

TEKNIK PENGELASAN



Ir. Jenly Dyliep Isria Manongko, M.Eng., M.Pd.
Timothy Waraney Kapoh, S.Pd., M.Pd.
Prof. Dr. Drs. Parabelem Tinno Dolf Rompas, M.T.

TEKNIK PENGELASAN

Ir. Jenly Dyliep Isria Manongko, M.Eng., M.Pd.
Timothy Waraney Kapoh, S.Pd., M.Pd.
Prof. Dr. Drs. Parabelem Tinno Dolf Rompas, M.T.



Tahta Media Group

UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

Pembatasan Pelindungan Pasal 26

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

- Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
- Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit.

TEKNIK PENGELASAN

Penulis:

Ir. Jenly Dyliep Isria Manongko, M.Eng., M.Pd.
Timothy Waraney Kapoh, S.Pd., M.Pd.
Prof. Dr. Drs. Parabelem Tinno Dolf Rompas, M.T.

Desain Cover:

Tahta Media

Editor:

Tahta Media

Proofreader:

Tahta Media

Ukuran:

xi, 114, Uk: 15,5 x 23 cm

ISBN: 978-634-262-230-8

Cetakan Pertama:

Juni 2026

Hak Cipta 2026, Pada Penulis

Isi diluar tanggung jawab percetakan

Copyright © 2026 by Tahta Media Group

All Right Reserved

PENERBIT TAHTA MEDIA GROUP

Perumahan Mitra Utama Residence 3 Blok A no 1, Sawahan, Tempel,
Kec. Gatak, Kabupaten Sukoharjo, Jawa Tengah 57557

email: tahtaliterasimedia@gmail.com

website: <http://store.tahtamedia.co.id/>

Anggota IKAPI (216/JTE/2021)

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat, anugerah, dan karunia-Nya, sehingga penyusunan buku referensi yang berjudul "**Teknik Pengelasan**" ini dapat dirampungkan dengan baik.

Lahirnya buku ini didorong oleh panggilan akademis dan komitmen nyata dalam pelaksanaan Tridharma Perguruan Tinggi, khususnya guna menyediakan literatur yang komprehensif, mutakhir, dan relevan bagi mahasiswa program sarjana (S1) di lingkungan Pendidikan Teknik Mesin. Di tengah pesatnya kemajuan teknologi manufaktur dan era digitalisasi industri saat ini, penguasaan kompetensi dalam bidang rekayasa penyambungan logam tidak lagi sekadar menuntut kecakapan psikomotorik mekanis. Calon insinyur dan pendidik vokasi masa depan dituntut untuk memiliki pemahaman analitis yang mendalam mengenai fundamental metalurgi, termodinamika proses, hingga kepatuhan terhadap standar operasional internasional.

Penyusunan kerangka materi di dalam karya ini secara khusus telah diselaraskan dengan paradigma *Outcome-Based Education* (OBE). Tujuannya adalah untuk memfasilitasi proses pembelajaran yang terukur dan berpusat pada pencapaian kompetensi nyata. Pembahasan di dalam buku ini dirancang sedemikian rupa untuk menjembatani teori sains dasar di ruang kelas dengan kompleksitas pemecahan masalah di rantai produksi industri. Melalui sepuluh bab yang disusun secara sistematis—dimulai dari esensi keselamatan kerja, metalurgi las, berbagai metode pengelasan konvensional maupun tingkat lanjut, inspeksi dan pengujian cacat, hingga masa depan otomasi dan *Internet of Things* (IoT)—buku ini hadir sebagai panduan yang utuh.

Lebih dari sekadar transfer pengetahuan teknis, buku ini juga membawa misi untuk menanamkan nilai-nilai etika keprofesian. Penulis berharap literatur ini mampu mencetak lulusan yang tidak hanya kompeten secara teknis, tetapi juga memiliki integritas tinggi, akuntabel, dan senantiasa menjunjung tinggi objektivitas serta penerapan sistem merit di lingkungan kerja dan manajerial industri.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa ilmu rekayasa material dan manufaktur terus berevolusi secara eksponensial, sehingga penyusunan buku ini tentu masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, segala bentuk kritik, koreksi, serta saran yang membangun dari para pakar, rekan sejawat, dan para pembaca sangat dinantikan demi penyempurnaan pada edisi-edisi mendatang.

Akhir kata, semoga buku referensi ini mampu memberikan manfaat yang luas, memperkaya khazanah keilmuan vokasi dan keteknikan, serta menjadi sumbangsih positif bagi kemajuan pendidikan dan teknologi di Indonesia.

Tondano, Mei 2026

Tim Penulis

PENGANTAR PENULIS

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulisan buku referensi yang berjudul "**Teknik Pengelasan**" ini dapat dirampungkan dengan baik.

Lahirnya karya ini didorong oleh sebuah panggilan akademis dan tanggung jawab keprofesian yang mendalam untuk menyediakan literatur yang komprehensif, mutakhir, dan berbobot bagi mahasiswa program sarjana (S1), khususnya di lingkup Pendidikan Teknik Mesin dan rekayasa manufaktur. Mengingat pesatnya pergeseran era dari perakitan mekanis tradisional menuju otomatisasi cerdas, pemahaman yang fundamental mengenai karakteristik penyambungan logam—mulai dari dasar metalurgi, termodinamika proses, hingga kontrol presisi robotika—menjadi landasan yang mutlak dikuasai oleh calon perekrutan dan pendidik vokasi masa depan.

Buku ini disusun tidak sekadar sebagai himpunan teori keteknikan semata, melainkan dirancang dengan menyelaraskan kerangka materinya pada paradigma *Outcome-Based Education* (OBE). Tujuan utamanya adalah memfasilitasi sebuah proses pembelajaran yang terukur dan berpusat pada pencapaian kompetensi (*outcome*). Lebih dari sekadar membentuk kecakapan psikomotorik dan kognitif, literatur ini ditujukan untuk mencetak lulusan yang menjunjung tinggi akuntabilitas, etika profesional, serta siap mengimplementasikan kultur industri yang berpegang teguh pada objektivitas dan **sistem merit** dalam setiap tahapan inspeksi maupun manajemen produksi.

Sebagai wujud nyata dari komitmen terhadap pelaksanaan Tridharma Perguruan Tinggi, pendekatan penyusunan dalam buku ini juga mempertimbangkan aspek adaptabilitas teknologi pendidikan. Narasi dan konsep rekayasa di dalamnya disusun agar siap dan mudah diintegrasikan ke dalam ekosistem pembelajaran

digital, seperti transformasi menjadi modul interaktif berbasis *flipbook* yang dapat diakses melalui *website* repositori program studi. Integrasi semacam ini diharapkan dapat menghadirkan pengalaman belajar yang jauh lebih visual, inklusif, dan relevan dengan gaya belajar mahasiswa di era digital.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa disiplin ilmu rekayasa material dan teknologi manufaktur terus berakselerasi dengan sangat dinamis, sehingga penyusunan buku referensi ini tentu masih memiliki ruang untuk perbaikan. Oleh karena itu, segala bentuk kritik, koreksi, dan saran yang membangun dari para pakar, rekan sejawat akademisi, serta para pembaca sekalian sangat senantiasa dinantikan demi penyempurnaan pada edisi-edisi mendatang.

Akhir kata, semoga karya ini mampu memberikan manfaat yang seluas-luasnya, memperkaya khazanah keilmuan rekayasa manufaktur, dan menjadi sumbangsih positif bagi kemajuan pendidikan serta teknologi di Indonesia.

