

Buku Referensi

TEKNOLOGI PENGELASAN MODERN

PRINSIP, PROSES,
DAN APLIKASI INDUSTRI



Ahmadil Amin, S.T., M.T.
Hj. Rika Sylvia, S.E., M.M.
Rendi, S.T., M.T.
Jainal Arifin, S.T., M.T.

BUKU REFERENSI

**TEKNOLOGI
PENGELASAN MODERN**
PRINSIP, PROSES, DAN APLIKASI INDUSTRI

Ahmadil Amin, S.T., M.T.
Hj. Rika Sylvia, S.E., M.M.
Rendi, S.T., M.T.
Jainal Arifin, S.T., M.T.

TEKNOLOGI PENGELASAN MODERN PRINSIP, PROSES, DAN APLIKASI INDUSTRI

Ditulis oleh:

Ahmadil Amin, S.T., M.T.
Hj. Rika Sylvia, S.E., M.M.
Rendi, S.T., M.T.
Jainal Arifin, S.T., M.T.

Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang. Dilarang keras memperbanyak, menerjemahkan atau mengutip baik sebagian ataupun keseluruhan isi buku tanpa izin tertulis dari penerbit.



ISBN: 978-634-7457-78-3
IV + 277 hlm; 18,2 x 25,7 cm.
Cetakan I, Maret 2026

Desain Cover dan Tata Letak:
Melvin Mirsal

Diterbitkan, dicetak, dan didistribusikan oleh
PT Media Penerbit Indonesia
Royal Suite No. 6C, Jalan Sedap Malam IX, Sempakata
Kecamatan Medan Selayang, Kota Medan 20131
Telp: 081362150605
Email: ptmediapenerbitindonesia@gmail.com
Web: <https://mediapenerbitindonesia.com>
Anggota IKAPI No.088/SUT/2024



KATA PENGANTAR

Perkembangan industri manufaktur modern menuntut teknologi pengelasan yang presisi dan berkualitas tinggi, sehingga pengelasan berevolusi dari metode konvensional menjadi sistem modern berbasis energi tinggi, otomasi, dan teknologi digital yang mendukung efisiensi, keselamatan, serta keberlanjutan industri.

Buku referensi ini membahas konsep dan prinsip teknologi pengelasan modern, fisika dan mekanika proses las, berbagai metode pengelasan berbasis energi tinggi dan non-tradisional, serta penerapan otomasi, robotik, dan kecerdasan buatan dalam proses pengelasan. Selain itu, buku referensi ini membahas pengelasan material maju, *additive manufacturing*, pengendalian mutu dan monitoring proses, desain dan simulasi pengelasan, penerapan di berbagai sektor industri, aspek keselamatan dan lingkungan, manajemen usaha pengelasan, serta inovasi dan arah masa depan teknologi pengelasan.

Semoga buku referensi ini dapat menjadi sumber rujukan yang bermanfaat dalam meningkatkan wawasan, kompetensi, dan profesionalisme pembaca di bidang teknologi pengelasan modern.

Salam Hangat

Tim Penulis



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
BAB I KONSEP DAN PRINSIP TEKNOLOGI PENGELASAN MODERN	1
A. Definisi dan Lingkup Teknologi Pengelasan Modern.....	2
B. Evolusi dari Konvensional ke <i>Modern Welding</i>	7
C. Karakteristik Sistem Pengelasan Canggih	15
D. Integrasi Teknologi Informasi dan Otomasi	21
BAB II FISIKA DAN MEKANIKA PROSES LAS MODERN	25
A. Fenomena Transfer Logam dan Arc Plasma	25
B. Dinamika Panas dan Pendinginan Las	31
C. Model Mekanika Tegangan Sisa	35
D. Simulasi dan Prediksi Kualitas Las	40
BAB III PROSES PENGELASAN BERBASIS ENERGI TINGGI	45
A. Laser Beam Welding (LBW)	45
B. Electron Beam Welding (EBW)	49
C. Plasma Arc Welding (PAW)	53
D. Kelebihan dan Keterbatasan Tiap Metode	58
BAB IV PROSES PENGELASAN CANGGIH NON-TRADISIONAL	63
A. Ultrasonic Welding.....	63
B. Friction Stir Welding (FSW)	68
C. Diffusion Bonding dan Explosion Welding.....	72
D. Aplikasi pada Industri Kedirgantaraan dan Otomotif	77
BAB V TEKNOLOGI PENGELASAN OTOMATIS DAN ROBOTIK	83
A. Sistem <i>Robot</i> Pengelasan	83
B. Sensor dan <i>Vision System</i> dalam Pengelasan.....	88
C. <i>Machine Learning</i> untuk Optimasi Las	93
D. Pengelasan Adaptif dan <i>Real-Time Control</i>	96

BAB VI MATERIAL MAJU DAN PENGELASAN ADAPTIF	101
A. Material Komposit dan Superalloy	101
B. Pengelasan untuk Material Nano dan <i>Smart Material</i>	106
C. Pengaruh Struktur Mikro Material terhadap Hasil Las	108
D. Penyesuaian Parameter untuk Material Spesifik.....	113
BAB VII PENGELASAN DALAM ADDITIVE MANUFACTURING.....	119
A. Konsep dan Proses Metal <i>Additive Manufacturing</i>	120
B. Laser Cladding dan Directed Energy Deposition	122
C. Integrasi Welding dengan 3D Printing.....	128
D. Tantangan dan Potensi Aplikatif	131
BAB VIII PENGENDALIAN MUTU DAN MONITORING PROSES LAS ..	139
A. Sensor Data dan Analisis Proses.....	139
B. Quality Control Berbasis Data.....	144
C. <i>Machine Learning</i> dalam Deteksi Cacat Las	148
D. Sistem Inspeksi Otomatis	151
BAB IX DESAIN DAN SIMULASI PROSES PENGELASAN	157
A. Perangkat Lunak Simulasi Pengelasan (ANSYS, SYSWELD) 157	
B. Analisis Tegangan, Distorsi dan Deformasi.....	164
C. Optimasi Desain Sambungan Las	172
D. Integrasi CAD/CAE untuk Proses Las	177
BAB X PENERAPAN TEKNOLOGI PENGELASAN DI INDUSTRI	183
A. Pengelasan di Industri Otomotif.....	183
B. Pengelasan di Industri Minyak dan Gas.....	186
C. Pengelasan di Industri Pelayaran dan Konstruksi	190
D. Studi Kasus Implementasi di Industri Modern.....	194
BAB XI ASPEK KESELAMATAN, LINGKUNGAN, DAN ENERGI.....	197
A. Manajemen Risiko dan Keselamatan Kerja.....	197
B. Pengelolaan Limbah dan Gas Hasil Las.....	202
C. Efisiensi Energi dalam Sistem Las.....	207
D. Pengelasan Ramah Lingkungan (<i>Green Welding</i>).....	209
BAB XII MANAJEMEN KEUANGAN DAN ANALISIS PENDIRIAN USAHA	
PENGELASAN	217
A. Konsep dan Perencanaan Bisnis Jasa Pengelasan	217

B.	Analisis Kelayakan Investasi (Modal Awal, ROI, dan <i>Break Even Point</i>).....	222
C.	Manajemen Keuangan, Operasional dan Sumber Daya Manusia.....	226
D.	Strategi Pemasaran dan Inovasi Layanan Jasa Pengelasan.....	234

BAB XIII INOVASI DAN ARAH MASA DEPAN TEKNOLOGI

	PENGELASAN	239
A.	Smart Welding System dan Internet of Things (IoT).....	239
B.	Integrasi Pengelasan dengan Industri 4.0 dan AI.....	245
C.	Arah Penelitian dan Tren Global.....	248
D.	Kompetensi dan SDM Pengelasan di Era Digital.....	252

BAB XIV KESIMPULAN.....	257
DAFTAR PUSTAKA.....	259
GLOSARIUM	269
INDEKS	271
BIOGRAFI PENULIS.....	277
SINOPSIS	279



BAB I

KONSEP DAN PRINSIP TEKNOLOGI PENGELASAN MODERN

Pengelasan modern merupakan bagian integral dari proses manufaktur yang berfokus pada penyambungan material logam maupun non-logam dengan presisi tinggi dan kualitas sambungan yang optimal. Teknologi ini telah berkembang jauh dari metode konvensional seperti SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) atau GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), menuju sistem canggih yang memanfaatkan energi tinggi, otomasi, dan integrasi digital. Konsep dasar pengelasan modern tidak hanya melibatkan pemanasan dan fusi material, tetapi juga pemahaman tentang fenomena fisik, mekanika, dan karakteristik material yang memengaruhi kualitas sambungan. Hal ini mencakup kontrol panas, transfer logam, tegangan sisa, distorsi, serta efek material di zona pengaruh panas (*heat affected zone*) yang dapat mempengaruhi kekuatan dan ketahanan sambungan.

Perkembangan teknologi pengelasan modern didorong oleh kebutuhan industri untuk efisiensi produksi, kualitas tinggi, dan fleksibilitas proses. Metode pengelasan berbasis energi tinggi seperti *Laser Beam Welding* (LBW) dan *Electron Beam Welding* (EBW), serta pengelasan non-tradisional seperti *Friction Stir Welding* (FSW) dan *Ultrasonic Welding*, memungkinkan sambungan presisi pada material sulit las, termasuk komposit, superalloy, dan *smart material*. Selain itu, integrasi sensor, sistem kontrol otomatis, dan analitik data memungkinkan proses pengelasan yang adaptif dan konsisten, mengurangi cacat, meminimalkan limbah, serta meningkatkan produktivitas.

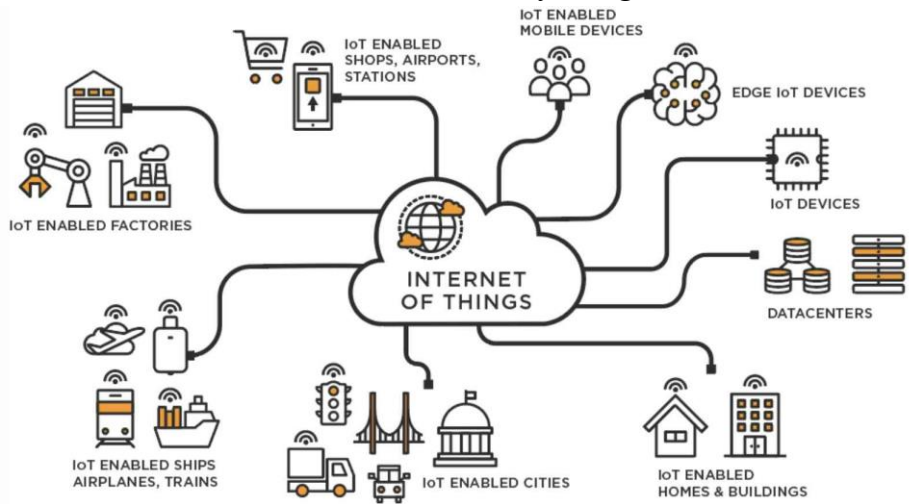
A. Definisi dan Lingkup Teknologi Pengelasan Modern

Teknologi pengelasan modern merupakan gabungan antara prinsip ilmu material, teknik manufaktur, kontrol panas, serta sistem otomasi untuk menghasilkan sambungan permanen antara dua material dengan kualitas tinggi, efisiensi optimal, dan keakuratan presisi. Dalam literatur teknik, pengelasan didefinisikan sebagai proses penyambungan material, terutama logam dan termoplastik, melalui pemanasan, tekanan, atau kombinasi keduanya sehingga terjadi difusi antar atom yang membentuk satu kesatuan struktural (Dwivedi, 2022). Pada konteks modern, definisi tersebut diperluas karena pengelasan tidak lagi terbatas pada penggabungan logam secara tradisional, tetapi telah mencakup penggunaan energi berteknologi tinggi seperti laser, elektron, gesekan (*friction*), getaran ultrasonik, serta otomasi berbasis Robotik dan kecerdasan buatan (AI).

Pengelasan modern juga mencakup metode fusi (*fusion welding*) dan *solid-state welding*. Pada metode fusi, material dipanaskan hingga titik lebur menggunakan sumber energi seperti busur listrik, laser, atau elektron. Sementara itu, *solid-state welding* menyatukan material tanpa meleburkan, melainkan melalui tekanan dan panas rendah, contohnya *Friction Stir Welding* (FSW) dan *Ultrasonic Welding* (Akinlabi & Mahamood, 2021). Kedua kategori ini berkembang bertahap seiring kemajuan teknologi material dan meningkatnya kebutuhan industri akan sambungan berkualitas tinggi pada struktur yang semakin kompleks.

Lingkup teknologi pengelasan modern jauh lebih luas dibanding metode tradisional. Jika dahulu proses pengelasan hanya mengandalkan sumber panas sederhana seperti gas oksiasetilena, listrik mesin arus bolak-balik, atau elektrode manual, saat ini pengelasan telah memasuki era manufaktur digital dan otomatisasi industri. Penggunaan inverter digital, kontrol sinergis, *Robot welding*, sensor *real-time monitoring*, kamera inframerah, sistem IoT (*Internet of Things*) berbasis data, hingga AI untuk memprediksi dan mengoreksi cacat sambungan telah menjadi bagian integral dalam teknologi pengelasan modern (Shevchik *et al.*, 2020).

Gambar 1. *Internet of Things*



Sumber: *Dicoding*

Seiring meningkatnya persyaratan teknis pada industri otomotif, aerospace, energi, dan konstruksi, definisi pengelasan modern juga berkembang. Beberapa parameter yang kini melekat dalam definisi teknologi pengelasan modern antara lain:

1. Efisiensi energi dan pengendalian panas: Sistem modern seperti *digital inverter*, *mode pulse* dan *double pulse*, serta kontrol arus adaptif dirancang untuk mengoptimalkan input panas sehingga distorsi, retak panas, dan cacat dapat diminimalkan.
2. Presisi tinggi berbasis teknologi laser, elektron, dan sensor: *Laser Beam Welding (LBW)* dan *Electron Beam Welding (EBW)* menawarkan pengendalian panas sangat presisi, penetrasi dalam, dan kualitas tinggi, sehingga populer untuk pengelasan komponen presisi seperti baterai EV, komponen pesawat, dan material berkekuatan tinggi.
3. Otomasi, robotik, dan kecerdasan buatan: *Modern welding* tidak lagi hanya pekerjaan manual, tetapi melibatkan *Robot 6-axis*, algoritma AI, vision system, dan digital twin untuk memastikan konsistensi pengelasan.
4. Pengelasan material baru dan dissimilar materials: Dengan berkembangnya material komposit, logam ringan, dan superalloy, pengelasan modern harus mampu menyambungkan material dengan sifat panas dan fisika berbeda.

5. Integrasi dengan konsep Industri 4.0 dan manufaktur digital: Teknologi modern mendukung data logging, monitoring kualitas, dan identifikasi cacat secara otomatis.

Dengan demikian, teknologi pengelasan modern dapat dipahami sebagai rangkaian teknik penggabungan material yang memanfaatkan energi dan teknologi canggih untuk menghasilkan sambungan berkualitas tinggi melalui kontrol panas presisi, otomasi, data digital, dan kecerdasan buatan. Teknologi pengelasan modern digunakan hampir di semua industri strategis global. Lingkup penggunaannya mencakup:

1. Industri Otomotif

Penerapan teknologi pengelasan modern dalam industri otomotif telah berkembang pesat seiring meningkatnya kebutuhan terhadap efisiensi produksi, presisi tinggi, dan kualitas sambungan yang konsisten. *Laser welding* banyak digunakan dalam pembuatan panel bodi karena mampu menghasilkan sambungan tipis, kuat, dan minim distorsi, sehingga cocok untuk material ringan seperti baja berkekuatan tinggi dan aluminium. Selain itu, *spot welding* tetap menjadi proses utama untuk penyambungan panel dan struktur chassis, terutama pada kendaraan berbahan baja. Proses ini mendukung produksi massal karena kecepatannya tinggi dan mudah diotomasi menggunakan sistem Robotik (Arnichand *et al.*, 2025).

Penggunaan *robotic MIG welding* semakin meluas untuk pembuatan rangka kendaraan, subframe, dan komponen struktural lainnya. Teknologi ini memberikan kendali stabil terhadap busur las, memungkinkan penetrasi yang konsisten, dan menurunkan risiko cacat. Untuk kendaraan listrik (EV), *Ultrasonic Welding* menjadi teknologi penting dalam perakitan modul baterai karena mampu menyambung material tipis seperti *foil aluminium* dan tembaga tanpa menghasilkan panas berlebih yang dapat merusak sel baterai. Kombinasi berbagai teknologi ini menjadikan proses produksi otomotif lebih cepat, aman, dan kompatibel dengan tuntutan kendaraan modern yang ringan dan efisien.

2. Industri Pesawat dan Aerospace

Penggunaan teknologi pengelasan modern di industri pesawat dan aerospace sangat penting karena sektor ini membutuhkan sambungan dengan presisi tinggi, kekuatan maksimal, serta ketahanan

terhadap suhu ekstrem. *Electron Beam Welding* (EBW) menjadi pilihan utama untuk pembuatan komponen turbin dan bagian mesin pesawat karena mampu menghasilkan penetrasi sangat dalam dengan distorsi minimal. Proses ini ideal untuk material berkekuatan tinggi seperti superalloy berbasis nikel yang digunakan pada bilah turbin, di mana kualitas sambungan harus memenuhi standar keselamatan yang ketat. Selain itu, pengelasan ini dilakukan dalam ruang hampa, sehingga sambungan terbebas dari kontaminasi dan cacat mikro (Zavadski, 2018).

Pada struktur badan pesawat, *Friction Stir Welding* (FSW) banyak digunakan karena mampu menyambung panel aluminium dengan kualitas tinggi tanpa melelehkan material. FSW menghasilkan sambungan yang lebih kuat dan tahan fatik dibanding metode fusi tradisional, sehingga meningkatkan keamanan dan umur pakai pesawat. Sementara itu, TIG welding sangat penting untuk penyambungan komponen titanium, yang banyak digunakan pada struktur pesawat karena ringan dan tahan korosi. TIG memberikan kontrol busur yang stabil dan kualitas sambungan yang halus, menjadikannya metode ideal untuk material sensitif di industri aerospace.

3. Industri Perkapalan

Industri perkapalan membutuhkan proses pengelasan yang mampu menangani material berukuran besar dan ketebalan tinggi, sehingga teknologi seperti *Flux-Cored Arc Welding* (FCAW) dan *Submerged Arc Welding* (SAW) menjadi pilihan utama. FCAW digunakan secara luas untuk penyambungan baja struktural tebal karena mampu menghasilkan deposit logam yang tinggi serta dapat digunakan pada lingkungan luar ruang dengan stabilitas busur yang baik. Sementara itu, SAW sangat ideal untuk pekerjaan panjang dan tebal pada konstruksi lambung kapal, sebab memberikan penetrasi dalam, tingkat pengisian besar, dan kualitas sambungan yang konsisten. Kedua teknik ini terbukti meningkatkan produktivitas fabrikasi kapal dan telah digunakan secara luas untuk baja berketebalan tinggi (Korzhyk *et al.*, 2021).

Industri perkapalan juga mulai mengadopsi *Robot track welding system*, yaitu *Robot* yang dapat bergerak mengikuti jalur pada panel atau blok kapal. Teknologi ini meningkatkan presisi, mengurangi variasi kualitas akibat operator, dan mempercepat proses fabrikasi

panel datar maupun panel melengkung. *Robot track* sangat efektif digunakan pada galangan besar yang menerapkan modular construction, di mana panel raksasa disambung secara berulang dengan pola yang seragam. Integrasi *Robotik* ini tidak hanya mempercepat pembangunan kapal, tetapi juga menurunkan biaya produksi dan meningkatkan keselamatan kerja di lingkungan galangan.

4. Industri Migas dan Petrokimia

Industri migas dan petrokimia menuntut kualitas sambungan yang sangat tinggi karena pipa dan peralatan operasional harus mampu menahan tekanan besar, suhu ekstrem, serta lingkungan korosif. *Submerged Arc Welding* (SAW) menjadi proses utama dalam pembuatan pipa baja berdiameter besar, seperti pipa transmisi minyak dan gas. SAW mampu menghasilkan sambungan dengan penetrasi mendalam, tingkat deposit tinggi, dan kualitas metalurgi yang konsisten, sehingga cocok untuk fabrikasi pipa spiral maupun longitudinal. Stabilitas proses yang tinggi meminimalkan risiko cacat, menjadikannya standar industri dalam produksi pipa baja berkualitas tinggi.

Untuk pengelasan pipa presisi dan instalasi di lapangan, terutama pada fasilitas pemrosesan dan kilang, *orbital welding* menjadi teknologi yang sangat penting. Proses ini memungkinkan pengelasan otomatis yang melingkar secara konsisten, sehingga menghasilkan sambungan bebas cacat dengan repetisi tinggi. *Orbital welding* sangat ideal untuk pipa stainless steel, titanium, dan material sensitif lainnya, di mana kontrol panas dan kualitas sambungan harus presisi ketat. Teknologi ini digunakan pada sistem perpipaan bertekanan tinggi, jalur proses kimia, dan instalasi LNG, serta telah terbukti meningkatkan keandalan sambungan dan mengurangi risiko kebocoran.

5. Industri Elektronik

Industri elektronik membutuhkan proses penyambungan yang presisi, cepat, dan bebas panas berlebih karena banyak komponen berskala mikro yang sensitif terhadap suhu tinggi. *Ultrasonic Welding* menjadi teknologi utama dalam penyambungan komponen elektronik, sensor, dan perangkat microelectronics. Proses ini bekerja dengan memanfaatkan getaran ultrasonik berfrekuensi tinggi untuk menggabungkan material tanpa melelehkannya, sehingga mencegah

kerusakan termal pada chip, sirkuit, dan bahan polimer. Keunggulan lain dari *Ultrasonic Welding* adalah waktu siklus yang sangat cepat, konsumsi energi rendah, dan kemampuan menghasilkan sambungan yang kuat dengan tingkat cacat minimal.

Pada produksi sensor, modul komunikasi, dan perangkat IoT, *Ultrasonic Welding* digunakan untuk menyambung material logam tipis seperti aluminium dan tembaga, serta komponen polimer yang menjadi casing atau housing perangkat. Teknologi ini juga penting untuk aplikasi microelectronics seperti penyambungan wire bonding, baterai kecil, dan komponen fleksibel yang tidak dapat dilas dengan metode termal konvensional. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa *Ultrasonic Welding* mampu meningkatkan keandalan sambungan dan integritas struktural perangkat elektronik berukuran mikro.

B. Evolusi dari Konvensional ke *Modern Welding*

Pengelasan sebagai teknologi penyambungan material telah mengalami transformasi signifikan sejak awal perkembangannya pada akhir abad ke-19 hingga era manufaktur digital saat ini. Evolusi ini tidak hanya ditandai oleh perubahan peralatan, tetapi juga transformasi paradigma, metode kerja, pendekatan metalurgi, otomasi, dan integrasi teknologi digital. Transisi dari pengelasan konvensional menuju pengelasan modern terjadi akibat kebutuhan industri global akan sambungan berkualitas tinggi, produksi massal, efisiensi energi, serta tuntutan material baru seperti aluminium, titanium, dan superalloys. Perubahan tersebut tercermin dalam perkembangan peralatan, metode kontrol panas, digitalisasi, hingga penggunaan teknologi cerdas seperti *Robotik* dan kecerdasan buatan.

1. Era Pengelasan Konvensional: Fondasi Teknologi Awal

Pengelasan konvensional melibatkan proses yang mengandalkan panas dari pembakaran gas atau busur listrik dasar untuk menyatukan logam. Metode seperti *Oxy-Acetylene Welding* (OAW), *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW), dan brazing merupakan tonggak awal perkembangan teknologi pengelasan. Metode konvensional memiliki karakteristik utama:

- a. Sumber panas sederhana dan terbatas, seperti api atau busur listrik dari elektroda terbungkus.

- b. Kontrol parameter manual, sehingga kualitas sangat bergantung pada skill welder.
- c. Rentan cacat seperti porositas, slag, undercut, dan distorsi.
- d. Kurangnya kontrol input panas yang presisi yang berdampak pada zona HAZ (*Heat-Affected Zone*) yang luas.
- e. Tidak kompatibel dengan material modern, seperti logam ringan dan paduan berteknologi tinggi.

Meskipun memiliki keterbatasan, teknologi konvensional menjadi dasar penting bagi perkembangan selanjutnya. SMAW misalnya, masih digunakan dalam konstruksi dan perbaikan karena fleksibilitasnya (Haque, 2023). Namun, metode ini tidak mampu memenuhi kebutuhan industri modern yang mengharuskan produksi massal, presisi tinggi, dan konsistensi kualitas.

2. Perkembangan Pengelasan Semi-Modern: MIG/MAG, TIG, dan SAW

Pada pertengahan abad ke-20, berbagai inovasi muncul untuk meningkatkan kualitas dan efisiensi pengelasan. Perkembangan ini melahirkan metode seperti:

- a. *Gas Metal Arc Welding* (GMAW/MIG-MAG),
- b. *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW/TIG),
- c. *Submerged Arc Welding* (SAW),
- d. *Flux Cored Arc Welding* (FCAW).

Teknologi semi-modern ini membawa beberapa kemajuan signifikan:

1) Pengendalian Panas Lebih Stabil

Perkembangan pengelasan semi-modern, seperti MIG/MAG (GMAW) dan TIG (GTAW), membawa kemampuan pengendalian panas yang lebih stabil dibanding metode konvensional. Penggunaan gas pelindung seperti argon, helium, atau campuran gas aktif memungkinkan busur las menghasilkan penetrasi yang konsisten sekaligus mencegah oksidasi pada logam cair. Hal ini penting untuk menjaga kualitas sambungan, terutama pada material sensitif seperti aluminium, stainless steel, dan baja berkekuatan tinggi.

- 2) **Kualitas Sambungan Meningkatkan**
Pengelasan semi-modern seperti TIG welding (GTAW) memungkinkan peningkatan signifikan pada kualitas sambungan karena menghasilkan las yang bersih, halus, dan presisi tinggi. Proses ini sangat cocok untuk material sensitif dan aplikasi kritis, termasuk industri pesawat terbang, aerospace, dan peralatan medis, di mana toleransi cacat sangat minim. TIG welding memberikan kontrol yang baik terhadap panas dan penetrasi, sehingga mengurangi distorsi dan retak pada sambungan. Penggunaan gas pelindung juga memastikan oksidasi minimal, meningkatkan integritas metalurgi, dan menghasilkan sambungan dengan kekuatan mekanik optimal serta permukaan estetika yang tinggi.
- 3) **Produktivitas Meningkatkan**
Pengelasan semi-modern, khususnya GMAW (MIG/MAG), memberikan peningkatan produktivitas yang signifikan dibandingkan metode konvensional seperti SMAW. Kecepatan pengelasan yang lebih tinggi memungkinkan penyelesaian sambungan dalam waktu lebih singkat, sehingga sangat efektif untuk produksi massal, terutama pada industri otomotif. Selain itu, penggunaan kawat las otomatis dan gas pelindung meminimalkan gangguan akibat pergantian elektroda dan oksidasi, sehingga proses berjalan lebih lancar.
- 4) **Fleksibilitas Material Meningkatkan**
Pengelasan semi-modern, termasuk MIG/MAG (GMAW), TIG (GTAW), dan SAW, menawarkan fleksibilitas tinggi dalam penanganan berbagai jenis material. Metode ini mampu digunakan pada aluminium, stainless steel, baja karbon, dan baja paduan, termasuk material dengan ketebalan dan sifat mekanik yang berbeda-beda. Gas pelindung dan kontrol panas yang presisi memungkinkan sambungan berkualitas tinggi tanpa distorsi signifikan atau oksidasi. Fleksibilitas ini menjadikan pengelasan semi-modern sangat cocok untuk berbagai industri, mulai dari otomotif, aerospace, hingga peralatan industri berat, di

mana kebutuhan material beragam dan kualitas sambungan harus tetap terjaga.

5) Pengembangan Fluks dan Elektroda Khusus

Pada pengelasan semi-modern, khususnya SAW (*Submerged Arc Welding*) dan FCAW (*Flux-Cored Arc Welding*), pengembangan fluks dan elektroda khusus menjadi kunci peningkatan kualitas sambungan. Material fluks dirancang untuk mengontrol aliran logam cair, melindungi las dari oksidasi, dan mengurangi cacat seperti porositas atau retak. Selain itu, formulasi fluks modern dapat meningkatkan penetrasi, stabilitas busur, dan kekuatan mekanik sambungan, sehingga hasil las lebih konsisten. Inovasi ini memungkinkan pengelasan baja tebal dan material paduan kompleks dengan performa tinggi, menjadikan SAW dan FCAW sangat efektif untuk industri berat, perkapalan, dan konstruksi struktural.

3. Transisi Menuju Pengelasan Modern: Teknologi Presisi Tinggi dan Material Baru

Memasuki abad ke-21, industri global mengalami pertumbuhan signifikan dalam teknologi material, terutama aluminium berteknologi tinggi, paduan nikel (superalloy), titanium, material komposit, dan struktur mikro berpresisi tinggi. Hal ini melahirkan tuntutan baru dalam dunia pengelasan. Proses konvensional dan semi-modern tidak lagi cukup untuk memenuhi standar kekuatan, keawetan, dan presisi bagi industri seperti aerospace, otomotif listrik, dan energi. Perkembangan teknologi modern didorong oleh beberapa faktor utama:

a. Kebutuhan Presisi Tinggi

Transisi menuju pengelasan modern dipicu oleh kebutuhan presisi tinggi dalam pembuatan komponen industri kritis, seperti aerospace, otomotif presisi, dan elektronik. Pengelasan komponen ini menuntut kontrol panas dalam skala mikron untuk mencegah distorsi, retak, atau perubahan sifat material. Metode konvensional tidak mampu memenuhi toleransi presisi tersebut, sehingga teknologi energi tinggi seperti *Laser Beam Welding* (LBW) dan *Electron Beam Welding* (EBW) menjadi solusi utama. Kedua metode ini memungkinkan pengelasan dengan penetrasi sangat dalam, sambungan halus, dan kontrol

distribusi panas yang presisi, sehingga kualitas sambungan memenuhi standar ketat industri modern

b. Inovasi Material Ringan dan Superalloy

Transisi menuju pengelasan modern juga didorong oleh inovasi material ringan dan superalloy yang menuntut metode khusus untuk menjaga integritas sambungan. Material seperti aluminium seri 6xxx dan 7xxx memiliki sifat mekanik yang tinggi namun sensitif terhadap panas, sehingga tidak optimal jika menggunakan pengelasan konvensional. Teknologi seperti *Friction Stir Welding* (FSW) dan *Laser Welding* menawarkan kontrol panas yang presisi, penetrasi homogen, serta distorsi minimal. Kedua metode ini memungkinkan pengelasan material ringan dan superalloy dengan sambungan yang kuat dan berkualitas tinggi, menjadikannya ideal untuk aplikasi aerospace, otomotif, dan industri transportasi modern yang mengutamakan efisiensi dan performa.

c. Kebutuhan Otomatisasi dan Efisiensi

Transisi menuju pengelasan modern juga dipicu oleh kebutuhan otomatisasi dan efisiensi dalam industri yang menuntut produksi cepat dan konsisten, seperti otomotif dan elektronik. Proses manual tidak mampu memenuhi kecepatan tinggi, presisi, dan repetisi yang dibutuhkan untuk manufaktur massal. Penggunaan robotik, sistem pengelasan otomatis, dan sensor cerdas memungkinkan kontrol parameter las secara real-time, mengurangi variasi kualitas, serta meningkatkan produktivitas. Dengan otomatisasi, sambungan dapat dihasilkan secara akurat dan efisien, mengurangi limbah, menekan biaya operasional, dan memastikan standar kualitas yang tinggi, sehingga mendukung tuntutan industri modern yang kompetitif dan berorientasi pada inovasi.

d. Digitalisasi Manufaktur

Transisi ke pengelasan modern juga melibatkan digitalisasi manufaktur, di mana teknologi pengelasan harus terintegrasi dengan sistem kontrol otomatis, robotik, dan monitoring berbasis sensor. Integrasi ini memungkinkan pengawasan proses secara real-time, pengaturan parameter las secara presisi, serta deteksi dini cacat sambungan. Dengan dukungan perangkat lunak dan sensor cerdas, proses pengelasan dapat dianalisis,

direplikasi, dan dioptimalkan secara konsisten, meningkatkan efisiensi produksi dan kualitas sambungan. Digitalisasi juga mendukung konektivitas antar mesin, integrasi dengan sistem manufaktur pintar, dan pengumpulan data untuk analitik prediktif, sehingga menjadi fondasi penting dalam manufaktur modern dan Industry 4.0 (Shevchik *et al.*, 2020).

4. Lompatan Teknologi Menuju Era Modern: Robotik, Laser, FSW, dan *Ultrasonic Welding*

Pengelasan modern ditandai oleh kehadiran berbagai metode berteknologi tinggi seperti:

a. *Laser Beam Welding* (LBW)

Laser Beam Welding (LBW) merupakan teknologi pengelasan modern dengan karakteristik utama berupa panas yang terlokalisasi dengan presisi tinggi. Panas yang terfokus memungkinkan penetrasi dalam pada material tipis maupun tebal tanpa mempengaruhi area sekitar, sehingga distorsi struktural dapat diminimalkan. Keunggulan ini menjadikan LBW sangat cocok untuk aplikasi yang membutuhkan sambungan presisi tinggi, seperti pada panel bodi otomotif, modul baterai kendaraan listrik, dan komponen elektronik yang sensitif terhadap panas. Proses ini juga mendukung pengelasan material ringan dan paduan kompleks yang sulit ditangani dengan metode konvensional (Arnichand *et al.*, 2025).

b. *Electron Beam Welding* (EBW)

Electron Beam Welding (EBW) adalah teknologi pengelasan modern yang dilakukan dalam ruang vakum, sehingga menghilangkan kontaminasi udara dan oksidasi pada logam cair. Penggunaan sinar elektron sebagai sumber panas memungkinkan penetrasi yang sangat dalam pada material tebal, sekaligus menghasilkan sambungan dengan cacat yang sangat minim. Karakteristik ini membuat EBW sangat ideal untuk aplikasi yang menuntut presisi tinggi dan integritas sambungan maksimum, termasuk komponen kritis pesawat, turbin, dan peralatan nuklir. Kontrol energi yang tepat memungkinkan penetrasi seragam dan sambungan dengan kualitas metalurgi superior, mendukung keamanan dan ketahanan struktur (Węglowski *et al.*, 2016).

c. *Friction Stir Welding* (FSW)

Friction Stir Welding (FSW) adalah teknologi pengelasan solid-state yang menyatukan material tanpa melelehkan logam dasar. Proses ini menggunakan pahat berputar yang menghasilkan panas akibat gesekan, sehingga logam menjadi plastis dan menyatu secara mekanis. Salah satu keunggulan utama FSW adalah distorsi yang sangat rendah, karena tidak ada zona leleh yang menyebabkan kontraksi atau perubahan bentuk. Selain itu, sambungan yang dihasilkan memiliki kekuatan tinggi, dengan struktur mikro yang homogen dan tahan terhadap retak. Keunggulan ini membuat FSW sangat cocok untuk material ringan seperti aluminium seri 2xxx, 6xxx, dan 7xxx yang banyak digunakan pada industri pesawat, kereta cepat, dan kapal (Akinlabi & Mahamood, 2021).

d. *Ultrasonic Welding* (USW)

Ultrasonic Welding (USW) adalah metode pengelasan modern yang memanfaatkan getaran ultrasonik frekuensi tinggi untuk menyatukan material logam tipis maupun plastik tanpa perlu melelehkan logam dasar. Proses ini bekerja dengan menghasilkan gesekan mikro pada permukaan sambungan, sehingga material menjadi plastis dan menyatu secara permanen. USW sangat cocok untuk aplikasi yang menuntut presisi tinggi dan sambungan bersih, seperti pada komponen elektronik, sensor, dan modul baterai kendaraan listrik. Keunggulan lain termasuk siklus pengelasan cepat, konsumsi energi rendah, dan minim cacat termal, sehingga metode ini menjadi pilihan utama untuk manufaktur modern di industri elektronik dan baterai.

