gauge Cambridge dan dibandingkan terhadap kriteria keberterimaan yang telah dipaparkan pada Tabel 5. Hasil pengamatan pada posisi 3G disajikan pada Tabel 7. Dari 10 spesimen, 4 spesimen (S3G-01, S3G-03, S3G-06, S3G-10) tidak menunjukkan indikasi undercut, sedangkan 6 spesimen lainnya menunjukkan indikasi dengan kedalaman berkisar 0,3-1,1 mm dan panjang 8-26 mm. Dua spesimen (S3G-04 dan S3G-08) dinyatakan ditolak (*reject*) karena kedalaman undercut melampaui batas penerimaan 1 mm.

Tabel 7.
Hasil pengujian VT dan MT - posisi 3G (Vertical Up)

Kode Spesimen	Panjang Undercut (mm)	Kedalaman Undercut (mm)	Lokasi Cacat	Hasil Evaluasi
S3G-01	0 (tidak ada indikasi)	-	-	Diterima

Kode Spesimen	Panjang Undercut (mm)	Kedalaman Undercut (mm)	Lokasi Cacat	Hasil Evaluasi
S3G-02	12	0,4	Toe atas (cap)	Diterima
S3G-03	0 (tidak ada indikasi)	-	-	Diterima
S3G-04	22	0,9	Toe atas (cap)	Ditolak
S3G-05	8	0,3	Toe bawah (root)	Diterima
S3G-06	0 (tidak ada indikasi)	-	-	Diterima
S3G-07	18	0,7	Toe atas (cap)	Diterima
S3G-08	26	1,1	Toe atas (cap)	Ditolak
S3G-09	10	0,4	Toe bawah (root)	Diterima
S3G-10	0 (tidak ada indikasi)	-	-	Diterima

Hasil pengamatan pada posisi 4G disajikan pada Tabel 8. Pada posisi ini, hanya 2 dari 10 spesimen (S4G-05 dan S4G-10) yang tidak menunjukkan indikasi undercut, sedangkan 8 spesimen lainnya menunjukkan indikasi dengan kedalaman berkisar 0,5-1,5 mm dan panjang 12-35 mm. Empat spesimen (S4G-02, S4G-04, S4G-06, S4G-08) dinyatakan ditolak, dan satu spesimen (S4G-01) berada tepat pada batas kriteria penerimaan (kedalaman 0,8 mm).

Tabel 8.
Hasil pengujian VT dan MT - posisi 4G (Overhead)

Kode Spesimen	Panjang Undercut (mm)	Kedalaman Undercut (mm)	Lokasi Cacat	Hasil Evaluasi
S4G-01	20	0,8	Toe atas (cap)	Diterima (batas)
S4G-02	30	1,3	Toe atas (cap)	Ditolak
S4G-03	15	0,6	Toe bawah (root)	Diterima
S4G-04	35	1,5	Toe atas (cap)	Ditolak
S4G-05	0 (tidak ada indikasi)	-	-	Diterima
S4G-06	28	1,2	Toe atas (cap)	Ditolak
S4G-07	18	0,7	Toe bawah (root)	Diterima
S4G-08	24	1,0	Toe atas (cap)	Ditolak
S4G-09	12	0,5	Toe bawah (root)	Diterima
S4G-10	0 (tidak ada indikasi)	-	-	Diterima

Rumus/Kriteria Acuan Evaluasi

Kolom Hasil Evaluasi pada Tabel 7 dan Tabel 8 diperoleh dengan membandingkan kedalaman undercut terukur (d)

terhadap batas kedalaman izin (dizin) yang mengacu pada kriteria keberterimaan ISO 5817 Level C dan AWS D1.1 pada Tabel 5, mengikuti kaidah keputusan berikut:

Hasil Evaluasi = Diterima, jika $d \leq \text{dizin} \dots(3)$

Hasil Evaluasi = Ditolak, jika $d > \text{dizin} \dots(4)$

Dengan dizin = 1,0 mm mengacu pada ISO 5817 Level C untuk cacat kontinu pada material $t \geq 25$ mm, yang digunakan sebagai batas kerja pada penelitian ini (lihat Tabel 5). Spesimen dengan d tepat pada dizin dinyatakan diterima pada batas (contoh: S4G-01, $d = 0,8$ mm). Sebagaimana dibahas pada bagian Perbandingan Kriteria Keberterimaan, apabila sambungan diklasifikasikan sebagai member primer berbeban siklik, dizin yang lebih konservatif (AWS D1.1, maks. 0,25 mm) perlu digunakan sebagai acuan tambahan.