Tondano, Mei 2026

Ir. Jenly Dyliep Isria Manongko, M.Eng., M.Pd.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iv
PENGANTAR PENULIS	vi
DAFTAR ISI.....	viii
BAB 1 PENDAHULUAN TEKNOLOGI PENGELASAN DAN MANUFAKTUR.....	1
1.1 Definisi, Sejarah, dan Evolusi Teknologi Pengelasan.....	1
1.2 Peran Esensial Pengelasan dalam Proses Produksi dan Manufaktur Industri.....	3
1.3 Klasifikasi Proses Penyambungan Logam (Penyambungan <i>Fusi vs. Solid State</i>)	5
1.4 Standar Internasional, Kode Etik Profesional, dan Regulasi Pengelasan.....	8
1.5 Prospek Karier dan Kompetensi Welder/Engineer di Era Modern	9
BAB 2 KESELAMATAN DAN KESEHATAN KERJA (K3) DALAM PENGELASAN	11
2.1 Identifikasi Potensi Bahaya Fisik dan Kimiawi	11
2.2 Spesifikasi dan Standar Alat Pelindung Diri (APD).....	12
2.3 Tata Kelola Sistem Ventilasi dan Ruang Terbatas (<i>Confined Space</i>).....	14
2.4 Mitigasi Risiko Kebakaran dan Ledakan.....	15
2.5 Prosedur Tanggap Darurat dan Pertolongan Pertama	17
BAB 3 METALURGI LAS DAN SIFAT MATERIAL	18
3.1 Struktur Kristal Logam dan Analisis Diagram Fase Besi-Karbon	18
3.2 Fenomena Daerah Pengaruh Panas (<i>Heat-Affected Zone / HAZ</i>)	20
3.3 Siklus Termal dan Laju Pendinginan saat Pengelasan.....	21

3.4	Sifat Mampu Las (<i>Weldability</i>) pada Berbagai Jenis Logam .	22
3.5	Cacat Metalurgi (Retak Panas dan Retak Dingin) serta Pencegahannya	23
BAB 4 PENGELASAN BUSUR LISTRIK KONVENSIONAL (<i>ARC WELDING</i>).....		26
4.1	Prinsip Kerja Busur Listrik, Pembangkitan Panas, dan Pemindahan Logam Cair	26
4.2	<i>Shielded Metal Arc Welding</i> (SMAW): Karakteristik dan Peralatan.....	27
4.3	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i> (GTAW/TIG): Gas Pelindung dan Aplikasi Presisi	29
4.4	<i>Gas Metal Arc Welding</i> (GMAW/MIG/MAG): Mode Transfer Logam	31
4.5	Identifikasi dan Pemecahan Masalah Operasional pada Pengelasan Busur Listrik.....	32
BAB 5 PENGELASAN RESISTANSI DAN PROSES PENGELASAN KHUSUS		34
5.1	Prinsip Kerja Pengelasan Resistansi Listrik (<i>Resistance Welding</i>).....	34
5.2	Aplikasi Spot Welding, Seam Welding, dan Projection Welding.....	35
5.3	Teknologi Pengelasan Gesek (<i>Friction Stir Welding</i> / FSW)...	37
5.4	<i>Submerged Arc Welding</i> (SAW) untuk Aplikasi Manufaktur Pelat Tebal	39
5.5	Teknologi Pengelasan Tingkat Lanjut: Sinar Laser (LBW) dan Berkas Elektron (EBW)	40
BAB 6 DESAIN SAMBUNGAN, SIMBOL, DAN MEKANIKA PENGELASAN		43
6.1	Jenis-jenis Sambungan Las Dasar dan Perilaku Mekanisnya	43

6.2	Klasifikasi Posisi Pengelasan dan Dinamika Fluida Cairan Las	45
6.3	Pemahaman dan Pembacaan Simbol Pengelasan Berdasarkan Standar AWS/ISO	46
6.4	Konsiderasi Desain Mekanis: Distribusi Tegangan dan Efek Takik.....	49
6.5	Analisis Kekuatan Statis dan Dinamis Sambungan Las.....	49
BAB 7 BAHAN TAMBAH (FILLER) DAN GAS PELINDUNG.....		52
7.1	Fungsi dan Klasifikasi Elektroda Terbungkus (SMAW).....	52
7.2	Kawat Las Berselubung (<i>Flux-Cored</i>) vs Kawat Pejal (<i>Solid Wire</i>)	54
7.3	Karakteristik, Campuran, dan Pemilihan Gas Pelindung	56
7.4	Peran Fluks Serbuk Pada Pengelasan <i>Submerged Arc Welding</i> (SAW).....	58
7.5	Penyimpanan dan Penanganan Bahan Tambah untuk Mencegah Hidrogen	60
BAB 8 INSPEKSI, PENGUJIAN, DAN EVALUASI CACAT LAS (<i>WELD DEFECTS</i>)		62
8.1	Morfologi dan Klasifikasi Cacat Visual Las.....	62
8.2	Inspeksi Visual (<i>Visual Testing</i> / VT) dan Pengukuran Geometri.....	64
8.3	Metode Pengujian Tidak Merusak (NDT)	65
8.4	Metode Pengujian Merusak (<i>Destructive Testing</i> / DT).....	67
8.5	Pembuatan WPS dan Kualifikasi Juru Las (WPQ)	69
BAB 9 DISTORSI, TEGANGAN SISA, DAN PERLAKUAN PASCA LAS (PWHT).....		71
9.1	Mekanisme Termomekanis Terjadinya Distorsi dan Tegangan Sisa (<i>Residual Stress</i>)	71
9.2	Strategi dan Urutan Pengelasan (<i>Welding Sequence</i>) untuk Mengendalikan Distorsi.....	73

9.3	Metode Penjepitan (<i>Jig/Fixture</i>) dan Koreksi Distorsi Pasca Las	75
9.4	<i>Post Weld Heat Treatment</i> (PWHT): Tujuan, Siklus Pemanasan, dan Parameter.....	77
9.5	Dampak Tegangan Sisa terhadap Umur Lelah (<i>Fatigue Life</i>) dan Ketahanan Korosi Struktur	79
BAB 10	OTOMASI, DIGITALISASI, DAN MASA DEPAN TEKNOLOGI PENGELASAN	82
10.1	Implementasi Robotika dan Lengan Artikulasi dalam Sistem Pengelasan Manufaktur Otomotif	82
10.2	Simulasi Proses Pengelasan Berbasis Elemen Hingga (<i>Finite Element Analysis / FEA</i>)	85
10.3	10.3 Integrasi <i>Internet of Things</i> (IoT) untuk Pemantauan Parameter Pengelasan Jarak Jauh (<i>Real-time</i>)	88
10.4	10.4 Pendekatan <i>Machine Learning</i> dan Visi Komputer (AI) untuk Deteksi Cacat Las Otomatis	91
10.5	Menyelaraskan Pembelajaran Teknologi Pengelasan dengan Adaptasi Modul Digital dan Sistem Manufaktur Pintar	93
DAFTAR PUSTAKA.....		96
LAMPIRAN.....		101
GLOSARIUM		105
INDEKS.....		111
RIWAYAT PENULIS.....		113

BAB 1

PENDAHULUAN TEKNOLOGI PENGELASAN DAN MANUFAKTUR

1.1 DEFINISI, SEJARAH, DAN EVOLUSI TEKNOLOGI PENGELASAN

Teknologi pengelasan secara fundamental didefinisikan sebagai proses metalurgi yang menyambungkan dua atau lebih material—umumnya logam atau termoplastik—melalui peleburan lokal dan koalesensi, baik dengan maupun tanpa aplikasi tekanan dan bahan tambah (*filler*). Berdasarkan **Teori Ikatan Atomik (Atomic Bonding Theory)**, sambungan logam yang sejati terjadi ketika permukaan dua material didekatkan pada jarak interatomik, sehingga awan elektronnya dapat saling tumpang tindih dan membagikan gaya tarik-menarik. Namun, pada kenyataannya, keberadaan lapisan oksida dan kekasaran permukaan menghalangi kontak ini. Oleh karena itu, energi aktivasi berupa panas ekstrem atau tekanan plastis diperlukan untuk menembus penghalang tersebut dan menyatukan kisi kristal logam secara permanen (Messler, 2004). Pemahaman terhadap teori ikatan ini menempatkan pengelasan bukan sekadar keahlian mekanis manual, melainkan sebuah cabang ilmu rekayasa termodinamika dan material.