5. Digitalisasi dan Automasi: Pondasi Pengelasan Industri 4.0

Pengelasan modern juga sangat dipengaruhi revolusi digital. Transformasi ini ditandai oleh:

a. *Robot Welding*

Robot welding merupakan tonggak penting dalam digitalisasi dan automasi pengelasan di era Industry 4.0. Dengan *Robot 6-axis*, proses pengelasan dapat dilakukan pada posisi dan sudut kompleks dengan akurasi tinggi dan kemampuan pengulangan yang konsisten, sehingga mengurangi variasi kualitas akibat

faktor manusia. *Robot* ini mendukung integrasi dengan sistem sensor, kontrol otomatis, dan perangkat lunak pemrograman untuk mengoptimalkan parameter las secara real-time. Keunggulan ini memungkinkan produksi massal yang cepat, efisien, dan presisi tinggi, menjadikan *Robot welding* sangat ideal untuk industri otomotif, aerospace, dan manufaktur modern yang menuntut kualitas sambungan tinggi dan produktivitas optimal (Gyasi *et al.*, 2017).

b. Sistem Monitoring dan Sensor

Sistem monitoring dan sensor menjadi elemen penting dalam digitalisasi pengelasan modern, memungkinkan pengawasan kualitas sambungan secara real-time. Berbagai sensor digunakan, termasuk sensor arus, tegangan, inframerah, dan kamera optik, untuk memantau parameter las, suhu, dan integritas sambungan. Data yang dikumpulkan dianalisis secara otomatis untuk mendeteksi cacat, variasi panas, atau distorsi yang mungkin terjadi selama proses. Integrasi sistem sensor dengan *Robotik* dan kontrol otomatis meningkatkan konsistensi, efisiensi, dan keamanan operasional.

c. IoT dan *Big Data*

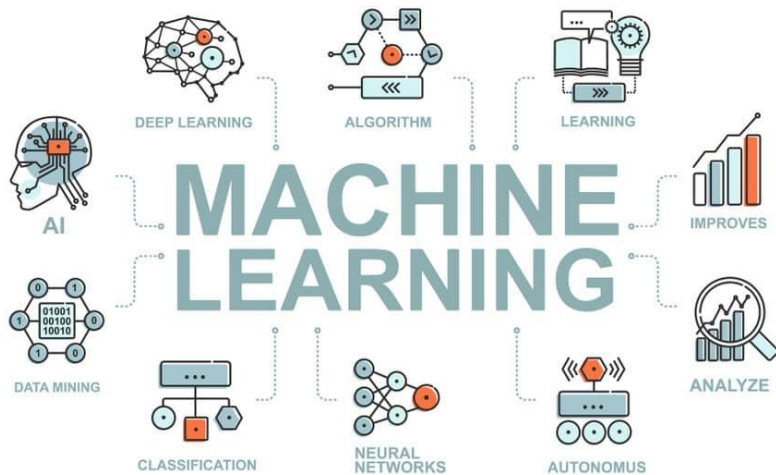
Di era pengelasan modern, *Internet of Things* (IoT) dan *big data* berperan penting dalam meningkatkan kualitas dan efisiensi proses. Setiap mesin las, sensor, dan *Robot* terhubung ke jaringan digital yang memungkinkan pengumpulan data secara kontinu, termasuk arus, tegangan, suhu, dan posisi las. Data ini kemudian dianalisis untuk menilai kualitas sambungan secara real-time, mendeteksi cacat, dan memastikan bahwa parameter las tetap berada dalam toleransi yang optimal. Pendekatan berbasis data ini memungkinkan proses pengelasan menjadi lebih prediktif dan terkontrol dibandingkan metode tradisional, mengurangi risiko kesalahan manusia dan variasi kualitas.

d. *Machine Learning* dan AI

Machine Learning dan *Artificial Intelligence* (AI) semakin diintegrasikan dalam pengelasan modern untuk meningkatkan kualitas, efisiensi, dan otomatisasi. Algoritma AI dapat mendeteksi cacat sambungan secara real-time dengan menganalisis data dari sensor, kamera, dan sistem monitoring lainnya. Dengan kemampuan ini, cacat seperti porositas, retak,

atau penetrasi tidak merata dapat diidentifikasi sebelum proses selesai, sehingga mengurangi limbah dan biaya perbaikan. AI juga memungkinkan pengaturan parameter las secara otomatis, menyesuaikan arus, kecepatan, atau intensitas energi sesuai kondisi material dan desain sambungan (Zhang *et al.*, 2019).

Gambar 2. *Machine Learning*



Sumber: *Codepolitan*

AI dan *Machine Learning* mendukung perencanaan jalur pengelasan untuk *Robot* dengan akurasi tinggi, memungkinkan *Robot* melakukan pengelasan pada sudut dan posisi kompleks secara konsisten. Integrasi ini meningkatkan efisiensi produksi, presisi sambungan, dan kecepatan proses, terutama di industri otomotif, aerospace, dan elektronik.

C. Karakteristik Sistem Pengelasan Canggih

Perkembangan teknologi manufaktur pada dua dekade terakhir telah mengubah arah sistem pengelasan dari teknik manual berbasis keahlian welder menjadi sistem teknis berpresisi tinggi yang didukung sensor, kecerdasan buatan, robotik, serta kendali termal dan struktural yang sangat kompleks. Sistem pengelasan canggih (*advanced welding systems*) tidak hanya mengutamakan kemampuan menyatukan logam, tetapi menghubungkan aspek metalurgi, otomasi, kontrol kualitas, dan

integrasi digital dalam satu platform terpadu. Karakteristik sistem pengelasan modern dapat dipahami melalui spesifikasi teknologi modernnya, seperti presisi panas, otomasi robotik, adaptabilitas terhadap material baru, digitalisasi proses, monitoring berbasis sensor, serta kemampuan menghasilkan kualitas sambungan tinggi dengan distorsi minimal. Karakteristik-karakteristik tersebut menjadi basis utama bagi industri otomotif, kedirgantaraan, energi, konstruksi presisi, dan manufaktur elektronik yang menuntut kecepatan, konsistensi, akurasi, dan efisiensi energi (Buang *et al.*, 2024).

1. Presisi Termal yang Tinggi (*High Thermal Precision*)

Salah satu karakteristik paling penting dari sistem pengelasan canggih adalah kemampuan untuk mengontrol input panas secara presisi. Sistem modern menggunakan sumber panas terfokus seperti laser, elektron, atau proses solid-state yang meminimalkan distorsi termal. Presisi panas merupakan faktor kritis karena memengaruhi:

- a. Ukuran zona HAZ (*Heat-Affected Zone*),
- b. Pembentukan mikrostruktur,
- c. Kekuatan sambungan,
- d. Retak panas,
- e. Deformasi produk akhir.

Teknologi seperti *Laser Beam Welding* (LBW) dan *Electron Beam Welding* (EBW) mampu menghasilkan rasio kedalaman terhadap lebar las yang sangat tinggi, sesuatu yang tidak dapat dicapai oleh pengelasan konvensional. LBW memberikan input panas minimal membuat sambungan lebih kuat dan stabil, sementara EBW mampu melakukan penetrasi sangat dalam pada lingkungan vakum, sehingga menghasilkan sambungan bebas porositas dan oksidasi. Pada *Friction Stir Welding* (FSW), presisi termal diperoleh bukan melalui pencairan logam, tetapi melalui proses solid-state yang hanya melembutkan material. Hal ini membuat FSW sangat cocok untuk logam sensitif panas seperti aluminium seri 7xxx dan paduan magnesium, di mana proses pengelasan fusi rentan menyebabkan cacat (Zeng *et al.*, 2019).

2. Otomasi Tingkat Tinggi dan Robotik

Sistem pengelasan canggih ditandai oleh penggunaan *Robot* industri, *CNC welding manipulators*, dan sistem otomatis yang mampu

mengendalikan posisi torch, kecepatan, parameter panas, serta kualitas sambungan. Otomasi ini ditopang oleh:

- a. *Robot 6-axis dan 7-axis*,
- b. Koordinasi multi-robot,
- c. *Path planning* berbasis algoritma,
- d. Sistem adaptif real-time.

Aplikasi *Robot welding* memberikan konsistensi kualitas jauh lebih tinggi dibandingkan operator manual, sekaligus meningkatkan kecepatan produksi hingga 300% pada industri otomotif.

Robot modern tidak hanya bergerak mengikuti jalur tetap, tetapi dilengkapi *real-time adaptive control* berbasis sensor visual dan sensor arc. Contohnya:

- 1) *vision-based seam tracking*,
- 2) *laser scanning*,
- 3) arc sensing untuk koreksi otomatis jalur pengelasan,
- 4) *AI-assisted adaptive welding*.

Aplikasi ini sangat penting dalam kegiatan pengelasan kompleks pada rangka kendaraan listrik, struktur pesawat, pipa minyak dan gas, dan komponen presisi tinggi lain.

3. Monitoring Real-Time dan Sensorik Canggih

Kemampuan monitoring merupakan ciri pembeda utama sistem pengelasan modern. Sensor digunakan untuk memantau parameter penting seperti:

- a. Arus dan tegangan,
- b. Suhu permukaan dan kedalaman penetrasi,
- c. Geometri bead,
- d. Kecepatan torch,
- e. Distorsi permukaan,
- f. Emisi cahaya arc dan plasma,
- g. Getaran dan akustik proses.

Sensor-sensor ini lalu terhubung ke sistem kontrol terpusat sehingga operator dapat menganalisis data secara real-time. Teknologi seperti thermography, optical coherence tomography, dan machine-vision-based inspection memungkinkan sistem secara otomatis mendeteksi:

- 1) Porositas,
- 2) Undercut,

- 3) Incomplete fusion,
- 4) Misalignment,
- 5) Kesalahan penetrasi.

4. Integrasi Digital: IoT, *Big Data*, dan Industri 4.0

Digitalisasi merupakan karakteristik struktural sistem pengelasan modern. Proses pengelasan kini terhubung secara langsung dengan sistem digital berbasis:

- a. *Internet of Things* (IoT),
- b. *Industrial Internet of Things* (IIoT),
- c. *Cloud computing*,
- d. *Big data analytics*,
- e. *Cyber-physical systems* (CPS).

Pengelasan di era Industri 4.0 bukan lagi proses fisik murni, tetapi juga proses berbasis data. Setiap proses pengelasan menghasilkan ribuan data parameter yang kemudian dianalisis untuk:

- 1) Mendeteksi pola cacat,
- 2) Melakukan pengendalian mutu otomatis,
- 3) Mengoptimalkan parameter untuk generasi sambungan berikutnya,
- 4) Memperpanjang umur peralatan.

5. *Machine Learning* (AI) dan *Machine Learning*

Salah satu karakteristik terpenting sistem pengelasan canggih adalah penggunaan kecerdasan buatan untuk:

- a. Pemodelan termal,
- b. Prediksi cacat struktural,
- c. Rekomendasi parameter otomatis,
- d. Analisis visual sambungan,
- e. Optimasi *Robot path*,
- f. *Adaptive welding control*.

Algoritma *convolutional neural networks* (CNN) telah digunakan untuk:

- 1) Klasifikasi cacat visual,
- 2) Pendeteksian seam,
- 3) Segmentasi area pengelasan.

AI juga digunakan untuk membangun model prediktif kualitas. Melalui *Machine Learning*, parameter seperti input panas, kecepatan,

dan pola aliran dapat diprediksi untuk menghasilkan sambungan optimal tanpa *trial-and-error* yang panjang (Breitenbach *et al.*, 2021).

6. Efisiensi Energi dan Ekologi Proses

Sistem pengelasan modern sangat memperhatikan konsumsi energi dan dampak lingkungan. Proses seperti *laser welding*, FSW, dan *cold metal transfer* (CMT) dirancang agar:

- a. Lebih hemat energi,
- b. Lebih cepat,
- c. Menghasilkan panas lebih sedikit,
- d. Mengurangi emisi CO₂,
- e. Meminimalkan pemakaian bahan habis seperti fluks dan elektroda.

Proses seperti CMT GMAW menghasilkan percikan (*spatter*) yang sangat rendah, sehingga:

- 1) Mengurangi limbah,
- 2) Meningkatkan kualitas permukaan,
- 3) Menurunkan biaya finishing.

Sistem-sistem ini juga didukung oleh teknologi *energy-saving inverter power sources* yang lebih efisien daripada *rectifier* lama (Korzhyk *et al.*, 2021).

7. Adaptabilitas Tinggi terhadap Material Baru

Sistem pengelasan modern dirancang agar kompatibel dengan material berteknologi tinggi yang tidak dapat dilas dengan metode konvensional. Material modern meliputi:

- aluminium 6xxx dan 7xxx,
- a. Superalloy berbasis nikel (*Inconel*),
 - b. Titanium dan paduannya,
 - c. Magnesium alloy,
 - d. Baja kekuatan tinggi (AHSS),
 - e. Material komposit logam.

Pengelasan ini membutuhkan:

- 1) Kontrol panas ketat,
- 2) Proses solid-state,
- 3) Energi terarah seperti laser.

Laser welding sangat cocok untuk baja AHSS pada industri otomotif, karena memberikan ketangguhan tinggi dan distorsi minimal.

Sementara itu, pengelasan titanium menggunakan EBW mengurangi kontaminasi oksigen yang dapat menyebabkan retak.

8. Kontrol Mikrostruktur dan Rekayasa Metalurgi

Sistem pengelasan canggih tidak hanya fokus pada penyambungan fisik, tetapi juga rekayasa mikrostruktur material. Teknologi modern memungkinkan:

- a. Pengaturan ukuran butir,
- b. Kontrol fasa,
- c. Stabilitas termal,
- d. Ketahanan retak,
- e. Peningkatan ketangguhan daerah HAZ.

Proses *digitalizing welding* memungkinkan visualisasi pola aliran cairan (*melt pool dynamics*) secara real-time. Ini membantu mengendalikan:

- 1) Porositas,
- 2) Segregasi elemen paduan,
- 3) Solidifikasi tidak merata.

FSW bahkan menghasilkan struktur mikro rekristalisasi halus yang meningkatkan kekuatan sambungan. Laser *Hybrid Welding* menghasilkan mikrostruktur yang lebih homogen pada baja sehingga memperbaiki toughness sambungan.

9. Fleksibilitas dan *Multi-Process Integration*

Sistem pengelasan canggih memiliki fleksibilitas tinggi, yang ditandai oleh:

- a. kemampuan melakukan multi-proses (GMAW, TIG, laser, FSW) dalam satu platform,
- b. switching parameter otomatis,
- c. adaptasi terhadap bentuk permukaan kompleks,
- d. integrasi simulasi CAD-CAM.

Industri modern menggunakan sistem hibrida seperti:

- 1) *Laser-GMAW hybrid welding*,
- 2) *TIG-MIG hybrid*,
- 3) *EBW-assisted FSW*.

Penggabungan sumber panas meningkatkan produktivitas dan penetrasi tanpa mengorbankan kualitas.

10. Standarisasi, Kualitas, dan Traceability Digital

Sistem pengelasan canggih sangat menekankan traceability (ketertelusuran). Setiap sambungan memiliki:

- a. Data parameter,
- b. Rekaman sensorik,
- c. Catatan inspeksi,
- d. Sertifikat kualitas.

Hal ini sesuai dengan standar internasional seperti ISO 3834 dan ISO 14731.

Industrialisasi modern mensyaratkan setiap sambungan memiliki identitas digital yang memudahkan:

- 1) Audit kualitas,
- 2) Maintenance prediktif,
- 3) Pelacakan ulang cacat.

D. Integrasi Teknologi Informasi dan Otomasi

Transformasi teknologi pengelasan dari metode manual ke sistem modern tidak hanya ditandai oleh perkembangan sumber energi, robotik, dan proses pengelasan presisi, tetapi juga oleh integrasi teknologi informasi (*information technology*) dan otomasi (*automation*). Integrasi ini mengubah pengelasan menjadi proses manufaktur digital yang mampu menghasilkan sambungan berkualitas tinggi secara konsisten, efisien, dan dapat dilacak (*traceable*). Konvergensi teknologi informasi dan otomasi dalam pengelasan dikenal sebagai *digital welding systems*, yang memungkinkan pengelasan berbasis data, pengendalian parameter secara real-time, pemantauan kualitas otomatis, serta prediksi cacat sambungan (Barot & Patel, 2021).

Pada konteks industri modern, terutama Industri 4.0, pengelasan tidak lagi sekadar operasi manual, melainkan proses yang terintegrasi dengan sensor, robot, IoT, cloud computing, dan AI. Hal ini memungkinkan pengelasan menjadi bagian dari sistem manufaktur cerdas, yang mendukung keputusan berbasis data, pengendalian kualitas otomatis, dan efisiensi proses tinggi (Zhang *et al.*, 2019).

1. Integrasi Teknologi Informasi dalam Pengelasan

Integrasi teknologi informasi mencakup penggunaan perangkat keras dan perangkat lunak untuk mengumpulkan, memproses, dan menganalisis data proses pengelasan. Fungsi utama integrasi TI dalam pengelasan modern meliputi:

- a. Pengumpulan Data Proses (*Data Acquisition*)
Sensor canggih, kamera, dan *arc monitors* digunakan untuk mengumpulkan data kritis seperti arus, tegangan, kecepatan torch, suhu melt pool, dan posisi seam. Data ini kemudian dikirim ke sistem kontrol pusat untuk dianalisis secara real-time.
- b. Pemantauan dan Analisis Real-Time (*Real-Time Monitoring and Analytics*)
Sensor yang terhubung dengan sistem TI memungkinkan operator atau *Robot* menyesuaikan parameter secara otomatis jika terjadi penyimpangan.
- c. Integrasi dengan Sistem Manufaktur Digital (*Digital Manufacturing Integration*)
Data pengelasan terhubung ke sistem CAD/CAM dan MES (*Manufacturing Execution System*), sehingga setiap sambungan dapat dirancang, diprogram, dan dimonitor secara digital. Hal ini mendukung *digital twin* dalam pengelasan, yaitu replika virtual proses yang memprediksi performa dan cacat sebelum pengelasan fisik dilakukan.
- d. Traceability dan Dokumentasi Otomatis
Setiap sambungan dapat dilacak secara digital dengan mencatat parameter pengelasan, sensor reading, dan inspeksi. Ini mendukung standar internasional seperti ISO 3834 dan ISO 14731. Dengan *traceability*, produksi massal tetap dapat mempertahankan kualitas konsisten.

2. Integrasi Otomasi dalam Pengelasan

Otomasi dalam pengelasan modern merujuk pada penggunaan robot, kontrol CNC, dan sistem closed-loop untuk mengatur proses pengelasan tanpa intervensi manual. Karakteristik utama otomasi mencakup:

- a. *Robotik* dan Manipulator Cerdas

Robot 6-axis dan 7-axis dapat menggerakkan torch dengan akurasi tinggi. Sistem ini dilengkapi kemampuan path planning, koreksi jalur otomatis, dan adaptive control berdasarkan data sensor.

b. *Sistem Kontrol Closed-Loop*

Closed-loop control menggunakan feedback dari sensor untuk menyesuaikan arus, tegangan, dan kecepatan pengelasan secara otomatis, menjaga kualitas sambungan meski terjadi perubahan kondisi material atau lingkungan.

c. *Pengendalian Parameter Adaptif (Adaptive Parameter Control)*

Parameter seperti arus, tegangan, dan kecepatan torch dapat diubah secara real-time berdasarkan kondisi melt pool atau seam tracking. Sistem adaptif ini mengurangi cacat dan distorsi.

d. *Multi-Robot Collaboration*

Pada pengelasan kompleks seperti rangka mobil atau panel kapal, beberapa *Robot* dapat bekerja secara simultan dengan koordinasi waktu nyata, meningkatkan produktivitas dan konsistensi.



BAB II

FISIKA DAN MEKANIKA

PROSES LAS MODERN

Proses pengelasan modern tidak hanya melibatkan penyambungan material, tetapi juga memerlukan pemahaman mendalam mengenai fisika dan mekanika yang mendasari pembentukan sambungan las. Fenomena seperti transfer logam, pembentukan arc plasma, dan aliran fluida logam cair menjadi faktor penentu kualitas dan kekuatan sambungan. Energi yang diaplikasikan melalui busur listrik, laser, atau electron beam mempengaruhi distribusi panas, penetrasi las, dan pembentukan zona pengaruh panas (*heat affected zone*). Pemahaman mengenai diferensial temperatur, konduksi panas, dan konveksi cairan logam menjadi krusial untuk mengontrol distorsi, tegangan sisa, dan potensi cacat sambungan, sehingga proses las dapat menghasilkan sambungan yang kuat, konsisten, dan efisien.

Dinamika panas dan pendinginan selama pengelasan berperan penting dalam menentukan mikrostruktur dan sifat mekanik material. Variasi laju pendinginan dapat memicu pembentukan fasa yang berbeda, seperti martensit atau bainit pada baja, yang akan memengaruhi kekerasan, keuletan, dan ketahanan korosi. Model mekanika tegangan sisa menjadi alat penting untuk memprediksi distorsi dan potensi kegagalan struktural. Penggunaan metode simulasi numerik memungkinkan insinyur untuk merancang parameter las yang optimal, meminimalkan cacat, dan memperkirakan deformasi material sebelum proses fisik dilakukan.

A. Fenomena Transfer Logam dan Arc Plasma

Proses pengelasan modern tidak hanya terkait dengan menyatukan logam secara mekanis, tetapi juga melibatkan fenomena

fisik kompleks, terutama transfer logam (*metal transfer*) dan perilaku arc plasma. Pemahaman mekanika dan fisika kedua fenomena ini sangat penting untuk pengendalian kualitas las, efisiensi energi, dan pengembangan proses pengelasan otomatis. Fenomena ini menjadi dasar untuk memahami bagaimana logam cair bergerak dari elektroda ke sambungan dan bagaimana plasma busur memengaruhi distribusi panas, pembentukan bead, penetrasi, dan distorsi (Katayama, 2021).

Arc plasma dan transfer logam merupakan interaksi multifisika yang melibatkan:

1. Elektrodinamika, yaitu interaksi medan listrik dan arus,
2. Termodinamika, termasuk konduksi, konveksi, dan radiasi panas,
3. Fluid dynamics, yaitu aliran logam cair dan gas pelindung,
4. Elektromagnetik, karena medan magnet yang dihasilkan arus pengelasan memengaruhi bentuk arc.

Fenomena ini berlaku pada berbagai proses modern, termasuk GMAW (MIG/MAG), GTAW (TIG), SAW, *laser hybrid welding*, dan bahkan pengelasan *solid-state* seperti *Friction Stir Welding* (FSW).

1. Transfer Logam dalam Pengelasan Arc

Transfer logam merupakan proses di mana logam cair dari elektroda bergerak ke kolam las (*weld pool*). Fenomena ini memengaruhi kualitas bead, penetrasi, spatter, dan efisiensi pengelasan. Dalam GMAW, transfer logam dibedakan menjadi beberapa tipe:

a. *Short-Circuiting Transfer*

Short-Circuiting Transfer merupakan salah satu jenis transfer logam pada pengelasan *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) di mana elektroda bersentuhan langsung dengan logam dasar. Saat kontak terjadi, arus listrik meningkat secara sesaat, sehingga logam elektroda meleleh dan terbentuk tetesan logam cair kecil yang berpindah ke sambungan. Karakteristik ini membuat *Short-Circuiting Transfer* ideal untuk pengelasan material tipis, karena panas yang dihasilkan relatif rendah dan distorsi pada logam dasar dapat diminimalkan. Proses ini juga memungkinkan pengendalian penetrasi yang baik dan sambungan yang halus pada komponen sensitif (Hashimoto *et al.*, 2020).

b. *Globular Transfer*

Globular Transfer adalah jenis transfer logam pada pengelasan GMAW di mana logam elektroda membentuk tetesan besar yang jatuh ke kolam las karena pengaruh gravitasi. Proses ini biasanya terjadi pada arus tinggi dan penggunaan elektroda berdiameter besar, sehingga ukuran tetesan cenderung lebih besar dibanding *Short-Circuiting Transfer*. Karakteristik ini memungkinkan pengelasan material tebal dengan kecepatan lebih tinggi, tetapi kurang cocok untuk sambungan tipis karena risiko distorsi meningkat. *Globular Transfer* sering digunakan pada aplikasi struktural di mana penetrasi diperlukan, namun presisi sambungan bukan prioritas utama (Ribeiro *et al.*, 2021).

c. *Spray Transfer*

Spray Transfer adalah jenis transfer logam pada pengelasan GMAW di mana logam elektroda terbentuk menjadi tetesan sangat halus yang teratomisasi dan diarahkan secara stabil ke kolam las oleh gaya elektromagnetik. Proses ini memerlukan arus tinggi serta penggunaan gas pelindung inert seperti argon untuk menjaga stabilitas busur dan mencegah oksidasi. Dengan tetesan yang halus dan konsisten, *Spray Transfer* menghasilkan penetrasi sambungan yang stabil dan permukaan bead yang halus, sehingga kualitas las lebih unggul dibanding *short-circuiting* atau *Globular Transfer*.

d. *Pulsed Spray Transfer*

Pulsed Spray Transfer adalah teknik pengelasan GMAW yang menggunakan pulsa arus listrik untuk mengontrol pembentukan dan perpindahan tetesan logam dari elektroda ke kolam las. Dengan mengatur pulsa arus secara presisi, metode ini menggabungkan keunggulan *Short-Circuiting Transfer* yang cocok untuk material tipis dan *Spray Transfer* yang memberikan penetrasi stabil dan permukaan bead halus. Pendekatan pulsa ini memungkinkan pengelasan dengan kontrol panas yang lebih baik, sehingga distorsi material minimal dan kualitas sambungan meningkat.

Mekanisme transfer logam dalam pengelasan GMAW dipengaruhi oleh interaksi beberapa gaya yang bekerja secara simultan dan dinamis. Salah satu gaya utama adalah gaya elektromagnetik (*Lorentz force*) yang mendorong tetesan logam cair dari elektroda

menuju kolam las, sehingga memungkinkan pengisian sambungan yang stabil. Gaya gravitasi juga berperan penting, terutama pada *Globular Transfer*, di mana tetesan logam besar jatuh ke kolam las akibat beratnya sendiri. Selain itu, tegangan permukaan (*surface tension*) memengaruhi ukuran dan bentuk tetesan logam, sedangkan gaya dari gas pelindung membantu menstabilkan busur dan mempertahankan bentuk tetesan selama transfer, sehingga mengurangi cacat dan percikan (Lippold, 2014).

2. Arc Plasma: Fenomena Fisik dan Mekanika

Arc plasma adalah ionisasi gas di antara elektroda dan kolam las yang membawa energi ke permukaan logam. Plasma ini memiliki suhu sangat tinggi (5.000–30.000 K) dan karakteristik elektromagnetik kompleks (Katayama, 2021). Arc plasma memiliki tiga daerah utama:

- a. *Arc column*: Bagian tengah plasma, suhu dan konduktivitas listrik tinggi, tempat transfer energi dominan ke logam.
- b. *Cathode spot*: Titik lepasnya elektron dari elektroda negatif.
- c. *Anode region*: Tempat masuknya elektron ke logam dasar, menyebabkan penetrasi dan pencairan logam.

Pada proses pengelasan berbasis plasma, plasma berfungsi sebagai media utama untuk membawa energi dari sumber panas ke logam dasar. Energi ini ditransfer melalui beberapa mekanisme utama, yaitu konduksi listrik, di mana arus listrik mengalir melalui plasma dan menghasilkan panas resistif; konveksi panas, yaitu perpindahan energi melalui aliran partikel bermuatan dalam plasma; serta radiasi elektromagnetik, yang memancarkan energi dalam bentuk gelombang elektromagnetik ke permukaan logam. Kombinasi mekanisme ini memungkinkan plasma untuk mencapai suhu yang sangat tinggi, sehingga dapat melelehkan logam dengan cepat dan presisi tinggi, menciptakan penetrasi dalam dan sambungan berkualitas.

Plasma juga memengaruhi stabilitas busur dan bentuk kolam las. Intensitas panas yang tinggi dan terkonsentrasi memungkinkan pengelasan material tebal maupun logam dengan konduktivitas rendah, seperti titanium dan stainless steel, tanpa distorsi signifikan. Disisi lain, plasma bertindak sebagai media energi yang membantu membentuk kolam las dengan ukuran dan bentuk yang terkendali, serta menentukan penetrasi sambungan sesuai kebutuhan material dan ketebalan. Melalui interaksi panas dan aliran partikel bermuatan,

plasma juga memengaruhi distribusi tetesan logam, memastikan penyebaran logam cair yang merata ke seluruh sambungan, sehingga meningkatkan kualitas dan kekuatan las.

Plasma menghasilkan arus ion dan medan elektromagnetik yang berkontribusi pada stabilitas busur las. Medan ini membantu menjaga konsistensi aliran energi dan arah tetesan logam, mengurangi spatter, dan meminimalkan cacat pada sambungan. Kombinasi kontrol panas, aliran logam, dan stabilitas busur membuat pengelasan plasma sangat cocok untuk aplikasi presisi tinggi, termasuk aerospace, industri nuklir, dan manufaktur komponen kritis, di mana kualitas sambungan dan penetrasi mendalam menjadi prioritas utama.

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi arc plasma:

1) Parameter Arus dan Tegangan

Parameter arus dan tegangan merupakan faktor kunci yang memengaruhi karakteristik arc plasma dalam pengelasan. Arus tinggi meningkatkan tingkat ionisasi dalam plasma, menghasilkan tetesan logam yang lebih halus dan stabil, seperti yang terlihat pada *Spray Transfer*, sehingga penetrasi sambungan menjadi lebih merata. Sementara itu, tegangan tinggi memperluas kolom busur (*Arc column*), memengaruhi distribusi panas, penetrasi logam, dan tingkat distorsi pada logam dasar. Penyesuaian arus dan tegangan secara tepat memungkinkan pengelasan yang efisien dan presisi, meminimalkan cacat sambungan, serta menjaga kualitas bead pada berbagai jenis material dan ketebalan.

2) Jenis Gas Pelindung

Jenis gas pelindung sangat menentukan stabilitas arc dan kualitas pengelasan. Gas inert seperti argon menghasilkan busur yang stabil dan halus, ideal untuk pengelasan TIG, serta meminimalkan oksidasi pada logam dasar. Sementara itu, campuran gas aktif seperti CO₂ atau O₂ yang digunakan pada MIG/MAG memengaruhi tingkat ionisasi, kecepatan transfer logam, dan penetrasi kolam las. Pemilihan gas yang tepat memungkinkan pengendalian bentuk dan ukuran tetesan, penetrasi sambungan, serta kualitas bead yang konsisten.

3) Jarak Elektroda-Kolam Las (*Arc Length*)

Jarak elektroda-ke-kolam las (*arc length*) merupakan faktor penting yang memengaruhi karakteristik busur dan kualitas sambungan. Jarak yang pendek meningkatkan arus lokal dan konsentrasi panas, menghasilkan penetrasi yang dalam namun risiko distorsi lebih tinggi pada logam dasar. Sebaliknya, jarak yang lebih panjang menyebarkan panas secara lebih merata, menghasilkan distorsi yang lebih rendah dan bead geometry yang lebih halus, tetapi penetrasi cenderung menurun. Pengaturan jarak arc yang tepat sangat krusial untuk menyeimbangkan penetrasi, distorsi, dan kualitas permukaan sambungan, khususnya pada material tipis dan sambungan presisi tinggi.

4) Diameter Elektroda dan Bentuk Ujung

Diameter elektroda dan bentuk ujungnya memengaruhi mekanisme transfer logam dan karakteristik busur dalam pengelasan. Elektroda tipis umumnya mendukung *Spray Transfer*, menghasilkan tetesan halus dan penetrasi stabil, sehingga cocok untuk pengelasan presisi tinggi pada industri otomotif dan aerospace. Sebaliknya, elektroda berdiameter besar cenderung menghasilkan *Globular Transfer*, dengan tetesan lebih besar yang jatuh ke kolam las oleh gravitasi, cocok untuk pengelasan material tebal atau sambungan struktural. Pemilihan elektroda yang tepat, termasuk bentuk ujung, menjadi kunci untuk mengontrol penetrasi, distorsi, dan kualitas bead, menyesuaikan metode pengelasan dengan jenis material dan ketebalan logam.

3. Interaksi Transfer Logam dan Arc Plasma

Interaksi antara transfer logam dan arc plasma merupakan fenomena kompleks yang mendasari proses pengelasan modern. Arc plasma memanaskan elektroda dan logam dasar secara simultan, sehingga tetesan logam terbentuk dan berpindah dari elektroda ke kolam las. Proses ini tidak bersifat satu arah, karena tetesan logam yang bergerak juga memengaruhi distribusi plasma, mengganggu ionisasi gas dan mengubah karakteristik busur. Hal ini menunjukkan adanya hubungan timbal balik antara plasma dan logam cair, di mana keduanya

saling memengaruhi penetrasi, bentuk kolam las, dan stabilitas busur (Gogulraj & Rajamurugan, 2025).

Lorentz force yang dihasilkan oleh arus plasma berperan penting dalam menentukan arah jatuhnya tetesan logam. Gaya elektromagnetik ini membantu menstabilkan aliran tetesan, meminimalkan spatter, dan menjaga konsistensi penetrasi sambungan. Interaksi plasma dan tetesan logam secara langsung memengaruhi kualitas bead, distorsi, dan kekuatan sambungan. Ketidakseimbangan dalam parameter arus, tegangan, atau gas pelindung dapat menimbulkan ketidakstabilan busur, spatter berlebih, atau penetrasi yang tidak konsisten, sehingga berdampak negatif pada sambungan akhir.

B. Dinamika Panas dan Pendinginan Las

Dinamika panas (*heat dynamics*) dan pendinginan (*cooling dynamics*) merupakan aspek kritis dalam pengelasan modern karena menentukan sifat mekanik sambungan, mikrostruktur logam, penetrasi, distorsi, dan ketahanan terhadap retak (*cracking*). Distribusi panas selama pengelasan bukan sekadar fungsi input energi, tetapi merupakan interaksi kompleks antara sumber panas, sifat termal material, geometri sambungan, dan kondisi lingkungan (Katayama, 2021).

1. Distribusi Panas dalam Proses Las

a. Sumber Panas dan Input Energi

Pada pengelasan modern, sumber panas menentukan cara energi ditransfer ke logam dasar:

- 1) *Arc Welding* (GMAW, GTAW, SAW): Energi disuplai oleh busur listrik yang membentuk plasma antara elektroda dan logam dasar. Suhu plasma mencapai 5.000–30.000 K, memanaskan logam dan menghasilkan penetrasi tertentu.
- 2) *Laser Beam Welding* (LBW) & *Electron Beam Welding* (EBW): Energi sangat terfokus dengan beam diameter kecil (<1 mm), menghasilkan rasio kedalaman terhadap lebar tinggi dan zona HAZ sempit. Distribusi panas ini sangat presisi, namun rentan terhadap perubahan ketebalan material.

- 3) *Friction Stir Welding* (FSW): Sumber panas berasal dari gesekan mekanis antara tool dan logam, memanaskan material secara *solid-state*. Panas lebih merata, dan risiko distorsi lebih rendah dibandingkan pengelasan fusi.
 - 4) *Hybrid Welding* (Laser + Arc): Kombinasi arc dan laser menghasilkan penetrasi tinggi dengan kontrol panas lebih baik dan zona HAZ lebih sempit.
- b. Konduksi, Konveksi, dan Radiasi
- Distribusi panas dalam proses pengelasan ditentukan oleh tiga mekanisme utama: konduksi, konveksi, dan radiasi. Konduksi merupakan perpindahan panas melalui material padat dari area yang lebih panas ke area yang lebih dingin. Mekanisme ini sangat efektif pada logam dengan konduktivitas tinggi seperti aluminium dan tembaga, yang memungkinkan panas menyebar lebih cepat dan memengaruhi penetrasi serta zona terpengaruh panas (*Heat-Affected Zone*). Konduksi membantu membentuk kolam las yang stabil dan meminimalkan gradien suhu ekstrem di sepanjang sambungan, sehingga mengurangi risiko retak atau distorsi (Lippold, 2014).