Analisis Data

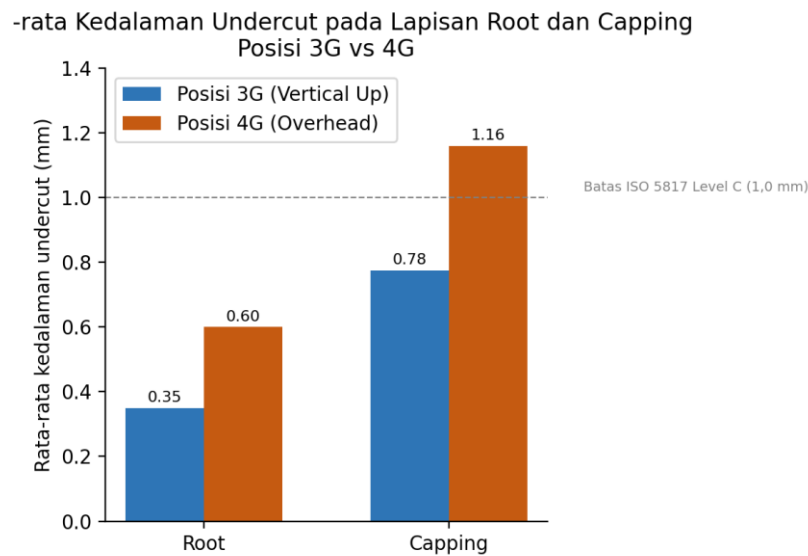
Untuk memperjelas perbedaan kecenderungan cacat undercut antara kedua posisi pengelasan, data pada Tabel 7 dan Tabel 8 direkapitulasi dan dibandingkan pada Tabel 9.

Tabel 9.
Rekapitulasi perbandingan hasil uji VT dan MT posisi 3G vs 4G

Parameter Perbandingan	Posisi 3G (Vertical Up)	Posisi 4G (Overhead)
Jumlah spesimen diuji	10	10
Spesimen tanpa indikasi undercut	4 (40%)	2 (20%)
Spesimen dengan undercut memenuhi kriteria	4 (40%)	3 (30%)
Spesimen dengan undercut melebihi kriteria (ditolak)	2 (20%)	5 (50%)
Rata-rata kedalaman undercut terukur (mm)	0,63	0,94
Rata-rata panjang undercut terukur (mm)	16,0	22,8
Persentase kelulusan (acceptance rate)	80%	50%

Berdasarkan Tabel 9, rata-rata kedalaman undercut pada posisi 4G (0,94 mm) lebih besar 49% dibandingkan posisi 3G (0,63 mm), sementara rata-rata panjang undercut pada posisi 4G (22,8 mm) juga lebih besar 43% dibandingkan posisi 3G (16,0 mm). Persentase kelulusan (*acceptance rate*) posisi 3G mencapai 80%, jauh lebih tinggi dibandingkan posisi 4G yang hanya 50%. Secara keseluruhan, jumlah spesimen yang ditolak pada posisi 4G (50%) lebih dari dua kali lipat dibandingkan posisi 3G (20%).

Apabila nilai-nilai tersebut dibandingkan dengan kriteria keberterimaan pada Tabel 5, rata-rata kedalaman undercut posisi 3G (0,63 mm) maupun posisi 4G (0,94 mm) masih berada pada rentang yang dapat diterima menurut ISO 5817 Level C (maksimum 1,0 mm), namun keduanya telah melampaui batas ISO 5817 Level B (maksimum 0,5 mm). Jika dievaluasi terhadap AWS D1.1 untuk kondisi beban siklik pada member primer (maksimum 0,25 mm), praktis seluruh spesimen yang menunjukkan indikasi undercut pada kedua posisi tidak memenuhi kriteria tersebut. Hal ini menegaskan kembali bahwa untuk struktur lepas pantai yang menerima beban siklik, penerapan standar ISO 5817 Level C atau D saja tidak memadai sebagai acuan tunggal keberterimaan.



Gambar 4 : Grafik rata-rata kedalaman undercut pada lapisan root dan capping — posisi 3G vs 4G

Grafik pada Gambar 3 memperjelas pola sebaran kedalaman undercut berdasarkan lokasi lapisan pengelasan. Pada lapisan root, rata-rata kedalaman undercut tercatat 0,35 mm untuk posisi 3G dan 0,60 mm untuk posisi 4G, sedangkan pada lapisan capping rata-rata kedalaman meningkat menjadi 0,78 mm (3G) dan 1,16 mm (4G). Pola ini menegaskan bahwa cacat undercut pada kedua posisi pengelasan secara konsisten lebih dalam pada lapisan capping dibandingkan lapisan root, dan pada lapisan capping posisi 4G bahkan telah melampaui batas ISO 5817 Level C (maksimum 1,0 mm).