Secara historis, jejak awal teknik penyambungan logam berakar dari metode penempaan panas (*forge welding*) pada Zaman Perunggu. Evolusi sesungguhnya terjadi pada akhir abad ke-19 dengan penemuan busur listrik (*electric arc*) yang memberikan densitas energi tinggi. Pergeseran ini sangat selaras dengan **Hukum Termodinamika**, di mana konversi energi listrik menjadi energi panas melalui resistansi celah udara (busur) memungkinkan material mencapai titik leburnya dalam fraksi detik (Cary & Helzer, 2005).



Memasuki era modern, evolusi teknologi pengelasan berjalan secara eksponensial dengan ditemukannya metode tingkat lanjut seperti pengelasan berkas elektron (*electron beam welding*) dan pengelasan laser (*laser beam welding*). Perkembangan ini terus

beradaptasi dengan tuntutan industri kedirgantaraan yang mensyaratkan distorsi minim dan kemampuan menyambung material eksotis. Di abad ke-21, fokus evolusi bergeser ke arah integrasi sensor presisi, otomasi, dan perancangan material berskala mikro guna mengoptimalkan profil perpindahan panas.

 SMAW (Electrode/Stick) Welding Cariarc Power Stick Econoarc Inverdelta ZX5 Learn more ▶	 MIG/MAG/CO2 (GMAW) Welding Economig NB Series MIG/Stick NBC Series MIG Series NBK Series Learn more ▶
 TIG (GTAW) Welding Mostig Econowave Protig Wave Superwave Learn more ▶	 Submerge (SAW) Welding Armada Thyristor Armada IGBT Learn more ▶
 Plasma Cutting Econocut Trident Learn more ▶	 Consumables & Accessories Electrode Solid Wire Stainless Steel Wire Flux Core Wire Learn more ▶

1.2 PERAN ESENSIAL PENGELASAN DALAM PROSES PRODUKSI DAN MANUFAKTUR INDUSTRI

Dalam lanskap produksi global, pengelasan menduduki posisi yang tidak tergantikan sebagai metode fabrikasi primer untuk membangun infrastruktur raksasa, mulai dari jembatan, perpipaan migas, hingga reaktor nuklir. Keandalan sambungan ini sangat bergantung pada **Teori Mekanika Fraktur (Fracture Mechanics)** dan

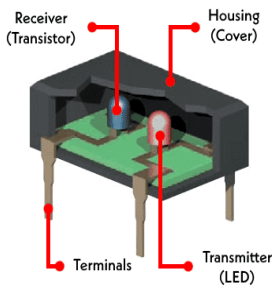
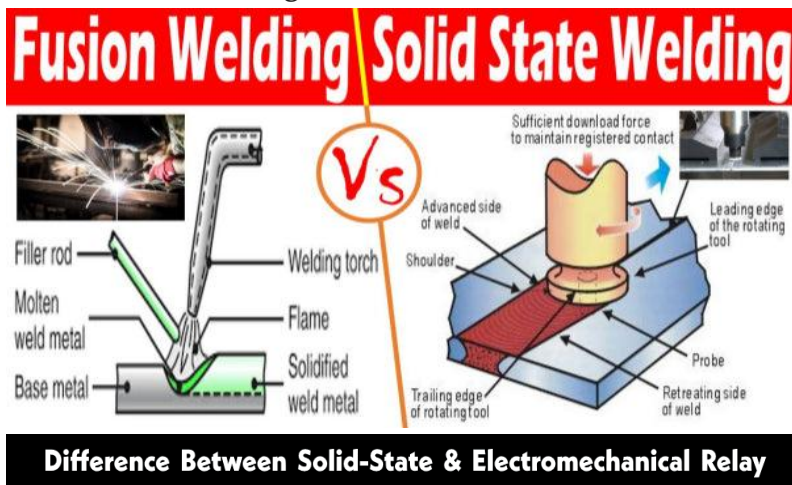
Integritas Struktural. Konsep utama dari teori ini adalah bahwa sebuah struktur penyambungan harus mampu mendistribusikan aliran tegangan (*stress flow*) secara kontinu tanpa menciptakan titik konsentrasi tegangan yang tajam. Sambungan las yang dieksekusi dengan sempurna akan memiliki struktur metalurgi yang bersinambungan, sehingga mampu menahan beban kelelahan (*fatigue*) dan rambatan retak (*crack propagation*) yang setara dengan kekuatan logam induknya (Radaj, 2012).



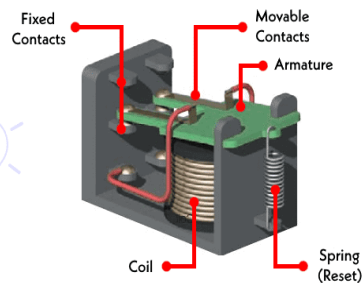
Dari sudut pandang ekonomi teknik, aplikasi teknologi pengelasan memberikan dampak efisiensi yang luar biasa signifikan terhadap pengurangan berat struktur. Berbeda dengan sambungan paku keling (*rivet*) yang melubangi material dan melemahkan penampang melintangnya, pengelasan mempertahankan luas penampang secara penuh. Berdasarkan **Teori Optimasi Desain**, eliminasi elemen pengikat eksternal memungkinkan rekayasawan untuk merancang topologi struktur yang jauh lebih ringan, aerodinamis, dan hemat material dasar, yang pada akhirnya memangkas durasi perakitan dan biaya operasional secara masif (Groover, 2019).

1.3 KLASIFIKASI PROSES PENYAMBUNGAN LOGAM (PENYAMBUNGAN FUSI VS. SOLID STATE)

Dalam studi proses produksi dan manufaktur, pengelasan (welding) diklasifikasikan ke dalam dua kategori utama berdasarkan fase material saat proses penyambungan berlangsung: **Penyambungan Fusi (Fusion Welding)** dan **Penyambungan Solid State (Solid State Welding)**.



SSR - Solid State Relay



EMR - Electromechanical Relay

Berikut adalah rincian klasifikasi dari kedua mekanisme penyambungan logam tersebut:

1.3.1 Penyambungan Fusi (Fusion Welding)

Proses fusi melibatkan pemanasan pada logam induk (base metal) hingga mencapai titik leburnya (melting point) sehingga material tersebut mencair dan menyatu. Proses ini sering kali, meskipun tidak selalu, menggunakan logam pengisi (filler metal) untuk memperkuat sambungan.

Karakteristik Utama:

- **Suhu:** Melampaui titik lebur material.
- **Material Pengisi:** Umumnya menggunakan kawat las atau *filler*.
- **Tekanan:** Biasanya tidak memerlukan tekanan eksternal.
- **Zona Pengaruh Panas (HAZ):** Memiliki Heat-Affected Zone (HAZ) yang relatif luas, yang dapat mengubah sifat mekanik dan struktur mikro logam di sekitar area las.