2. Zona Pengaruh Panas (*Heat-Affected Zone*, HAZ)

HAZ adalah area logam dasar yang terkena panas tanpa mencair, tetapi mengalami perubahan mikrostruktur. Dinamika panas menentukan lebar dan karakteristik HAZ:

- a. *Zona Austenitization*
Zona Austenitization merupakan bagian dari *Heat-Affected Zone* (HAZ) di sekitar sambungan las di mana suhu cukup tinggi untuk mengubah struktur mikro baja menjadi austenit. Pada baja karbon rendah hingga tinggi, pembentukan austenit ini memengaruhi sifat mekanik logam, termasuk kekuatan dan ketangguhan. Transformasi fase yang terjadi selama pemanasan dan pendinginan dapat menimbulkan perubahan mikrostruktur, seperti terbentuknya martensit atau perlit, yang berpengaruh pada sifat las dan daerah sekitar sambungan. Pemahaman *Zona Austenitization* sangat penting untuk mengendalikan distorsi, retak termal, dan kualitas sambungan pada berbagai aplikasi industri.

b. *Zona Transformasi Fasa*

Zona transformasi fasa pada *Heat-Affected Zone* (HAZ) mencerminkan perubahan mikrostruktur akibat panas las dan laju pendinginan material. Pada baja karbon tinggi, pendinginan yang cepat cenderung menghasilkan martensit, meningkatkan kekerasan tetapi juga meningkatkan risiko retak termal. Sebaliknya, pendinginan yang lebih lambat membentuk pearlite atau bainite, yang memberikan ketangguhan lebih baik namun penetrasi kekuatan sambungan relatif lebih rendah. Perubahan fasa ini sangat berpengaruh pada sifat mekanik sambungan dan logam sekitarnya, sehingga pemahaman dan pengendalian laju pendinginan menjadi kunci untuk mencegah cacat, mengoptimalkan kekuatan, dan menjaga keandalan sambungan las (Mahore *et al.*, 2017).

c. *Zona Panas Rendah (Subcritical Zone)*

Zona panas rendah (*Subcritical Zone*) pada *Heat-Affected Zone* (HAZ) merupakan area di sekitar sambungan las di mana suhu tidak cukup tinggi untuk membentuk fasa baru. Meskipun demikian, panas yang diterima tetap dapat menyebabkan perubahan mekanik minor, seperti rekristalisasi lokal atau pelunakan sebagian material. Perubahan ini biasanya tidak signifikan dalam hal struktur mikro, namun dapat memengaruhi sifat mekanik lokal, termasuk ketangguhan dan kekerasan. Pemahaman *Subcritical Zone* penting untuk mengendalikan distribusi tegangan sisa dan meminimalkan risiko cacat, terutama pada material sensitif seperti baja karbon tinggi atau baja paduan (Patil & Shelke, 2015).

3. Pendinginan Las dan Pengaruhnya terhadap Mikrostruktur

Pendinginan las mengontrol sifat mekanik akhir sambungan. Faktor yang memengaruhi pendinginan meliputi:

- a. Ketebalan material: material tebal lebih lambat mendingin, menghasilkan struktur kasar.
- b. Konduktivitas termal: aluminium dan tembaga mendingin lebih cepat dibanding baja.
- c. Kecepatan travel torch: pengelasan cepat mengurangi waktu pemanasan lokal, meminimalkan HAZ.

- d. Metode pendinginan: pendinginan alami vs. buatan, penggunaan heat sink, atau gas pendingin.

Cooling rate memengaruhi:

- 1) Ukuran butir dan fasa logam,
- 2) Ketangguhan, kekerasan, dan kekuatan tarik,
- 3) Kerentanan terhadap retak panas (*hot cracking*) dan retak dingin (*cold cracking*).

4. Teknik Pengendalian Panas dan Pendinginan

Untuk pengelasan presisi tinggi, pengendalian panas sangat penting. Beberapa teknik pengendalian panas meliputi:

a. *Pulsed Welding*

Pulsed Welding adalah teknik pengelasan yang menggunakan arus pulsa untuk mengatur input panas ke logam dasar. Dengan mengatur durasi dan frekuensi pulsa, panas yang diterima material dapat dikontrol secara presisi, sehingga penetrasi sambungan menjadi konsisten dan distorsi termal dapat diminimalkan. Metode ini sangat efektif pada pengelasan material tipis atau komponen presisi, di mana fluktuasi panas yang tinggi dapat menyebabkan deformasi, cacat, atau spatter berlebih.

b. *Interpass Temperature Control*

Interpass temperature control adalah teknik penting dalam pengelasan multi-pass yang bertujuan mengontrol suhu logam antara setiap pass las. Dengan mempertahankan suhu antar pass pada tingkat optimal, teknik ini mencegah pemanasan berlebih atau pendinginan terlalu cepat, yang dapat menyebabkan pembentukan fasa rapuh seperti martensit pada baja karbon tinggi. Pengendalian suhu antar pass juga membantu meminimalkan tegangan sisa, distorsi, dan risiko retak termal, sehingga meningkatkan kualitas dan keandalan sambungan las. Selama proses pengelasan berlangsung, logam las dan HAZ akan mengalami serangkaian siklus thermal berupa pemanasan sampai mencapai suhu maksimum dan diikuti dengan pendinginan. Panas yang terjadi akan mempengaruhi distribusi suhu, tegangan sisa (*residual stress*), dan distorsi (Amin, 2016).

c. *Heat Sink* dan *Backing Bars*

Heat sink dan *backing bars* merupakan metode efektif untuk mengendalikan distribusi panas selama proses pengelasan. Logam tambahan atau pelat pendukung ditempatkan di bawah atau sekitar area las untuk menyerap panas berlebih, sehingga kolam las mendingin lebih cepat dan distorsi termal dapat diminimalkan. Teknik ini sangat penting terutama pada material tipis atau sambungan kompleks yang rentan terhadap deformasi akibat ekspansi termal. Dengan menggunakan *heat sink*, panas yang seharusnya menyebabkan perubahan bentuk atau tegangan sisa dapat dialihkan, menjaga geometri dan integritas sambungan (Wang *et al.*, 2023).

d. *Active Cooling* dengan Gas atau Air

Active cooling adalah teknik pengendalian panas yang menggunakan aliran udara atau gas inert untuk mendinginkan area las secara lokal selama atau segera setelah pengelasan. Dengan meningkatkan laju pendinginan, metode ini memengaruhi transformasi fasa dan mikrostruktur material, memungkinkan operator menyesuaikan sifat mekanik sambungan sesuai kebutuhan. Misalnya, pendinginan lebih cepat dapat meningkatkan kekerasan permukaan, sedangkan pendinginan terkendali membantu mencegah pembentukan fasa rapuh seperti martensit. Teknik ini sangat bermanfaat pada pengelasan baja karbon tinggi, paduan aluminium, atau titanium, di mana kontrol pendinginan sangat memengaruhi kualitas sambungan (Ribeiro *et al.*, 2021).

C. Model Mekanika Tegangan Sisa

Tegangan sisa (*residual stress*) merupakan fenomena internal yang muncul pada logam setelah proses pengelasan. Tegangan ini timbul akibat ekspansi termal lokal yang tidak seragam selama pemanasan dan pendinginan, serta interaksi mekanik antara logam yang menyusut dan bagian yang belum atau sudah mendingin (Węglowski, 2018). Tegangan sisa memengaruhi kekuatan sambungan, deformasi, retak, dan umur fatigue struktur las. Oleh karena itu, pemodelan mekanika tegangan sisa sangat penting dalam pengelasan modern untuk mendesain sambungan yang aman, mengoptimalkan parameter pengelasan, dan mengintegrasikan proses otomatis atau robotik.

1. Asal Usul Tegangan Sisa pada Pengelasan

Tegangan sisa terbentuk karena interaksi antara beberapa fenomena fisik:

a. Ekspansi Termal Lokal

Ekspansi termal lokal merupakan salah satu penyebab utama terbentuknya tegangan sisa dalam proses pengelasan. Saat kolam las mencapai suhu tinggi, logam di area tersebut memuai lebih cepat dibandingkan logam di sekitarnya yang relatif lebih dingin. Perbedaan laju pemuaiian ini menciptakan ketegangan internal karena logam sekitarnya membatasi ekspansi logam panas. Akibatnya, terbentuk tegangan tarik pada permukaan dan tegangan tekan di bagian bawah sambungan, yang dapat memengaruhi integritas struktural dan ketahanan terhadap beban eksternal (Lippold, 2014).

b. Transformasi Fasa Logam

Transformasi fasa logam merupakan faktor penting yang menyebabkan tegangan sisa pada pengelasan, terutama pada baja karbon tinggi. Saat pendinginan dari suhu las tinggi, material mengalami perubahan fasa, misalnya dari austenit menjadi martensit. Transformasi ini disertai perubahan volume lokal karena martensit memiliki kepadatan berbeda dibandingkan austenit. Perubahan volume ini menimbulkan tegangan tambahan di sekitar zona pengaruh panas (*Heat-Affected Zone/HAZ*), yang bersifat termomekanik dan dapat memengaruhi integritas sambungan.

c. Interaksi Geometrik

Interaksi geometrik berperan penting dalam pembentukan tegangan sisa selama pengelasan. Bentuk geometri sambungan, posisi tumpuan material, dan kompleksitas desain memengaruhi jalur perpindahan panas dari kolam las ke logam sekitarnya. Area dengan massa logam lebih besar atau sambungan yang menahan pergerakan panas akan mengalami pendinginan lebih lambat, sedangkan area tipis mendingin lebih cepat. Perbedaan laju pendinginan ini menghasilkan tegangan internal yang tidak seragam, karena logam yang menyusut pada kecepatan berbeda mengalami hambatan dari bagian sekitarnya.

d. Pendinginan Tidak Seragam

Pendinginan tidak seragam adalah salah satu faktor utama terbentuknya tegangan sisa dalam proses pengelasan. Saat kolam las mulai mendingin, permukaan logam sering kali kehilangan panas lebih cepat dibandingkan inti material. Perbedaan laju pendinginan ini menciptakan gradien termal di sepanjang ketebalan material, sehingga bagian permukaan cenderung mengalami tegangan tarik sementara inti mengalami tegangan tekan. Gradien termal ini memicu distorsi dan deformasi sambungan, yang jika tidak dikontrol dapat mengurangi kekuatan struktural dan integritas sambungan las.

2. Karakteristik Tegangan Sisa

Tegangan sisa dapat dikategorikan berdasarkan arah, lokasi, dan tipe:

a. Arah Tegangan

- 1) Longitudinal stress: sejajar arah pengelasan.
- 2) Transversal stress: tegak lurus arah pengelasan.
- 3) Through-thickness stress: tegangan sepanjang ketebalan material.

b. Tipe Tegangan

- 1) Tegangan tarik: meningkatkan risiko retak, mengurangi ketahanan fatigue.
- 2) Tegangan tekan: dapat menutup retak, tetapi meningkatkan distorsi permukaan.

c. Distribusi Tegangan

- 1) Maksimum terjadi di permukaan dan dekat HAZ, menurun menuju inti logam.
- 2) Distribusi dipengaruhi oleh parameter pengelasan, geometri sambungan, dan pendinginan.

3. Model Mekanika Tegangan Sisa

Pemodelan tegangan sisa menggunakan pendekatan analitik, semi-analitik, dan numerik.

a. Model Analitik

Model analitik mendasarkan pada teori elastis dan termomekanik sederhana:

- 1) Teori Thermal Elastic-Plastic: Tegangan sisa dihitung dari distribusi suhu dan sifat termomekanik logam.

$$\sigma_{res} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

di mana E adalah modulus elastisitas, α sebagai koefisien ekspansi termal, dan ΔT sebagai perubahan temperatur (Kou, 2015).

- 2) Model Bi-Material/*Beam Theory*: Digunakan untuk sambungan tumpang tindih, memperkirakan tegangan longitudinal akibat ekspansi berbeda antara lapisan las dan logam dasar.

Keterbatasan model analitik: tidak akurat untuk geometri kompleks, material anisotropik, atau pengelasan multi-pass.

b. Model Semi-Analitik

Model semi-analitik merupakan pendekatan penting untuk memprediksi tegangan sisa pada pengelasan dengan menggabungkan prinsip teori elastis dan data eksperimen. Dalam metode ini, distribusi panas yang diukur secara eksperimental dan kurva pendinginan digunakan untuk menghitung tegangan yang muncul di sambungan las. Model ini mempertimbangkan efek gradien termal, ekspansi termal, dan transformasi fasa secara semi-kuantitatif, sehingga lebih realistis dibandingkan model analitik murni yang sering kali mengabaikan kompleksitas nyata dari proses pengelasan. Pendekatan ini memungkinkan prediksi lokasi kritis dan tegangan maksimum pada sambungan sederhana, memberikan informasi awal untuk desain sambungan yang lebih aman dan andal.

c. Model Numerik (FEM)

Finite Element Method adalah metode dominan untuk prediksi tegangan sisa dalam pengelasan modern:

1) Simulasi Termal

Simulasi termal menggunakan model numerik (FEM) merupakan tahap awal dalam analisis tegangan sisa pengelasan. Metode ini menghitung distribusi suhu tiga dimensi selama proses pengelasan dengan memperhitungkan berbagai faktor, seperti sumber panas las, konduktivitas termal, kapasitas panas spesifik material, dan

geometri sambungan. Dengan simulasi ini, insinyur dapat memprediksi perubahan suhu pada setiap titik material secara real-time, memahami zona pengaruh panas (HAZ), dan mengidentifikasi area dengan gradien termal tinggi yang berisiko mengalami tegangan sisa atau distorsi. Pendekatan FEM memberikan akurasi tinggi dibandingkan metode semi-analitik dan sangat berguna untuk material dan sambungan kompleks (Cho *et al.*, 2021).

2) Simulasi Termomekanik

Tegangan dihitung dengan memasukkan deformasi termal, plastisitas, dan interaksi fasa:

$$\sigma = f(T, \varepsilon_{thermal}, \varepsilon_{plastic})$$

Hasil FEM menunjukkan lokasi tegangan maksimum, arah tegangan, dan potensi retak.

3) Simulasi *Multi-Pass Welding*

Simulasi *multi-pass welding* menggunakan model numerik (FEM) memungkinkan analisis tegangan sisa pada sambungan yang dilas dalam beberapa lapisan atau proses *hybrid welding*. Dengan pendekatan ini, distribusi panas, efek penumpukan tegangan dari pass sebelumnya, dan interaksi kompleks antara material dapat diprediksi secara akurat. FEM juga mendukung simulasi *Robot welding* adaptif, di mana jalur las, arus, dan kecepatan pengelasan dapat diatur secara real-time. Pendekatan ini sangat penting untuk mengidentifikasi lokasi kritis tegangan maksimum, meminimalkan distorsi, dan mengoptimalkan parameter pengelasan dalam aplikasi industri modern yang menuntut presisi tinggi dan konsistensi sambungan).

4) Integrasi dengan Digital Twin dan AI

Integrasi model numerik (FEM) dengan digital twin dan AI menghadirkan pendekatan adaptif untuk prediksi tegangan sisa dalam pengelasan modern. Data sensor panas, deformasi, dan posisi real-time dari sistem *Robot* atau mesin las digunakan untuk memperbarui simulasi FEM secara kontinu, sehingga model mencerminkan kondisi aktual sambungan. Pendekatan ini memungkinkan prediksi tegangan sisa adaptif, optimasi jalur las, dan pengaturan

parameter pengelasan secara otomatis untuk meminimalkan distorsi (Moinuddin *et al.*, 2024).

D. Simulasi dan Prediksi Kualitas Las

Simulasi dan prediksi kualitas las merupakan aspek penting dalam pengelasan modern karena memungkinkan kontrol proses secara proaktif, optimasi parameter, dan pengurangan cacat. Dalam industri manufaktur presisi tinggi, seperti otomotif, aerospace, energi, dan elektronik, kualitas las tidak hanya ditentukan oleh sambungan mekanis, tetapi juga oleh distribusi panas, mikrostruktur, tegangan sisa, dan distorsi yang dihasilkan (Katayama, 2021).

Perkembangan teknologi simulasi berbasis komputer dan algoritma prediktif kini memungkinkan analisis multi-faktor secara real-time, termasuk distribusi suhu, transfer logam, tegangan sisa, distorsi, dan integritas mikrostruktur.

Simulasi kualitas las mempertimbangkan parameter kritis berikut:

1. Input Energi: Arus, tegangan, daya laser, atau energi gesekan menentukan ukuran kolam las dan penetrasi.
2. Distribusi Panas dan *Cooling Rate*: *Cooling rate* memengaruhi mikrostruktur, kekerasan, dan tegangan sisa.
3. Material dan Geometri: Konduktivitas termal, koefisien ekspansi, ketebalan, dan bentuk sambungan memengaruhi distribusi panas dan deformasi.
4. Teknik Pendinginan dan Heat Management: Backing bar, heat sink, preheating, atau gas pendingin memodifikasi profil suhu untuk mengurangi distorsi dan tegangan sisa.
5. Jenis Gas Pelindung dan Transfer Logam: Stabilitas arc dan bentuk tetesan memengaruhi bentuk bead dan kualitas sambungan.

a. Metode Simulasi Kualitas Las

Simulasi kualitas las menggabungkan mekanika panas, tegangan, *fluid dynamics*, dan transformasi mikrostruktur. Beberapa metode utama meliputi:

1) *Finite Element Method* (FEM)

Finite Element Method (FEM) telah menjadi metode dominan dalam simulasi kualitas las karena kemampuannya memodelkan fenomena kompleks dalam tiga dimensi

secara akurat. Pada simulasi termal, FEM menghitung distribusi suhu selama proses pengelasan, memprediksi kolam las, zona pengaruh panas (HAZ), dan laju pendinginan di setiap titik material. Informasi ini sangat penting untuk memahami perilaku material, perubahan mikrostruktur, dan risiko terbentuknya tegangan sisa atau distorsi. Dengan data distribusi panas, insinyur dapat merancang jalur las dan parameter pengelasan yang optimal untuk mencapai kualitas sambungan yang diinginkan (Ma *et al.*, 2020).

2) *Computational Fluid Dynamics (CFD)*

Computational Fluid Dynamics (CFD) menjadi alat penting dalam simulasi kualitas las karena kemampuannya memodelkan perilaku aliran logam cair dan interaksi kompleks dengan arc plasma. CFD memungkinkan prediksi bentuk bead, penetrasi kolam las, dan stabilitas arc dengan mempertimbangkan parameter arus, tegangan, geometri elektroda, dan sifat termofisik material. Dengan simulasi ini, insinyur dapat memahami bagaimana logam cair bergerak selama pengelasan, bagaimana panas didistribusikan, dan area mana yang berisiko mengalami ketidakseragaman atau cacat las.

3) *Multi-Physics Simulation*

Multi-Physics Simulation merupakan pendekatan canggih dalam simulasi kualitas las yang mengintegrasikan berbagai fenomena fisika secara simultan, termasuk termal, mekanik, elektromagnetik, dan *fluid dynamics*. Dengan menggabungkan semua aspek ini, simulasi dapat memprediksi interaksi kompleks antara kolam logam cair, arc plasma, dan medan elektromagnetik yang memengaruhi pembentukan bead, penetrasi, dan distribusi panas. Pendekatan ini memungkinkan insinyur untuk memahami bagaimana setiap parameter proses arus, tegangan, geometri elektroda, dan sifat material mempengaruhi hasil akhir pengelasan secara lebih realistis daripada metode tunggal (Ribeiro *et al.*, 2021).

4) Metode *Data-Driven* dan *Machine Learning*

Metode *Data-Driven* dan *Machine Learning* menjadi pendekatan modern dalam simulasi kualitas las dengan memanfaatkan data real-time dari sensor suhu, deformasi, dan tegangan untuk memprediksi cacat las dan karakteristik kualitas sambungan. Data yang dikumpulkan selama proses pengelasan dianalisis menggunakan algoritma *Machine Learning* untuk mengidentifikasi pola yang berhubungan dengan cacat seperti pori, retak, spatter, atau distorsi. Pendekatan ini memungkinkan prediksi yang lebih cepat dan adaptif dibandingkan metode fisika murni, serta mendukung pengambilan keputusan secara real-time dalam pengelasan otomatis atau *Robotik* (Gogulraj & Rajamurugan, 2025).

b. Prediksi Cacat dan Kualitas Mikrostruktur

Simulasi dapat memprediksi berbagai cacat las dan karakteristik mikrostruktur:

1) Porositas

Porositas merupakan salah satu cacat umum dalam proses pengelasan yang dapat menurunkan kekuatan sambungan dan integritas struktural. Porositas biasanya terjadi ketika gas terperangkap di dalam logam cair sebelum mengeras menjadi kolam las. Dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD), aliran logam cair dan perilaku gas dalam kolam las dapat dimodelkan secara detail untuk mengidentifikasi area berisiko terbentuknya pori. CFD memungkinkan visualisasi distribusi tekanan dan kecepatan aliran gas, sehingga faktor-faktor seperti turbulensi, geometri sambungan, dan laju pengelasan dapat dianalisis untuk meminimalkan porositas.

2) Retak Panas dan *Cold Cracking*

Retak panas dan *cold cracking* merupakan masalah kritis dalam pengelasan, terutama pada baja karbon tinggi, paduan nikel, dan superalloy. Retak panas biasanya terjadi selama pendinginan awal ketika logam masih dalam keadaan plastis tinggi dan tegangan tarik melebihi batas kekuatan material, sedangkan *cold cracking* muncul beberapa jam hingga hari setelah pengelasan akibat

tegangan sisa dan hidrida terbentuk di HAZ (Leggatt, 2008). Untuk memprediksi potensi retak, metode *Finite Element Method* (FEM) termomekanik digunakan, mengintegrasikan distribusi suhu, laju pendinginan, dan sifat elastis-plastik material. FEM memungkinkan visualisasi area dengan tegangan tarik maksimum dan lokasi kritis yang rentan terhadap retak, sehingga langkah mitigasi seperti pra-pemanasan atau pengendalian interpass temperature dapat diterapkan sebelum pengelasan dilakukan.

3) *Undercut* dan *Lack-of-Fusion*

Undercut dan *lack-of-fusion* merupakan cacat umum dalam pengelasan yang secara signifikan menurunkan kekuatan sambungan. *Undercut* terjadi ketika logam dasar meleleh terlalu banyak di sepanjang tepi las tetapi tidak diisi dengan logam pengisi, membentuk alur yang melemahkan sambungan. *Lack-of-fusion* muncul ketika logam pengisi gagal menyatu dengan logam dasar atau antar lapisan, meninggalkan area tanpa ikatan. Kedua cacat ini biasanya muncul akibat parameter pengelasan yang tidak optimal, seperti arus terlalu rendah, kecepatan pengelasan terlalu tinggi, atau sudut torch yang kurang tepat (Haghshenas, 2020).

4) Mikrostruktur Akhir

Mikrostruktur akhir dari sambungan las sangat bergantung pada siklus termal yang dialami material selama proses pengelasan, termasuk laju pemanasan, suhu puncak, dan laju pendinginan. Simulasi *thermal cycle* memungkinkan prediksi distribusi suhu 3D di sepanjang kolam las dan zona pengaruh panas (HAZ), sehingga perilaku fasa seperti pembentukan martensit, bainit, atau pearlite pada baja karbon dapat dianalisis secara akurat. Pendinginan cepat cenderung membentuk martensit yang keras namun rapuh, sedangkan pendinginan lambat menghasilkan pearlite atau bainit yang lebih ductile. Untuk material non-ferrous seperti aluminium dan titanium, simulasi juga dapat memperkirakan rekristalisasi atau pembentukan fasa

intermetalik yang memengaruhi kekuatan, ketangguhan, dan distorsi sambungan (Węglowski *et al.*, 2016).



BAB III

PROSES PENGELASAN

BERBASIS ENERGI TINGGI

Pengelasan berbasis energi tinggi merupakan salah satu kemajuan signifikan dalam teknologi pengelasan modern, yang memungkinkan pencapaian penetrasi las tinggi, presisi sambungan, dan kualitas sambungan yang superior. Proses ini mencakup metode seperti *Laser Beam Welding* (LBW), *Electron Beam Welding* (EBW), dan *Plasma Arc Welding* (PAW), yang memanfaatkan sumber energi terkonsentrasi untuk melelehkan material secara lokal. Keunggulan utama metode ini adalah kemampuan untuk menyambung logam tipis maupun tebal dengan *heat affected zone* (HAZ) yang minimal, sehingga mengurangi distorsi dan tegangan sisa pada komponen yang dilas.

LBW, EBW, dan PAW masing-masing memiliki karakteristik unik. LBW menggunakan energi laser untuk menghasilkan penetrasi presisi tinggi dan kontrol panas yang akurat, ideal untuk industri aerospace dan otomotif. EBW memanfaatkan berkas elektron di ruang hampa untuk menciptakan sambungan berkualitas sangat tinggi pada material superalloy dan titanium. Sementara PAW menggunakan plasma ionisasi untuk memberikan energi tinggi pada area yang terbatas, memungkinkan pengelasan logam tipis dan komponen presisi. Pemilihan metode yang tepat bergantung pada karakteristik material, ketebalan, geometri sambungan, serta tujuan produksi.

A. Laser Beam Welding (LBW)

Laser Beam Welding (LBW) adalah teknologi pengelasan berbasis energi tinggi yang memanfaatkan sinar laser terfokus untuk melelehkan material lokal, membentuk sambungan logam dengan

presisi tinggi, penetrasi dalam, dan zona pengaruh panas (*Heat-Affected Zone/HAZ*) yang sempit (Węglowski *et al.*, 2016). LBW menjadi salah satu proses kunci dalam manufaktur modern, terutama pada industri otomotif, aerospace, energi, dan elektronik, karena memungkinkan pengelasan material tipis, material paduan kompleks, dan sambungan multi-layer tanpa distorsi berlebihan.

1. Prinsip Kerja *Laser Beam Welding*

LBW bekerja dengan memfokuskan sinar laser pada permukaan material, menghasilkan kolam las lokal (*weld pool*) dengan temperatur sangat tinggi (≥ 3.000 K). Proses ini dapat diklasifikasikan menjadi dua mode:

a. *Conduction Mode*

Prinsip kerja *conduction mode* pada *Laser Beam Welding* (LBW) didasarkan pada penyerapan energi laser oleh permukaan material, yang menyebabkan lapisan tipis logam mencair. Dalam mode ini, panas terutama mengalir melalui konduksi dari permukaan yang terkena laser ke logam di bawahnya, sehingga hanya terbentuk kolam las dangkal dan zona pengaruh panas (HAZ) yang sempit. Karena penetrasi terbatas, metode ini ideal untuk material tipis di bawah 3 mm, di mana kontrol panas yang presisi sangat penting untuk mencegah distorsi atau kerusakan termal pada komponen.

b. *Keyhole Mode*

Pada *keyhole mode* dalam *Laser Beam Welding* (LBW), energi laser yang tinggi menyebabkan logam permukaan cepat menguap, membentuk rongga uap atau *keyhole* di kolam las. Rongga ini memungkinkan energi laser menembus lebih dalam ke material, menciptakan penetrasi yang jauh lebih besar dibanding *conduction mode*. Mekanisme ini efektif untuk pengelasan material tebal, karena panas tidak hanya terbatas pada permukaan, tetapi diteruskan ke kedalaman kolam las melalui *keyhole*, sehingga menghasilkan sambungan yang kuat dan seragam hingga beberapa puluh milimeter.

2. Karakteristik Proses LBW

a. Sumber Energi dan Mode Laser

Laser Beam Welding (LBW) memanfaatkan berbagai sumber energi laser yang memiliki karakteristik berbeda sesuai kebutuhan aplikasi. CO₂ laser dengan panjang gelombang 10,6 µm terkenal memiliki penetrasi tinggi dan banyak digunakan untuk pengelasan baja karbon maupun baja tahan karat. Sementara itu, Nd:YAG laser (1,064 µm) lebih fleksibel untuk pengelasan presisi dan area yang sulit dijangkau. Teknologi terbaru, yaitu fiber laser (1,070–1,080 µm), menawarkan efisiensi tinggi, presisi optimal, penetrasi dalam, serta kompatibilitas yang baik dengan otomatisasi industri modern, sehingga menjadikannya pilihan utama di sektor otomotif, aerospace, dan manufaktur berat (Katayama, 2021).

b. Kecepatan dan Penetrasi

Laser Beam Welding (LBW) memiliki kemampuan travel speed yang tinggi, berkisar antara 0,5 hingga 5 m/menit, tergantung jenis material dan sumber laser yang digunakan. Keunggulan ini memungkinkan produksi sambungan cepat tanpa mengorbankan kualitas, sehingga sangat cocok untuk aplikasi industri yang menuntut efisiensi tinggi, seperti otomotif dan aerospace. Penetrasi yang dalam dapat dicapai dengan pengaturan fokus laser yang tepat, memungkinkan pembuatan sambungan multi-layer dan material tebal dengan presisi tinggi.

c. Zona Pengaruh Panas (HAZ)

Laser Beam Welding (LBW) menghasilkan Zona Pengaruh Panas (HAZ) yang relatif sempit karena energi laser sangat terfokus dan penetrasi terjadi dengan cepat. Karakteristik ini berbeda dengan metode pengelasan konvensional, di mana HAZ cenderung lebih luas akibat penyebaran panas yang lambat. HAZ yang sempit pada LBW memungkinkan minimisasi perubahan mikrostruktur di sekitar sambungan, sehingga sifat mekanik material tetap terjaga. Hal ini penting terutama untuk material presisi tinggi seperti aluminium aerospace atau baja tahan karat, di mana perubahan mikrostruktur dapat menurunkan ketangguhan dan kekuatan sambungan.

3. Parameter Kunci LBW

- a. Daya Laser (*Laser Power*)
 - 1) Menentukan penetrasi dan ukuran kolom las.
 - 2) Daya tinggi → penetrasi dalam, risiko spatter meningkat.
- b. Fokus Sinar (Focus Position & Spot Size)
 - 1) Fokus tepat pada permukaan → penetrasi optimal dan bead halus.
 - 2) Spot besar → penetrasi menurun, bead lebih lebar.
- c. Kecepatan Travel
 - 1) Kecepatan rendah → penetrasi lebih dalam, risiko HAZ lebih lebar.
 - 2) Kecepatan tinggi → penetrasi terbatas, HAZ sempit, risiko lack-of-fusion.

d. Gas Pelindung

Pada proses *Laser Beam Welding* (LBW), gas pelindung berperan penting untuk menjaga kualitas sambungan. Gas seperti argon, helium, atau campuran keduanya digunakan untuk melindungi kolom las dari oksidasi, sehingga logam cair tidak bereaksi dengan oksigen atau nitrogen di udara. Selain itu, gas pelindung berfungsi untuk memodifikasi bentuk bead dengan memengaruhi aliran logam cair dan stabilitas keyhole, sehingga penetrasi tetap konsisten dan cacat seperti porositas dapat diminimalkan. Pemilihan jenis dan aliran gas yang tepat sangat menentukan kualitas hasil las, terutama pada material sensitif seperti aluminium, titanium, atau stainless steel.

e. Material dan Geometri Sambungan

Pada *Laser Beam Welding* (LBW), material dan geometri sambungan menjadi parameter kunci yang memengaruhi distribusi panas dan penetrasi las. Tebal atau tipisnya material menentukan jumlah energi yang diperlukan untuk melelehkan logam, sedangkan sifat reflektif permukaan, seperti pada aluminium atau tembaga, memengaruhi seberapa besar energi laser diserap. Konduktivitas termal material juga memengaruhi penyebaran panas, sehingga material dengan konduktivitas tinggi membutuhkan pengaturan kecepatan dan fokus laser khusus. Selain itu, geometri sambungan, termasuk sudut dan jarak antar panel, menentukan formasi kolom las dan kestabilan

keyhole, sehingga penyesuaian parameter ini esensial untuk hasil las berkualitas.

B. Electron Beam Welding (EBW)

Electron Beam Welding (EBW) adalah teknologi pengelasan berbasis energi tinggi yang menggunakan berkas elektron terfokus untuk melelehkan material lokal pada tekanan rendah (*vacuum*) atau dalam kondisi terkendali. Proses ini dikenal dengan penetrasi dalam, presisi tinggi, dan HAZ (*Heat-Affected Zone*) yang sempit, sehingga sangat ideal untuk aplikasi industri kritis seperti aerospace, energi nuklir, pembuatan turbin gas, dan manufaktur komponen presisi tinggi.

EBW berbeda dari *Laser Beam Welding* (LBW) karena menggunakan elektron bermuatan yang diarahkan oleh medan magnet untuk membentuk kolam las. Sinar elektron membawa energi kinetik yang dikonversi menjadi panas saat menumbuk permukaan logam, menghasilkan penetrasi mendalam tanpa kontak fisik (Węglowski, 2018). Teknologi ini memungkinkan pengelasan logam tebal hingga beberapa puluh milimeter dengan kualitas sambungan tinggi dan distorsi minimal.

1. Prinsip Kerja *Electron Beam Welding*

Proses EBW bekerja dengan prinsip dasar berikut:

a. Emisi Elektron

Pada *Electron Beam Welding* (EBW), prinsip dasar emisi elektron sangat penting untuk menghasilkan energi yang terkonsentrasi. Sumber elektron berasal dari cathode yang dipanaskan melalui proses *thermionic emission*, di mana pemanasan menyebabkan elektron lepas dari permukaan logam. Alternatifnya, *field emission* dapat digunakan, di mana medan listrik kuat memaksa elektron keluar dari permukaan cathode. Elektron-elektron yang dilepaskan ini kemudian dipercepat oleh tegangan tinggi menuju material kerja, membentuk beam energi tinggi yang mampu menembus logam dengan presisi. Kualitas dan stabilitas emisi elektron menentukan penetrasi, lebar kolam las, dan konsistensi sambungan.

b. Akselerasi Elektron

Pada proses *Electron Beam Welding* (EBW), akselerasi elektron merupakan tahap kritis untuk menghasilkan penetrasi yang dalam dan presisi tinggi. Elektron yang dilepaskan dari cathode dipercepat oleh tegangan tinggi berkisar antara 50 hingga 200 kV menuju permukaan logam yang akan dilas. Tegangan tinggi ini meningkatkan energi kinetik elektron, sehingga saat mengenai permukaan logam, energi kinetik tersebut diubah menjadi panas yang sangat terkonsentrasi. Panas tinggi ini mampu melelehkan logam lokal dengan cepat, membentuk kolom las sempit dan dalam dengan *Heat-Affected Zone* (HAZ) minimal. Kontrol akselerasi elektron sangat menentukan stabilitas beam dan kualitas sambungan.

c. Fokus dan Kontrol Beam

Pada *Electron Beam Welding* (EBW), fokus dan kontrol berkas elektron menjadi aspek kunci untuk mencapai kualitas las yang tinggi. Medan magnet digunakan untuk memfokuskan berkas elektron hingga mencapai diameter sangat kecil, sekitar 0,1 hingga 1 mm, sehingga energi beam terkonsentrasi pada area las yang terbatas. Kepadatan energi yang tinggi ini memungkinkan logam dasar meleleh secara cepat, membentuk kolom las lokal dengan penetrasi dalam dan HAZ yang minimal. Pengaturan fokus dan posisi beam secara presisi juga memastikan stabilitas proses, mengurangi cacat seperti porositas, undercut, atau distorsi, serta mendukung pengelasan komponen kompleks dalam industri pesawat dan aerospace.

d. Penetrasi dan *Keyhole Formation*

Pada *Electron Beam Welding* (EBW), energi tinggi yang terkonsentrasi pada titik fokus menyebabkan terbentuknya kolom logam cair dalam mode *keyhole*, di mana sinar elektron menembus logam dan membentuk rongga uap yang dalam. Fenomena ini memungkinkan penetrasi yang sangat dalam sekaligus menjaga zona pengaruh panas (HAZ) tetap sempit, sehingga perubahan mikrostruktur di sekitar sambungan minimal dan distorsi struktural dapat dikontrol dengan baik. Mode *keyhole* juga meningkatkan efisiensi pengelasan untuk material tebal dan sambungan multi-layer, menjadikannya

pilihan ideal untuk komponen kritis di industri aerospace, nuklir, dan permesinan presisi tinggi (Katayama, 2021).

e. Pendinginan dan Mikrostruktur

Pada *Electron Beam Welding* (EBW), setelah pembentukan kolam las dalam mode keyhole, logam cair mendingin dengan sangat cepat karena konduksi panas ke logam dasar yang dingin dan lingkungan vakum yang terbatas. Pendinginan cepat ini menghasilkan mikrostruktur halus, meningkatkan kekuatan sambungan dan ketahanan terhadap retak termal. Selain itu, laju pendinginan yang tinggi membantu meminimalkan tegangan sisa dan distorsi, menjaga presisi dimensi komponen, terutama pada sambungan tebal atau bagian yang kompleks. Kombinasi penetrasi mendalam, HAZ sempit, dan mikrostruktur halus menjadikan EBW sangat efektif untuk aplikasi kritis di industri aerospace, nuklir, dan permesinan presisi tinggi.