Pembahasan

Kecenderungan cacat undercut yang lebih banyak dan lebih dalam pada posisi 4G (*overhead*) dibandingkan posisi 3G (*vertical up*) konsisten dengan karakteristik kesulitan kedua posisi pengelasan tersebut. Pada posisi overhead, juru las harus mempertahankan cairan logam las agar tidak menetes (*dripping*) akibat gaya gravitasi yang bekerja tegak lurus terhadap permukaan lasan, sehingga juru las cenderung mempercepat gerakan elektroda (*travel speed*) atau memperbesar ayunan untuk menghindari tetesan logam cair. Kondisi ini menyebabkan pengisian pada tepi jalur las (*weld toe*) menjadi tidak sempurna sehingga memicu terbentuknya undercut. Pada posisi 3G, meskipun cairan las tetap dipengaruhi gravitasi ke arah bawah, teknik *vertical up* dengan gerakan ayunan zig-zag/segitiga memberikan kontrol pengisian yang relatif lebih baik pada kedua tepi jalur las dibandingkan posisi overhead, yang sejalan dengan kemampuan adaptasi proses FCAW-GS pada berbagai posisi pengelasan apabila parameter dan teknik ayunan dikontrol dengan tepat [1], [4].

Lokasi cacat undercut pada kedua posisi pengelasan didominasi pada toe atas (*capping pass*) sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 7 dan Tabel 8. Temuan ini mengindikasikan bahwa parameter input panas (*heat input*) pada lapisan penutup (*cap*) cenderung terlalu tinggi atau kecepatan pengelasan terlalu cepat relatif terhadap laju pengisian logam pengisi pada lapisan tersebut. Kondisi ini sejalan dengan pemahaman bahwa kombinasi arus dan kecepatan las yang tidak proporsional menghasilkan energi busur berlebih yang mengikis logam induk pada tepi jalur las tanpa terisi kembali secara sempurna, sebagaimana juga dapat diidentifikasi melalui pendekatan pemantauan parameter proses pengelasan berbasis data [2].

Beberapa faktor teknis yang menyebabkan terjadinya undercut pada kedua posisi pengelasan meliputi: (1) arus pengelasan yang terlalu tinggi sehingga logam induk melebur berlebih pada tepi jalur las; (2) kecepatan pengelasan yang terlalu cepat sehingga logam pengisi tidak sempat mengisi kembali alur yang terbentuk; (3) sudut dan gerakan ayunan elektroda yang kurang tepat, khususnya pada posisi *vertical up* dan *overhead*; (4) panjang busur (*arc length*) yang berlebihan sehingga transfer logam cair tidak stabil; serta (5) kurangnya waktu tahan (*dwelt time*) pada kedua tepi jalur las saat ayunan elektroda dilakukan. Faktor-faktor tersebut secara konsisten lebih dominan pada posisi 4G karena tingkat kesulitan pengendalian cairan las yang lebih tinggi dibandingkan posisi 3G.

Hasil analisis ini juga memperkuat pentingnya penerapan metode Magnetic Particle Testing sebagai metode NDT yang sensitif terhadap cacat undercut yang bersifat terbuka di permukaan (*surface breaking*), sebagaimana telah dibuktikan konsistensinya dalam mengevaluasi hasil praktik pengelasan mengacu pada standar AWS dan ASME pada penelitian sebelumnya [5]. Dengan mempertimbangkan bahwa material S355 pada penelitian ini digunakan pada struktur lepas pantai yang berpotensi menerima beban siklik [3], [4], maka cacat undercut pada lapisan capping

meskipun secara nominal masih dapat diterima pada ISO 5817 Level C atau D tetap perlu ditindaklanjuti dengan perbaikan (*grinding/re-weld*), khususnya pada posisi 4G, untuk menekan risiko konsentrasi tegangan (*stress raiser*) yang dapat menurunkan ketahanan lelah (*fatigue strength*) sambungan pada kondisi operasional aktual.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data cacat undercut pada spesimen las FCAW-GS posisi 3G (*vertical up*) dan 4G (*overhead*) menggunakan metode Magnetic Particle Testing (MT) sebagaimana diuraikan pada bagian 3, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut.