Sub-Klasifikasi Utama Fusi:

- **Arc Welding (Las Busur):** Menggunakan energi listrik untuk menghasilkan busur panas. Contoh: SMAW (Las Listrik Manual), GMAW/MIG, GTAW/TIG, dan SAW.
- **Gas Welding (Las Gas):** Menggunakan pembakaran gas bahan bakar (biasanya asetilen) dan oksigen. Contoh: Oxy-Acetylene Welding (OAW).
- **Resistance Welding (Las Tahanan):** Panas dihasilkan dari resistansi material terhadap aliran arus listrik bolak-balik berarus tinggi. Contoh: Spot Welding (RSW) dan Seam Welding (RSEW).
- **High-Energy Beam Welding:** Menggunakan sinar berenergi tinggi yang difokuskan. Contoh: Laser Beam Welding (LBW) dan Electron Beam Welding (EBW).

1.3.2 Penyambungan Solid State (Solid State Welding)

Proses penyambungan ini terjadi pada fase padat. Logam induk dipanaskan namun suhunya dijaga **di bawah titik lebur**, dan penyambungan dicapai melalui penerapan tekanan (pressure) secara mekanik.

Karakteristik Utama:

- **Suhu:** Di bawah titik lebur material (hanya sampai pada fase plastis).
- **Material Pengisi:** Tidak menggunakan *filler* sama sekali.
- **Tekanan:** Wajib menggunakan tekanan atau gaya gesek untuk menggabungkan material.
- **Zona Pengaruh Panas (HAZ):** Sangat minim atau bahkan tidak ada zona peleburan, sehingga mempertahankan sifat metalurgi asli dari logam induk dengan sangat baik.

Sub-Klasifikasi Utama Solid State:

- **Friction Welding (Las Gesek):** Panas dihasilkan dari gesekan mekanik antara dua permukaan yang berputar atau bergeser di bawah tekanan. Termasuk di dalamnya adalah inovasi *Friction Stir Welding* (FSW).
- **Ultrasonic Welding (USW):** Menggunakan energi getaran ultrasonik berfrekuensi tinggi sambil memberikan tekanan sedang pada bidang sambung. Sering digunakan untuk logam tipis atau material non-logam.
- **Explosion Welding (EXW):** Menggunakan energi dari detonasi bahan peledak berkecepatan tinggi untuk menekan dua pelat logam hingga menyatu (biasanya untuk *cladding*).
- **Diffusion Welding (DFW):** Proses penyatuan padat akibat migrasi atom melintasi permukaan kontak pada suhu tinggi (sekitar 50% dari titik lebur) dan tekanan konstan dalam waktu yang cukup lama.

Tabel Perbandingan Mekanisme

Parameter	Penyambungan Fusi (Fusion)	Penyambungan Solid State
Fase Material	Meleleh menjadi cair (<i>Liquid</i>)	Tetap padat (Plastis / <i>Solid</i>)
Penggunaan Logam Pengisi	Sering digunakan	Tidak digunakan
Aplikasi Tekanan	Tidak diperlukan (kecuali las tahanan)	Wajib / Sangat diperlukan
Heat-Affected Zone (HAZ)	Signifikan, mengubah struktur metalurgi	Sangat minimal / Tidak ada
Risiko Cacat (Defects)	Rentan terhadap porositas, retak panas (<i>hot cracking</i>), dan distorsi	Risiko porositas dan distorsi jauh lebih rendah

Struktur klasifikasi ini sangat cocok untuk diintegrasikan sebagai landasan teori dasar dalam Rencana Pembelajaran Semester (RPS), terutama saat membedakan mekanisme perubahan struktur mikro material paska-pengelasan.

1.4 STANDAR INTERNASIONAL, KODE ETIK PROFESIONAL, DAN REGULASI PENGELASAN

Mengingat kegagalan sebuah sambungan las dapat berakibat fatal berupa meledaknya bejana tekan atau runtuhnya bangunan, eksekusi pekerjaan pengelasan harus tunduk pada standar teknis seperti AWS, ASME, dan ISO. Standar-standar ini tidak dibangun secara acak, melainkan dilandaskan pada **Teori Keandalan (Reliability Theory)** dan **Manajemen Kualitas Total (TQM)**. Konsep

utamanya adalah bahwa kualitas sambungan las tidak dapat dipastikan hanya dari inspeksi produk akhir (karena banyak cacat yang tersembunyi di dalam lapisan logam), melainkan harus dijamin melalui pengendalian proses yang ketat sejak awal. Itulah sebabnya regulasi mewajibkan adanya *Welding Procedure Specification* (WPS) yang terqualifikasi untuk menyeragamkan probabilitas keberhasilan pada setiap siklus pengelasan (Besterfield, 2013).

Standar ASME *Boiler and Pressure Vessel Code* (BPVC) Seksi IX, misalnya, mengatur batas toleransi ketat terkait sifat mekanis dan uji destruktif sebelum sebuah prosedur diizinkan untuk diaplikasikan di lapangan (Bawa, 2004). Menguasai pembacaan dan interpretasi kode-kode ini merupakan kompetensi primer seorang insinyur las.

Lebih lanjut, penerapan standar operasional ini harus diiringi oleh **Prinsip Etika Keprofesian (Engineering Ethics)**. Penilaian kualitas las wajib dievaluasi berdasarkan sistem yang menitikberatkan pada objektivitas faktual tanpa manipulasi data inspeksi. Teori etika utilitarisme dalam rekayasa menegaskan bahwa seorang *welding inspector* menanggung tanggung jawab moral tertinggi untuk mencegah bahaya laten terhadap masyarakat luas, yang mengharuskan mereka untuk menolak sambungan yang berada di bawah standar kelayakan, terlepas dari tekanan batas waktu produksi (Bowman, 2010).

1.5 PROSPEK KARIER DAN KOMPETENSI WELDER/ENGINEER DI ERA MODERN

Transisi menuju era Industri 4.0 secara radikal mengubah profil kualifikasi sumber daya manusia di bidang rekayasa material. Prospek karier bagi *welding engineer* kini sangat berpusat pada pemahaman **Teori Sistem Siber-Fisik (Cyber-Physical Systems)**. Konsep ini

menjelaskan integrasi antara elemen fisik (robot las, sensor busur listrik) dengan elemen komputasi cerdas (kembaran digital, algoritma *machine learning*). Industri masa kini membutuhkan pakar yang tidak hanya memahami laju pendinginan metalurgi, tetapi juga sanggup mendiagnosis anomali parameter arus las secara *real-time* menggunakan jaringan *Internet of Things* (IoT) untuk mencegah cacat fabrikasi sebelum terjadi (Kah et al., 2015).

Berdasarkan paradigma *Outcome-Based Education* (OBE), mahasiswa program sarjana teknik mesin dituntut untuk memiliki kompetensi *hybrid*. Mereka harus menguasai fundamen fisis proses pengelasan secara utuh (mulai dari termodinamika hingga pembentukan mikrostruktur), sembari piawai memanfaatkan teknologi digital untuk mengkalibrasi sistem otomasi. Tantangan kognitif ini menjadikan pembelajaran rekayasa las sebagai salah satu disiplin ilmu yang paling dinamis, menghubungkan sains material klasik dengan sistem manufaktur cerdas masa depan (Somers, 2021).