2. Karakteristik Proses EBW

a. Energi dan Penetrasi

Electron Beam Welding (EBW) dikenal karena kemampuannya menghasilkan penetrasi sangat dalam dengan *Heat-Affected Zone* (HAZ) yang sempit, sering kali kurang dari 1 mm. Hal ini dimungkinkan oleh kepadatan energi tinggi yang mencapai sekitar 10^7 – 10^8 W/cm², memungkinkan logam tebal untuk dilas dalam satu pass tanpa memerlukan filler material. Penetrasi yang mendalam ini sangat penting dalam aplikasi industri yang menuntut kekuatan sambungan maksimum dan minimnya distorsi, seperti pada komponen turbin pesawat, reaktor nuklir, dan struktur presisi tinggi.

b. Mode Pengelasan

Electron Beam Welding (EBW) memiliki dua mode utama yang menentukan karakteristik penetrasi dan bentuk sambungan. Pada *Conduction Mode*, energi beam terutama diserap di permukaan material, sehingga membentuk kolam las yang relatif dangkal dengan penetrasi terbatas. Mode ini cocok untuk pengelasan logam tipis, di mana kontrol panas yang akurat diperlukan untuk mencegah distorsi atau pembakaran material. Kolam las dangkal juga menghasilkan *Heat-Affected Zone*

(HAZ) yang kecil, menjaga sifat mekanik material tetap stabil dan meminimalkan tegangan sisa.

Keyhole Mode terjadi ketika energi elektron cukup tinggi untuk membentuk rongga uap (*keyhole*) di logam cair. Mode ini memungkinkan penetrasi yang sangat dalam dengan HAZ yang sempit, sehingga ideal untuk pengelasan material tebal atau sambungan multi-layer. *Keyhole* yang stabil memfasilitasi perpindahan logam cair dan mengurangi cacat seperti porositas.

c. Material yang Dapat di Las

Electron Beam Welding (EBW) menawarkan fleksibilitas material yang luas, menjadikannya pilihan utama untuk berbagai aplikasi industri presisi tinggi. Proses ini efektif digunakan pada baja karbon, baja tahan karat, titanium, aluminium, dan superalloys, karena kepadatan energi yang tinggi memungkinkan penetrasi mendalam sekaligus menghasilkan *Heat-Affected Zone* (HAZ) yang sempit. Hal ini menjaga sifat mekanik dan mikrostruktur material tetap optimal, yang sangat penting untuk komponen kritis pada industri pesawat, energi, dan nuklir. EBW juga memungkinkan pengelasan dengan kontrol termal yang presisi, sehingga distorsi dan tegangan sisa dapat diminimalkan.

d. Geometri Sambungan dan Ketebalan

Electron Beam Welding (EBW) menawarkan fleksibilitas tinggi terkait geometri sambungan dan ketebalan material. Proses ini cocok digunakan pada berbagai jenis sambungan, termasuk tumpang tindih (*lap joint*), *butt joint*, maupun sambungan dengan variasi ketebalan tipis hingga tebal. Keunggulan ini memungkinkan perancang dan insinyur untuk menyesuaikan teknik pengelasan dengan kebutuhan desain tanpa mengorbankan kualitas sambungan atau integritas material. Keakuratan berkas elektron yang fokus dan intensitas energi yang tinggi memungkinkan penetrasi yang presisi pada area yang sulit dijangkau.

Untuk sambungan tebal, terutama lebih dari 20 mm, EBW dapat melakukan pengelasan dalam satu pass menggunakan *keyhole mode* yang stabil. Pendekatan ini menghasilkan HAZ yang sempit dan mengurangi distorsi dibandingkan metode konvensional seperti MIG atau TIG multi-pass. Dengan

penetrasi mendalam sekaligus kontrol panas yang tepat, EBW meningkatkan efisiensi produksi dan menjaga sifat mekanik serta mikrostruktur material tetap optimal, membuatnya ideal untuk industri pesawat, energi, dan komponen kritis lainnya.

3. Parameter Kunci EBW

- a. *Beam Voltage*
 - 1) Menentukan energi kinetik elektron. Tegangan tinggi → penetrasi dalam.
- b. *Beam Current*
 - 1) Mengontrol jumlah elektron per detik → menentukan jumlah panas yang masuk.
- c. *Focus Beam / Spot Size*
 - 1) Fokus sempit → penetrasi dalam, keyhole stabil.
 - 2) Fokus lebar → penetrasi dangkal, risiko undercut rendah.
- d. *Travel Speed*
 - 1) Kecepatan tinggi → HAZ sempit, pendinginan cepat.
 - 2) Kecepatan rendah → penetrasi mendalam, risiko *keyhole collapse* meningkat.
- e. *Vacuum Level / Gas Atmosphere*
 - 1) Vacuum tinggi ($>10^{-4}$ mbar) → mencegah oksidasi dan spatter.
 - 2) Partial vacuum atau inert gas untuk komponen besar.

C. Plasma Arc Welding (PAW)

Plasma Arc Welding (PAW) adalah teknologi pengelasan berbasis energi tinggi yang menggunakan busur plasma terfokus untuk melelehkan logam dan membentuk sambungan yang presisi tinggi (Lippold, 2014). PAW dikembangkan pada tahun 1960-an sebagai teknologi lanjutan dari *Tungsten Inert Gas* (TIG) *welding*, dengan peningkatan kepadatan energi, penetrasi lebih dalam, dan kemampuan pengelasan material tipis hingga tebal.

1. Prinsip Kerja *Plasma Arc Welding*

PAW bekerja berdasarkan prinsip plasma: ionisasi gas pelindung untuk membentuk kolam plasma yang sangat panas. Proses utama adalah:

a. Ionisasi Gas Pelindung

Prinsip kerja *Plasma Arc Welding* (PAW) dimulai dengan ionisasi gas pelindung yang dialirkan melalui nozzle. Gas inert seperti argon, helium, atau campuran keduanya berperan sebagai medium yang dapat diionisasi saat diberi energi dari sumber listrik. Ionisasi gas ini menghasilkan plasma, yaitu campuran gas bermuatan yang memiliki konduktivitas listrik tinggi dan suhu yang sangat tinggi, sehingga dapat menghantarkan energi secara efektif ke logam dasar. Elektroda tungsten yang tahan panas tinggi menjadi pusat terbentuknya busur listrik (*arc*), memfokuskan energi untuk melelehkan material dengan presisi tinggi.

b. Kolam Plasma dan Penetrasi

Pada *Plasma Arc Welding* (PAW), kolam plasma terbentuk dari gas yang terionisasi dengan suhu sangat tinggi, berkisar antara 10.000 hingga 30.000 K. Energi tinggi ini memusatkan panas secara lokal pada logam dasar, sehingga kolam las menjadi sangat terfokus. Mekanisme pemanasan ini memungkinkan logam meleleh secara cepat dan membentuk kolam cair yang stabil, sekaligus meminimalkan penyebaran panas ke area sekitarnya. Karakteristik ini penting untuk menjaga zona pengaruh panas (HAZ) sempit, sehingga perubahan mikrostruktur di sekeliling sambungan dapat dikendalikan dengan baik.

c. Fokus dan Transfer Panas

Plasma Arc Welding (PAW) memiliki kemampuan unik untuk mengatur fokus energi panas melalui dua mode pengelasan utama, yaitu *Keyhole Mode* dan *Conduction Mode*. Pada *Keyhole Mode*, energi plasma difokuskan untuk menembus logam secara mendalam, menciptakan lubang uap (*keyhole*) yang memungkinkan penetrasi tinggi pada material tebal. Mode ini sangat efektif untuk sambungan multi-layer dan material tebal, karena panas terkonsentrasi sehingga menghasilkan HAZ sempit dan distorsi minimal. Keuntungan lainnya termasuk

pengelasan cepat dan penetrasi yang seragam, yang sangat penting untuk aplikasi industri berat seperti aerospace dan peralatan nuklir.

Conduction Mode digunakan untuk material tipis dan aplikasi presisi tinggi. Dalam mode ini, panas disebarkan lebih merata melalui konduksi, sehingga penetrasi dangkal tercapai dengan kontrol yang baik terhadap bentuk bead dan kualitas permukaan. Mode ini mengurangi risiko perforasi pada material tipis dan memungkinkan pengelasan presisi, misalnya pada komponen elektronik atau part otomotif.

d. Pendinginan dan Mikrostruktur

Pendinginan pada proses *Plasma Arc Welding* (PAW) memiliki peran penting dalam menentukan kualitas sambungan las. Energi plasma yang sangat tinggi memusatkan panas pada area kecil, sehingga setelah sumber panas dipindahkan, material mengalami pendinginan cepat. Pendinginan cepat ini menyebabkan logam cair mengeras dengan mikrostruktur halus, seperti butiran kecil martensit atau fasa metastabil lainnya pada baja karbon dan paduan tinggi. Mikrostruktur halus ini meningkatkan kekuatan mekanik sambungan, ketangguhan, dan resistensi terhadap retak termal, sehingga sambungan lebih andal terutama untuk aplikasi presisi tinggi.

2. Karakteristik Proses PAW

a. Densitas Energi Tinggi

Proses *Plasma Arc Welding* (PAW) memiliki karakteristik utama berupa densitas energi tinggi, yang menjadi keunggulan dibandingkan metode pengelasan konvensional seperti TIG. Plasma arc yang dihasilkan memiliki suhu sangat tinggi, mencapai 10.000–30.000 K, sehingga energi yang tersalur ke permukaan logam sangat terkonsentrasi. Kepadatan energi tinggi ini memungkinkan logam dasar meleleh dengan cepat dan membentuk kolam las yang dalam, sehingga penetrasi material lebih efektif. Hasilnya, PAW dapat digunakan untuk mengelas material tebal dalam satu pass, yang sulit dicapai dengan metode pengelasan tradisional. Selain penetrasi yang mendalam, densitas energi tinggi juga memungkinkan kecepatan pengelasan lebih tinggi tanpa mengorbankan kualitas

sambungan. Plasma arc yang stabil menahan distorsi termal dan spatter, serta menghasilkan bead yang halus dan presisi.

b. Mode Pengelasan

Proses *Plasma Arc Welding* (PAW) menawarkan dua mode pengelasan utama, yaitu *Conduction Mode* dan *Keyhole Mode*, yang masing-masing memiliki karakteristik khusus sesuai dengan ketebalan material dan kebutuhan presisi. Pada *Conduction Mode*, energi plasma difokuskan pada permukaan logam, menghasilkan penetrasi dangkal dan zona pengaruh panas (HAZ) yang sempit. Mode ini ideal untuk material tipis karena kolam las yang kecil memungkinkan kontrol presisi pada *bead geometry*, mengurangi distorsi, dan menghasilkan sambungan yang rapi dan konsisten.

Keyhole Mode digunakan untuk pengelasan material tebal dengan penetrasi yang jauh lebih dalam, sering kali lebih dari 10 mm. Mode ini membentuk rongga uap (*keyhole*) dalam logam cair, sehingga kolam las dapat menembus material secara signifikan. Keberhasilan pengelasan dengan mode ini sangat bergantung pada kontrol fokus laser, travel speed, dan kestabilan arc. Jika parameter tidak tepat, risiko cacat seperti porositas, undercut, atau ketidakseragaman bead meningkat, sehingga kontrol proses yang cermat sangat diperlukan untuk memastikan kualitas sambungan optimal.

c. Material yang Dapat di Las

Plasma Arc Welding (PAW) memiliki fleksibilitas material yang luas, sehingga dapat diaplikasikan pada berbagai jenis logam dan paduan. Proses ini efektif untuk pengelasan baja karbon, baja tahan karat, titanium, aluminium, serta paduan superalloys, yang biasanya menuntut penetrasi dalam, presisi tinggi, dan HAZ yang sempit. Kepadatan energi tinggi dari plasma memungkinkan pengelasan material dengan konduktivitas termal tinggi, seperti aluminium dan tembaga, yang sulit dicapai dengan metode konvensional. Selain itu, PAW mampu mempertahankan kualitas bead yang stabil, mengurangi cacat seperti undercut atau porositas, sehingga cocok untuk aplikasi industri otomotif, aerospace, dan manufaktur presisi tinggi.

d. Geometri Sambungan

Plasma Arc Welding (PAW) menunjukkan fleksibilitas tinggi dalam menangani berbagai geometri sambungan, termasuk *butt joint*, *lap joint*, *corner joint*, dan *fillet*. Karakteristik plasma yang terfokus memungkinkan kolam las terbentuk dengan presisi tinggi, sehingga sambungan dapat dibuat sesuai toleransi geometrik yang ketat. Metode ini sangat cocok untuk aplikasi industri di mana akurasi dimensi dan kualitas estetika bead penting, seperti dalam manufaktur pesawat, elektronik, dan komponen presisi. Dengan penetrasi yang dapat dikontrol secara akurat, PAW meminimalkan risiko cacat seperti undercut, porositas, atau distorsi, terutama pada sambungan yang rumit dan material tipis.

PAW mampu mengelas material tipis (<5 mm) hingga tebal (>15 mm) secara efektif. Pada material tipis, mode *conduction* digunakan untuk menjaga HAZ tetap sempit dan bead halus, sementara pada material tebal, mode *keyhole* memastikan penetrasi dalam tanpa perlu *multiple pass* yang berisiko menimbulkan tegangan sisa tinggi.

3. Parameter Kunci PAW

a. *Arc Current*

- 1) Menentukan jumlah panas dan penetrasi.
- 2) Arus tinggi → penetrasi dalam, risiko *keyhole collapse* meningkat.

b. *Gas Flow Rate* dan *Composition*

- 1) Argon murni atau campuran helium digunakan sebagai plasma gas.
- 2) Gas mempengaruhi bentuk kolam las, stabilitas plasma, dan HAZ.

c. *Electrode Position / Nozzle Design*

- 1) Elektroda tungsten memfokuskan *arc plasma*.
- 2) Jarak nozzle ke permukaan material memengaruhi penetrasi dan bentuk bead.

d. *Travel Speed*

- 1) Kecepatan rendah → penetrasi mendalam, risiko *spatter* meningkat.

- 2) Kecepatan tinggi → HAZ sempit, bead halus, cocok untuk material tipis.
- e. Mode Operasi
- Plasma Arc Welding* (PAW) dapat dijalankan dalam mode *continuous* maupun *pulsed* untuk menyesuaikan penetrasi, bentuk bead, dan input panas. Mode *continuous* memberikan energi stabil, cocok untuk penetrasi dalam pada material tebal, sedangkan mode *pulsed* memungkinkan kontrol panas lebih baik, meminimalkan distorsi dan spatter pada material tipis atau sambungan presisi. Pemilihan mode operasi disesuaikan dengan ketebalan material, jenis logam, dan geometri sambungan, sehingga menghasilkan kolam las optimal dengan *Heat-Affected Zone* (HAZ) yang terkendali dan mikrostruktur akhir yang diinginkan.

D. Kelebihan dan Keterbatasan Tiap Metode

Pengelasan berbasis energi tinggi mencakup *Laser Beam Welding* (LBW), *Electron Beam Welding* (EBW), dan *Plasma Arc Welding* (PAW). Ketiga metode ini telah berkembang pesat selama dua dekade terakhir, menawarkan keunggulan signifikan dibandingkan pengelasan konvensional (Lippold, 2014). Meski demikian, masing-masing metode memiliki keterbatasan teknis, biaya, dan persyaratan operasional yang perlu dipahami agar pemilihan metode tepat sesuai aplikasi industri.

1. Kelebihan *Laser Beam Welding* (LBW)

- Presisi Tinggi: Sinar laser terfokus dengan diameter kecil (0,1–1 mm) memungkinkan sambungan dengan toleransi geometrik ketat. Cocok untuk material tipis, microcomponents, dan panel otomotif.
- Penetrasi Dalam dan HAZ Sempit: *Keyhole mode* memungkinkan penetrasi hingga puluhan milimeter, sementara HAZ tetap sempit. Meminimalkan tegangan sisa dan distorsi.
- Kecepatan Tinggi dan Produktivitas: *Travel speed* tinggi → meningkatkan efisiensi produksi pada manufaktur massal. Efektif untuk pengelasan *continuous* dan *robotic automation*.

- d. Kemampuan Hybrid dan *Material Dissimilar*: Kombinasi LBW + *arc welding* meningkatkan penetrasi dan kontrol HAZ. Bisa mengelas material berbeda, misal baja + aluminium, dengan kontrol energi tepat.
- e. Integrasi Digital dan Otomasi: Sensor real-time dan digital twin memungkinkan adaptasi parameter, kontrol kualitas, dan optimasi proses.

2. Keterbatasan *Laser Beam Welding (LBW)*

- a. Sensitif terhadap Reflektif Material: Aluminium, tembaga, dan logam highly reflective memerlukan daya tinggi atau preheating untuk penetrasi efektif.
- b. Keterbatasan Geometri Sambungan: Sulit untuk pengelasan pada akses terbatas atau sudut tajam tanpa manipulasi optik atau robotic arm.
- c. Biaya Peralatan Tinggi: Laser high-power dan sistem fokus presisi membutuhkan investasi awal tinggi dan maintenance teratur.
- d. Kebutuhan Stabilitas dan Pendinginan: Stabilitas beam, gas shielding, dan pendinginan aktif diperlukan untuk mencegah cacat dan keyhole collapse.

3. Kelebihan *Electron Beam Welding (EBW)*

- a. Penetrasi Sangat Dalam: Dapat menembus logam hingga puluhan milimeter dalam satu pass tanpa filler, ideal untuk material tebal.
- b. HAZ Sempit dan Distorsi Minimal: High energy density dan vacuum environment menghasilkan HAZ sempit dan tegangan sisa rendah. Cocok untuk aerospace, energi nuklir, dan turbin gas.
- c. Kualitas Sambungan Tinggi: Pendinginan cepat → mikrostruktur halus, kekerasan konsisten, ketahanan retak optimal.
- d. Kemampuan Hybrid dan *Dissimilar Metal*: EBW + filler material memungkinkan pengelasan multi-layer atau material berbeda, menjaga penetrasi dan kualitas.

- e. Kompatibel dengan Otomasi dan *Additive Manufacturing*: EBW digunakan dalam *Electron Beam Additive Manufacturing* (EBAM) untuk logam tebal dan superalloys.

4. Keterbatasan *Electron Beam Welding* (EBW)

- a. *Vacuum Requirement*: Sebagian besar EBW memerlukan *chamber vacuum*, membatasi ukuran komponen dan fleksibilitas. Partial vacuum diperlukan untuk komponen besar, meningkatkan kompleksitas sistem.
- b. Biaya Investasi Tinggi: Tegangan tinggi, sistem vacuum, dan kontrol beam presisi memerlukan biaya awal tinggi dan maintenance khusus.
- c. Kesulitan pada Material Tipis atau Reflektif: Material tipis memerlukan kontrol arus rendah dan fokus beam presisi untuk mencegah penetrasi berlebihan.
- d. Keterbatasan Akses dan Manipulasi: Beam harus diarahkan langsung ke permukaan logam → sulit untuk sudut tajam atau lokasi terbatas.

5. Kelebihan *Plasma Arc Welding* (PAW)

- a. Densitas Energi Tinggi: Plasma arc terfokus menghasilkan penetrasi lebih dalam dibanding TIG, dengan HAZ sempit.
- b. Presisi Tinggi: *Plasma torch* memungkinkan kontrol *bead geometry*, sangat berguna untuk material tipis dan komponen presisi.
- c. Fleksibilitas Material dan Ketebalan: Dapat mengelas baja, aluminium, titanium, dan superalloys dari tipis hingga tebal (>15 mm) dengan mode *conduction* atau *keyhole*.
- d. Kemampuan Hybrid: PAW digabungkan dengan TIG atau laser untuk optimalisasi penetrasi dan HAZ, cocok untuk industri aerospace dan microelectronics.
- e. Kompatibilitas Otomasi: Plasma torch dapat dikontrol robotik, sensor real-time dapat meningkatkan stabilitas dan kualitas sambungan.

6. Keterbatasan *Plasma Arc Welding* (PAW)

- a. Kontrol Keyhole Sulit: *Keyhole collapse* dapat menyebabkan porositas dan spatter, memerlukan simulasi dan kontrol multi-parameter.
- b. Sensitivitas Material Reflektif: Aluminium dan tembaga membutuhkan gas pelindung khusus dan arus terkontrol.
- c. Biaya dan Kompleksitas Peralatan: Plasma torch, gas supply, dan sistem kontrol presisi membutuhkan investasi tinggi dan perawatan rutin.
- d. Keterbatasan Akses dan Posisi Pengelasan: Sulit untuk lokasi terbatas atau sudut yang tidak mudah dijangkau tanpa sistem robotic atau manipulasi torch.



BAB IV

PROSES PENGELASAN

CANGGIH NON-TRADISIONAL

Proses pengelasan canggih non-tradisional telah muncul sebagai solusi untuk tantangan pengelasan material modern yang sulit disambung dengan metode konvensional. Metode ini mencakup *Friction Stir Welding* (FSW), *Ultrasonic Welding*, *Diffusion Bonding*, dan *Explosion Welding*, yang memungkinkan sambungan logam dan non-logam dengan presisi tinggi, kualitas sambungan superior, dan kerusakan material minimal. Keunggulan utama metode non-tradisional adalah kemampuan untuk menyambung material tipis, komposit, dan superalloy tanpa menghasilkan panas berlebih yang dapat merusak struktur mikro, sehingga menjaga kekuatan dan keuletan sambungan.

Friction Stir Welding menggunakan tool berputar untuk mencampur logam dalam keadaan plastis, menghasilkan sambungan homogen tanpa pencairan material. *Ultrasonic Welding* memanfaatkan gelombang ultrasonik untuk menyatukan material dengan gaya tekan rendah dan panas minimal, sangat efektif untuk logam tipis dan komponen elektronik. *Diffusion Bonding* dan *Explosion Welding* menggunakan prinsip energi kinetik dan tekanan untuk menyatukan permukaan material, memungkinkan pengelasan material berbeda yang sulit disambung secara termal. Setiap metode memiliki aplikasi spesifik, misalnya FSW pada industri aerospace dan otomotif, serta *Explosion Welding* untuk pembuatan bimetal atau multilayer plates.

A. Ultrasonic Welding

Ultrasonic Welding (USW) adalah teknologi pengelasan solid-state, yang berarti proses ini tidak memerlukan pelelehan material dasar untuk membentuk sambungan. Proses ini menggunakan getaran

ultrasonik frekuensi tinggi (20–70 kHz) untuk menghasilkan panas melalui gesekan antar permukaan logam atau polimer, sehingga material dapat menyatu tanpa mencapai titik leleh (Satpathy & Sahoo, 2017). USW termasuk dalam kategori pengelasan non-tradisional, karena berbeda dari proses berbasis energi tinggi seperti *Laser Beam Welding* (LBW), *Electron Beam Welding* (EBW), atau *Plasma Arc Welding* (PAW) yang memanfaatkan panas tinggi dan fusi logam.

1. Prinsip Kerja *Ultrasonic Welding*

USW bekerja berdasarkan kombinasi getaran mekanik ultrasonik dan tekanan statis untuk menghasilkan sambungan solid-state. Proses utamanya adalah:

a. Penempatan Material

Pada *Ultrasonic Welding* (USW), proses dimulai dengan penempatan material yang akan disambungkan. Dua permukaan, baik logam tipis maupun polimer, diposisikan secara tepat dalam konfigurasi sambungan yang diinginkan, biasanya *lap joint* atau *spot weld*. Posisi material sangat penting karena ketepatan kontak menentukan efisiensi transfer energi ultrasonik, stabilitas sambungan, dan konsistensi kualitas las. Ketidaksesuaian posisi dapat menyebabkan penetrasi energi yang tidak merata, sehingga bead las menjadi tidak homogen atau cacat seperti void dan delaminasi dapat muncul.

b. Tekanan dan Vibrasi

Pada *Ultrasonic Welding* (USW), mekanisme utama pengelasan melibatkan tekanan dan vibrasi yang diterapkan pada material. Horn atau sonotrode menekan permukaan material dengan gaya yang dikontrol secara presisi, biasanya berkisar antara 50 hingga 500 N untuk logam tipis. Tekanan ini memastikan kontak yang erat antar permukaan yang akan disambungkan, memungkinkan energi ultrasonik diteruskan secara optimal ke zona sambungan. Gaya tekan yang tepat juga membantu mengurangi cacat seperti void atau delaminasi, sehingga sambungan menjadi lebih homogen dan kuat.

Vibrasi ultrasonik yang dihasilkan oleh generator frekuensi tinggi (20–70 kHz) memicu gesekan internal pada permukaan kontak. Vibrasi dapat bersifat lateral (*shear*) atau longitudinal, tergantung desain horn dan konfigurasi sambungan. Gesekan ini

menyebabkan plastifikasi lokal pada material logam atau polimer tanpa perlu pemanasan eksternal signifikan. Kombinasi tekanan mekanik dan energi vibrasi menghasilkan sambungan fusi padat dengan presisi tinggi, cepat, dan minim distorsi, sehingga USW banyak diaplikasikan dalam industri elektronik, baterai, dan microelectronics.

c. Hasil Gesekan dan Heating

Pada *Ultrasonic Welding* (USW), vibrasi frekuensi tinggi yang diterapkan pada permukaan material menghasilkan gesekan mikro di antara kontak logam atau polimer. Gesekan ini terjadi pada skala mikroskopis dan secara langsung meningkatkan lokal heating pada zona sambungan tanpa memerlukan sumber panas eksternal. Panas lokal yang terbentuk cukup untuk melembutkan material di permukaan kontak, memungkinkan deformasi plastis terbatas yang memfasilitasi penyatuan material. Mekanisme ini berbeda dengan pengelasan konvensional, karena energi terfokus pada zona sangat kecil, sehingga HAZ minimal dan distorsi struktural hampir tidak terjadi.

Gesekan mikro ini juga efektif dalam menghilangkan lapisan oksida atau kontaminan pada permukaan material. Dengan lapisan penghalang tersebut terangkat, atom-atom pada kedua permukaan dapat berinteraksi lebih langsung, meningkatkan difusi dan pembentukan ikatan metalurgi yang kuat. Kombinasi panas lokal dan kontak tekanan menghasilkan bonding solid-state yang presisi tinggi, menjadikan USW ideal untuk pengelasan logam tipis, komponen elektronik, dan material polimer sensitif.

d. *Solid-State Bonding*

Setelah panas mikro terbentuk melalui gesekan ultrasonik pada permukaan material, tekanan yang diberikan oleh horn (*sonotrode*) dipertahankan untuk memungkinkan material mengalami deformasi plastis dan menyatu pada tingkat atomik. Proses ini disebut *solid-state bonding*, karena penyatuan material terjadi tanpa meleleh. Ikatan yang terbentuk bersifat mekanik dan metalurgis, tergantung pada tekanan, frekuensi vibrasi, dan durasi waktu pengelasan. Keunggulan utama dari metode ini adalah pengelasan dilakukan pada suhu relatif

rendah, sehingga risiko perubahan fasa, oksidasi, atau kerusakan termal pada material dapat diminimalkan, menjadikannya sangat cocok untuk logam tipis, sensor elektronik, dan material sensitif panas.

Pendinginan berlangsung sangat cepat karena energi yang masuk sangat terbatas dan zona panas sangat kecil. Pendinginan cepat ini memastikan distorsi minimal dan mempertahankan sifat mekanik asli material, termasuk kekerasan, ketangguhan, dan konduktivitas. Kombinasi panas mikro, tekanan plastis, dan pendinginan cepat membuat *Ultrasonic Welding* menjadi metode *solid-state* yang presisi, efisien, dan ramah material, terutama untuk aplikasi industri elektronik, baterai EV, dan komponen miniatur.

2. Karakteristik Proses USW

- a. Material yang Dapat di Las
 - 1) Logam tipis: Aluminium, tembaga, nikel, emas, perak.
 - 2) Polimer: Polycarbonate, ABS, Polypropylene, Nylon.
 - 3) Material dissimilar: Logam-logam ringan atau logam-polimer dapat digabungkan dengan kontrol parameter presisi.
- b. Geometri Sambungan
 - 1) *Spot welding*: diameter 1–5 mm, sering digunakan untuk elektronik atau baterai.
 - 2) *Seam welding: continuous line welding*, untuk material fleksibel seperti foil aluminium atau strip logam tipis.
 - 3) *Lap joint*: tumpang tindih, umum untuk otomotif dan microelectronics.

3. Parameter Kunci

- a. Amplitudo Ultrasonik

Amplitudo ultrasonik merupakan parameter kunci dalam *Ultrasonic Welding* yang menentukan intensitas getaran yang diteruskan ke permukaan sambungan. Untuk logam tipis, amplitudo umumnya berkisar antara 10–50 μm . Semakin tinggi amplitudo, energi gesek meningkat sehingga panas mikro yang terbentuk lebih besar, menghasilkan penetrasi bonding yang lebih baik dan ikatan antar material lebih kuat. Namun,

amplitudo yang terlalu tinggi dapat menimbulkan kerusakan pada material sensitif, seperti deformasi lokal, retakan mikro, atau pecahnya lapisan tipis.

b. Tekanan Horn / Sonotrode

Tekanan yang diberikan oleh horn atau sonotrode merupakan parameter kritis dalam *Ultrasonic Welding* karena memastikan kontak yang baik antara permukaan material dan memfasilitasi difusi logam atau polimer selama proses pengelasan. Tekanan yang terlalu rendah akan menghasilkan bonding yang tidak efektif, di mana permukaan tidak cukup menyatu sehingga kekuatan sambungan rendah. Sebaliknya, tekanan yang terlalu tinggi dapat menimbulkan deformasi berlebihan, kerusakan permukaan, atau retakan mikro pada material tipis.

c. Waktu *Welding*

Waktu *welding* pada proses *Ultrasonic Welding* merupakan parameter kunci yang menentukan keberhasilan bonding antar material. Untuk logam tipis dengan ketebalan $\leq 0,5$ mm, durasi pengelasan biasanya berkisar antara 0,1 hingga 5 detik, di mana waktu yang terlalu singkat dapat menyebabkan energi yang diberikan tidak cukup untuk membentuk ikatan solid-state, sedangkan waktu yang terlalu lama berisiko merusak permukaan material atau menimbulkan deformasi berlebih.

d. Frekuensi Ultrasonik

Frekuensi ultrasonik merupakan faktor penting dalam *Ultrasonic Welding* karena menentukan intensitas vibrasi dan efisiensi transfer energi ke material. Untuk logam tipis, frekuensi umum berkisar antara 20 hingga 70 kHz, memungkinkan pembentukan gesekan mikro yang cukup untuk bonding solid-state tanpa merusak permukaan. Sedangkan untuk polimer tipis dan komponen microelectronics, frekuensi yang lebih tinggi (>40 kHz) digunakan untuk menghasilkan energi lokal yang presisi, meminimalkan distorsi, dan memastikan integritas sambungan.

B. Friction Stir Welding (FSW)

Friction Stir Welding (FSW) adalah metode *solid-state joining* yang dikembangkan pertama kali oleh *The Welding Institute* (TWI) pada tahun 1991, dan sejak itu telah menjadi salah satu teknologi pengelasan canggih non-tradisional yang banyak digunakan di industri aerospace, otomotif, transportasi, dan manufaktur kapal (Mishra *et al.*, 2016).

FSW menggunakan tool berputar untuk mengaduk logam pada suhu di bawah titik leleh, menghasilkan sambungan homogen tanpa pelelehan. Proses ini sangat efektif untuk aluminium dan paduan ringan, tetapi juga dapat diaplikasikan pada tembaga, magnesium, titanium, dan stainless steel.

1. Prinsip Kerja *Friction Stir Welding*

FSW bekerja berdasarkan gesekan mekanis dan deformasi plastis untuk menghasilkan bonding antar material. Prinsip kerja utamanya meliputi:

a. Penempatan dan Penjepitan Material

Friction Stir Welding (FSW) dimulai dengan penempatan dua plat logam dalam posisi sambungan yang tepat, biasanya *lap joint* atau *butt joint*. Kedua plat dijepit secara kuat pada meja kerja menggunakan *clamp* atau *fixture* khusus untuk mencegah pergerakan lateral selama proses pengelasan. Penjepitan yang stabil sangat penting karena gaya yang dihasilkan oleh tool rotasi cukup besar, dan setiap pergeseran plat dapat mengakibatkan cacat seperti void, undercut, atau ketidakselarasan bead. Dengan posisi dan penjepitan yang tepat, material siap menerima energi mekanis yang dihasilkan oleh tool untuk membentuk sambungan homogen dan kuat.

Tool berputar ditempatkan pada permukaan sambungan. Tekanan vertikal dari tool menembus material, menghasilkan gesekan yang memanaskan logam hingga kondisi plastis. Pemanasan lokal ini memungkinkan aliran material di sekitar tool, menyatukan kedua plat tanpa mencairkan logam. Posisi awal dan stabilitas material memastikan bahwa aliran logam terkontrol dan sambungan akhir memiliki kualitas tinggi, minim

distorsi, dan mikrostruktur homogen, yang menjadi keunggulan utama FSW dibandingkan metode pengelasan tradisional.

b. Tool Berputar dan Translasi

Pada *Friction Stir Welding* (FSW), *tool* yang terdiri dari pin dan shoulder berperan utama dalam menghasilkan sambungan yang kuat. Tool ini berputar pada kecepatan tinggi, biasanya antara 300 hingga 2000 rpm, sambil bergerak secara translasi sepanjang garis sambungan. Pin tool menembus material, sedangkan shoulder membantu menahan material dan memfasilitasi aliran logam di sekitar area pengelasan. Perpaduan gerakan putar dan translasi ini menghasilkan gesekan antara tool dan material, yang memanaskan logam hingga mencapai kondisi plastis tanpa mencairkannya.

Panas yang dihasilkan dari gesekan ini memungkinkan material di sekitar pin untuk melunak dan mengalir, menyatu membentuk sambungan solid-state yang homogen. Karena tidak terjadi pelelehan, risiko distorsi, porositas, atau perubahan mikrostruktur yang merugikan sangat minimal. Kontrol kecepatan putar, translasi, dan tekanan tool menjadi faktor kritis untuk memastikan penetrasi yang cukup, aliran material merata, dan hasil sambungan yang kuat serta konsisten, menjadikan FSW unggul untuk aluminium, titanium, dan material superalloys.

c. Deformasi Plastik dan Bonding

Pada *Friction Stir Welding* (FSW), deformasi plastik berperan kunci dalam membentuk sambungan yang kuat. Saat tool berputar dan bergerak sepanjang garis sambungan, material di sekitar pin mengalami plastifikasi akibat panas gesek. Shoulder tool memberikan tekanan tambahan yang menahan material dan mendorong logam plastis mengalir secara lateral dan vertikal, sehingga mengisi celah-celah kecil dan menghilangkan void. Aliran ini juga membantu memecah lapisan oksida di permukaan logam, memungkinkan kontak logam-ke-logam yang bersih dan konsisten.

Proses ini menghasilkan bonding solid-state yang homogen, di mana material tidak pernah melebur, sehingga risiko distorsi, porositas, atau perubahan mikrostruktur merugikan sangat minim. Struktur mikro yang terbentuk cenderung seragam

dengan distribusi grain halus di daerah nugget, meningkatkan kekuatan mekanik dan ketahanan terhadap retak.

d. Pendinginan dan Mikrostruktur Stabil

Material plastis yang terbentuk di sepanjang sambungan mulai mendingin dengan cepat. Pendinginan cepat ini menyebabkan *Heat-Affected Zone* (HAZ) tetap sempit, berbeda dengan pengelasan tradisional di mana area HAZ bisa sangat luas. HAZ yang sempit menjaga perubahan mikrostruktur di sekitar sambungan tetap minimal, sehingga meminimalkan pembentukan fasa rapuh atau retak termal. Dengan kata lain, integritas mekanik material sekitar sambungan tetap terjaga, mengurangi risiko distorsi dan degradasi sifat mekanik.