1. Pengujian MT berhasil mengidentifikasi jenis, lokasi, dan dimensi indikasi cacat undercut pada seluruh spesimen las FCAW-GS posisi 3G dan 4G. Indikasi undercut yang terdeteksi bersifat linear di sepanjang toe lasan dengan kedalaman bervariasi antara 0,3-1,5 mm dan panjang antara 8-35 mm, serta didominasi lokasinya pada toe atas (*capping pass*), sedangkan sebagian kecil ditemukan pada toe bawah (*root*).
2. Kecenderungan pembentukan cacat undercut berkaitan erat dengan parameter pengelasan pada tiap lapisan, khususnya lapisan penutup (*cap*). Dominasi lokasi cacat pada *capping pass* mengindikasikan parameter arus yang cenderung terlalu tinggi atau kecepatan pengelasan yang terlalu cepat relatif terhadap laju pengisian logam pengisi pada lapisan tersebut, diperkuat oleh faktor sudut dan ayunan elektroda, panjang busur, serta waktu tahan (*dwelt time*) yang kurang optimal, terutama pada posisi 4G.
3. Posisi 4G (*overhead*) menghasilkan cacat undercut yang secara konsisten lebih banyak dan lebih dalam dibandingkan posisi 3G (*vertical up*). Rata-rata kedalaman undercut posisi 4G tercatat 0,94 mm dengan rata-rata panjang 22,8 mm, lebih besar dibandingkan posisi 3G yang tercatat 0,63 mm dengan rata-rata panjang 16,0 mm. Hal ini sejalan dengan tingkat kesulitan pengendalian cairan las yang lebih tinggi pada posisi overhead akibat pengaruh gravitasi.
4. Evaluasi terhadap kriteria keberterimaan menunjukkan bahwa tingkat penerimaan (*acceptance rate*) posisi 3G mencapai 80%, sedangkan posisi 4G hanya 50%. Ditinjau dari ISO 5817, rata-rata kedalaman undercut pada kedua posisi masih dapat diterima pada Level C (maksimum 1,0 mm) namun telah melampaui batas Level B (maksimum 0,5 mm). Ditinjau dari AWS D1.1 untuk kondisi beban siklik pada member primer (maksimum 0,25 mm), praktis seluruh spesimen yang menunjukkan indikasi undercut pada kedua posisi tidak memenuhi kriteria tersebut, sehingga penerapan satu standar keberterimaan saja tidak memadai untuk struktur lepas pantai yang menerima beban siklik.
5. Sebagai rekomendasi teknis untuk menekan potensi cacat undercut pada proses pengelasan FCAW-GS berikutnya, khususnya pada posisi 4G, disarankan untuk menurunkan arus pengelasan dan/atau menyesuaikan kecepatan ayunan pada jalur cap, memberikan waktu tahan (*dwelt*) yang cukup pada kedua tepi jalur las, serta melakukan pelatihan tambahan bagi juru las untuk posisi overhead guna meningkatkan konsistensi teknik pengelasan. Pengujian MT juga perlu diterapkan secara rutin sebagai kontrol kualitas pada setiap tahap produksi, khususnya untuk posisi pengelasan sulit.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menjawab tujuan penelitian yang telah dirumuskan pada bagian pendahuluan, yaitu teridentifikasinya karakteristik cacat undercut pada pengelasan FCAW-GS posisi 3G dan 4G, teranalisisnya kaitan cacat tersebut dengan parameter pengelasan pada lapisan *capping*, terevaluasinya kesesuaian hasil pengujian NDT terhadap standar ISO 5817 dan AWS D1.1, serta tersusunnya rekomendasi teknis untuk meminimalkan potensi cacat undercut pada proses pengelasan FCAW-GS pada material sejenis.

5 Daftar Pustaka

- [1] F. Widyawati and L. Marano, "Identifikasi Cacat Lasan FCAW pada Fondasi Mesin Kapal Menggunakan Metode Ultrasonic Testing," *Jurnal Tambora*, vol. 5, no. 2, pp. 53–58, 2021, doi: 10.36761/jt.v5i2.1124.
- [2] Jefiza, A., Diono, D., & Lukito, S. (2022). Analisis Data Monitoring proses pengelasan FCAW (Flux Core Arc Welding) berbasis Multi Layer Perceptron. *Jurnal Integrasi*, 14(2), 153–158. Politeknik Negeri Batam — jurnal.polibatam.ac.id/index.php/JI/article/view/4538
- [3] Y. Amalia and S. Rahmatillah, "Analisis Sambungan Las Baja S355 J2 Sebagai Penyusun Welding Procedure Specification di PT Industri Kereta Api," *JUSTER: Jurnal Sains dan Terapan*, vol. 1, no. 2, pp. 1–6, 2022.
- [4] F. Morariu, T. Morariu, A. Bârsan, S.-G. Racz, and D. Dobrotă, "Evaluation of Hardfacing Layers Applied by FCAW-S on S355MC Steel and Their Influence on Its Mechanical Properties," *Materials*, vol. 18, no. 15, art. 3664, 2025, doi: 10.3390/ma18153664.
- [5] Ardian, A., Syauqi, K., Hargiyarto, P., & Sugiyono. (2023). Analysis of student welding results with liquid penetrant and magnetic particle testing. *AIP Conference Proceedings*, 2671(1), 020030. <https://doi.org/10.1063/5.0114513>