BAB 2

KESELAMATAN DAN KESEHATAN KERJA (K₃) DALAM PENGELASAN

2.1 IDENTIFIKASI POTENSI BAHAYA FISIK DAN KIMIAWI

Lingkungan kerja pengelasan secara inheren dipenuhi dengan paparan energi tinggi dan transformasi material yang memicu berbagai potensi bahaya mematikan. Pendekatan sistematis untuk mengenali ancaman ini didasarkan pada **Teori Hierarki Pengendalian Bahaya (Hierarchy of Hazard Control)**. Konsep dasar dari teori ini menekankan bahwa langkah paling efektif dalam manajemen K3 bukanlah sekadar membagikan alat pelindung kepada pekerja, melainkan mengeliminasi atau meminimalkan sumber bahaya itu sendiri sejak dari tahap perencanaan operasional. Dalam konteks pengelasan, bahaya ini termanifestasi dalam bentuk paparan radiasi sinar ultraviolet (UV) dan inframerah yang dapat merusak retina mata, serta percikan logam cair yang mengancam jaringan kulit pekerja (Goetsch, 2019).



Fumes and Gases



Physical Hazards



Electric Shock



Fire and Explosion

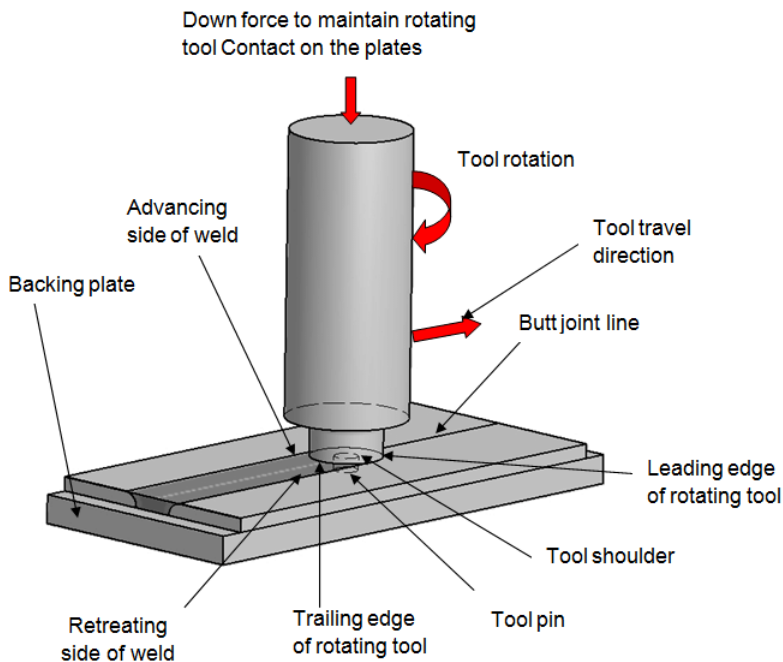
Selain bahaya fisik, ancaman kimiawi yang tersembunyi berupa paparan gas dan asap beracun (*welding fumes*) membutuhkan intervensi pengendalian yang sangat ketat. Berdasarkan **Teori Toksikologi Industri**, paparan partikulat berukuran sub-mikron yang menguap dari peleburan bahan tambah (seperti unsur mangan, kromium heksavalen, dan ozon) dapat menembus sistem pertahanan paru-paru dan masuk langsung ke dalam aliran darah manusia. Jika lingkungan kerja gagal menyediakan sirkulasi udara yang memadai, akumulasi racun ini dalam jangka panjang secara konsisten memicu penyakit pernapasan kronis hingga gangguan neurologis fatal yang dikenal sebagai *manganism* (Burgess et al., 2004).

2.2 SPESIFIKASI DAN STANDAR ALAT PELINDUNG DIRI (APD)

Meskipun rekayasa lingkungan kerja telah dimaksimalkan, perlindungan individual tetap menjadi lapisan pertahanan terakhir yang krusial. Hal ini diatur dalam **Teori Perlindungan Penghalang (Barrier Protection Theory)**, yang mengonseptualisasikan isolasi fisik total antara tubuh pekerja dan agen perusak eksternal. Spesifikasi tameng wajah (*welding helmet*), misalnya, harus dilengkapi dengan lensa filter *auto-darkening* yang mampu merespons kilatan cahaya busur dalam hitungan milidetik. Lensa ini dirancang secara khusus

untuk memblokir spektrum gelombang elektromagnetik perusak, sambil tetap memberikan visibilitas yang cukup bagi operator untuk memantau kolam logam cair (Plog & Quinlan, 2012).

Lebih jauh, kelengkapan pakaian pelindung seperti apron kulit, sarung tangan isolator panas, dan sepatu keselamatan harus memenuhi standar perlindungan termal tingkat tinggi. Material kulit (*leather*) dipilih karena kemampuannya dalam menahan rambatan panas konveksi sekaligus menolak percikan terak panas agar tidak menembus lapisan kain. Implementasi dari standar garmen pelindung ini merupakan kewajiban absolut untuk memastikan bahwa percikan api sesaat tidak akan memicu luka bakar derajat tinggi atau menyebabkan pakaian pekerja terbakar saat proses manufaktur berlangsung (Reese, 2015).



Saat pahat bergerak maju menelusuri garis sambungan, profil pin pada ujung pahat akan mengaduk material yang melunak tersebut, memaksa atom-atom dari kedua sisi pelat untuk bercampur dan berdifusi secara mekanis. Penempaan secara kontinu oleh bahu pahat di area belakang lintasan menghasilkan struktur mikro butir yang sangat halus dan ekuaksial akibat fenomena rekristalisasi dinamis. Tidak adanya fase pencairan pada FSW secara radikal mengeliminasi cacat khas pengelasan fusi, seperti porositas gas dan retak pemadatan (*solidification cracking*). Oleh karena itu, metode ini dinilai sebagai terobosan paling andal untuk merakit struktur panel paduan aluminium kelas dirgantara (Seri 2xxx dan 7xxx) yang secara metalurgi sangat sulit untuk disatukan menggunakan pengelasan busur listrik konvensional (Lohwasser & Chen, 2009).

DAFTAR PUSTAKA

- American Welding Society (AWS). (2012). *Standard Symbols for Welding, Brazing, and Nondestructive Examination (AWS A2.4)*. Miami: American Welding Society.
- American Welding Society (AWS). (2018). *Structural Welding Code - Steel (AWS D1.1/D1.1M)*. Miami: American Welding Society.
- Aslanlar, S. (2006). The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry. *Materials & Design*, 27(2), 125-131.
- Bawa, H. S. (2004). *Manufacturing Processes*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Education.
- Besterfield, D. H. (2013). *Quality Control* (8th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson.
- Bowman, P. A. (2010). *Engineering Ethics: Concepts and Cases*. Belmont, CA: Wadsworth Cengage Learning.
- Boyle, T. (2012). *Health and Safety: Risk Management*. Leicester: IOSH Services.
- Brauer, R. L. (2016). *Safety and Health for Engineers* (3rd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Burgess, W. A., Ellenbecker, M. J., & Treitman, R. D. (2004). *Recognition of Health Hazards in Industry*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (9th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

- Campbell, J. E. (2018). *Basic Trauma Life Support*. New York, NY: McGraw-Hill Education.
- Cary, H. B., & Helzer, S. C. (2005). *Modern Welding Technology* (6th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
- Chen, B., Xia, C., & Zhang, Y. (2020). Machine learning and computer vision in welding defect detection. *Journal of Manufacturing Processes*, 56, 123-134.
- Cote, A. E. (2003). *Fundamentals of Fire Protection*. Quincy, MA: National Fire Protection Association.
- Dawes, C. (1992). *Laser Welding: A Practical Guide*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Dowling, N. E. (2012). *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue* (4th ed.). Boston, MA: Pearson.
- Easterling, K. (1992). *Introduction to the Physical Metallurgy of Welding* (2nd ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Erickson, P. A. (2016). *Practical Guide to Occupational Health and Safety*. San Diego, CA: Elsevier.
- Fontana, M. G. (2005). *Corrosion Engineering* (3rd ed.). New Delhi: Tata McGraw-Hill Education.
- Goetsch, D. L. (2019). *Occupational Safety and Health for Technologists, Engineers, and Managers* (9th ed.). New York, NY: Pearson.
- Goldak, J. A., & Akhlaghi, M. (2005). *Computational Welding Mechanics*. New York, NY: Springer.

- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Groover, M. P. (2019). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems* (7th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Hellier, C. J. (2012). *Handbook of Nondestructive Evaluation* (2nd ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education.
- Hughes, P., & Ferrett, E. (2011). *Introduction to Health and Safety at Work*. Oxford: Routledge.
- Jeffus, L. (2020). *Welding: Principles and Applications* (9th ed.). Boston, MA: Cengage Learning.
- Kah, P., Salminen, A., & Martikainen, J. (2015). Trends in welding: Innovations and automations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(5), 1011-1025.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2020). *Manufacturing Engineering and Technology* (8th ed.). Hoboken, NJ: Pearson.
- Kou, S. (2003). *Welding Metallurgy* (2nd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Krautkramer, J., & Krautkramer, H. (1990). *Ultrasonic Testing of Materials*. Berlin: Springer-Verlag.
- Lancaster, J. F. (1999). *Metallurgy of Welding* (6th ed.). Cambridge: Abington Publishing.
- Lindgren, L. E. (2007). *Computational Welding Mechanics: Thermomechanical and Microstructural Simulations*. Cambridge: Woodhead Publishing.

- Lippold, J. C. (2015). *Welding Metallurgy and Weldability*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Lohwasser, D., & Chen, Z. (2009). *Friction Stir Welding: From Basics to Applications*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Mayer, R. E. (2009). *Multimedia Learning* (2nd ed.). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Messler, R. W. (2004). *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Mishra, R. S., & Mahoney, M. W. (2007). *Friction Stir Welding and Processing*. Materials Park, OH: ASM International.
- Nof, S. Y. (1999). *Handbook of Industrial Robotics* (2nd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- O'Brien, R. L. (Ed.). (2015). *Welding Handbook: Welding Processes* (9th ed., Vol. 2). Miami: American Welding Society.
- Plog, B. A., & Quinlan, P. J. (2012). *Fundamentals of Industrial Hygiene* (6th ed.). Itasca, IL: National Safety Council.
- Radaj, D. (1992). *Heat Effects of Welding: Temperature Field, Residual Stress, Distortion*. Berlin: Springer-Verlag.
- Radaj, D. (2012). *Design and Analysis of Fatigue Resistant Welded Structures*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Reese, C. D. (2015). *Occupational Health and Safety Management: A Practical Approach* (3rd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Shigley, J. E., Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2011). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (9th ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education.

- Singh, R. (2012). *Applied Welding Engineering: Processes, Codes, and Standards*. Waltham, MA: Butterworth-Heinemann.
- Somers, T. (2021). *Digital Transformation in the Welding Industry*. London: Welding Technology Press.
- Spady, W. G. (1994). *Outcome-Based Education: Critical Issues and Answers*. Arlington, VA: American Association of School Administrators.
- Steen, W. M., & Mazumder, J. (2010). *Laser Material Processing* (4th ed.). London: Springer.
- Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). *Reinforcement Learning: An Introduction* (2nd ed.). Cambridge, MA: MIT Press.
- Tao, F., Qi, Q., & Nee, A. Y. C. (2019). *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*. London: Academic Press.
- Wang, L., Törngren, M., & Onori, M. (2015). Big data analytics in smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 245-251.
- Zhang, H., & Senkara, J. (2011). *Resistance Welding: Fundamentals and Applications*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Zheng, P., Wang, H., & Sang, Z. (2020). IoT-based remote monitoring system for intelligent welding. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 64, 101946.

LAMPIRAN

LAMPIRAN 1: TABEL KONVERSI SATUAN DAN PARAMETER TERMAL

Bagian ini membantu rekayasawan dalam mengonversi satuan internasional ke satuan yang umum digunakan pada standar AWS atau ASME.

Tabel L1.1: Konversi Satuan Panjang dan Dimensi (Ketebalan Pelat/Elektroda)

Dari	Ke	Faktor Konversi
1 Milimeter (mm)	Inci (inch)	0,03937
1 Inci (inch)	Milimeter (mm)	25,4
1 Meter (m)	Kaki (feet)	3,2808

Tabel L1.2: Konversi Satuan Suhu (Pemanasan Awal dan PWHT)

Dari	Ke	Rumus Konversi
Celcius (°C)	Fahrenheit (°F)	$(^{\circ}\text{C} \times 9/5) + 32$
Fahrenheit (°F)	Celcius (°C)	$(^{\circ}\text{F} - 32) \times 5/9$
Celcius (°C)	Kelvin (K)	$^{\circ}\text{C} + 273,15$

LAMPIRAN 2: STANDAR TEKNIS INTERNASIONAL PENGELASAN

Daftar referensi regulasi yang menjadi acuan legalitas dan keamanan dalam manufaktur global.

Tabel L2.1: Standar AWS, ASME, dan ISO

Standar	Judul / Cakupan	Aplikasi Utama
AWS D1.1	<i>Structural Welding Code - Steel</i>	Konstruksi gedung, jembatan, dan struktur baja.
ASME Seksi IX	<i>Welding and Brazing Qualifications</i>	Kualifikasi prosedur dan operator bejana tekan/pipa migas.
ISO 9606	<i>Qualification testing of welders</i>	Standar internasional kualifikasi kinerja juru las.
ISO 5817	<i>Welding - Fusion-welded joints</i>	Tingkat kualitas untuk cacat pada pengelasan baja.
AWS A2.4	<i>Standard Symbols for Welding</i>	Aturan baku pembuatan simbol las pada gambar teknik.

LAMPIRAN 3: SIFAT FISIK DAN KARAKTERISTIK MAMPU LAS LOGAM

Data fundamental untuk menentukan kebutuhan suhu pemanasan awal (*pre-heat*).

Tabel L3.1: Titik Lebur dan Indeks Mampu Las Logam Umum

Jenis Logam	Titik Lebur (°C)	Kemampulasan (Weldability)	Kebutuhan Pre-heat
Baja Karbon Rendah	1450 – 1510	Sangat Baik	Jarang/Sesuai Ketebalan
Baja Karbon Tinggi	1350 – 1400	Terbatas	Wajib

Jenis Logam	Titik Lebur (°C)	Kemampulasan (Weldability)	Kebutuhan Pre-heat
Aluminium Murni	660	Baik (dengan AC-GTAW)	Tidak (Konduktivitas Tinggi)
Stainless Steel 304	1400 – 1450	Baik	Minimal
Tembaga Murni	1083	Sulit	Sangat Tinggi

LAMPIRAN 4: PARAMETER OPERASIONAL TIPIKAL (ESTIMASI ARUS)

Panduan dasar pengaturan mesin untuk mencapai penetrasi yang optimal sesuai ketebalan material.

Tabel L4.1: Rekomendasi Arus Las SMAW (Elektroda E7018)

Diameter Elektroda (mm)	Ketebalan Pelat (mm)	Rentang Arus (Ampere)	Posisi Pengelasan
2,6	2,0 – 4,0	60 – 90	Datar/Vertikal
3,2	4,0 – 8,0	90 – 130	Semua Posisi
4,0	8,0 – 12,0	140 – 190	Datar/Fillet Horizontal
5,0	> 12,0	190 – 250	Datar

LAMPIRAN 5: PANDUAN VISUAL SIMBOL PENGELASAN

Ringkasan piktogram yang sering muncul pada gambar fabrikasi industri.