Pendinginan cepat juga memengaruhi distribusi tegangan sisa, menghasilkan profil tegangan rendah dan seragam di sekitar sambungan. Mikrostruktur nugget zone cenderung halus dan homogen, dengan grain refinement yang meningkatkan kekuatan tarik, keuletan, dan ketahanan aus. Kombinasi HAZ sempit, tegangan sisa rendah, dan mikrostruktur stabil membuat FSW sangat ideal untuk material aluminium, titanium, dan superalloys, terutama dalam aplikasi pesawat, otomotif, dan kereta cepat yang menuntut sambungan presisi tinggi dan kinerja mekanik optimal.

2. Karakteristik Proses FSW

a. Material yang Dapat di Las

- 1) Aluminium dan paduannya: 2xxx, 5xxx, 6xxx, 7xxx series.
- 2) Magnesium dan paduan: AZ31, AZ91.
- 3) Tembaga dan titanium: sheet tipis hingga tebal sedang.
- 4) Material dissimilar: Aluminium-tembaga, aluminium-steel, magnesium-aluminium.

b. Geometri Sambungan

- 1) *Butt joint*: sambungan tepi-ke-tepi untuk panel dan plat.
- 2) *Lap joint*: tumpang tindih untuk panel kendaraan dan kapal.
- 3) *Corner joint*: jarang, memerlukan tool khusus.
- 4) *Thick plate welding*: FSW dapat digunakan hingga 50 mm ketebalan logam dengan tool khusus.

3. Parameter Kunci

a. *Tool Rotational Speed* (RPM)

Kecepatan putar tool (*Tool Rotational Speed*) merupakan parameter kunci dalam *Friction Stir Welding* karena secara langsung memengaruhi jumlah panas yang dihasilkan melalui gesekan antara tool dan material. Putaran yang lebih tinggi meningkatkan deformasi plastik material di sekitar pin, sehingga aliran logam menjadi lebih homogen dan sambungan solid-state terbentuk lebih baik. Namun, rotasi tinggi juga berisiko menghasilkan flash berlebih di sepanjang sambungan, yang dapat memerlukan proses finishing tambahan.

b. *Travel Speed* (mm/min)

Kecepatan translasi tool sepanjang sambungan atau *travel speed* merupakan parameter kritis dalam *Friction Stir Welding* karena menentukan waktu interaksi tool dengan material dan distribusi panas di zona las. *Travel speed* yang rendah memungkinkan material menerima panas cukup untuk plastifikasi optimal, menghasilkan penetrasi yang dalam dan aliran material yang homogen, sehingga sambungan *solid-state* terbentuk dengan kualitas tinggi. Sebaliknya, *travel speed* terlalu cepat mengurangi input panas, menyebabkan material tidak sepenuhnya plastis dan bonding tidak sempurna, meningkatkan risiko void atau cacat internal.

c. *Axial Force / Downward Pressure*

Axial force atau *downward pressure* pada *Friction Stir Welding* adalah gaya vertikal yang diterapkan oleh *shoulder tool* ke permukaan material, berfungsi menjaga kontak optimal antara tool dan plat logam. Tekanan ini memastikan material plastis dipadatkan dengan baik, mengisi celah dan menutup oksida, sekaligus mengontrol terbentuknya flash berlebih di sekitar sambungan. *Axial force* yang terlalu rendah dapat menyebabkan penetrasi tidak mencukupi dan sambungan lemah, sedangkan tekanan berlebihan dapat menimbulkan deformasi berlebihan atau kerusakan tool.

d. *Tool Geometry*

Geometri tool pada *Friction Stir Welding*, termasuk bentuk pin (*cylindrical, tapered, atau threaded*) dan shoulder (*flat, concave, atau scroll*), sangat memengaruhi aliran material

plastis dan kualitas sambungan. Pin menentukan penetrasi ke dalam material dan intensitas pencampuran logam, sedangkan shoulder memengaruhi pemadatan permukaan dan distribusi panas. Pemilihan geometri tool yang tepat memungkinkan aliran material yang homogen, mengurangi void, flash, dan cacat internal, serta menghasilkan mikrostruktur seragam dengan kekerasan optimal. Tool yang tidak sesuai dapat menimbulkan sambungan cacat, distorsi, atau HAZ tidak merata, sehingga penyesuaian geometri tool harus mempertimbangkan jenis logam, ketebalan material, dan parameter proses lain.

e. *Tilt Angle*

Sudut tilt (*tilt angle*) pada *Friction Stir Welding*, biasanya antara 2–4°, berperan penting dalam memfasilitasi aliran material plastis di bawah *shoulder tool* dan mengurangi pembentukan flash berlebih di sepanjang sambungan. Sudut ini membantu menekan material ke arah belakang tool, memastikan kontak yang konsisten antara shoulder dan permukaan material, sehingga aliran logam tetap homogen. Pengaturan tilt angle yang tepat juga memengaruhi distribusi panas, penetrasi sambungan, dan kualitas bead, sekaligus mengurangi risiko cacat permukaan atau void internal. Penyesuaian sudut harus disesuaikan dengan jenis material, ketebalan plat, dan geometri tool.

C. Diffusion Bonding dan Explosion Welding

Pengelasan canggih non-tradisional mencakup metode *solid-state* dan *high-strain rate joining* yang berbeda dari pengelasan fusi konvensional. Dua metode penting adalah *Diffusion Bonding* (DB) dan *Explosion Welding* (EW), yang telah banyak digunakan dalam industri aerospace, energi, transportasi, dan kimia karena kemampuannya menggabungkan logam sama atau berbeda tanpa melelehkan material (Kumar *et al.*, 2022).

1. *Diffusion Bonding* (DB) memanfaatkan difusi atomik antara permukaan logam di bawah tekanan dan suhu moderat, menghasilkan sambungan homogen tanpa fusi.

2. *Explosion Welding* (EW) menggunakan gelombang kejut mekanis berkecepatan tinggi untuk menempelkan logam dissimilar, menghasilkan sambungan solid-state dengan area bonding luas.

Kedua metode memiliki keunggulan: minim distorsi, HAZ sempit, kompatibel dengan material dissimilar, namun berbeda dalam mekanisme dan aplikasi industri.

1. Prinsip Kerja *Diffusion Bonding* (DB)

Diffusion bonding adalah proses *solid-state joining* yang terjadi melalui tiga mekanisme utama:

a. Persiapan Permukaan

Diffusion Bonding (DB) merupakan proses pengelasan solid-state yang mengandalkan difusi atom antar permukaan logam untuk membentuk sambungan. Tahap awal yang krusial adalah persiapan permukaan material. Permukaan logam yang akan disambung harus dibersihkan secara menyeluruh dari kontaminan, oksida, minyak, dan kotoran lainnya. Kebersihan permukaan ini memastikan kontak atom yang optimal, sehingga difusi dapat terjadi secara efektif. Selain itu, permukaan harus cukup halus dan rata; ketidakrataan atau kekasaran berlebihan dapat menyebabkan terperangkapnya udara atau memicu celah yang menghambat kontak logam, sehingga kualitas sambungan menurun.

b. Tekanan dan Pemanasan

Pada proses *Diffusion Bonding* (DB), tahap pemanasan dan penerapan tekanan merupakan kunci terbentuknya sambungan *solid-state* yang kuat. Setelah permukaan material dipersiapkan, kedua logam dijepit menggunakan tekanan statis tertentu, biasanya berkisar antara 5 hingga 50 MPa, tergantung sifat mekanik dan ketebalan material. Tekanan ini memastikan kontak intim antar permukaan, meminimalkan celah mikro, dan memungkinkan atom-atom pada permukaan berada cukup dekat untuk memulai proses difusi. Tanpa tekanan yang memadai, difusi atom akan tidak merata, sehingga sambungan bisa lemah atau terdapat void internal.

Pemanasan material dilakukan pada suhu tinggi, sekitar 0,5 hingga 0,8 kali temperatur leleh logam (T_m). Suhu ini cukup tinggi untuk meningkatkan mobilitas atom di permukaan,

namun tetap di bawah titik leleh sehingga material tidak mencair. Pada kondisi ini, atom-atom mulai bertukar posisi antar permukaan yang bersentuhan, membentuk ikatan logam secara gradual. Kombinasi tekanan dan panas ini menghasilkan bonding yang homogen dengan mikrostruktur yang stabil, tegangan internal rendah, serta kekuatan mekanik yang mendekati logam dasar, menjadikan DB ideal untuk aplikasi presisi tinggi pada komponen aerospace, elektronik, dan superalloy.

c. Difusi dan Homogenisasi

Tahap difusi atom menjadi kunci utama dalam pembentukan sambungan *solid-state* yang kuat dan homogen. Atom-atom pada permukaan logam mulai bergerak secara termal, menembus celah-celah kecil dan menutupi void atau porositas yang ada. Proses difusi ini memungkinkan terbentuknya ikatan logam yang kontinu di seluruh area kontak, sehingga mengurangi kemungkinan adanya titik lemah atau cacat internal. Difusi juga mendorong homogenisasi mikrostruktur, membuat sifat mekanik sambungan mendekati logam dasar dan meningkatkan kekuatan tarik serta ketahanan terhadap retak.

Holding time atau durasi pemanasan pada tekanan tertentu sangat memengaruhi keberhasilan difusi dan homogenisasi. Waktu ini ditentukan oleh jenis material, ketebalan plat, dan temperatur operasi, biasanya berkisar antara 30 hingga 240 menit. Durasi yang cukup memungkinkan atom menempati posisi optimal, menutup void, dan menyebar merata di seluruh sambungan. Sebaliknya, waktu yang terlalu singkat dapat menyebabkan bonding tidak sempurna, sedangkan waktu terlalu lama berisiko menimbulkan pertumbuhan butir berlebihan.

d. Pendinginan

Proses pendinginan menjadi tahap kritis dalam *Diffusion Bonding* (DB). Pendinginan dilakukan secara perlahan untuk menghindari gradien suhu yang tinggi, yang dapat menimbulkan tegangan sisa atau deformasi pada sambungan. Gradien suhu yang besar berpotensi menyebabkan retak termal atau distorsi, terutama pada logam dengan koefisien ekspansi termal yang berbeda. Pendinginan bertahap memastikan bahwa mikrostruktur yang terbentuk selama difusi tetap stabil dan

homogen, menjaga kontinuitas ikatan antar atom serta kekuatan mekanik sambungan.

2. **Material *Diffusion Bonding* (DB) yang Dapat di Las**

- a. Titanium dan paduannya (Ti-6Al-4V).
- b. *Nickel-based superalloys*.
- c. *Stainless steel* dan paduan besi.
- d. Material dissimilar: titanium-nickel, aluminium-titanium.

3. **Parameter Kunci *Diffusion Bonding* (DB)**

- a. Suhu Bonding: 0,5–0,8 Tm logam → cukup untuk difusi atom, minim distorsi.
- b. Tekanan: 5–50 MPa → memastikan kontak permukaan tanpa deformasi berlebih.
- c. Waktu Holding: 30–240 menit → tergantung material, tebal, dan mikrostruktur.
- d. *Surface Preparation*: kehalusan $<0,4 \mu\text{m Ra}$; bebas oksida/contaminants.

4. **Prinsip Kerja *Explosion Welding* (EW)**

Explosion Welding (EW) menggunakan gelombang kejut berenergi tinggi untuk menempelkan logam dissimilar secara solid-state:

a. **Persiapan Material**

Prinsip dasar *Explosion Welding* (EW) dimulai dengan persiapan material yang cermat. Dua plat logam diposisikan sejajar, di mana plat atas disebut “*flyer*” dan plat bawah disebut “*base*.” Posisi ini harus sangat presisi untuk memastikan kontak yang tepat saat ledakan terjadi. Permukaan plat biasanya dibersihkan dari oksida, minyak, atau kontaminan lain agar sambungan akhir memiliki ikatan metalurgi yang optimal. Ketebalan plat, jenis logam, dan jarak antar plat juga diperhitungkan, karena faktor-faktor ini menentukan distribusi energi ledakan dan keberhasilan proses welding.

Plat dipasang pada fixture khusus untuk menahan posisi selama proses ledakan. Fixture dirancang agar mampu menahan gaya dinamis tinggi yang dihasilkan saat plat flyer dipercepat menuju

plat base. Penentuan sudut dan jarak flyer terhadap base juga krusial untuk menghasilkan gelombang tekanan yang tepat, yang akan menyebabkan deformasi plastik lokal pada kedua plat dan membentuk bonding metalurgi.

b. Peledakan dan Propagasi Gelombang

Tahap peledakan menjadi inti dari *Explosion Welding* (EW). *Charge explosive* ditempatkan di atas plat flyer dan kemudian dilepas secara terkontrol. Ledakan ini menghasilkan energi kinetik yang sangat tinggi, sehingga plat flyer terdorong dengan kecepatan antara 300 hingga 1000 m/s menuju plat base. Kecepatan tinggi ini memastikan benturan yang cukup untuk menghasilkan deformasi plastis lokal pada permukaan kedua plat. Proses ini terjadi dalam waktu sangat singkat, sehingga panas yang dihasilkan relatif minimal dibandingkan *welding* konvensional, sehingga mengurangi perubahan mikrostruktur dan tegangan sisa pada plat.

Saat plat flyer bertumbukan dengan plat base, terjadi interlocking mekanis akibat deformasi plastis yang ekstrem. Gelombang tekanan dari ledakan merambat sepanjang area sambungan, memastikan kontak atomik dan difusi permukaan yang cukup untuk membentuk ikatan metalurgi. Benturan ini juga menciptakan pola gelombang unik pada interface plat, yang meningkatkan kekuatan mekanik sambungan. Kombinasi energi kinetik, deformasi plastis, dan propagasi gelombang inilah yang menjadikan EW efektif untuk menyambungkan logam yang sulit disambung dengan metode konvensional.

c. *Bonding Solid-State*

Pada tahap bonding dalam *Explosion Welding* (EW), gesekan dan tekanan ekstrem yang terjadi saat plat flyer bertumbukan dengan plat base menghasilkan area kontak yang mengalami deformasi plastis intensif. Tekanan tinggi dan kecepatan benturan memungkinkan atom-atom di permukaan kedua logam untuk saling mendekat dan berikatan secara solid-state. Proses ini tidak melibatkan pelelehan logam, sehingga sifat mikrostruktur asli kedua material tetap terjaga. Hasilnya adalah sambungan yang memiliki kekuatan mekanik tinggi dengan distorsi dan tegangan sisa minimal dibandingkan metode pengelasan konvensional.

Proses EW menghasilkan pola interfacial waves yang khas pada area bonding. Gelombang ini terbentuk akibat gelombang tekanan dari ledakan yang merambat di interface, meningkatkan area kontak efektif dan ketahanan terhadap beban mekanik. Interlocking mekanis dan ikatan metalurgi solid-state inilah yang memberikan kekuatan luar biasa pada sambungan, sekaligus meminimalkan *Heat-Affected Zone* (HAZ) dan risiko retak.

5. Material *Explosion Welding* (EW) yang Dapat di Las

- a. Aluminium dan titanium.
- b. *Stainless steel* dan aluminium.
- c. Copper–aluminium, copper–titanium.
- d. Material paduan berat, logam non-ferrous, dan komposit.

6. Parameter Kunci *Explosion Welding* (EW)

- a. *Charge Explosive*: menentukan energi kinetik flyer.
- b. *Standoff Distance*: jarak antara flyer dan base → kontrol gelombang dan area bonding.
- c. *Flyer Velocity*: 300–1000 m/s → memengaruhi deformasi plastis dan integritas bonding.
- d. *Bonding Angle & Alignment*: sudut benturan memengaruhi interlocking dan profil interface.

D. Aplikasi pada Industri Kedirgantaraan dan Otomotif

Industri kedirgantaraan dan otomotif menghadapi tuntutan tinggi terkait efisiensi bahan, berat ringan, kekuatan struktur, dan keamanan. Pengelasan konvensional, yang menggunakan fusi logam dan gas pelindung, sering kali menimbulkan masalah seperti distorsi, tegangan sisa tinggi, HAZ lebar, dan keterbatasan bonding material dissimilar. Oleh karena itu, industri modern mengadopsi proses pengelasan canggih non-tradisional (*Advanced Non-Traditional Welding* – ANTW) seperti *Ultrasonic Welding* (USW), *Friction Stir Welding* (FSW), *Diffusion Bonding* (DB), dan *Explosion Welding* (EW). Proses ini menghasilkan sambungan *solid-state* atau *high-strain rate joining* dengan karakteristik:

1. Distorsi minimal

2. Kekuatan mekanik tinggi
3. Kemampuan mengelas material tipis, dissimilar, dan *high-performance alloys*
4. Integrasi dengan automasi dan *robotic manufacturing*.

a. Industri Kedirgantaraan

1) Kebutuhan dan Tantangan

Industri kedirgantaraan menuntut penggunaan material ringan dan performa tinggi seperti aluminium, titanium, *nickel-based superalloys*, dan magnesium alloys untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar dan kinerja struktural. Setiap sambungan harus memiliki kualitas tinggi agar risiko retak, deformasi, atau kegagalan struktural dapat diminimalkan selama operasi. Komponen kritis seperti panel pesawat, sayap, fuselage, dan fuel tank membutuhkan presisi tinggi, serta kemampuan untuk mengintegrasikan berbagai material (*dissimilar metals*) seperti aluminium-titanium atau aluminium-steel tanpa mengurangi kekuatan sambungan. Hal ini menuntut metode pengelasan yang mampu menghasilkan bead halus dengan distorsi minimal. Pengelasan konvensional menghadapi tantangan signifikan pada industri ini. Material tipis (0,5–5 mm) rentan terhadap distorsi dan tegangan sisa tinggi, sementara pengelasan dissimilar metals sering menimbulkan retak dan fasa intermetalik yang rapuh. *Heat-Affected Zone* (HAZ) yang terbentuk pada suhu tinggi berpotensi melemahkan material lokal, menurunkan kekuatan dan ketangguhan.

2) Penerapan *Friction Stir Welding* (FSW)

Friction Stir Welding (FSW) telah menjadi metode pengelasan yang sangat populer di industri kedirgantaraan karena kemampuannya mengatasi keterbatasan pengelasan konvensional pada material ringan dan paduan tinggi. Material utama yang sering dilas dengan FSW mencakup aluminium alloys seri 2xxx, 5xxx, dan 7xxx, serta magnesium dan titanium alloys. FSW digunakan secara luas untuk komponen kritis seperti panel fuselage, wing skins, fuel tanks, dan bulkheads. Keunggulan utama metode ini meliputi distorsi minimal, *Heat-Affected Zone* (HAZ) sempit, dan kekuatan sambungan yang hampir setara

dengan logam dasar. Selain itu, FSW memungkinkan pengelasan material dissimilar dengan microstructure homogen, sehingga meningkatkan integritas struktural dan keandalan sambungan.

Penerapan industri FSW sudah terbukti di level global. Boeing dan Airbus memanfaatkan FSW untuk merakit panel aluminium fuselage, yang memungkinkan pengurangan distorsi sambil mempertahankan presisi dimensi tinggi. NASA juga mengadopsi teknologi ini untuk panel aluminium-lithium pada spacecraft, di mana kekuatan sambungan dan pengendalian deformasi menjadi kritikal. Kemampuan FSW untuk menghasilkan sambungan berkualitas tinggi tanpa pelelehan signifikan menjadikannya solusi ideal bagi industri kedirgantaraan modern, di mana material ringan, performa tinggi, dan keandalan struktural merupakan tuntutan utama.

3) Penerapan *Diffusion Bonding* (DB)

Diffusion Bonding (DB) menjadi pilihan penting dalam industri kedirgantaraan, terutama untuk material yang sensitif terhadap panas seperti titanium alloys dan nickel-based superalloys. Metode ini memanfaatkan proses solid-state di mana atom dari permukaan material saling berdifusi di bawah tekanan dan suhu tinggi, tanpa melewati fase leleh. Pendekatan ini menghasilkan sambungan dengan *Heat-Affected Zone* (HAZ) yang minimal, menjaga mikrostruktur tetap stabil dan sifat mekanik material hampir setara dengan logam dasar. DB sangat cocok untuk komponen presisi tinggi, karena mampu menghasilkan sambungan homogen yang kuat tanpa risiko retak atau deformasi akibat panas berlebih.

4) Penerapan *Explosion Welding* (EW)

Explosion Welding (EW) merupakan teknik penting dalam industri kedirgantaraan untuk menyatukan material dissimilar yang sulit dielas dengan metode konvensional. Proses ini memanfaatkan ledakan terkontrol untuk meluncurkan plat “flyer” dengan kecepatan tinggi ke plat “base,” sehingga terjadi deformasi plastis ekstrem dan interlocking mekanis pada permukaan kontak. Bonding

terjadi secara *solid-state*, sehingga mikrostruktur dasar material tetap stabil dan *Heat-Affected Zone* (HAZ) minimal. Keunggulan EW terletak pada kemampuannya membentuk area bonding yang luas tanpa pelelehan, sehingga distorsi dan tegangan sisa dapat diminimalkan, menjadikannya sangat efektif untuk material yang tidak kompatibel secara fusi, seperti aluminium-titanium, titanium-steel, dan aluminium-copper.

5) *Ultrasonic Welding* (USW) pada Aerospace

Ultrasonic Welding (USW) telah menjadi metode penting dalam industri kedirgantaraan, terutama untuk aplikasi microelectronics dan komponen presisi tinggi. Proses ini menggunakan vibrasi ultrasonik berfrekuensi tinggi untuk menghasilkan gesekan mikro pada permukaan material tipis, seperti *aluminium foil*, *copper foil*, dan *sensor wiring*. Tekanan dari horn atau sonotrode menahan material sehingga terjadi difusi plastis antar permukaan tanpa pelelehan. Keunggulan utama USW adalah kecepatan proses yang sangat tinggi, berkisar dari milidetik hingga beberapa detik, yang memungkinkan produksi efisien untuk komponen skala kecil. Selain itu, proses ini menghasilkan distorsi minimal dan mempertahankan sifat mekanik material, sangat cocok untuk sambungan mikro dan lapisan tipis dalam *avionic systems* dan *battery tabs*.

b. Industri Otomotif

1) Kebutuhan dan Tantangan

Industri otomotif saat ini menghadapi tuntutan tinggi untuk meningkatkan efisiensi bahan dan performa kendaraan melalui penggunaan material ringan seperti *aluminium alloys*, *magnesium alloys*, *high-strength steels* (HSS), dan *advanced high-strength steels* (AHSS). Material ringan ini memungkinkan pengurangan bobot kendaraan, meningkatkan *fuel economy*, dan menurunkan emisi. Selain itu, kualitas sambungan pada komponen *safety-critical* seperti *chassis*, *body panels*, dan struktur rangka sangat penting untuk keselamatan penumpang. Proses produksi pun harus cepat dan konsisten untuk memenuhi target *high-volume assembly lines*, sehingga metode pengelasan harus

andal, presisi, dan kompatibel dengan otomatisasi industri modern.

Pengelasan konvensional menghadapi berbagai tantangan signifikan. Pengelasan body aluminium tipis cenderung menimbulkan distorsi dan tegangan sisa tinggi, sementara pengelasan material dissimilar seperti aluminium-steel sulit dilakukan tanpa menimbulkan cacat seperti porositas, undercut, atau lack-of-fusion. Heat input yang tinggi juga memperluas zona pengaruh panas (HAZ), menurunkan sifat mekanik lokal, dan dapat menyebabkan retak atau softening pada logam.

2) *Friction Stir Welding* (FSW) di Otomotif

Friction Stir Welding (FSW) telah menjadi teknologi penting dalam industri otomotif modern, khususnya untuk material ringan seperti *aluminium alloys* dan *magnesium alloys*. FSW digunakan secara luas pada *body panels*, chassis, dan interior panels, serta pada komponen kritis kendaraan listrik seperti *battery pack housing*. Metode ini bekerja sebagai proses *solid-state*, sehingga meminimalkan distorsi dan menghasilkan zona pengaruh panas (HAZ) yang sempit. Kekuatan sambungan yang dihasilkan mendekati logam dasar, sementara kemampuan FSW untuk menyambungkan material aluminium-aluminium maupun *aluminium-magnesium dissimilar alloys* menjadikannya ideal untuk aplikasi otomotif yang menuntut kualitas tinggi dan efisiensi bahan.

3) *Ultrasonic Welding* (USW) di Otomotif

Ultrasonic Welding (USW) menjadi metode pengelasan penting dalam industri otomotif, terutama untuk material tipis seperti copper foil, aluminium foil, sensor wires, dan termoplastik. Proses ini banyak digunakan untuk komponen kritis seperti wiring harness, battery tabs, dan microelectronic assemblies. Keunggulan utama USW adalah kemampuannya melakukan spot welding dalam waktu sangat singkat, yang sangat sesuai untuk lini produksi berkecepatan tinggi. Selain itu, proses ini menghasilkan sambungan presisi tinggi dengan distorsi

minimal, menjaga integritas material dan geometri komponen sensitif.

4) *Diffusion Bonding* (DB) di Otomotif

Diffusion Bonding (DB) menjadi metode pengelasan penting dalam industri otomotif untuk komponen presisi tinggi yang menuntut kualitas sambungan superior. Proses ini banyak digunakan pada *fuel injectors*, *heat exchangers*, dan komponen turbocharger, di mana akurasi dimensi, kekuatan sambungan, dan stabilitas mikrostruktur sangat kritis. DB memungkinkan bonding *solid-state* pada material seperti *titanium alloys*, *stainless steel*, dan *nickel-based superalloys*, sehingga mengurangi risiko distorsi, tegangan sisa, atau cacat yang biasanya terjadi pada proses fusi konvensional.

5) *Explosion Welding* (EW) di Otomotif

Explosion Welding (EW) menawarkan solusi unggul untuk pengelasan material dissimilar di industri otomotif, terutama aluminium-steel yang umum digunakan pada *structural panels* dan *heat exchangers*. Proses ini memanfaatkan ledakan terkendali untuk menggerakkan plat “flyer” menumbuk plat “base” dengan kecepatan tinggi, menghasilkan deformasi plastis lokal dan *bonding solid-state*. Karena tidak terjadi pelelehan, mikrostruktur material dasar tetap stabil dan HAZ minimal, sehingga distorsi dapat diminimalkan. Sambungan yang dihasilkan memiliki area bonding luas dan kuat, cocok untuk komponen *load-bearing* yang menuntut integritas struktural tinggi.



BAB V

TEKNOLOGI PENGELASAN OTOMATIS DAN ROBOTIK

Pengelasan otomatis dan *Robotik* merupakan evolusi penting dalam industri manufaktur modern, yang bertujuan meningkatkan konsistensi kualitas sambungan, produktivitas, dan keselamatan kerja. Teknologi ini memanfaatkan *Robot* industri yang diprogram untuk melakukan pengelasan berulang dengan presisi tinggi, sehingga meminimalkan variasi akibat faktor manusia. Sistem *Robot* pengelasan mampu menangani beragam jenis sambungan, mulai dari komponen tipis hingga struktur besar, serta dapat diintegrasikan dengan berbagai metode pengelasan canggih seperti MIG, TIG, dan *laser beam welding*.

Integrasi sensor dan vision system menjadi kunci dalam pengelasan otomatis. Sensor real-time memungkinkan pengukuran posisi, kecepatan, dan parameter proses, sementara sistem vision menggunakan kamera dan laser untuk mendeteksi posisi sambungan dan kondisi material. Kombinasi ini mendukung pengelasan adaptif, di mana parameter las dapat disesuaikan secara otomatis berdasarkan kondisi aktual, sehingga mengurangi cacat, meningkatkan kualitas, dan mempercepat proses produksi. Pemanfaatan data dari sensor juga memungkinkan monitoring berbasis analitik untuk optimasi proses dan pemeliharaan prediktif robotik.

A. Sistem *Robot* Pengelasan

Pada industri manufaktur modern, otomasi dan *Robotik* telah menjadi aspek kunci untuk meningkatkan produktivitas, kualitas, dan konsistensi proses pengelasan. Sistem *Robot* pengelasan (*Welding Robot Systems*) memungkinkan perusahaan untuk memproduksi komponen kompleks secara cepat dengan presisi tinggi dan minim

distorsi (Groover, 2016). *Robot* pengelasan merupakan bagian dari kategori *automated welding systems*, yang mencakup:

1. *Arc welding robots* (MIG/MAG, TIG, Plasma)
2. *Laser welding robots*
3. *Hybrid Welding systems* (FSW + laser, laser + arc)

1. Komponen Sistem *Robot* Pengelasan

Sistem *Robot* pengelasan terdiri dari beberapa komponen inti yang saling terintegrasi:

a. *Robot Manipulator*

Umumnya berupa articulated *Robot* dengan 4–6 sumbu gerak, memungkinkan fleksibilitas posisi torch dan tool. Manipulator digunakan untuk menggerakkan alat las (*torch*) sepanjang jalur sambungan. Sumbu *Robot* menentukan area kerja, orientasi torch, dan path planning.

b. *End-Effector / Welding Torch*

Torch adalah bagian yang menyampaikan sumber energi ke logam, bisa berupa MIG/MAG, TIG, Plasma, atau Laser. *End-effector* dapat dilengkapi dengan sensor untuk monitoring jarak, kecepatan, dan posisi secara real-time. Desain torch ergonomis dan modular memungkinkan pertukaran cepat antara proses las.

c. *Controller dan Software*

Controller dan *software* merupakan komponen kunci dalam sistem *Robot* pengelasan modern, berfungsi mengatur gerakan robot, kecepatan travel, rotasi sumbu, dan urutan pengelasan. *Controller* memastikan setiap langkah *Robot* presisi sesuai program, sehingga jalur torch dapat diikuti secara konsisten. Hal ini sangat penting terutama untuk sambungan kompleks atau geometri komponen yang rumit, di mana kesalahan kecil pada posisi atau kecepatan dapat menyebabkan cacat las, spatter berlebih, atau penetrasi tidak merata.

d. *Power Source dan Wire Feeder*

Power source dan *wire feeder* merupakan komponen vital dalam sistem *Robot* pengelasan, berperan menyediakan energi yang stabil dan kontinu untuk menghasilkan kolam las berkualitas tinggi. *Power source* dapat berupa MIG, MAG, TIG, atau laser, tergantung pada jenis material dan spesifikasi sambungan. Parameter penting seperti arus, tegangan, dan pulsa

energi diatur secara otomatis sesuai karakteristik material, ketebalan plat, dan tipe sambungan. *Wire feeder* otomatis memastikan kawat pengisi (*filler wire*) disuplai dengan kecepatan dan panjang yang tepat, menjaga kontinuitas kolam las serta mencegah cacat akibat suplai kawat tidak konsisten.

e. Sensor dan *Vision System*

Sensor dan *vision system* menjadi komponen penting dalam sistem *Robot* pengelasan modern karena kemampuannya memberikan *feedback real-time* yang akurat. *Laser displacement sensors* memantau posisi torch terhadap sambungan, memastikan jarak dan sudut optimal untuk penetrasi dan bentuk bead yang konsisten. *Vision cameras* menangkap citra permukaan sambungan untuk mendeteksi deviasi jalur, cacat seperti undercut, atau ketidakseragaman bead. Sementara itu, *infrared sensors* mengukur suhu kolam las dan sekitarnya, membantu mengontrol heat input agar HAZ tetap sempit dan distorsi minimal. Integrasi ketiga jenis sensor ini memungkinkan *Robot* menyesuaikan parameter pengelasan secara adaptif tanpa intervensi operator, sehingga kualitas sambungan lebih konsisten dan prediktabilitas proses meningkat (Eren *et al.*, 2023).

2. Jenis Sistem *Robot* Pengelasan

a. *Articulated Robot Welding*

Articulated Robot welding merupakan jenis *Robot* pengelasan yang paling banyak digunakan dalam industri otomotif dan kedirgantaraan karena fleksibilitas dan kemampuannya menjangkau posisi sambungan kompleks. Dengan 6-axis, *Robot* ini dapat bergerak dalam berbagai arah, menyesuaikan orientasi torch untuk mengikuti kontur komponen, termasuk permukaan melengkung atau sudut sempit. Fleksibilitas ini memungkinkan penggunaan berbagai jenis torch, mulai dari MIG/MAG, TIG, hingga laser, sehingga dapat mengelas material tipis maupun tebal dengan presisi tinggi. Konfigurasi articulated *Robot* sangat ideal untuk jalur sambungan yang sulit dijangkau manusia atau *Robot* dengan struktur lebih sederhana, menjadikannya andalan pada lini produksi high-volume maupun komponen presisi tinggi.

b. *Gantry / Cartesian Robot Welding*

Gantry atau *Cartesian Robot welding* adalah sistem *Robot* pengelasan yang bergerak secara linear pada sumbu X, Y, dan Z. *Robot* jenis ini biasanya digunakan untuk komponen besar yang memerlukan area kerja luas, seperti panel pesawat, kapal, atau chassis kendaraan berat. Gerakan linear pada setiap sumbu memungkinkan pengelasan presisi tinggi pada permukaan datar dan struktur besar yang sulit dijangkau oleh *Robot articulated*. Karena konfigurasi gantry cenderung stabil dan kaku, sistem ini mampu menahan beban torch dan komponen besar tanpa kehilangan akurasi, sehingga menghasilkan sambungan dengan kualitas konsisten.

c. *SCARA / Parallel Robot Welding*

SCARA (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*) atau *parallel Robot welding* merupakan sistem *Robot* pengelasan yang banyak digunakan untuk sambungan mikro atau komponen elektronik dengan ukuran kecil. *Robot* ini memiliki struktur paralel yang memungkinkan gerakan cepat pada sumbu horizontal dengan presisi tinggi, sehingga sangat ideal untuk siklus produksi pendek dan volume tinggi. Dengan akurasi posisi mencapai $\pm 0,05$ mm, SCARA mampu melakukan pengelasan pada *battery tabs*, sensor wiring, dan rangkaian elektronik lainnya tanpa merusak komponen sensitif. Struktur *Robot* yang kompak juga memungkinkan integrasi dengan stasiun otomatisasi mikro, sehingga efisiensi produksi meningkat secara signifikan.

d. *Collaborative Welding Robots (Cobots)*

Collaborative welding robots, atau *cobots*, merupakan *Robot* ringan yang dirancang untuk bekerja berdampingan dengan operator manusia tanpa memerlukan *cage safety* tradisional. *Cobots* dilengkapi *sensor force* dan *proximity* yang memungkinkan deteksi kontak atau jarak dengan manusia, sehingga keselamatan kerja tetap terjaga. Keunggulan utama *cobots* adalah fleksibilitasnya; mudah diprogram ulang untuk berbagai jenis tugas pengelasan, sehingga cocok untuk produksi batch kecil atau variasi produk yang tinggi. Dalam industri otomotif premium, *cobots* banyak digunakan untuk *assembly lines* yang memerlukan pengelasan presisi pada komponen

kompleks, di mana fleksibilitas dan adaptasi cepat menjadi kunci efisiensi (Schumacher *et al.*, 2022).

3. Prinsip Kerja dan Kontrol *Robot* Pengelasan

a. *Path Planning* dan *Programming*

Path planning dan *programming* merupakan aspek krusial dalam pengoperasian *Robot* pengelasan modern. Dalam *offline programming*, model CAD/CAM digunakan untuk merancang jalur *Robot* sebelum produksi dimulai. Metode ini memungkinkan simulasi lengkap dari proses pengelasan, termasuk optimasi travel speed, torch angle, dan spacing antar titik las, sehingga potensi cacat atau distorsi dapat diminimalkan. Keuntungan utama dari pendekatan ini adalah kemampuan untuk merencanakan jalur kompleks tanpa menghentikan lini produksi, serta memungkinkan evaluasi interaksi *Robot* dengan komponen sebelum implementasi fisik.

Online programming atau *teaching* memanfaatkan operator untuk menggerakkan *Robot* secara manual, sehingga path *Robot* direkam secara real-time. Metode ini berguna untuk komponen unik atau variasi batch kecil yang sulit diprediksi melalui CAD/CAM. Dengan kombinasi software modern dan sensor feedback, sistem dapat menyesuaikan jalur dan parameter pengelasan secara adaptif selama proses berlangsung. Pendekatan hybrid ini memastikan kualitas sambungan optimal, meningkatkan konsistensi, dan mengurangi risiko cacat pada berbagai tipe material dan geometri sambungan.

b. Parameter Pengelasan Otomatis

Parameter pengelasan otomatis menjadi elemen penting dalam memastikan kualitas dan konsistensi sambungan pada *Robot* pengelasan. Kecepatan travel robot, biasanya berkisar antara 20 hingga 1000 mm/s, disesuaikan dengan jenis material, ketebalan, dan metode pengelasan yang digunakan. Selain itu, rotasi torch $\pm 30^\circ$ memungkinkan *Robot* menjangkau sambungan kompleks dan mempertahankan orientasi optimal untuk penetrasi dan *bead geometry* yang seragam. Sistem kontrol modern mengatur arus, tegangan, dan *feed wire* secara otomatis, sehingga input energi selalu sesuai kondisi aktual sambungan dan material.