Tabel L5.1: Simbol Geometri Las Dasar

Bentuk Sambungan	Simbol Dasar	Keterangan
Fillet (Sudut)	$\triangle$	Las sudut pada sambungan T atau tumpang.
Square Groove (Tumpul)	Π	Sambungan tumpul tanpa pengetirusan.
V-Groove	∇	Sambungan tumpul dengan tirus satu sisi (V).
Bevel Groove	$\surd$	Sambungan tumpul tirus pada satu pelat saja.
Plug / Slot	$\square$	Pengelasan pada lubang melingkar atau memanjang.

LAMPIRAN 6: TEMPLAT WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)

Format dokumen baku untuk kualifikasi prosedur pengelasan di bengkel maupun industri.

WPS NO:	IDENTITAS PROYEK:	TANGGAL:
Proses Las:	Jenis Sambungan:	Posisi Las:
Logam Induk:	Bahan Tambah (AWS):	Gas Pelindung:
Arus (A):	Tegangan (V):	Kecepatan (mm/mnt):
Pre-heat Temp:	PWHT Temp:	Metode Pembersihan:

GLOSARIUM

A

- **Arc Blow (Hembusan Busur):** Penyimpangan atau pembelokan busur listrik dari jalur yang seharusnya, diakibatkan oleh gaya magnetik yang tidak seimbang di sekitar benda kerja.
- **Austenit:** Struktur kristal padat (kubus pemusat sisi / FCC) pada besi dan baja yang stabil pada suhu tinggi dan mampu melarutkan karbon dalam jumlah besar.

B

- **Back-Step Welding:** Teknik urutan pengelasan di mana segmen-segmen pendek dilas dengan arah yang berlawanan dengan arah kemajuan pengelasan secara keseluruhan untuk meminimalkan regangan dan distorsi.
- **Bahan Tambah (Filler Metal):** Logam atau paduan yang ditambahkan ke dalam kolam las selama proses pengelasan untuk mengisi celah dan membentuk sambungan.

C

- **Cold Cracking (Retak Dingin):** Retak yang terjadi pada daerah las atau HAZ beberapa jam hingga berhari-hari setelah logam mendingin, umumnya dipicu oleh keberadaan hidrogen, tegangan sisa, dan struktur mikro yang rapuh.
- **Computer Vision (Visi Komputer):** Bidang kecerdasan buatan yang memungkinkan mesin untuk mengekstraksi dan menganalisis informasi visual (seperti mendeteksi cacat kolam las) secara *real-time* melalui tangkapan kamera.

D

- **Daerah Pengaruh Panas (Heat-Affected Zone / HAZ):** Bagian dari logam induk yang tidak ikut mencair, namun struktur

mikro dan sifat mekanisnya berubah akibat siklus pemanasan dan pendinginan dari proses pengelasan.

- **Distorsi:** Perubahan bentuk atau dimensi fisik secara permanen pada struktur logam akibat kontraksi termal dan tegangan sisa pasca-pengelasan.
- **Dye Penetrant Testing (PT):** Salah satu metode pengujian tidak merusak (NDT) yang memanfaatkan cairan pewarna berdaya tembus tinggi untuk mendeteksi retakan halus di permukaan logam.

E

- **Electron Beam Welding (EBW):** Proses pengelasan fusi berdensitas energi tinggi yang menggunakan pancaran elektron yang difokuskan pada benda kerja di dalam ruang hampa udara.

F

- **Fatigue (Kelelahan Logam):** Fenomena perambatan retak progresif pada material yang disebabkan oleh beban siklik (berulang) secara terus-menerus, meskipun beban tersebut berada di bawah batas luluh statisnya.
- **Finite Element Analysis (FEA):** Metode komputasi numerik yang digunakan untuk menyimulasikan dan menganalisis perilaku termal, regangan, dan tegangan pada struktur las secara virtual.
- **Fluks (Flux):** Material reaktif yang melapisi elektroda atau ditaburkan pada kolam las, berfungsi untuk melindungi logam cair dari oksidasi, menstabilkan busur, dan membentuk terak pemurni.
- **Friction Stir Welding (FSW):** Proses pengelasan keadaan padat (*solid-state*) yang memanfaatkan panas gesekan dari pahat

berputar untuk melunakkan dan menyatukan material melalui deformasi plastis tanpa meleburnya.

G

- **Gas Metal Arc Welding (GMAW):** Proses pengelasan busur listrik yang menggunakan kawat pejal atau tubular yang terumpan secara kontinu dan dilindungi oleh gas eksternal (seperti Argon atau CO₂).
- **Gas Tungsten Arc Welding (GTAW):** Proses pengelasan busur listrik presisi tinggi yang menggunakan elektroda tungsten tak-terumpan (tidak mencair) dengan perlindungan gas inert.

H

- **Higroskopis:** Sifat alami suatu material (seperti lapisan fluks elektroda) yang sangat mudah menyerap kelembapan air dari udara sekitarnya.
- **Hot Cracking (Retak Panas):** Keretakan yang terbentuk tepat pada saat logam cair mulai membeku (transisi cair-ke-padat) akibat tegangan susut dan keberadaan pengotor bersuhu leleh rendah di batas butir.

I

- **Incomplete Penetration (Penetrasi Kurang):** Kondisi cacat las di mana cairan logam tidak sepenuhnya menembus dan melebur hingga ke bagian akar (*root*) dari celah sambungan.
- **Inklusi Terak (Slag Inclusion):** Cacat las yang terjadi ketika sisa material terak non-logam terperangkap di dalam matriks logam lasan akibat proses pembersihan yang kurang sempurna di antara lapisan lintasan las.

K

- **Kekuatan Luluh (Yield Strength):** Batas tegangan maksimum di mana suatu material dapat menahan beban tanpa mengalami deformasi plastis (perubahan bentuk permanen).

- **Keyhole Mode (Mode Lubang Kunci):** Fenomena kapiler berupa terbentuknya lubang plasma sempit dan dalam pada benda kerja saat pengelasan berdensitas energi tinggi (seperti LBW dan EBW), menghasilkan penetrasi yang sangat efisien.

M

- **Martensit:** Struktur mikro baja yang sangat keras namun getas, yang terbentuk ketika struktur austenit didinginkan secara sangat cepat (*quenching*) melampaui laju pendinginan kritisnya.
- **Masukan Panas (Heat Input):** Besaran energi termal absolut yang disalurkan ke benda kerja per satuan panjang lasan, menentukan dimensi HAZ dan laju pendinginan metalurgi.

N

- **Non-Destructive Testing (NDT):** Kumpulan metode inspeksi pengujian (seperti ultrasonik, radiografi, cairan penetran) yang dirancang untuk mengevaluasi integritas sambungan las tanpa merusak atau mengubah fisik benda uji.

P

- **Porositas (Porosity):** Cacat las berupa rongga-rongga udara berukuran mikro atau makro yang terbentuk akibat gas yang gagal melepaskan diri dan terperangkap di dalam cairan logam saat membeku.
- **Post Weld Heat Treatment (PWHT):** Proses perlakuan pemanasan struktur las pada suhu tertentu (di bawah batas kritis) dan menahannya selama beberapa waktu untuk melepaskan tegangan sisa dan memperbaiki keuletan material.

R

- **Radiographic Testing (RT):** Metode NDT yang menggunakan pancaran foton (Sinar-X atau Gamma) menembus material

untuk memetakan kepadatan logam dan memvisualisasikan cacat internal pada lembaran film.

- **Resistance Spot Welding (RSW):** Metode penyambungan lembaran logam beroperasi secara otomatis tanpa busur listrik, memanfaatkan panas yang dihasilkan dari tahanan kontak listrik (resistansi Joule) dan tekanan klem elektroda.