Adaptive welding memungkinkan *Robot* menyesuaikan parameter secara real-time berdasarkan feedback sensor, seperti laser displacement, vision system, dan thermal sensor. Dengan kemampuan ini, perubahan *joint gap*, *warpage*, atau *deflection* dapat dikompensasi secara langsung, mengurangi risiko cacat seperti undercut, spatter, atau porositas. Integrasi kontrol otomatis dan sensor feedback meningkatkan produktivitas, presisi, serta stabilitas kualitas sambungan pada lini produksi otomotif dan *aerospace* yang menuntut toleransi sangat ketat.

c. *Sensor-Based Feedback Control*

Sensor-based feedback control menjadi tulang punggung sistem *Robot* pengelasan modern untuk memastikan konsistensi dan kualitas sambungan. *Vision systems*, misalnya, digunakan untuk memantau posisi *torch* terhadap *joint* secara real-time, sehingga jalur pengelasan dapat dikoreksi jika terdapat deviasi akibat variasi geometri atau pergeseran material. Thermal sensors memantau temperatur pada zona pengaruh panas (HAZ), memungkinkan kontrol *cooling rate* yang tepat dan mencegah terbentuknya mikrostruktur rapuh atau distorsi berlebih. Sementara itu, *force* dan *torque sensors* mengatur tekanan torch pada sambungan, menjaga kontak optimal antara elektroda dan material serta menghindari cacat mekanik pada bead.

4. Material Robot Pengelasan

- a. *Aluminium alloys: automotive body panels, aerospace panels.*
- b. *Steel dan stainless steel: chassis, pipelines, structural components.*
- c. *Titanium alloys: aerospace fuselage, aircraft frames.*
- d. *Magnesium alloys: automotive interior panels, EV battery housing.*
- e. *Dissimilar metals: aluminium-steel, aluminium-copper → Hybrid Welding (FSW + robotic MIG).*

B. Sensor dan *Vision System* dalam Pengelasan

Pengelasan otomatis dan *Robotik* telah merevolusi industri manufaktur modern dengan meningkatkan presisi, kecepatan, dan kualitas sambungan. Salah satu faktor kunci yang memungkinkan *Robot* pengelasan mencapai performa tinggi adalah integrasi sensor dan

vision system untuk monitoring, kontrol, dan adaptasi proses secara real-time (Ma *et al.*, 2025). Sensor dan sistem visi (*vision systems*) dalam pengelasan memungkinkan:

1. Pemantauan posisi *torch* terhadap *joint*
2. Deteksi cacat awal seperti porositas, undercut, atau spatter
3. Kontrol adaptif energi, kecepatan, dan tekanan
4. Optimasi path dan *process* parameters secara otomatis

1. Tipe Sensor dalam Pengelasan Robotik

Sensor dalam pengelasan *Robotik* dapat diklasifikasikan berdasarkan fungsi dan parameter yang diukur:

a. Sensor Posisi dan *Displacement*

Sensor posisi dan *displacement* berperan penting dalam pengelasan *Robotik* untuk memastikan *torch* tetap berada pada jarak optimal terhadap permukaan material. Sensor ini bekerja dengan mengukur jarak secara presisi menggunakan berbagai prinsip, termasuk *laser triangulation*, *eddy current*, atau *capacitive sensors*. Dengan data yang dihasilkan, sistem *Robot* dapat menyesuaikan posisi *torch* secara real-time, sehingga penetrasi las tetap konsisten dan lebar bead terjaga. Hal ini sangat penting pada proses seperti MIG/MAG atau TIG, di mana variasi kecil pada jarak elektroda dapat menyebabkan ketidakseragaman bead atau cacat seperti undercut dan spatter.

b. Sensor Suhu dan *Thermal Imaging*

Sensor suhu dan *thermal imaging* berperan krusial dalam pengelasan *Robotik* untuk memantau temperatur kolam las dan HAZ secara real-time. Sensor ini menggunakan berbagai teknologi, termasuk *infrared thermometers*, *pyrometers*, dan *thermal cameras*, untuk menangkap distribusi panas selama proses pengelasan. Data temperatur yang diperoleh memungkinkan sistem kontrol *Robot* menyesuaikan parameter pengelasan, seperti arus, tegangan, dan *travel speed*, guna menjaga *cooling rate* yang optimal. Pengendalian *cooling rate* sangat penting karena memengaruhi pembentukan fasa mikrostruktur, kekerasan, dan kekuatan sambungan akhir, serta membantu mengurangi risiko cacat termal seperti retak panas atau deformasi.

c. Sensor Arus dan Tegangan

Sensor arus dan tegangan merupakan komponen penting dalam pengelasan *Robotik* untuk memantau kondisi listrik selama proses pengelasan. Sensor ini mengukur parameter kritis seperti arus, tegangan, dan *power input* yang diterapkan pada busur listrik, baik pada proses MIG/MAG maupun TIG. Data yang diperoleh dari sensor ini membantu memastikan stabilitas busur, menghindari fluktuasi yang dapat menyebabkan cacat seperti spatter, undercut, atau penetrasi tidak merata. Monitoring parameter listrik secara real-time juga memungkinkan identifikasi masalah seperti sambungan terbuka atau variasi resistansi material, yang dapat memengaruhi kualitas bead dan sifat mekanik sambungan akhir.

d. *Force / Torque Sensor*

Force dan *torque sensor* menjadi komponen krusial dalam pengelasan robotik, khususnya pada proses solid-state seperti *Friction Stir Welding* (FSW) dan *Ultrasonic Welding* (USW). Sensor ini mengukur tekanan axial atau torsi yang diberikan oleh tool terhadap material selama proses pengelasan. Data ini memastikan bahwa tool menekan material dengan gaya yang optimal untuk menghasilkan penetrasi yang konsisten, aliran material yang homogen, dan interlocking yang efektif antara lapisan logam. Dengan pemantauan real-time, sensor membantu menjaga kualitas sambungan, mencegah cacat seperti void, underfill, atau bonding yang tidak sempurna, yang sangat penting pada aplikasi material tipis atau komponen presisi tinggi.

e. *Sensor Optical dan Laser Profiling*

Sensor optikal dan *laser profiling* merupakan teknologi kunci dalam pengelasan *Robotik* modern, terutama untuk memastikan presisi sambungan pada komponen kompleks. Sensor ini mengukur *profil joint* secara real-time, mendeteksi celah, keselarasan (*alignment*), atau warpage pada material sebelum dan selama proses pengelasan. Dengan akurasi tinggi, biasanya dalam skala mikrometer, data yang diperoleh memungkinkan *Robot* menyesuaikan posisi *torch* atau *tool* agar selalu berada

pada jalur optimal. Teknologi yang umum digunakan meliputi laser triangulation dan structured light, yang mampu memetakan permukaan 3D dengan cepat dan presisi, serta meminimalkan risiko cacat akibat misalignment atau gap yang tidak seragam.

2. *Vision System* dalam Pengelasan

Vision system menggunakan kamera dan algoritma pengolahan citra untuk monitoring visual dan pengendalian proses.

a. Komponen *Vision System*

- 1) *Cameras*: High-speed CCD/CMOS untuk *capture image* atau video.
- 2) *Lighting*: Laser line, LED, atau *strobe lighting* → memastikan kontras dan visibilitas.
- 3) *Processing Unit*: FPGA atau GPU untuk real-time image processing.
- 4) *Software*: Algoritma *computer vision*, *pattern recognition*, dan *Machine Learning* untuk deteksi joint dan cacat.

b. Fungsi *Vision System*

Vision system dalam pengelasan *Robotik* berperan penting untuk meningkatkan akurasi dan kualitas sambungan. Fungsi utamanya meliputi joint tracking, yaitu memastikan *torch* atau *tool Robot* selalu mengikuti seam atau *weld line* secara presisi selama proses pengelasan. Selain itu, *vision system* juga melakukan seam detection sebelum pengelasan dimulai, memungkinkan *Robot* untuk memetakan path las secara otomatis berdasarkan citra 3D dari komponen. Dengan kemampuan ini, potensi kesalahan akibat keselarasan yang tidak tepat dapat diminimalkan, sehingga menghasilkan bead yang seragam dan konsisten.

c. Teknologi *Vision Modern*

Teknologi *vision modern* dalam pengelasan *Robotik* menghadirkan kemampuan canggih untuk meningkatkan presisi dan kualitas sambungan. Sistem laser vision, misalnya, mampu mengukur profil 3D dari joint, sangat berguna pada proses seperti *Friction Stir Welding* (FSW) atau laser welding. Dengan pemetaan 3D yang akurat, *Robot* dapat menyesuaikan posisi tool secara *real-time* untuk menjaga konsistensi penetrasi dan

bentuk *bead*, bahkan pada sambungan kompleks atau permukaan melengkung. Sementara itu, *infrared vision* digunakan untuk monitoring temperatur sambungan, memungkinkan kontrol *cooling rate* dan prediksi mikrostruktur akhir sambungan.

3. Integrasi Sensor dan *Vision System*

a. *Closed-Loop Control*

Integrasi sensor dan vision system dalam pengelasan *Robotik* memungkinkan implementasi *closed-loop control* yang canggih, di mana data real-time digunakan untuk menyesuaikan parameter proses secara otomatis. Sensor posisi, displacement, dan *force/torque* memonitor jarak *torch*, tekanan tool, dan interaksi dengan material. Sementara itu, *vision system* memantau profil sambungan, seam tracking, dan deteksi cacat seperti porositas atau undercut. Semua informasi ini dikirim ke *Robot controller* untuk memodifikasi jalur, kecepatan, dan orientasi *torch* secara real-time, memastikan kualitas sambungan tetap optimal meskipun terjadi variasi pada joint atau material.

b. *Adaptive Welding* untuk *Material Dissimilar*

Adaptive welding untuk *material dissimilar* memanfaatkan integrasi sensor dan *vision system* agar proses pengelasan dapat disesuaikan secara real-time dengan karakteristik masing-masing material. Pada sambungan *aluminium-steel* atau aluminium-titanium, perbedaan konduktivitas termal, reflektivitas, dan koefisien ekspansi termal menimbulkan tantangan signifikan. Sensor posisi, *displacement*, dan *optical profiling* memantau gap, *alignment*, dan kondisi permukaan sambungan. Sementara itu, *thermal sensor* memantau distribusi panas untuk mencegah overmelting pada material ringan atau underheating pada material berat. Data ini dikirim ke *controller Robot* untuk menyesuaikan parameter pengelasan secara adaptif, termasuk orientasi *torch*, *travel speed*, dan *energy input*, sehingga penetrasi optimal dan kualitas bonding tercapai.

c. Monitoring Microstructure dan HAZ

Monitoring mikrostruktur dan zona pengaruh panas (HAZ) dalam pengelasan *Robotik* sangat penting untuk menjamin

kualitas sambungan. Dengan integrasi *thermal sensors* dan *vision system*, distribusi suhu selama pengelasan dapat dipantau secara real-time, memungkinkan prediksi pertumbuhan butiran dan perubahan fasa di HAZ. Data suhu yang akurat memungkinkan pengaturan *cooling rate* sehingga pembentukan fasa rapuh, *overtempering*, atau *grain coarsening* dapat diminimalkan. Hal ini sangat krusial pada material sensitif seperti *aluminium alloys*, *titanium alloys*, atau baja tahan karat, di mana sifat mekanik dan korosi sangat bergantung pada mikrostruktur akhir.

C. *Machine Learning* untuk Optimasi Las

Seiring perkembangan industri 4.0, pengelasan otomatis dan *Robotik* tidak hanya mengandalkan *Robot multi-axis*, sensor, dan *vision system*, tetapi juga *Machine Learning*(AI) untuk optimasi proses las. AI memungkinkan analisis data besar (*big data*), prediksi cacat, optimasi parameter las, dan kontrol adaptif secara real-time (Moinuddin *et al.*, 2024). Penerapan AI dalam pengelasan *Robotik* mencakup:

1. Optimasi *travel speed*, arus, tegangan, dan *feed wire*.
2. Deteksi *defect welding* secara otomatis.
3. *Adaptive control* untuk material dissimilar, panel tipis, dan geometri kompleks.
4. Integrasi sensor fusion dan *Machine Learning* untuk prediksi kualitas sambungan.

1. Peran AI dalam Pengelasan Modern

AI digunakan untuk mengubah data sensor dan *vision system* menjadi kontrol adaptif yang cerdas. Beberapa peran utama AI adalah:

a. Optimalisasi Parameter Las

Peran kecerdasan buatan (AI) dalam pengelasan modern sangat signifikan, terutama dalam optimalisasi parameter las untuk mencapai kualitas sambungan yang konsisten. Dengan integrasi sensor dan *vision system*, AI mampu memonitor kondisi real-time seperti posisi *torch*, gap sambungan, temperatur HAZ, dan profil bead. Berdasarkan data ini, algoritma AI secara otomatis menyesuaikan arus, tegangan, *travel speed*, dan *feed wire* sesuai kebutuhan spesifik material dan geometri sambungan.

Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi produksi, tetapi juga meminimalkan risiko cacat seperti porositas, undercut, dan distorsi pada material tipis atau dissimilar metals.

b. **Prediksi dan Deteksi Cacat**

Kecerdasan buatan (AI) berperan penting dalam prediksi dan deteksi cacat pengelasan modern melalui analisis data real-time yang diperoleh dari berbagai sensor. Sensor thermal, displacement, dan vision system mengumpulkan informasi kritis mengenai kondisi kolam las, posisi torch, dan profil permukaan sambungan. Algoritma *Machine Learning* kemudian memproses data ini untuk memprediksi potensi cacat sebelum benar-benar terbentuk, memungkinkan tindakan korektif dilakukan secara proaktif. Dengan pendekatan ini, cacat seperti porositas, undercut, spatter, dan ketidakteraturan bead dapat diantisipasi, mengurangi risiko kegagalan sambungan dan memperbaiki kualitas keseluruhan produksi.

c. ***Adaptive Control***

Kecerdasan buatan (AI) memungkinkan implementasi kontrol adaptif (*adaptive control*) dalam pengelasan modern melalui sistem *closed-loop* yang menyesuaikan parameter proses secara otomatis. Data real-time dari sensor, seperti thermal, displacement, dan *vision system*, dianalisis oleh algoritma AI untuk menentukan penyesuaian optimal pada torch angle, travel speed, dan power input. Dengan pendekatan ini, sistem pengelasan dapat merespons perubahan kondisi sambungan secara instan, misalnya variasi gap, ketebalan material, atau deformasi yang terjadi selama proses. Hal ini memastikan konsistensi penetrasi, bentuk bead yang presisi, dan distribusi tegangan sisa yang minimal, sehingga kualitas sambungan meningkat secara signifikan.

d. ***Process Planning dan Path Optimization***

Peran AI dalam perencanaan proses pengelasan dan optimisasi jalur *Robot* semakin penting dalam pengelasan modern. Dengan memanfaatkan data CAD/CAM dari desain komponen, AI dapat menentukan path optimal yang harus dilalui oleh torch atau tool selama proses pengelasan. Informasi tambahan dari sensor real-time, seperti posisi, temperatur, dan profil permukaan, memungkinkan sistem untuk menyesuaikan jalur secara adaptif

sehingga meminimalkan deviasi dari desain yang diinginkan. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan akurasi pengelasan, tetapi juga mengurangi risiko cacat akibat ketidaksesuaian jarak torch atau variasi HAZ yang tidak terkendali.

2. Metode AI yang Digunakan dalam Pengelasan

a. *Neural Networks*

Neural networks menjadi salah satu metode AI yang paling banyak digunakan dalam pengelasan modern karena kemampuannya untuk mengenali pola kompleks dari data sensor. Data input bisa berupa informasi suhu, deformasi, posisi torch, jenis material, ketebalan plat, dan karakteristik busur listrik. *Neural networks* kemudian memproses data ini untuk memprediksi kualitas sambungan dan menentukan kemungkinan terjadinya cacat seperti porositas, undercut, atau *bead irregularities*. Dengan model yang dilatih menggunakan data historis dan eksperimental, *neural networks* mampu memberikan estimasi yang akurat terhadap perilaku sambungan sebelum pengelasan selesai.

b. *Fuzzy Logic Systems*

Fuzzy logic systems menjadi metode AI yang efektif dalam pengelasan karena kemampuannya menangani ketidakpastian dan variabilitas proses yang sering muncul pada aplikasi industri. Berbeda dengan kontrol konvensional yang memerlukan nilai input presisi, *fuzzy logic* mampu bekerja dengan data yang tidak pasti, misalnya variasi gap sambungan, deformasi material, atau fluktuasi suhu. Sistem ini memodelkan logika manusia dengan aturan “IF-THEN” berbasis fuzzy sets untuk menilai kondisi sambungan secara real-time. Dengan pendekatan ini, *Robot* pengelasan dapat menyesuaikan perilaku secara adaptif meskipun data sensor tidak sempurna atau kondisi lapangan berubah-ubah.

c. *Machine Learning (ML) & Deep Learning*

Machine Learning (ML) dan *Deep Learning* telah menjadi alat penting dalam pengelasan modern, terutama untuk meningkatkan kualitas sambungan dan efisiensi proses. ML digunakan untuk berbagai tugas, seperti klasifikasi cacat las, prediksi sifat HAZ, dan optimasi parameter proses. Algoritma

ini memproses data sensor, termasuk arus, tegangan, *displacement*, dan temperatur, untuk menghasilkan prediksi yang akurat tentang perilaku sambungan. Dengan kemampuan belajar dari data historis, ML dapat mengidentifikasi pola yang sulit dideteksi secara manual, sehingga mendukung pengambilan keputusan otomatis dalam pengelasan robotik.

d. *Reinforcement Learning*

Reinforcement Learning (RL) merupakan pendekatan AI yang memungkinkan *Robot* pengelasan belajar secara mandiri melalui proses *trial and error* dalam simulasi digital. Dalam metode ini, *Robot* menerima umpan balik berupa reward atau penalti berdasarkan kualitas hasil sambungan yang dihasilkan dari setiap aksi, seperti penyesuaian path, kecepatan travel, atau power input. Dengan iterasi berulang, sistem RL dapat menemukan strategi optimal untuk mencapai sambungan berkualitas tinggi, meminimalkan cacat, dan mengurangi distorsi. Metode ini sangat berguna ketika kondisi proses kompleks atau tidak sepenuhnya diketahui, sehingga algoritma dapat menyesuaikan tindakan berdasarkan pengalaman belajar.

e. *Sensor Fusion AI*

Sensor Fusion AI merupakan metode canggih dalam pengelasan modern yang mengintegrasikan data dari berbagai jenis sensor, termasuk *thermal sensors*, *displacement sensors*, dan *vision system*. Dengan menggabungkan informasi dari sumber yang berbeda, sistem AI dapat memperoleh gambaran menyeluruh mengenai kondisi sambungan secara real-time, termasuk posisi torch, temperatur HAZ, profil permukaan, dan potensi cacat. *Data multi-source* ini kemudian diproses menggunakan algoritma *Machine Learning* atau *deep learning* untuk memberikan kontrol adaptif yang lebih akurat. Pendekatan ini memungkinkan *Robot* pengelasan menyesuaikan parameter las secara presisi, seperti kecepatan travel, arus, tegangan, dan orientasi torch, sesuai kondisi aktual pada sambungan.

D. Pengelasan Adaptif dan *Real-Time Control*

Pengelasan otomatis modern tidak hanya bergantung pada *Robot multi-axis* dan sensor, tetapi juga pada sistem pengelasan adaptif

(*adaptive welding*) dan kontrol real-time. Teknologi ini memungkinkan *Robot* pengelasan menyesuaikan parameter las secara otomatis berdasarkan kondisi aktual sambungan, seperti geometri, ketebalan, dan variasi material (Eren *et al.*, 2023). Konsep *adaptive welding* berkembang dari kebutuhan industri untuk:

1. Menangani material tipis, dissimilar metals, dan geometri kompleks.
2. Meningkatkan kualitas sambungan, konsistensi, dan produktivitas.
3. Mengurangi cacat las dan distorsi termal.

Pada industri otomotif, kedirgantaraan, dan energi, pengelasan adaptif telah menjadi standar karena mendukung *high-precision, high-speed welding* dengan intervensi manusia minimal.

Pengelasan adaptif menggunakan data sensor real-time untuk menyesuaikan parameter las, termasuk:

1. *Torch position dan angle*
2. *Travel speed*
3. *Power input (current & voltage)*
4. *Wire feed rate*

Sistem adaptif mengintegrasikan sensor dan *vision system*, sehingga menghasilkan *closed-loop control* yang secara otomatis memperbaiki kondisi proses las jika terjadi penyimpangan dari kondisi optimal.

1. Adaptive Arc Welding (MIG/MAG/TIG)

Adaptive Arc Welding menggunakan teknologi *Robotik* canggih untuk menyesuaikan parameter pengelasan secara real-time, termasuk arus, tegangan, dan *travel speed*. Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan data dari sensor dan *vision system* yang memantau kondisi sambungan saat proses berlangsung. Misalnya, variasi jarak sambungan (*joint gap*) dapat memengaruhi penetrasi logam cair dan stabilitas busur. Dengan *adaptive control*, *Robot* secara otomatis menyesuaikan arus dan tegangan untuk menjaga kolam las tetap stabil, sehingga hasil penetrasi dan *bead geometry* tetap optimal. Pendekatan ini penting untuk memastikan kualitas sambungan konsisten terutama pada material tipis atau sambungan kompleks yang rawan cacat.

Warpage panel atau *distorsi material* selama proses pengelasan juga dapat dikompensasi secara otomatis. Sensor mengidentifikasi deformasi permukaan, dan *controller* menyesuaikan *travel speed* atau

torch orientation agar bead tetap presisi. Hal ini mencegah terbentuknya undercut, overlap, atau ketidakseragaman lebar bead. *Adaptive welding* juga membantu meminimalkan HAZ yang terlalu luas akibat heat input berlebih, sehingga sifat mekanik logam di sekitar sambungan tetap terjaga. Dengan demikian, risiko retak atau penurunan kekuatan lokal dapat diminimalkan.

2. Adaptive FSW (*Friction Stir Welding*)

Adaptive Friction Stir Welding (FSW) memanfaatkan teknologi sensor untuk mengoptimalkan proses pengelasan secara real-time, terutama pada material sensitif seperti *aluminium-lithium panels* yang banyak digunakan di industri kedirgantaraan. *Force sensor* mengukur tekanan atau torsi yang diberikan tool pada material, sedangkan thermal sensor memantau temperatur lokal di sekitar kolam las. Data ini diproses oleh *controller Robot* untuk menyesuaikan *rotational speed*, *travel speed*, dan *downforce tool* sehingga aliran material plastis tetap optimal. Pendekatan ini memastikan bonding yang homogen, mencegah void atau *underfill*, serta menjaga kualitas mikrostruktur di *zona nugget* dan *Heat-Affected Zone* (HAZ) (Mishra *et al.*, 2016).

Keunggulan utama *adaptive FSW* terletak pada kemampuannya mengontrol distorsi dan HAZ yang sempit. *Aluminium-lithium alloys* sangat rentan terhadap distorsi dan tegangan sisa karena rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi. Dengan *sensor-based control*, tool secara otomatis menyesuaikan torsi dan kecepatan translasi untuk mengurangi panas berlebih dan deformasi panel. HAZ yang lebih sempit mempertahankan sifat mekanik dasar material di sekitar sambungan, sehingga *fatigue life* komponen meningkat. Hal ini penting untuk aplikasi aerospace di mana keselamatan dan daya tahan jangka panjang menjadi prioritas.

3. Laser Adaptive Welding

Laser adaptive welding merupakan teknologi pengelasan modern yang memanfaatkan kontrol real-time terhadap parameter laser untuk mencapai kualitas sambungan optimal. Dalam proses ini, daya laser, fokus, dan *travel speed* diatur secara otomatis berdasarkan kondisi aktual sambungan, termasuk variasi ketebalan material, gap antara panel, dan *geometri joint*. Sensor dan *vision system* memantau posisi torch, profil *seam*, dan area kolam las, sehingga sistem dapat

menyesuaikan intensitas laser dan arah fokus secara instan. Pendekatan ini memungkinkan penetrasi yang konsisten, mengurangi risiko *undercut*, *spatter*, atau *keyhole collapse*, terutama pada material tipis dan sambungan presisi tinggi seperti aluminium, titanium, atau stainless steel.

Keunggulan utama *laser adaptive welding* adalah kemampuannya menjaga kualitas sambungan pada kondisi variatif. *Vision system* memproyeksikan citra 2D/3D joint secara real-time, kemudian AI atau algoritma *Machine Learning* memproses data tersebut untuk prediksi penetrasi dan deteksi potensi cacat sebelum terbentuk. Dengan cara ini, torch secara otomatis menyesuaikan fokus, *travel speed*, dan *daya laser*, sehingga HAZ tetap sempit dan sifat mekanik material tidak menurun. Hal ini sangat penting untuk aplikasi aerospace dan elektronik, di mana dimensi ketat dan integritas struktural menjadi prioritas.

4. Hybrid Adaptive Welding

Hybrid adaptive welding merupakan teknologi pengelasan canggih yang menggabungkan dua atau lebih metode pengelasan, misalnya laser + arc atau FSW + laser, untuk mengoptimalkan proses dan kualitas sambungan. Dalam sistem ini, berbagai sumber energi bekerja secara simultan sehingga penetrasi, distribusi panas, dan aliran material dapat dikontrol dengan presisi tinggi. Pendekatan hybrid memungkinkan pengelasan material dissimilar yang sulit dicapai dengan metode tunggal, sekaligus meningkatkan kecepatan produksi tanpa mengorbankan kualitas sambungan. Sistem adaptif kompleks ini memanfaatkan sensor dan *vision system* untuk memantau joint, kolam las, dan HAZ secara real-time, sehingga parameter seperti *torch position*, *travel speed*, dan *energy input* dapat disesuaikan secara otomatis.

Keunggulan *hybrid adaptive welding* terutama terlihat pada kemampuan AI dan sensor fusion untuk melakukan kontrol adaptif. Data dari *thermal sensors*, *displacement sensors*, dan *vision system* digabungkan untuk menghasilkan informasi real-time tentang kondisi sambungan. AI kemudian memproses informasi ini untuk menyesuaikan pengaturan *laser*, *arc*, atau *tool torque* secara instan, memastikan penetrasi optimal, *bead geometry* konsisten, dan HAZ minimal. Dengan demikian, risiko cacat seperti porositas, *undercut*,

atau *keyhole collapse* dapat diminimalkan, bahkan pada material dissimilar atau geometri kompleks. Pendekatan ini memungkinkan fleksibilitas tinggi dalam mengelola variasi ketebalan material dan gap sambungan.



BAB VI

MATERIAL MAJU DAN PENGELASAN ADAPTIF

Perkembangan material maju, termasuk komposit, superalloy, *smart material*, dan material nano, telah mendorong inovasi dalam teknologi pengelasan modern. Material-material ini menawarkan performa tinggi dalam hal kekuatan, ketahanan korosi, dan stabilitas termal, namun juga menghadirkan tantangan dalam penyambungan. Pengelasan material maju memerlukan penyesuaian parameter proses secara presisi, termasuk kontrol panas, laju pendinginan, dan distribusi energi, untuk menjaga integritas struktur mikro dan menghindari cacat seperti retak atau porositas. Prinsip pengelasan adaptif menjadi krusial, di mana proses las disesuaikan secara real-time sesuai karakteristik material yang dilas.

Pengelasan adaptif memanfaatkan sensor canggih, monitoring real-time, dan sistem kontrol otomatis untuk menyesuaikan parameter proses seperti arus, tegangan, kecepatan, dan posisi torak. Teknologi ini memungkinkan pengelasan material sensitif terhadap panas, seperti aluminium, titanium, dan material nano, dengan hasil sambungan yang konsisten dan minim cacat. Struktur mikro material sangat memengaruhi sifat mekanik hasil las, sehingga pemahaman interaksi antara energi yang diaplikasikan, aliran panas, dan rekristalisasi material menjadi dasar dalam merancang proses pengelasan yang optimal.

A. Material Komposit dan Superalloy

Perkembangan material maju, seperti material komposit dan superalloy, telah menjadi fokus utama dalam industri otomotif, kedirgantaraan, energi, dan manufaktur presisi. Material ini

menawarkan rasio kekuatan-terhadap-berat tinggi, ketahanan korosi, dan stabilitas termal yang superior dibanding logam konvensional (Kumar *et al.*, 2022). Namun, pengelasan material maju menghadirkan tantangan unik:

1. Material heterogen seperti komposit logam-polimer atau *fiber-reinforced composites* sulit disambungkan menggunakan metode konvensional.
2. Superalloy memiliki titik leleh tinggi dan sensitivitas terhadap termal → risiko *cracking*, *porosity*, dan distorsi tinggi.

Untuk mengatasi hal ini, pengelasan adaptif dan otomatis berbasis sensor serta AI menjadi penting, karena memungkinkan kontrol energi dan kondisi proses secara real-time, menyesuaikan dengan karakteristik material spesifik.

1. Karakteristik Material Komposit

Material komposit merupakan gabungan dua atau lebih fase dengan sifat berbeda untuk menghasilkan performa superior. Klasifikasi umum:

- a. *Fiber-reinforced composites* (FRC) – fiber (carbon, glass, aramid) + matriks polymer, metal, atau ceramic.
- b. *Metal matrix composites* (MMC) – logam matriks + reinforcement (SiC, Al₂O₃, TiC).
- c. *Ceramic matrix composites* (CMC) – ceramic matriks + reinforcement fiber (SiC, Al₂O₃) (Sun *et al.*, 2021).

1) Sifat Mekanik dan Termal

Material komposit dikenal karena kombinasi sifat mekanik dan termal yang unggul, membuatnya sangat diminati di industri *high-performance* seperti kedirgantaraan dan energi. Salah satu karakteristik utama adalah kekuatan tinggi yang dikombinasikan dengan massa rendah, menghasilkan rasio *strength-to-weight* yang tinggi. Sifat ini memungkinkan material komposit menggantikan logam konvensional tanpa mengorbankan ketahanan struktural, sehingga sangat efektif untuk komponen seperti panel pesawat, blade turbin, atau struktur kendaraan ringan. Selain itu, banyak komposit, terutama serat karbon atau keramik, memiliki ketahanan korosi dan oksidasi yang baik,

sehingga mampu bertahan dalam lingkungan ekstrem tanpa degradasi signifikan.

Material komposit juga memiliki tantangan tersendiri terkait pengelasan atau penyambungan. Beberapa komposit, terutama *ceramic matrix composites* (CMC), memiliki konduktivitas termal rendah, sehingga panas dari proses pengelasan tidak mudah tersebar. Hal ini memerlukan kontrol panas yang presisi agar sambungan terbentuk optimal tanpa merusak material dasar. Selain itu, perbedaan ekspansi termal antara matriks dan serat dapat menyebabkan tegangan internal dan retak jika pendinginan tidak dikontrol.

2) Tantangan Pengelasan Material Komposit

Pengelasan material komposit menghadirkan tantangan unik yang berbeda dibandingkan logam konvensional, terutama karena adanya perbedaan sifat antara matriks dan *reinforcement*. Salah satu isu utama adalah thermal mismatch, yaitu perbedaan koefisien ekspansi termal antara serat dan matriks. Ketika material dipanaskan selama proses pengelasan, perbedaan ekspansi ini dapat menimbulkan tegangan internal yang tinggi, berpotensi menyebabkan retak dan akumulasi tegangan sisa. Selain itu, material komposit berbasis polimer atau *fiber-reinforced composites* (FRC) rentan terhadap degradasi matriks jika dikenai panas tinggi, sehingga metode pengelasan termal tradisional tidak dapat diterapkan tanpa merusak struktur komposit.

Tantangan lainnya adalah cacat pada *interface* antara fiber dan matriks. Poor bonding pada interface ini dapat terjadi akibat panas tidak merata atau tekanan mekanis yang tidak tepat selama proses pengelasan. Cacat interface akan menurunkan kekuatan sambungan, mengurangi performa mekanik, dan meningkatkan risiko kegagalan premature pada komponen.

2. Karakteristik Superalloy

Superalloy adalah paduan berbasis Ni, Co, atau Fe dengan ketahanan tinggi terhadap panas, oksidasi, dan creep. Aplikasinya berupa *turbine blades*, *jet engine components*, *heat exchangers*.

a. Sifat Mekanik dan Termal

Superalloy dikenal karena sifat mekaniknya yang unggul, terutama ketahanan terhadap creep yang tinggi, sehingga dapat mempertahankan kekuatan dan dimensi pada temperatur ekstrem, sering kali di atas 700°C. Karakteristik ini menjadikan superalloy sangat cocok untuk aplikasi kritis, seperti turbin gas, komponen aerospace, dan power generation, di mana material harus menahan beban mekanik berat dalam kondisi panas tinggi. Selain itu, superalloy memiliki titik leleh yang tinggi, yang berarti pengelasan memerlukan energi input yang besar untuk mencairkan logam dan membentuk sambungan yang memadai. Penggunaan metode pengelasan konvensional sering kali menimbulkan tantangan, terutama dalam mempertahankan kualitas sambungan dan mikrostruktur material.

Superalloy sangat sensitif terhadap perubahan termal. *Cooling rate* yang tidak terkontrol dapat menimbulkan retak panas, porositas, dan distorsi pada zona pengaruh panas (HAZ). Mikrostruktur yang terbentuk selama pengelasan juga dapat mempengaruhi sifat mekanik akhir, seperti kekerasan dan ketahanan fatigue.

b. Tantangan Pengelasan Superalloy

Pengelasan superalloy menghadapi sejumlah tantangan teknis yang signifikan karena sifat materialnya yang sensitif terhadap panas dan kimia. Salah satu masalah utama adalah hot *cracking* yang muncul akibat segregasi larutan padat selama pendinginan. Ketika komposisi kimiawi material tidak homogen, daerah tertentu dapat mengalami tegangan internal tinggi yang memicu retak. Fenomena ini sangat umum pada paduan berbasis nikel dan cobalt dengan elemen paduan tinggi, sehingga memerlukan kontrol pendinginan yang ketat dan pengaturan parameter pengelasan yang presisi untuk mengurangi risiko retak panas.

Pembentukan oksida pada permukaan superalloy dapat menurunkan kualitas bonding sambungan. Oksida ini menghalangi difusi atom antar permukaan logam dan

mengurangi kohesi, sehingga sambungan menjadi lemah. Distorsi termal juga menjadi tantangan penting, terutama untuk komponen presisi tinggi. Perbedaan ekspansi termal selama pemanasan dan pendinginan dapat menyebabkan misalignment, deformasi, atau perubahan dimensi yang tidak diinginkan.

3. Teknologi Pengelasan Adaptif untuk Material Maju

a. Sensor dan Vision System

Pengelasan material maju, seperti superalloy atau komposit, menuntut akurasi tinggi karena permukaannya yang heterogen dan sifat termal yang sensitif. Penggunaan sensor jarak, thermal, dan force menjadi krusial untuk memastikan torch atau tool pengelasan berada pada posisi optimal terhadap permukaan material. Sensor jarak menjaga jarak torch agar penetrasi konsisten, sedangkan sensor thermal memantau suhu HAZ untuk mencegah overheat dan distorsi. Sensor force mengontrol tekanan pada material, penting khususnya pada proses seperti *Friction Stir Welding* atau *Ultrasonic Welding*, sehingga bonding dapat terbentuk secara homogen tanpa merusak material (Schumacher *et al.*, 2022).

Vision system memberikan kontribusi signifikan dalam pengelasan adaptif. Sistem ini mampu mendeteksi jalur sambungan, porositas awal, serta alignment komponen secara real-time. Data citra yang dihasilkan digunakan oleh controller untuk melakukan koreksi otomatis pada posisi, orientasi, dan kecepatan torch. Integrasi sensor dan vision system ini memungkinkan pengelasan adaptif, menjaga kualitas sambungan tinggi, meminimalkan cacat, serta mengatasi tantangan pengelasan material maju dengan heterogenitas permukaan dan sifat mekanik yang kompleks.

b. *Closed-Loop Control* dan AI

Pengelasan material maju seperti superalloy dan komposit menuntut kontrol energi yang sangat presisi karena sifat termal yang sensitif dan kecenderungan terhadap distorsi atau cacat seperti *cracking*. Teknologi *closed-loop control* memungkinkan sistem pengelasan menyesuaikan parameter secara real-time berdasarkan data sensor. Sensor thermal, jarak, dan force mengirimkan informasi tentang suhu, posisi, dan tekanan, yang

kemudian diolah oleh controller untuk menyesuaikan *laser power*, *travel speed*, dan *torch angle*. Dengan mekanisme ini, energi yang diberikan selalu sesuai dengan kondisi aktual material, sehingga risiko overheating atau underheating dapat diminimalkan.

Integrasi AI semakin meningkatkan kemampuan pengelasan adaptif. Algoritma *Machine Learning* atau neural networks memproses data multi-sensor dan memprediksi perilaku material selama proses pengelasan. AI dapat mengantisipasi perubahan kondisi permukaan, variasi ketebalan, atau pergerakan material sehingga parameter disesuaikan secara otomatis sebelum cacat terjadi.

B. Pengelasan untuk Material Nano dan *Smart Material*

Seiring perkembangan teknologi material, industri manufaktur modern kini memanfaatkan material nano dan *smart material* untuk meningkatkan performa struktural, responsif terhadap lingkungan, dan fungsi fungsional. Material nano (*nanostructured metals*, *nanocomposites*) menawarkan kekuatan mekanik, ketahanan korosi, dan konduktivitas termal tinggi dibandingkan material konvensional. Sementara *smart material* (*shape memory alloys*, *piezoelectric materials*, *magnetorheological materials*) memiliki kemampuan merespons stimulus eksternal seperti temperatur, medan magnet, atau gaya mekanik (Aminzadeh *et al.*, 2023). Pengelasan material ini menghadirkan tantangan unik, antara lain:

1. Sensitivitas termal tinggi → overheating dapat merusak struktur nano atau sifat fungsional *smart material*.
2. Degradasi sifat responsif → *improper heat input* atau *cooling rate* dapat menurunkan efektivitas *shape memory* atau konduktivitas piezoelectric.
3. Ukuran mikro/nano → pengelasan konvensional sulit menjamin integritas struktural.
 - a. Karakteristik Material Nano
Material nano memiliki struktur mikro berukuran 1–100 nm. Jenis umum yang digunakan sebagai berikut:
 - 1) *Nanostructured metals* (nano-grained Cu, Al, Ni alloys) → kekuatan tinggi, ductility baik.

- 2) *Nanocomposites (polymer/ceramic/metal matrix)* → *lightweight, high stiffness.*
- 3) *Carbon-based nanomaterials (CNT, graphene, graphene oxide)* → konduktivitas termal & listrik tinggi.

b. Karakteristik *Smart Material*

Smart material merupakan kelas material canggih yang mampu merespons stimulus eksternal seperti panas, medan listrik, atau medan magnet. Contohnya adalah *Shape Memory Alloys (SMA)* seperti NiTi dan CuAlNi yang dapat kembali ke bentuk semula setelah dipanaskan, *piezoelectric materials* seperti ZnO dan PZT yang menghasilkan listrik saat mengalami deformasi mekanik, serta *magnetorheological materials* berupa fluida atau elastomer yang kekakuannya dapat berubah seiring medan magnet yang diberikan (Casalino, 2018). Karakteristik ini menjadikan *smart material* sangat menarik untuk aplikasi presisi tinggi di bidang aerospace, otomotif, dan robotik, di mana kemampuan responsif material menjadi faktor penting bagi performa sistem.

Pengelasan *smart material* menghadirkan tantangan tersendiri. Proses welding konvensional dapat mengganggu fungsi fungsional material karena sifatnya yang sensitif terhadap suhu dan deformasi. Misalnya, pada SMA, suhu pengelasan yang berlebihan dapat mengubah fase martensit-austenit sehingga mempengaruhi efek memori bentuk. Piezoelectric materials juga rentan terhadap degradasi kristal atau retak mikro yang dapat mengurangi kemampuan menghasilkan listrik saat deformasi. Magnetorheological materials dapat mengalami perubahan struktur internal akibat panas lokal, sehingga respons terhadap medan magnet menjadi tidak konsisten.

c. Strategi Pengelasan Adaptif untuk Material Nano dan Smart

1) Sensor dan *Vision System*

Strategi pengelasan adaptif untuk material nano dan smart menekankan pentingnya pemantauan real-time menggunakan sensor canggih dan sistem vision. Thermal dan *infrared sensors* digunakan untuk memantau temperatur sambungan secara terus-menerus, sehingga overheating dapat dicegah dan sifat material sensitif tetap terjaga. *Displacement* dan *force sensors* menjaga posisi

dan tekanan torch atau tool pada joint dengan presisi tinggi, memastikan penetrasi optimal dan mengurangi risiko deformasi atau kerusakan pada struktur mikro. Sementara itu, *vision system* memungkinkan deteksi alignment sambungan dan cacat mikro atau nano yang tidak terlihat oleh inspeksi konvensional, sehingga kualitas bonding dapat terjaga pada level presisi tinggi.

2) *Closed-Loop Adaptive Welding*

Closed-loop adaptive welding merupakan strategi penting dalam pengelasan material nano dan smart, di mana sistem secara terus-menerus menerima data dari berbagai sensor untuk menyesuaikan parameter pengelasan secara real-time. Parameter yang dikontrol meliputi *laser power*, *travel speed*, *wire feed*, dan *torch angle*, sehingga kondisi pengelasan selalu optimal sesuai karakteristik lokal material. Dengan mekanisme ini, setiap perubahan kecil pada ketebalan, konduktivitas termal, atau sifat mikro dapat segera direspons, meminimalkan risiko *overheating*, *cracking*, atau deformasi yang dapat merusak sifat material sensitif seperti nanostructure atau fungsionalitas *smart material*.

C. Pengaruh Struktur Mikro Material terhadap Hasil Las

Struktur mikro material berperan kunci dalam menentukan kualitas dan integritas hasil las. Baik pada material konvensional, material maju, maupun smart/nano materials, struktur mikro menentukan:

1. Distribusi panas dan penetrasi las
2. Pembentukan bead dan HAZ (*Heat-Affected Zone*)
3. Kekuatan mekanik sambungan
4. Kemunculan cacat seperti *cracking*, porosity, dan residual stress

Pada pengelasan material maju dan adaptif, pemahaman struktur mikro menjadi fundamental. Struktur mikro meliputi *grain size*, *phase composition*, *precipitates*, dan *dislocation density* yang memengaruhi respon material terhadap panas, tekanan, dan pendinginan selama pengelasan (Zhang *et al.*, 2021).

1. Karakteristik Struktur Mikro Material

a. *Grain Size* dan Orientasi

Karakteristik struktur mikro material, khususnya ukuran butir (*grain size*) dan orientasinya, memiliki pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik dan ketahanan terhadap propagasi retak. Material dengan grain halus (*fine-grained microstructure*) cenderung menunjukkan distribusi panas yang lebih homogen selama pengelasan, sehingga penetrasi logam cair lebih merata dan risiko cacat seperti porositas atau hot *cracking* berkurang. Sebaliknya, material dengan grain kasar (*coarse-grained microstructure*) lebih rentan terhadap terbentuknya retak panas karena gradien temperatur yang tinggi dan aliran logam cair yang tidak merata.

b. *Fase* dan *Precipitates*

Fase dan *precipitates* dalam material, terutama pada alloy canggih seperti superalloy, berperan krusial dalam menentukan sifat mekanik dan ketahanan terhadap deformasi pada suhu tinggi. Misalnya, fase γ' , γ , dan δ pada superalloy bertanggung jawab atas resistensi terhadap creep dan retak selama operasi jangka panjang. *Precipitates* yang terbentuk dalam microstructure membantu memperkuat sambungan dengan menghambat pergerakan dislokasi. Namun, selama proses pengelasan konvensional, input panas yang tinggi dapat melarutkan *precipitates* atau mengubah fase yang ada, sehingga mengurangi kekuatan sambungan dan menurunkan ketahanan terhadap deformasi termal.

c. *Dislocation* dan *Defect Density*

Dislocation merupakan ketidakaturan dalam kisi kristal yang mempengaruhi sifat mekanik material. Kerapatan dislokasi tinggi sering meningkatkan kekuatan material karena menghambat pergerakan dislokasi tambahan, sehingga material menjadi lebih tahan terhadap deformasi plastis. Namun, kondisi ini juga membuat material lebih sensitif terhadap retak saat terpapar panas tinggi, seperti selama pengelasan konvensional. Peningkatan temperatur lokal dapat menyebabkan konsentrasi tegangan di sekitar dislokasi, memicu propagasi retak dan penurunan integritas sambungan. Selain itu, keberadaan *defect density* yang tinggi, seperti void atau inklusi, dapat

memperparah risiko kerusakan mekanik saat material mengalami *thermal cycling*.

d. *Interface* dan *Microstructure* pada Material Nano/Smart

Material nano dan smart memiliki karakteristik mikrostruktur yang sangat sensitif terhadap input panas selama pengelasan. Pada *nanostructured metals*, tingginya jumlah grain boundaries meningkatkan kekuatan dan kekerasan, namun membuat material ini rentan terhadap overheating. Panas berlebih dapat menyebabkan pertumbuhan grain yang cepat atau rekristalisasi lokal, sehingga mengurangi sifat mekanik unggul dan meningkatkan risiko retak. Sementara itu, *smart material* seperti *shape memory alloys* (SMA) bergantung pada mikrostruktur yang presisi agar efek memori bentuk tetap efektif. Perubahan fase atau transformasi mikrostruktur akibat panas berlebih dapat menurunkan kemampuan material untuk kembali ke bentuk semula setelah deformasi.

2. Pengaruh Struktur Mikro terhadap *Heat-Affected Zone* (HAZ)

Heat-Affected Zone (HAZ) merupakan area di sekitar bead las yang mengalami perubahan mikrostruktur akibat paparan panas selama proses pengelasan. Dalam HAZ, terjadi fenomena seperti pertumbuhan grain, pelarutan precipitates, dan transformasi fase, yang secara langsung memengaruhi sifat mekanik material. *Grain growth* yang berlebihan dapat menurunkan kekuatan dan ketahanan terhadap retak, sedangkan dissolusi precipitates dapat melemahkan sambungan dan mengurangi keuletan. Pada material superalloy berbasis nikel, misalnya, fase γ' yang halus berperan penting dalam memberikan kekuatan pada temperatur tinggi. Jika fase ini terganggu oleh panas las, kemampuan creep resistance dan durability material menurun.

Untuk mengatasi perubahan mikrostruktur yang merugikan, pengelasan adaptif menjadi metode yang efektif. Sistem ini menggunakan sensor thermal dan AI untuk memonitor dan menyesuaikan energi input secara real-time. Dengan kontrol laser power adaptif, distribusi panas dapat dioptimalkan sehingga HAZ tetap sempit dan grain structure serta precipitate penting dapat dipertahankan. Pendekatan ini memungkinkan pengelasan material canggih, termasuk superalloy, dengan kualitas sambungan tinggi dan sifat mekanik optimal.

a. Transformasi Fase

Transformasi fase merupakan salah satu fenomena utama yang terjadi di *Heat-Affected Zone* (HAZ) selama proses pengelasan. Pada material besi karbon, pemanasan akibat las dapat menyebabkan terbentuknya austenite, yang kemudian mendingin menjadi ferrite atau martensite tergantung pada laju pendinginan. Pembentukan martensite yang cepat dapat meningkatkan kekerasan lokal, tetapi juga meningkatkan risiko retak termal, sedangkan ferrite memberikan sifat lebih ulet namun dengan kekuatan yang lebih rendah. Kontrol distribusi panas dan *cooling rate* menjadi krusial untuk menjaga keseimbangan antara kekuatan dan keuletan sambungan.

Pada superalloy berbasis nikel, fenomena transformasi fase lebih kompleks. Fase γ' yang halus memberikan kekuatan creep tinggi pada temperatur tinggi, namun overheating dapat menyebabkan dekomposisi γ' menjadi fase yang lebih besar atau tidak stabil, sehingga menurunkan ketahanan mekanik material. Pengelasan adaptif dengan sensor real-time dan kontrol energi memungkinkan penyesuaian laju pendinginan dan input panas sehingga stabilitas fase γ' dapat dipertahankan, menjaga kekuatan, keuletan, dan umur pakai komponen kritis dalam aplikasi kedirgantaraan dan energi tinggi.

b. *Residual Stress* dan *Cracking*

Residual stress dan potensi retak merupakan tantangan signifikan yang terkait dengan *Heat-Affected Zone* (HAZ) pada proses pengelasan. Material dengan *grain size* besar atau distribusi fase yang tidak homogen cenderung mengalami akumulasi tegangan internal selama pemanasan dan pendinginan. Tegangan ini dapat memicu *hot cracking*, terutama pada material paduan superalloy atau baja karbon tinggi, sedangkan *cold cracking* dapat muncul setelah pendinginan akibat konsentrasi hydrogen atau ketegangan sisa lokal. HAZ yang luas atau tidak terkontrol memperburuk fenomena ini, menurunkan integritas mekanik sambungan dan meningkatkan risiko kegagalan pada komponen kritis.

Pengelasan adaptif menawarkan solusi untuk mengurangi residual stress dan mencegah *cracking*. Dengan memanfaatkan sensor real-time, seperti thermal, force, dan displacement

sensors, serta integrasi AI untuk *closed-loop control*, *parameter las* seperti laju pendinginan, arus, tegangan, dan *travel speed* dapat disesuaikan secara dinamis. Penyesuaian ini memungkinkan distribusi panas lebih homogen, mengurangi konsentrasi tegangan, dan mempertahankan mikrostruktur yang stabil. Hasilnya, sambungan memiliki integritas mekanik lebih tinggi, risiko *cracking* menurun, dan umur pakai komponen meningkat, terutama pada material sensitif seperti superalloy dan paduan ringan.

3. Adaptive Welding dan Struktur Mikro

a. Sensor dan Monitoring Mikrostruktur

Pengelasan adaptif memanfaatkan sensor canggih untuk memantau dan mengontrol struktur mikro secara real-time, sehingga kualitas sambungan dapat dijaga dengan optimal. Infrared dan thermal sensors digunakan untuk mengukur distribusi panas di *Heat-Affected Zone* (HAZ), memungkinkan kontrol yang presisi terhadap laju pemanasan dan pendinginan. Pemantauan temperatur ini krusial untuk mencegah pertumbuhan grain berlebih, *dissolusi precipitate*, atau transformasi fase yang tidak diinginkan, sehingga sifat mekanik seperti kekuatan dan keuletan tetap terjaga.

Force dan torque sensors memonitor deformasi mikro selama proses pengelasan, memastikan material tidak mengalami konsentrasi tegangan berlebih yang dapat memicu *cracking*. Vision system terintegrasi membantu mendeteksi uniformitas bead dan porositas, memungkinkan koreksi jalur dan parameter secara real-time. Kombinasi sensor ini, melalui sistem sensor fusion, mendukung *adaptive control* yang mempertahankan integritas mikrostruktur, terutama pada material sensitif seperti superalloy, *nanostructured metals*, dan *smart materials*, sehingga sambungan akhir memiliki kualitas mekanik tinggi dan minim cacat.

b. AI dan Real-Time *Microstructure Control*

Pengelasan adaptif kini semakin mengandalkan kecerdasan buatan (AI) untuk pengendalian mikrostruktur secara real-time. *Neural networks* dan sistem *fuzzy logic* digunakan untuk memprediksi evolusi mikrostruktur berdasarkan data yang

diterima dari sensor, termasuk distribusi panas, tekanan, dan deformasi material. Prediksi ini memungkinkan sistem menyesuaikan parameter pengelasan secara proaktif sebelum terjadi degradasi mikrostruktur, seperti pertumbuhan grain berlebih, dissolusi precipitate, atau kerusakan pada matriks komposit. Dengan pendekatan ini, *adaptive welding* tidak hanya mempertahankan integritas mekanik, tetapi juga konsistensi kualitas sambungan pada setiap siklus pengelasan.

c. Pengelasan Hybrid dan *Microstructure*

Pengelasan hybrid, yang menggabungkan dua metode seperti laser dengan arc atau laser dengan FSW, memungkinkan distribusi energi yang lebih terkontrol dan homogen sepanjang sambungan. Pendekatan ini menghasilkan penetrasi yang optimal dan HAZ yang lebih sempit, sehingga mikrostruktur material tetap seragam. Dengan mengatur proporsi energi dari masing-masing sumber, *Hybrid Welding* dapat meminimalkan pembentukan grain kasar, segregasi fase, atau porositas, yang biasanya terjadi pada pengelasan konvensional. Hasilnya adalah sambungan yang memiliki kekuatan mekanik tinggi dan konsistensi sifat mikro yang lebih baik, terutama pada material kompleks seperti superalloy atau nanostructured metals.

D. Penyesuaian Parameter untuk Material Spesifik

Pada pengelasan material maju seperti superalloy, *nanostructured metals*, *smart material* dan komposit, keberhasilan proses las tidak hanya ditentukan oleh metode pengelasan, tetapi juga oleh penyesuaian parameter proses yang spesifik terhadap karakteristik material. Parameter utama meliputi:

1. *Laser or arc power*
2. *Travel speed / welding speed*
3. *Wire feed rate / filler material composition*
4. *Torch angle, pressure* atau *force*
5. *Cooling rate / heat dissipation control*

Setiap material memiliki sensitivitas berbeda terhadap panas, strain, dan transformasi fasa, sehingga satu set parameter universal tidak efektif (Rahadian, 2025). Adaptasi parameter melalui sensor real-

time dan AI control memungkinkan proses pengelasan yang presisi, minim distorsi, dan menjaga integritas fungsional material.

1. Faktor Material yang Mempengaruhi Parameter Pengelasan

a. *Thermal Conductivity* dan *Heat Capacity*

Konduktivitas termal dan kapasitas panas material berperan penting dalam menentukan parameter pengelasan yang optimal. Material dengan konduktivitas termal tinggi, seperti aluminium atau tembaga, dengan cepat menyebarkan panas dari area las ke sekitarnya. Akibatnya, energi yang diberikan selama pengelasan harus ditingkatkan atau *travel speed* dikurangi agar penetrasi las tetap cukup dan *bead geometry* tetap sesuai spesifikasi. Tanpa penyesuaian ini, sambungan dapat mengalami penetrasi dangkal atau bead yang tidak seragam, yang menurunkan kekuatan sambungan.

Material dengan konduktivitas termal rendah, seperti nanocomposites atau keramik, cenderung menahan panas di area lokal. Hal ini meningkatkan risiko overheating, degradasi mikrostruktur, dan pembentukan residual stress atau *cracking*. Oleh karena itu, *energy input*, *laser power*, atau arus las perlu dikurangi, sementara *travel speed* harus disesuaikan agar distribusi panas lebih merata. Pendekatan adaptif ini, sering dibantu sensor dan AI, memastikan penetrasi optimal, HAZ minimal, dan integritas mekanik material tetap terjaga.

b. Struktur Mikro dan Grain Size

Struktur mikro dan ukuran butir (*grain size*) material memiliki pengaruh signifikan terhadap respon material terhadap pengelasan. Material dengan butir halus (*fine-grained*) cenderung lebih homogen dalam menyerap dan mendistribusikan panas, sehingga lebih toleran terhadap variasi energi selama proses pengelasan. Hal ini memungkinkan penetrasi yang lebih merata dan *bead geometry* yang konsisten, serta menurunkan risiko terjadinya cacat seperti porositas atau *hot cracking*. *Fine-grained material* juga cenderung mempertahankan sifat mekanik aslinya lebih baik karena distribusi panas yang lebih seragam pada zona terpengaruh panas (HAZ).

Material dengan butir kasar (*coarse-grained*) atau mikrostruktur heterogen memerlukan perhatian lebih dalam penentuan parameter pengelasan. Perbedaan kemampuan material dalam menyerap panas dapat menyebabkan konsentrasi tegangan lokal, meningkatkan risiko hot *cracking* dan residual stress. Adaptive welding menjadi penting dalam konteks ini, karena memungkinkan penyesuaian real-time terhadap heat input, travel speed, dan arus las.

c. Material Heterogen dan *Dissimilar Materials*

Pengelasan material heterogen atau *dissimilar metals*, seperti aluminium-steel atau tembaga-nikel, menghadirkan tantangan tersendiri akibat perbedaan sifat termal dan mekanik masing-masing logam. Salah satu masalah utama adalah perbedaan koefisien ekspansi termal, yang dapat menyebabkan distorsi, residual stress, atau retak selama proses pengelasan. Untuk mengatasi hal ini, strategi seperti penggunaan pulse power, preheating, atau lapisan interlayer sering diterapkan agar distribusi panas lebih merata dan mengurangi tegangan termal pada sambungan. Pendekatan ini penting untuk menjaga integritas sambungan dan mencegah cacat mikro yang dapat menurunkan kekuatan struktural.

Adaptive welding menjadi kunci dalam mengelola pengelasan material dissimilar. Sistem kontrol adaptif dapat menyesuaikan parameter seperti daya las, *travel speed*, dan *cooling rate* secara real-time berdasarkan sifat termal dan ekspansi masing-masing material. Dengan pemantauan dan penyesuaian berkelanjutan, penetrasi, *bead geometry*, dan *Heat-Affected Zone (HAZ)* dapat dikontrol secara optimal. Hasilnya, sambungan antara logam yang berbeda tetap kuat, homogen, dan minim distorsi, sehingga komponen dapat memenuhi spesifikasi performa tinggi, terutama pada aplikasi aerospace, otomotif, dan energi canggih.

d. Functional Properties pada *Smart Materials*

Smart materials, seperti *shape memory alloys (SMA)*, piezoelectric, dan magnetorheological materials, memiliki sifat fungsional yang sensitif terhadap perubahan termal dan mikrostruktur selama pengelasan. SMA, misalnya NiTi atau CuAlNi, dapat kehilangan kemampuan “memory effect” jika terkena panas berlebih. Oleh karena itu, kontrol suhu yang

presisi, biasanya dalam toleransi $\pm 5^{\circ}\text{C}$, sangat penting untuk memastikan bahwa transformasi fase tetap terjaga dan material kembali ke bentuk semula setelah pemanasan. Ketidaktepatan kontrol panas dapat menyebabkan deformasi permanen atau retak mikro, sehingga mengurangi kinerja fungsional material.

Pada piezoelectric atau *magnetorheological materials*, sifat fungsional juga sangat bergantung pada integritas mikrostruktur. Degradasi atau perubahan fase akibat overheating dapat menurunkan respons material terhadap stimulus eksternal, misalnya deformasi mekanik atau medan magnet. Pengelasan adaptif dengan modulasi laser, sistem pendinginan terkendali, dan pemantauan sensor real-time memungkinkan penyesuaian energy input untuk menjaga microstructure tetap stabil.

2. Penyesuaian Parameter untuk Material Maju Tertentu

a. Superalloy (Ni-based, Co-based)

Superalloy, terutama berbasis nikel (Ni-based) atau kobalt (Co-based), menuntut pengelasan presisi tinggi karena sensitivitasnya terhadap panas dan kecenderungan mengalami hot *cracking* atau porositas. Penggunaan laser atau electron beam power yang dikontrol secara akurat memungkinkan penetrasi yang cukup tanpa melelehkan material berlebihan, menjaga integritas mikrostruktur. Travel speed juga diatur secara optimal untuk membatasi lebar *Heat-Affected Zone* (HAZ), sehingga risiko *cracking* atau perubahan fase seperti γ' dan δ dapat diminimalkan. Selain itu, penggunaan shielding gas campuran, seperti argon dan helium, membantu mengurangi oksidasi permukaan selama proses pengelasan, menjaga kualitas sambungan tetap tinggi.

Filler material dipilih dengan komposisi yang kompatibel untuk mempertahankan stabilitas fase kritis pada superalloy. Implementasi *adaptive laser welding* pada komponen kompleks, misalnya bilah turbin Ni-based, menunjukkan penetrasi yang presisi $\pm 0,5$ mm dan HAZ minimal. Dengan pengaturan parameter secara real-time berdasarkan sensor thermal dan feedback, fatigue life komponen tetap terjaga, sambil mempertahankan kekuatan dan homogenitas mikrostruktur.

b. Nanostructured Metals

Nanostructured metals, seperti aluminium nanostructured alloys, memerlukan pengelasan dengan kontrol panas yang sangat presisi karena struktur grain yang sangat halus rentan terhadap pertumbuhan grain berlebihan. Oleh karena itu, heat input dijaga serendah mungkin, sementara travel speed ditingkatkan dan energi diaplikasikan secara pulsed untuk memastikan penetrasi yang homogen tanpa menyebabkan overheating. Pendekatan ini memungkinkan distribusi panas yang merata dan menjaga integritas mikrostruktur, sehingga sifat mekanik material tetap optimal. Penggunaan sensor thermal dan vision system memungkinkan monitoring real-time untuk mencegah degradasi grain atau pembentukan porositas.

Pada aplikasi *Friction Stir Welding* (FSW) adaptif, torque dan spindle speed tool diatur secara real-time sesuai feedback sensor untuk menjaga alignment fiber dan matriks pada nanocomposites. Pendekatan ini memastikan bahwa serat tidak terdeformasi dan matriks tetap homogen, sehingga *fine-grained microstructure* terjaga. Hasilnya, nanostructured aluminium alloys mempertahankan kekuatan mekanik tinggi dan fatigue resistance optimal, sekaligus meminimalkan risiko *cracking* atau delamination.

c. *Composite Material* (MMC / CMC / FRC)

Pengelasan material komposit, termasuk *Metal Matrix Composites* (MMC), *Ceramic Matrix Composites* (CMC), dan *Fiber-Reinforced Composites* (FRC), memerlukan pendekatan khusus karena sensitif terhadap degradasi matriks dan kerusakan serat akibat panas berlebih. Metode *solid-state welding*, seperti *Friction Stir Welding* (FSW) atau *Ultrasonic Welding*, menjadi pilihan utama karena mampu menyatukan material tanpa melewati fase leleh, sehingga matriks tetap stabil dan integritas serat terjaga. Selama proses, parameter seperti torque, vibrasi amplitude, dan tekanan disesuaikan dengan kadar dan orientasi serat untuk memastikan distribusi material plastis yang homogen, menghindari void atau *delamination*.

Cooling rate dikontrol secara hati-hati untuk mencegah pembentukan retak termal atau distorsi mikrostruktur. Sensor thermal dan force digunakan untuk memonitor distribusi panas

dan tekanan real-time, sehingga *adaptive control* dapat mempertahankan alignment serat dan integritas matriks. Implementasi pada MMC aluminium-SiC panel menunjukkan bahwa FSW adaptif mampu menjaga fiber alignment dan matriks tetap utuh, menghasilkan sambungan dengan kekuatan mekanik tinggi dan performa struktural optimal, sesuai standar industri aerospace dan otomotif.

d. *Smart Material* (SMA / Piezoelectric)

Pengelasan *smart material*, seperti *Shape Memory Alloys* (SMA) dan *piezoelectric materials*, membutuhkan kontrol panas yang sangat presisi karena sifat fungsionalnya sensitif terhadap suhu. Untuk SMA NiTi, laser power dikontrol dengan toleransi $\pm 5^{\circ}\text{C}$ agar *shape memory effect* tetap terjaga. Parameter pengelasan lainnya, seperti durasi pulsa dan *travel speed*, disesuaikan untuk mencegah overheating yang dapat menyebabkan degradasi mikrostruktur dan hilangnya kemampuan memory. *Adaptive cooling* atau *quenching* diterapkan setelah pengelasan untuk memastikan material kembali ke kondisi optimal tanpa deformasi atau retak termal.

Piezoelectric materials memerlukan kontrol energi yang cermat agar sifat dielektrik dan koefisien d33 tetap stabil. Modifikasi modulasi energi laser atau arc memungkinkan pengelasan yang aman tanpa merusak kristal piezoelectric atau mengubah orientasi domain. Sensor *thermal*, *displacement*, dan *vision system* bekerja secara real-time untuk menyesuaikan parameter pengelasan, sehingga integritas fungsional material tetap optimal dan kinerja jangka panjang komponen terjaga.



BAB VII

PENGELASAN DALAM

ADDITIVE MANUFACTURING

Pengelasan dalam konteks *additive manufacturing* (AM) merupakan evolusi penting dari pengelasan konvensional, di mana proses penyambungan dan penambahan material dilakukan secara simultan untuk membentuk komponen tiga dimensi. Konsep ini dikenal sebagai metal *additive manufacturing*, yang mencakup metode seperti Laser Cladding, *Directed Energy Deposition* (DED), dan hybrid welding-3D printing. Penggunaan energi terkonsentrasi memungkinkan penambahan material secara presisi, dengan *heat affected zone* yang minimal, sehingga mengurangi distorsi dan menjaga integritas struktur mikro. Teknologi ini memungkinkan pembuatan komponen kompleks yang sulit dicapai dengan metode konvensional.

Laser Cladding dan *Directed Energy Deposition* menjadi metode utama dalam integrasi pengelasan dengan *additive manufacturing*. *Laser Cladding* menggunakan sumber laser untuk melelehkan material yang diaplikasikan secara powder atau wire, menghasilkan lapisan yang homogen dan sambungan berkualitas tinggi. Sementara DED memanfaatkan energi laser atau *electron beam* untuk menyatukan material tambahan pada substrat, memungkinkan pembangunan struktur secara *layer-by-layer* dengan kontrol termal yang cermat. Integrasi pengelasan dengan *additive manufacturing* memungkinkan produksi *part custom*, *repair component*, dan optimasi geometri internal, yang menjadi kunci dalam industri aerospace, otomotif, dan energi.

A. Konsep dan Proses Metal *Additive Manufacturing*

Additive Manufacturing (AM) atau yang sering disebut 3D printing logam merupakan teknologi manufaktur yang membangun komponen layer demi layer dari data digital. Berbeda dengan metode konvensional (*subtractive manufacturing*) yang memotong material dari blok besar, AM menambahkan material secara bertahap, memungkinkan geometri kompleks, ringan, dan desain fungsional yang sulit dicapai melalui metode tradisional (Ngo *et al.*, 2018).

Pada konteks logam, metal *additive manufacturing* mengintegrasikan prinsip pengelasan modern karena proses deposisi material pada umumnya melibatkan fusion welding atau *solid-state bonding*. Teknologi ini digunakan secara luas dalam *aerospace*, *automotive*, *biomedical*, dan *energy sector*, terutama karena kemampuannya untuk:

1. Memproduksi komponen dengan geometri kompleks yang sulit dibuat konvensional.
2. Mengurangi material waste hingga >90% dibandingkan machining.
3. Memungkinkan *material graded* atau *functionally graded materials* (FGM).
4. Memfasilitasi prototyping cepat dan custom manufacturing.

Metal AM memanfaatkan lapisan material logam yang kemudian difusikan atau dilebur secara lokal menggunakan sumber energi: laser, electron beam, atau arc. Proses ini dapat dikategorikan sebagai:

1. *Powder Bed Fusion* (PBF) → lapisan serbuk logam dilebur selektif.
2. *Directed Energy Deposition* (DED) → material dilebur saat dideposisikan, cocok untuk repair atau build-up.
3. Binder Jetting → serbuk logam dilekatkan dengan binder, kemudian sintering.

Proses AM sering disebut sebagai “*welding layer by layer*”, karena prinsip localized melting, rapid solidification, dan metallurgical bonding sangat mirip dengan pengelasan modern (DebRoy *et al.*, 2018).

Adapun hubungan Metal AM dengan pengelasan diantaranya:

1. *Heat input localized* → seperti laser welding, HAZ dapat dikontrol.

2. *Rapid cooling rate* → grain refinement terjadi, menghasilkan microstructure unik.
3. *Layer-by-layer deposition* → memerlukan penyesuaian parameter untuk residual stress minim, distorsi rendah.

- a. *Powder Bed Fusion* (PBF)

Powder Bed Fusion (PBF) merupakan salah satu teknologi additive manufacturing yang banyak digunakan untuk material logam. Prinsip kerjanya melibatkan penyebaran lapisan serbuk logam tipis, biasanya berkisar antara 20 hingga 100 μm , di atas build platform. Setelah itu, serbuk dilebur secara selektif menggunakan sumber energi, baik laser pada *Selective Laser Melting* (SLM) maupun electron beam pada *Electron Beam Melting* (EBM). Proses ini diulang secara berlapis hingga komponen tiga dimensi selesai terbentuk, memungkinkan pembuatan geometri kompleks yang sulit dicapai dengan metode konvensional.

Parameter utama yang memengaruhi kualitas hasil PBF meliputi laser atau *electron beam power*, *scan speed*, *hatch spacing*, dan ketebalan lapisan. *Laser power* dan *scan speed* harus diatur dengan cermat untuk memastikan energi cukup untuk melebur serbuk tanpa menyebabkan *overheating*. *Hatch spacing* memengaruhi kepadatan dan homogenitas material, sedangkan *layer thickness* menentukan resolusi vertikal serta kualitas permukaan. *Scan strategy*, seperti meander, chessboard, atau spiral, digunakan untuk mengontrol distribusi panas dan residual stress selama proses pencetakan.

- b. *Directed Energy Deposition* (DED)

Directed Energy Deposition (DED) merupakan teknologi additive manufacturing yang menekankan pada penambahan material logam secara selektif melalui sumber energi terkonsentrasi. Prinsip kerjanya melibatkan peleburan material logam, baik dalam bentuk serbuk maupun kawat, secara langsung saat dideposisikan di permukaan substrat atau komponen. Sumber energi yang digunakan dapat berupa laser, electron beam, atau arc listrik, sehingga material dilebur saat bersentuhan dengan permukaan target dan membentuk sambungan metallurgis secara bertahap. Proses ini

memungkinkan pembangunan geometri tiga dimensi secara berlapis dengan fokus pada area tertentu.

Beberapa parameter kunci memengaruhi kualitas hasil DED. Laser, electron beam, atau arc power harus disesuaikan dengan material dan ketebalan lapisan agar peleburan merata tanpa overheating. *Deposition rate* atau *feed rate* menentukan jumlah material yang ditambahkan per satuan waktu, sedangkan travel speed mengontrol distribusi energi dan penetrasi. Shielding gas, seperti argon, helium, atau nitrogen, digunakan untuk mencegah oksidasi dan kontaminasi permukaan selama proses peleburan. Kontrol simultan parameter ini sangat penting untuk mendapatkan hasil yang konsisten dan meminimalkan cacat.

c. Binder Jetting

Binder Jetting adalah salah satu teknologi *additive manufacturing* yang menggunakan prinsip penumpukan serbuk logam secara berlapis-lapis, di mana setiap lapisan diikat oleh cairan polymer binder. Proses dimulai dengan menyebarkan lapisan tipis serbuk logam di atas build platform, kemudian print head menempelkan binder pada area yang ditentukan berdasarkan model 3D digital. Binder bertindak sebagai “lem sementara” yang menjaga partikel serbuk tetap berada pada posisi yang diinginkan, membentuk green part dengan geometri yang diinginkan. Setiap lapisan berikutnya ditambahkan secara berurutan hingga keseluruhan komponen terbentuk.

Setelah pencetakan selesai, *green part* masih rapuh dan memerlukan proses pasca-cetak untuk mencapai kekuatan mekanik yang memadai. Proses ini meliputi debinding, di mana binder polymer dihilangkan melalui pemanasan atau pelarut kimia, dan diikuti oleh sintering. Sintering memadatkan serbuk logam melalui difusi pada temperatur tinggi, menghasilkan kepadatan material mendekati logam padat. Tahapan ini sangat krusial untuk menentukan properti mekanik, seperti kekuatan tarik, kekerasan, dan kepadatan akhir komponen.

B. Laser Cladding dan Directed Energy Deposition

Laser Cladding (LC) dan *Directed Energy Deposition* (DED) merupakan teknologi metal *additive manufacturing* yang menggunakan

prinsip *localized melting* dan *fusion welding* untuk membangun atau mereparasi komponen logam. Kedua metode ini memiliki kesamaan fundamental dengan pengelasan modern, karena prosesnya melibatkan:

1. Deposisi material logam *layer-by-layer*.
2. *Heat input* terlokalisasi untuk menghindari distorsi termal yang berlebihan.
3. Pengendalian solidifikasi untuk menghasilkan *microstructure* yang optimal.