S

- **Shielded Metal Arc Welding (SMAW):** Proses pengelasan manual yang menggunakan elektroda batangan yang dibungkus selaput fluks, menghasilkan perisai gas dan terak pelindung saat elektroda dileburkan.
- **Submerged Arc Welding (SAW):** Proses pengelasan mekanis otomatis dengan laju deposisi bahan tambah tinggi, di mana busur listrik sepenuhnya terendam secara terisolasi di bawah timbunan serbuk fluks granular.

T

- **Takik Las (Undercut):** Cacat visual eksternal berupa alur tajam yang tergerus masuk ke dalam logam induk di sepanjang tepi kaki las, yang menciptakan titik konsentrasi tegangan berbahaya.
- **Tegangan Sisa (Residual Stress):** Tegangan internal tarik atau tekan yang secara permanen terkunci dan mendiami komponen struktural setelah siklus pengelasan berakhir dan komponen mencapai suhu ruang.
- **Terak (Slag):** Lapisan kerak non-logam yang mengapung di permukaan kolam las cair kemudian membeku; bertindak sebagai selimut termal penahan panas dan medium pemurni kotoran logam.

U

- **Ultrasonic Testing (UT):** Metode NDT yang mentransmisikan gelombang suara frekuensi tinggi melintasi material, mengukur pantulan gema akustik untuk menyingkap kedalaman cacat tersembunyi.

W

- **Welding Procedure Specification (WPS):** Dokumen legal rekayasa yang mendikte variabel dan batasan parameter standar pengelasan guna memastikan kualitas mekanis sambungan yang konsisten dan lulus kualifikasi.

INDEKS

A

Acoustic Wave Propagation
Theory, 65
Alat Pelindung Diri (APD),
viii, 12
American Welding Society
(AWS), 53, 96
Analitika Data Frekuensi
Tinggi, 89
Aproksimasi Numerik, 86
Argon,, 57
Austenit, 105

B

Baja karbon, 22

C

Cathodic Cleaning Theory, 30
Closed-Loop Feedback
Control, 84
Computer Vision (Visi
Komputer), 105

D

Daerah Pengaruh Panas (*Heat-
Affected Zone* / HAZ), 20,
105
Dye Penetrant Testing (PT),
106

E

Electron Beam Welding (EBW),
6, 40, 106
Electron Beam Welding
(EBW),, 40

F

Finite Element Analysis (FEA),
86, 106
Fluks, x, 28, 39, 58, 60, 106
Friction Stir Welding (FSW),, 7

G

Gas Metal Arc Welding
(GMAW), 31, 107
Gas pelindung, 56
Gas Tungsten Arc Welding
(GTAW), 29, 107

H

Helium, 56

I

Internet of Things (IoT), iv, xi,
10, 88, 89

J

Jig, xi, 75

K

Kecerdasan Buatan (AI), 91

L

Laju pendinginan, 78

Laser Beam Welding (LBW), 6,
40

Local Exhaust Ventilation
(LEV), 15

M

Makro-Etsa, 69

Martensit, 21, 108

N

Non-Destructive Testing
(NDT), 108

O

Outcome-Based Education
(OBE), iv, vi, 10

Outcome-Based Education
(OBE),, 10

P

Pengelasan busur listrik, 26

Pengelasan resistansi, 34

Porositas, 108

Post Weld Heat Treatment
(PWHT), xi, 77, 108

R

Resistance Spot Welding
(RSW), 35, 109

S

Shielded Metal Arc Welding
(SMAW), ix, 27, 52, 109

Simbol pengelasan, 46

Submerged Arc Welding (SAW),
ix, x, 39, 58, 109

T

Termodinamika, 2, 18, 29

Termodinamika,, 2

Tungsten, ix, 29, 107

U

Ultrasonic Testing (UT), 110

W

Welding Procedure

Specification (WPS), 9, 48,
69, 89, 110

Welding Procedure

Specification (WPS),, 89

RIWAYAT PENULIS



Ir. Jenly Dyliep Isria Manongko, M.Eng., M.Pd lahir di Tompaso pada tanggal 23 Juli 1967. Menyelesaikan Studi S1 di Jurusan Teknik Industri Institut Teknologi Minaesa Tomohon Sulawesi Utara, S2 Competitive Intelligence Universite Aix Marseille 3 Prancis, Kerjasama dengan Universitas Negeri Manado. Dan S2 yang lain penulis ambil Jurusan Teknologi Pendidikan dan Kejuruan di Universitas Negeri Manado. Penulis pernah mengikuti Seminar Nasional Teknik Mesin Seluruh Indonesia sejak tahun 2011, dan pernah mendapatkan penelitian nasional tahun 2015 dan 2016. Sekarang dipercayakan sebagai Ketua Jurusan Pendidikan Teknik Mesin dengan membawahi dua Program Studi yaitu Pendidikan Teknik Mesin dan Teknik Mesin.



Timothy Waraney Kapoh, S.Pd., M.Pd. adalah dosen di Fakultas Teknik Universitas Negeri Manado (Unima) yang lahir di Tomohon 8 Januari 1996. Beliau menyelesaikan Pendidikan S-1 di Universitas Negeri Manado pada Jurusan Pendidikan Teknik Mesin dan S-2 di Universitas Negeri Manado dengan focus pada bidang manajemen pendidikan, teknik pemesinan dan Teknik otomotif. Dalam lima tahun terakhir, beliau terlibat dalam kegiatan penelitian dan pengabdian masyarakat, dan sementara melanjutkan studi S-3 juga di Universitas Negeri Manado. Ada juga Timothy menulis artikel ilmiah dan buku, serta mempresentasikan hasil penelitiannya pada seminar nasional dan internasional.



Prof. Dr. Ing. Drs. Parabelem Tinno Dolf Rompas, M.T. adalah Dosen di Fakultas Teknik Universitas Negeri Manado (Unima) yang lahir di Rumoong Atas pada 17 Desember 1965. Beliau menyelesaikan Pendidikan S-1 di IKIP Negeri Manado, S-2 di Universitas Gadjah Mada, dan S-3 di Universitas Aix-Marseille II, Prancis, dengan focus pada mekanika fluida dan modelisasi numerik. Dalam lima tahun terakhir, beliau terlibat dalam berbagai penelitian dan pengabdian masyarakat. Prof Rompas juga aktif menulis artikel ilmiah dan buku, serta telah mempresentasikan hasil penelitiannya di berbagai seminar nasional dan internasional. Selama masa menjadi Dosen/ASN telah menerima beberapa penghargaan, termasuk Satyalancana Karya Satya dari Presiden RI.

TEKNIK PENGELASAN



Lahirnya buku ini didorong oleh panggilan akademis dan komitmen nyata dalam pelaksanaan Tridharma Perguruan Tinggi, khususnya guna menyediakan literatur yang komprehensif, mutakhir, dan relevan bagi mahasiswa program sarjana (S1) di lingkungan Pendidikan Teknik Mesin. Di tengah pesatnya kemajuan teknologi manufaktur dan era digitalisasi industri saat ini, penguasaan kompetensi dalam bidang rekayasa penyambungan logam tidak lagi sekadar menuntut kecakapan psikomotorik mekanis. Calon insinyur dan pendidik vokasi masa depan dituntut untuk memiliki pemahaman analitis yang mendalam mengenai fundamental metalurgi, termodinamika proses, hingga kepatuhan terhadap standar operasional internasional.



CV. Tahta Media Group
Sukoharjo, Jawa Tengah
Web : www.tahtamedia.co.id
Ig : tahtamedia group
Telp/WA : +62 896 5427 3996