LC dan DED banyak digunakan di sektor *aerospace*, *power generation*, *automotive*, dan *repair industry*, terutama untuk material maju seperti *superalloy*, *titanium alloy*, *nanocomposite*, dan *high-strength steels* (King *et al.*, 2014).

1. Konsep Dasar Laser Cladding

Laser Cladding merupakan teknologi *overlay welding* berbasis laser yang dirancang untuk menambahkan lapisan material baru ke permukaan logam secara presisi. Proses ini bekerja dengan memfokuskan laser intensitas tinggi pada area kecil substrat sehingga membentuk molten pool lokal. Pada saat yang sama, material tambahan dalam bentuk powder atau wire disuplai langsung ke zona leleh, sehingga terjadi peleburan dan fusi metalurgi antara material cladding dan substrat. Dengan mekanisme tersebut, *Laser Cladding* memungkinkan rekonstruksi atau penguatan permukaan tanpa menyebabkan distorsi besar seperti pada pengelasan konvensional. Proses ini juga sangat fleksibel untuk berbagai material teknik, khususnya logam berkinerja tinggi.

Proses pendinginan cepat (*rapid solidification*) terjadi secara alami akibat luas area panas yang sangat kecil. Pendinginan cepat ini menghasilkan mikrostruktur yang lebih halus dan seragam, sehingga meningkatkan kekerasan, ketahanan aus, dan ketahanan korosi lapisan yang terbentuk. Kualitas metallurgical bonding yang dihasilkan jauh lebih baik dibandingkan metode *surface coating* konvensional seperti thermal spraying yang hanya menghasilkan bonding mekanis. Karena HAZ (*Heat-Affected Zone*) sangat kecil, sifat mekanik substrat tetap terjaga dan risiko distorsi atau *cracking* diminimalkan. Hal ini menjadikan *Laser Cladding* pilihan unggulan untuk komponen presisi seperti turbin, *mold tooling*, dan bagian mesin yang bekerja di lingkungan ekstrem.

2. Konsep Dasar *Directed Energy Deposition* (DED)

Directed Energy Deposition (DED) adalah salah satu teknologi additive manufacturing yang bekerja dengan cara melelehkan material logam, baik dalam bentuk powder maupun wire, secara simultan saat material tersebut dideposisikan ke permukaan substrat. Berbeda dari *Powder Bed Fusion* (PBF) yang bekerja pada lapisan serbuk statis, DED secara aktif menyuplai material ke zona leleh yang dihasilkan oleh laser, electron beam, atau arc. Proses ini memungkinkan kontrol penuh terhadap penambahan material, sehingga sangat cocok untuk fabrikasi struktur besar, perbaikan komponen aus, atau pembuatan geometri kompleks yang tidak dapat dicetak dengan metode konvensional. Keunggulan DED terletak pada fleksibilitasnya dalam penggunaan berbagai jenis logam, termasuk titanium alloys, stainless steel, *Inconel*, dan cobalt-based superalloys.

Ciri khas dari DED adalah kemampuannya untuk menghasilkan build-up yang tebal dengan kecepatan deposisi tinggi. Hal ini membuatnya ideal untuk pembuatan part berskala besar atau pengisian ulang (*repair*) komponen seperti blade turbin, mold tooling, dan housing mesin. Selain itu, proses deposisi lapis demi lapis (*layer-by-layer deposition*) memungkinkan rekayasa gradien material atau *functionally graded materials* (FGM), yaitu komponen dengan variasi sifat material dalam satu struktur. FGM ini sangat bermanfaat untuk aplikasi yang membutuhkan kombinasi sifat seperti ketahanan aus pada satu sisi dan ketangguhan pada sisi lainnya. Dibandingkan PBF, DED memiliki deposition rate yang jauh lebih tinggi sehingga efisien dalam produksi komponen yang memerlukan volume besar.

3. Hubungan dengan Pengelasan Modern

Laser Cladding (LC) dan *Directed Energy Deposition* (DED) memiliki hubungan erat dengan konsep pengelasan modern karena keduanya menggunakan prinsip dasar fusion welding, yaitu proses peleburan dan solidifikasi material untuk menghasilkan ikatan metalurgi yang kuat. Pada LC dan DED, sumber energi intens laser, electron beam, atau arc difokuskan secara presisi ke area kecil sehingga terbentuk molten pool yang kemudian membeku dan menyatu dengan substrat. Proses ini mirip dengan *laser welding* atau arc welding namun dilakukan secara berlapis (*layer-by-layer*). Karena karakteristik

peleburan lokal yang terkontrol, proses ini memungkinkan pembentukan *metallurgical bond* yang sangat kuat dan bebas kontaminasi, terutama ketika dilengkapi dengan shielding gas seperti argon atau helium (Herzog *et al.*, 2016).

Keunggulan LC dan DED dalam konteks pengelasan modern terletak pada kemampuan untuk mengontrol heat input secara sangat presisi. Heat input yang rendah dan terfokus mengurangi ukuran *Heat-Affected Zone* (HAZ), membatasi distorsi termal, dan meminimalkan residual stress. Hal ini sangat berbeda dari pengelasan konvensional yang biasanya menghasilkan HAZ luas dan distorsi signifikan. Dalam LC dan DED, parameter seperti *laser power*, *travel speed*, dan *feed rate* dapat disesuaikan secara real-time, mirip dengan *adaptive welding* pada Robotik modern. Kontrol ini membantu menghasilkan microstructure yang lebih halus (*fine-grained*), meningkatkan ketangguhan, dan mengurangi risiko cacat seperti hot *cracking* atau porosity.

4. Faktor Penentu Kualitas *Laser Cladding* dan DED

a. *Heat Input* dan *Cooling Rate*

Heat input merupakan faktor utama yang menentukan kualitas hasil pada proses *Laser Cladding* (LC) dan *Directed Energy Deposition* (DED) karena memengaruhi ukuran molten pool, kedalaman penetrasi, serta distribusi panas ke area sekitar. Heat input yang terlalu tinggi dapat menyebabkan molten pool menjadi terlalu besar, meningkatkan risiko *porosity*, *hot cracking*, dan distorsi. Sebaliknya, heat input yang terlalu rendah menyebabkan *incomplete fusion* atau bonding yang lemah antara material tambahan dan substrat. Selain itu, besarnya *heat input* juga mengendalikan evolusi mikrostruktur, termasuk *grain size* dan distribusi fasa, yang berdampak langsung pada sifat mekanik lapisan akhir.

Cooling rate merupakan faktor penentu lain yang sangat kritis karena memengaruhi pembentukan grain structure selama solidifikasi. *Cooling rate* yang tinggi mendorong pembentukan *fine-grained microstructure* yang meningkatkan kekuatan dan ketahanan aus, meskipun dapat menimbulkan anisotropy pada beberapa material. Sementara itu, *cooling rate* rendah dapat menghasilkan grain kasar yang menurunkan performa mekanik.

Sistem *adaptive control* yang mengandalkan sensor thermal dan

kecerdasan buatan (AI) mampu mengatur *laser power*, *scan speed*, dan pola pemanasan secara real-time untuk menjaga keseimbangan ideal antara *heat input* dan *cooling rate*, sehingga kualitas lapisan dapat dioptimalkan dan risiko cacat diminimalkan.

b. Material dan *Substrat Compatibility*

Material dan *substrate compatibility* merupakan faktor penting dalam menentukan keberhasilan proses *Laser Cladding* (LC) dan *Directed Energy Deposition* (DED). Pada LC, misalnya ketika Ni-based superalloy digunakan sebagai bahan overlay pada *substrate stainless steel*, perbedaan koefisien ekspansi termal dan konduktivitas panas harus diperhitungkan secara cermat. Jika tidak, mismatch termal dapat menyebabkan residual stress tinggi, *cracking*, atau delaminasi pada interface. Selain itu, sensitivitas mikrostruktur superalloy terhadap overheating dan segregasi elemen paduan menuntut kontrol *laser power* dan *scan speed* yang sangat presisi untuk memastikan terbentuknya *metallurgical bonding* yang kuat tanpa menimbulkan cacat.

Pada proses DED, kompatibilitas material sangat penting terutama untuk aplikasi repair pada komponen titanium alloy atau aluminum alloy yang memiliki titik lebur lebih rendah dan konduktivitas panas tinggi. Material ini membutuhkan heat input yang lebih terkontrol agar tidak terjadi *warping*, *porosity*, atau perubahan fase yang merugikan. Parameter seperti *feed rate*, *travel speed*, serta pemilihan shielding gas harus disesuaikan dengan sifat termal material untuk menghindari reaksi oksidasi atau kontaminasi.

c. *Layer Thickness* dan *Scan Strategy*

Ketebalan layer dan strategi scan merupakan faktor krusial dalam menentukan kualitas hasil *Laser Cladding* (LC) maupun *Directed Energy Deposition* (DED). Jika layer terlalu tebal, energi dari laser atau sumber panas tidak dapat menembus seluruh ketebalan material dengan merata, sehingga penetrasi menjadi tidak konsisten. Kondisi ini meningkatkan risiko terbentuknya *porosity*, *incomplete fusion*, atau mikrovoids pada

lapisan, yang akan menurunkan kekuatan mekanik dan integritas struktural komponen. Sebaliknya, ketebalan layer yang terkontrol memungkinkan molten pool terbentuk secara seragam, sehingga densitas lapisan optimal dan sifat mikrostruktur lebih homogen.

Strategi scan juga sangat memengaruhi distribusi panas, *residual stress*, dan *microstructure*. Strategi seperti zig-zag, spiral, atau meander dapat dipilih sesuai geometri komponen dan arah pendinginan yang diinginkan. Penggunaan *adaptive laser path* yang memanfaatkan sensor real-time dan algoritma AI memungkinkan penyesuaian otomatis pada kecepatan travel dan jalur scan, sehingga distorsi termal dapat diminimalkan dan penetrasi merata tercapai. Pendekatan ini meningkatkan densitas lapisan dan kualitas metallurgical bonding antara layer, menjadikan LC dan DED lebih efektif untuk material sensitif dan komponen presisi tinggi.

d. Shielding Gas dan Atmosphere Control

Kontrol atmosfer selama proses *Laser Cladding* (LC) dan *Directed Energy Deposition* (DED) merupakan faktor penting dalam menjaga kualitas sambungan dan sifat mekanik material. Paparan oksigen atau nitrogen dari udara dapat menyebabkan oksidasi atau pembentukan nitride pada permukaan molten pool, yang berpotensi menurunkan kekuatan, keuletan, dan ketahanan korosi lapisan yang dihasilkan. Terutama pada material sensitif seperti Ni-based superalloy atau titanium alloy, kontaminasi atmosfer dapat menimbulkan defek mikroskopis yang memengaruhi integritas struktural dan umur fatigue komponen.

Penggunaan gas inert seperti argon (Ar) atau helium (He) membantu menciptakan lingkungan terlindungi di sekitar area molten pool. Gas inert ini mencegah kontak langsung antara logam cair dan udara, sehingga oksidasi dan nitride formation diminimalkan. Selain itu, aliran gas dapat membantu pendinginan yang lebih terkendali dan stabilisasi molten pool, mendukung pembentukan metallurgical bonding yang homogen.

C. Integrasi Welding dengan 3D Printing

Integrasi pengelasan dengan teknologi 3D printing merupakan perkembangan mutakhir dalam metal *additive manufacturing* (AM), yang menggabungkan prinsip *fusion welding layer-by-layer* dengan fleksibilitas design digital dan proses deposisi material. Pendekatan ini memungkinkan manufaktur komponen logam kompleks, repair part, dan *functionally graded materials* (FGM) dengan presisi tinggi, kontrol mikrostruktur, dan properti mekanik optimal (DebRoy *et al.*, 2018). Integrasi ini muncul karena beberapa kebutuhan industri:

1. Kemampuan untuk membangun komponen besar atau kompleks yang sulit dicapai metode konvensional.
2. Repair dan maintenance komponen *high-value* tanpa membuang seluruh part.
3. *Custom geometries* dan *internal lattice structures* untuk aerospace, automotive, dan biomedical.
4. Kontrol heat input dan microstructure untuk menjaga residual stress minimal dan *fatigue life optimal*.

Integrasi welding dengan 3D printing memanfaatkan metode *Directed Energy Deposition* (DED), *Laser Cladding* (LC), dan hybrid AM-welding untuk menambahkan material logam ke substrat atau membangun struktur additively. Prinsip *Fusion Layer-by-Layer*:

- a. *Heat source*: laser, electron beam, atau arc welding.
- b. *Material feed*: powder atau wire.
- c. *Deposition layer-by-layer* → mirip *additive welding*, tetapi dikontrol presisi digital.
- d. *Cooling rate* dan heat input → memengaruhi *microstructure*, *grain size*, dan *mechanical properties*.

1) *Laser Welding Assisted AM*

Laser Welding Assisted Additive Manufacturing (LWAM) merupakan metode di mana laser digunakan sebagai sumber energi utama untuk melebur material logam secara selektif pada substrat, membangun komponen *layer-by-layer*. Proses ini memiliki prinsip serupa dengan *Laser Cladding* atau *Directed Energy Deposition* (DED), di mana material tambahan berupa powder atau wire dilebur secara lokal oleh laser untuk membentuk molten pool. Setiap lapisan material membeku dengan cepat, membentuk ikatan metallurgical

yang kuat dengan substrat dan lapisan sebelumnya, menghasilkan struktur padat yang mendekati sifat mekanik logam dasar. Dengan kontrol energi laser yang presisi, LWAM dapat memproduksi geometri kompleks dan mengurangi *Heat-Affected Zone* (HAZ) dibandingkan pengelasan konvensional.

Salah satu keunggulan LWAM adalah kemampuannya membangun komponen dengan kualitas mikrostruktur yang tinggi. *Laser power*, *travel speed*, dan *feed rate* dapat diatur secara real-time untuk memastikan penetrasi optimal dan kontrol porositas. Integrasi sensor *thermal*, *vision system*, dan AI memungkinkan *closed-loop control*, sehingga variasi material, ketebalan layer, atau geometri kompleks dapat diakomodasi tanpa mengurangi kualitas sambungan. Hal ini penting terutama pada material sensitif seperti titanium alloy, Ni-based superalloy, atau aluminium-lithium panels yang banyak digunakan di aerospace dan otomotif.

2) *Arc Welding Assisted AM* (WAAM)

Arc Welding Assisted Additive Manufacturing, atau lebih dikenal dengan *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM), merupakan teknik *additive manufacturing* yang memanfaatkan proses pengelasan busur listrik (MIG, MAG, atau TIG) untuk membangun komponen logam secara layer-by-layer. Pada WAAM, wire logam berdiameter tertentu secara otomatis diberikan ke area sambungan yang dipanaskan oleh busur listrik. Setiap lapisan logam dilelehkan dan membeku secara bertahap, membentuk struktur padat yang saling terikat metallurgically. Proses ini memungkinkan produksi komponen berukuran besar dan tinggi, yang sulit dicapai dengan metode *Powder Bed Fusion* atau *Laser Cladding*. Dengan kontrol parameter pengelasan seperti arus, tegangan, *travel speed*, dan *wire feed rate*, kualitas sambungan dapat dijaga tetap optimal meski volume material yang didepositkan relatif besar.

Salah satu keunggulan WAAM adalah laju deposit material yang tinggi, sehingga proses build-up komponen tebal jauh lebih cepat dibanding metode *laser-based AM*. WAAM ideal untuk manufaktur aerospace, energi, dan industri berat,

seperti pembuatan chassis kapal, pesawat, atau frame kendaraan industri. Meskipun resolusi geometris lebih rendah dibandingkan *Powder Bed Fusion*, WAAM menawarkan fleksibilitas desain dan kemampuan reparasi komponen besar. Integrasi sensor posisi, thermal, dan *vision system* memungkinkan *adaptive control*, sehingga variasi gap, distorsi termal, atau porosity dapat diminimalkan selama proses pengelasan.

3) Hybrid Welding-AM

Hybrid Welding–Additive Manufacturing (Hybrid Welding-AM) adalah pendekatan inovatif yang menggabungkan proses *additive manufacturing* berbasis laser atau electron beam, seperti *Powder Bed Fusion* (PBF) atau *Directed Energy Deposition* (DED), dengan teknik pengelasan konvensional atau adaptif. Tujuannya adalah memanfaatkan keunggulan kedua metode: presisi dan kompleksitas geometri dari AM serta laju deposit tinggi dan fleksibilitas pengelasan untuk material bulk atau perbaikan permukaan. Dalam praktiknya, lapisan logam pertama dibangun menggunakan PBF atau DED, kemudian lapisan tambahan atau koreksi geometri diterapkan melalui laser welding atau busur listrik adaptif. Integrasi ini memungkinkan peningkatan *deposition rate* sekaligus menjaga kualitas metallurgical bonding dan microstructure homogen.

Keunggulan Hybrid Welding-AM terlihat jelas pada komponen besar atau kritis, seperti aerospace panels, turbine blades, atau chassis industri berat. Dengan menggabungkan laser cladding atau DED dengan pengelasan adaptif berbasis sensor dan AI, distorsi termal dan HAZ dapat dikontrol secara real-time. Sensor thermal, vision, dan force/torque memberikan data yang diolah oleh sistem AI untuk menyesuaikan *laser power*, *travel speed*, dan *wire feed*, sehingga penetrasi optimal dan microstructure stabil dapat dicapai. Hal ini sangat penting untuk material canggih seperti superalloy, *nanostructured metals*, atau *smart materials*, di mana kualitas mikrostruktur menentukan kekuatan, *fatigue life*, dan sifat fungsional.

D. Tantangan dan Potensi Aplikatif

Pengelasan dalam konteks *additive manufacturing* (AM) telah merevolusi produksi logam melalui metode *layer-by-layer deposition* yang mengintegrasikan prinsip *fusion welding*, *adaptive heat input*, dan kontrol *microstructure*. Namun, meskipun potensinya besar, teknologi ini menghadapi berbagai tantangan teknis, material, dan proses yang harus diatasi agar implementasinya optimal di industri. Secara aplikatif, integrasi metal AM dan welding membuka peluang untuk:

1. Produksi komponen kompleks yang sulit dicapai dengan manufaktur konvensional.
2. Repair dan refurbishment komponen *high-value*.
3. Produksi *functionally graded materials* (FGM) dan *smart materials*.
4. Peningkatan efisiensi material dan pengurangan waste.

Teknologi ini juga menghadapi tantangan kritis terkait *residual stress*, *porosity*, *microstructure anisotropy*, dan kontrol kualitas real-time.

1. Tantangan Teknologi Metal AM dengan Welding

a. Kontrol Residual Stress dan Distorsi

Salah satu tantangan utama dalam metal *additive manufacturing* (AM) yang dikombinasikan dengan welding adalah kontrol residual stress dan distorsi yang timbul akibat akumulasi panas selama proses *layer-by-layer*. Setiap lapisan logam yang dilebur membawa energi termal tambahan, menciptakan gradien suhu yang signifikan antara lapisan panas dan lapisan yang sudah dingin. Gradien ini menghasilkan tegangan sisa (*residual stress*) yang tinggi, yang berpotensi menyebabkan distorsi geometri, retak, atau bahkan delaminasi pada komponen akhir. Fenomena ini menjadi lebih kritis pada komponen besar atau material sensitif terhadap panas seperti superalloy dan nanostructured metals, karena struktur mikro dapat terdegradasi jika *cooling rate* tidak tepat.

Untuk mengatasi masalah ini, sistem *adaptive control* berbasis sensor dan AI menjadi solusi penting. Sensor thermal dan *vision system* dapat memonitor distribusi panas real-time, sementara algoritma AI menyesuaikan *laser/arc power*, *travel speed*, dan

strategi scan secara dinamis untuk mengurangi gradien suhu. Dalam *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM) misalnya, *inter-layer cooling*, optimasi scan path, dan penyesuaian *deposition rate* digunakan untuk menstabilkan suhu dan meminimalkan residual stress.

b. Porosity dan Defek Mikrostruktur

Salah satu tantangan signifikan dalam teknologi metal *additive manufacturing* (AM) yang dikombinasikan dengan welding adalah munculnya porosity dan defek mikrostruktur. Porosity dapat terbentuk akibat *lack of fusion*, terjebaknya gas dalam molten pool, atau ketidakstabilan keyhole selama proses fusi logam. Kehadiran pori-pori ini menjadi titik konsentrasi tegangan yang potensial untuk inisiasi retak, yang secara signifikan mengurangi kekuatan mekanik dan umur fatigue komponen. Selain itu, defek mikrostruktur lain seperti segregasi fasa atau *cracking* mikro dapat muncul jika distribusi panas dan laju pendinginan tidak terkontrol, sehingga kualitas material akhir tidak konsisten.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penyesuaian parameter proses menjadi kunci. Kontrol presisi pada laser atau arc power, travel speed, dan *material feed rate* membantu memastikan molten pool homogen dan penetrasi optimal. Selain itu, monitoring in-situ menggunakan sensor optical dan thermal memungkinkan deteksi awal porosity atau *keyhole instability* sehingga parameter proses dapat disesuaikan secara real-time.

c. Anisotropy dan *Variasi Mechanical Properties*

Salah satu tantangan utama dalam teknologi metal *additive manufacturing* (AM) berbasis welding adalah munculnya anisotropi dan variasi sifat mekanik pada komponen akhir. Karena material dibangun secara *layer-by-layer*, orientasi lapisan secara langsung memengaruhi pertumbuhan grain dan arah kristal. *Cooling rate* yang tinggi menghasilkan mikrostruktur fine-grained yang memiliki kekuatan mekanik tinggi, namun meningkatkan anisotropi, sehingga sifat mekanik berbeda antara arah build dan arah transversal. Kondisi ini membuat performa komponen tidak seragam, yang berpotensi menimbulkan masalah pada aplikasi kritis seperti aerospace atau industri energi tinggi.

Heterogenitas mikrostruktur juga dapat muncul akibat fluktuasi heat input atau ketidakstabilan *thermal gradients* selama proses deposit logam. *Grain growth* yang tidak merata dan perbedaan fasa antar lapisan menyebabkan variasi sifat mekanik, seperti kekerasan, kekuatan tarik, dan ketahanan fatigue. Untuk mengatasi hal ini, *post-processing* seperti *heat treatment* atau *hot isostatic pressing* sering diterapkan untuk homogenisasi mikrostruktur, menurunkan anisotropi, dan meningkatkan konsistensi performa mekanik. Pendekatan ini memastikan komponen AM memenuhi spesifikasi teknis dan dapat diandalkan dalam operasi jangka panjang.

d. Keterbatasan Material dan Feedstock

Salah satu tantangan signifikan dalam teknologi metal *additive manufacturing* (AM) berbasis welding adalah keterbatasan material dan feedstock. Tidak semua paduan logam dapat diproses secara efektif dengan metode hybrid AM-welding, terutama material dengan titik leleh tinggi atau yang sensitif terhadap oksidasi. Penggunaan material semacam ini memerlukan kontrol proses adaptif yang presisi, termasuk pengaturan energi las, laju deposisi, dan strategi pendinginan, serta perlindungan atmosfer inert untuk mencegah oksidasi dan degradasi mikrostruktur. Tanpa kontrol ini, kualitas sambungan dan stabilitas mikrostruktur dapat terpengaruh, menurunkan performa komponen.

Karakteristik feedstock seperti morfologi serbuk, distribusi ukuran partikel, dan kualitas kawat las juga berperan penting dalam menentukan hasil deposit logam. Serbuk yang tidak homogen atau kawat dengan inklusi dapat menyebabkan porositas, cacat mikrostruktur, dan penetrasi tidak merata. Oleh karena itu, pemilihan feedstock berkualitas tinggi, dikombinasikan dengan pengawasan parameter proses secara real-time melalui sensor dan sistem adaptif, menjadi kunci untuk memastikan konsistensi kualitas, penetrasi optimal, dan integritas mekanik komponen AM yang dihasilkan.

e. Kontrol Proses dan Monitoring Real-Time

Integrasi teknologi welding dengan metal *additive manufacturing* (AM) menghadirkan tantangan besar dalam hal kontrol proses dan monitoring real-time. Proses *layer-by-layer*

memerlukan pemantauan terus-menerus terhadap molten pool, *bead geometry*, dan distribusi panas agar kualitas sambungan tetap optimal. Sensor termal, *displacement*, dan *force/torque* digunakan untuk memperoleh data real-time, sedangkan *vision system* memonitor *alignment* dan deteksi cacat mikro. Data yang dikumpulkan ini menjadi dasar bagi sistem *adaptive control* untuk menyesuaikan *laser power*, *travel speed*, atau *wire feed rate* secara otomatis, sehingga HAZ, distorsi, dan porositas dapat diminimalkan.

Tantangan lain adalah integrasi data sensor dan sistem monitoring ke dalam platform digital twin atau *predictive maintenance*. *Digital twin* memungkinkan simulasi dan prediksi perilaku komponen selama proses AM-welding, sehingga operator dapat melakukan koreksi sebelum cacat terbentuk. Sistem ini juga mendukung *adaptive control layer-by-layer*, mempercepat proses produksi, meningkatkan konsistensi kualitas, dan memperpanjang umur komponen.

f. *Post-Processing* dan *Finishing*

Salah satu tantangan signifikan dalam teknologi metal *additive manufacturing* (AM) yang dikombinasikan dengan welding adalah kebutuhan akan *post-processing* dan *finishing*. Proses *layer-by-layer* sering menghasilkan permukaan yang kasar dan tidak seragam, sehingga teknik tambahan seperti laser remelting atau machining diperlukan untuk mencapai toleransi dimensi dan kualitas permukaan yang diinginkan. Selain itu, residual stress yang terbentuk selama deposisi logam dapat menyebabkan distorsi atau retak, sehingga perlakuan panas (*stress relief/heat treatment*) menjadi penting untuk meningkatkan ductility dan stabilitas mekanik komponen. Proses ini harus direncanakan dengan cermat agar tidak merusak microstructure yang diinginkan.

2. Potensi Aplikatif

a. Aerospace Industry

Industri aerospace merupakan salah satu bidang yang paling diuntungkan dari integrasi metal additive manufacturing dengan teknologi welding. Komponen bernilai tinggi seperti turbine blades, nozzle, dan bagian engine roket memerlukan overlay yang presisi serta kemampuan reparasi tanpa mengganti seluruh part. *Laser Cladding* (LC) dan *Directed Energy Deposition* (DED) memungkinkan pembuatan lapisan pelindung dan penambahan material dengan kontrol heat input yang ketat, sehingga microstructure tetap stabil dan *residual stress* dapat diminimalkan. Keunggulan ini sangat penting untuk menjaga performa komponen di kondisi ekstrem, termasuk temperatur tinggi dan beban siklik yang berat (DebRoy *et al.*, 2018).

Penggunaan *functionally graded materials* (FGM) memungkinkan optimisasi struktural dan termal secara lokal. Misalnya, kombinasi LC dan DED dapat menghasilkan permukaan dengan ketahanan aus dan korosi tinggi, sementara bulk material tetap mempertahankan kekuatan mekanik. Contoh aplikatif adalah Ti-6Al-4V dan *Inconel 718*, di mana laser-assisted AM dapat membentuk microstructure γ' yang stabil dan mengurangi risiko *cracking*.

b. Automotive Industry

Industri otomotif semakin memanfaatkan integrasi metal additive manufacturing dengan teknologi welding untuk meningkatkan performa dan efisiensi produksi. Struktur kendaraan yang ringan, seperti chassis aluminium atau komponen rangka tubular, dapat diproduksi menggunakan *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM), yang memungkinkan build-up material tebal secara cepat dan presisi. Selain itu, permukaan yang rentan aus, seperti engine mounts atau brake components, dapat dilapisi dengan *laser-assisted AM overlay coating* untuk meningkatkan ketahanan terhadap gesekan dan korosi. Pendekatan ini tidak hanya memperpanjang umur komponen, tetapi juga mengurangi biaya pemeliharaan dan material (Ngo *et al.*, 2018).

Teknologi DED (*Directed Energy Deposition*) memungkinkan reparasi komponen performa tinggi tanpa harus mengganti

seluruh part, sehingga sangat efektif untuk kendaraan listrik atau *high-performance cars*. Adaptive AM-welding dengan sensor real-time dan kontrol AI memastikan microstructure homogen, mengoptimalkan *fatigue life* dan meminimalkan *residual stress*.

c. *Biomedical Applications*

Teknologi integrasi *laser-assisted additive manufacturing* (AM) dan welding memiliki potensi besar dalam bidang biomedical, terutama untuk pembuatan implan yang disesuaikan dengan pasien. Titanium implants dengan struktur lattice dapat diproduksi secara presisi menggunakan laser-assisted AM, memungkinkan densitas dan porositas diatur untuk mendukung *bone ingrowth* dan *osseointegration* yang optimal. Kontrol parameter energi laser, *feed rate* dan *scan strategy* secara adaptif memastikan microstructure yang seragam dan kekuatan mekanik yang memadai untuk menahan beban fisiologis tanpa menyebabkan degradasi material.

Teknologi ini membuka peluang untuk pengembangan smart implants dengan integrasi sensor di dalam struktur AM. Sensor embedded dapat memonitor tekanan, temperatur, atau deformasi implant secara real-time, memberikan data penting bagi pemulihan pasien dan pencegahan komplikasi. *Adaptive AM-welding* memungkinkan penggabungan material fungsional dan biokompatibel dengan presisi tinggi, sehingga implan tidak hanya mendukung fungsi mekanik tetapi juga dapat berinteraksi dengan sistem biologis secara aman dan efektif.

d. *Energy and Power Generation*

Teknologi integrasi welding dan *additive manufacturing* memiliki potensi besar dalam sektor energi dan pembangkit listrik, khususnya untuk komponen turbin dan sistem pembangkit daya yang menuntut performa tinggi. *High-strength steel turbine shafts*, misalnya, dapat direparasi menggunakan WAAM atau *laser cladding* (LC) overlay, sehingga komponen yang aus atau retak tidak perlu diganti secara keseluruhan. Pendekatan ini memungkinkan restorasi geometri dan kekuatan struktural dengan presisi tinggi, sekaligus menghemat biaya dan waktu pemeliharaan.

LC juga dapat digunakan untuk melapisi permukaan dengan material tahan korosi dan erosi, meningkatkan umur pakai komponen yang terpapar fluida atau gas panas. Penerapan *functionally graded superalloy* secara *layer-by-layer* memungkinkan distribusi properti mekanik dan termal yang optimal, sehingga komponen mampu menahan siklus termal yang berat tanpa mengalami degradasi microstructure atau retak.



BAB VIII

PENGENDALIAN MUTU DAN MONITORING PROSES LAS

Pengendalian mutu dan monitoring proses las merupakan aspek krusial dalam pengelasan modern, karena kualitas sambungan sangat bergantung pada parameter proses, kondisi material, dan lingkungan pengelasan. Penggunaan sensor, monitoring real-time, dan analitik data memungkinkan identifikasi cacat lebih cepat serta pencegahan kesalahan sebelum sambungan selesai. Proses pengelasan modern menuntut kontrol presisi terhadap arus, tegangan, kecepatan torak, dan distribusi panas, sehingga integrasi sistem pengendalian mutu berbasis data menjadi fondasi untuk mencapai konsistensi, efisiensi, dan keandalan sambungan.

Sensor dan teknologi monitoring memberikan informasi kritis tentang fenomena fisik selama pengelasan, seperti temperatur, bentuk arc, aliran logam cair, dan vibrasi. Data ini dapat dianalisis untuk mendeteksi potensi cacat, memprediksi distorsi, dan menyesuaikan parameter las secara adaptif. Selain itu, integrasi *Machine Learning* dan algoritma prediktif memungkinkan sistem untuk mengenali pola cacat, meningkatkan akurasi inspeksi, dan mendukung kontrol proses secara otomatis. Pendekatan ini menempatkan pengelasan modern sebagai proses cerdas yang adaptif dan responsif terhadap variasi material dan kondisi produksi.

A. Sensor Data dan Analisis Proses

Pada pengelasan modern, terutama pengelasan berbasis energi tinggi, otomatisasi, dan *additive manufacturing*, sensor data dan analisis proses berperan penting dalam pengendalian mutu. Proses las yang kompleks membutuhkan monitoring real-time untuk memastikan:

1. Konsistensi kualitas las.
2. Integritas struktur mikro dan mekanik.
3. Minimalisasi cacat seperti porosity, *cracking*, atau lack of fusion.
4. Optimalisasi parameter proses secara adaptif.

Sensor data digunakan sebagai input untuk sistem kontrol cerdas, seperti *Artificial Intelligence* (AI) atau *Machine Learning*, yang dapat memprediksi kualitas las dan menyesuaikan parameter proses secara otomatis (Zhang *et al.*, 2021).

1. Peran Sensor dalam Proses Pengelasan

Sensor dalam pengelasan modern dapat dibagi menjadi beberapa kategori, masing-masing memiliki fungsi khusus:

a. *Sensor Thermal*

Sensor thermal berperan penting dalam proses pengelasan modern, terutama untuk pengelasan berbasis laser seperti *Laser Cladding* dan *Directed Energy Deposition* (DED). Sensor ini mengukur temperatur molten pool serta *Heat Affected Zone* (HAZ) secara real-time, yang sangat krusial untuk memahami distribusi panas selama proses pengelasan. Data temperatur yang diperoleh membantu dalam memprediksi *cooling rate*, perkembangan mikrostruktur saat solidifikasi, serta potensi timbulnya *residual stress*. Dengan informasi ini, operator atau sistem kontrol adaptif dapat menyesuaikan parameter las, seperti *laser power*, *travel speed* dan *feed rate material*, untuk menghasilkan sambungan yang optimal dan meminimalkan cacat (DebRoy *et al.*, 2018).

Berbagai jenis sensor thermal digunakan sesuai kebutuhan, termasuk thermocouple untuk pengukuran titik, *infrared pyrometer* untuk *non-contact spot measurement*, dan *thermal camera* untuk pemetaan suhu area luas secara real-time. Contoh aplikasinya dapat dilihat pada pengelasan superalloy menggunakan *Laser Cladding* atau DED, di mana kontrol temperatur menentukan pembentukan fase γ' yang stabil dan *fine-grain microstructure*.

b. *Sensor Optik*

Sensor optik menjadi elemen krusial dalam pengelasan modern, terutama untuk monitoring real-time *molten pool* dan *bead formation*. Dengan menggunakan kamera *high-speed* dan *laser*

profilometer, sensor ini mampu mengukur morfologi bead, ukuran molten pool, serta perilaku keyhole selama proses pengelasan. Data yang diperoleh memungkinkan visualisasi tiga dimensi (3D) dari kondisi las, sehingga potensi cacat seperti *lack of fusion*, irregularitas permukaan, dan spatter dapat terdeteksi lebih awal. Hal ini sangat penting dalam pengelasan presisi tinggi, misalnya pada *Laser Cladding*, *Directed Energy Deposition* (DED), atau *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM), di mana kualitas permukaan dan konsistensi sambungan menjadi faktor kritis (King *et al.*, 2014).

Integrasi sensor optik dengan sistem kontrol adaptif memungkinkan penyesuaian parameter las secara real-time, seperti *laser power*, *travel speed*, dan *wire feed rate*, berdasarkan kondisi molten pool yang terpantau. Selain mendukung deteksi cacat, sensor optik juga membantu dalam optimasi path *Robotik* dan strategi scanning, sehingga kualitas sambungan meningkat dan residual stress dapat diminimalkan.

c. Sensor Akustik dan Ultrasonik

Sensor akustik dan ultrasonik berperan penting dalam memastikan kualitas sambungan las dengan cara mendeteksi cacat internal yang tidak terlihat secara visual. *Acoustic emission sensor* mampu menangkap sinyal awal dari retakan atau deformasi mikro selama proses pengelasan, sehingga potensi kegagalan dapat diidentifikasi lebih cepat. Sementara itu, sensor ultrasonik memungkinkan monitoring non-destruktif secara real-time pada setiap layer deposit, mendeteksi porosity, void, atau delaminasi yang dapat mempengaruhi integritas struktural sambungan. Integrasi kedua jenis sensor ini sangat penting, terutama pada pengelasan presisi tinggi dan *additive manufacturing* berbasis logam, di mana cacat internal dapat menurunkan kekuatan mekanik dan umur fatigue komponen.

Data yang diperoleh dari sensor akustik dan ultrasonik dapat diolah secara langsung oleh sistem kontrol adaptif untuk melakukan penyesuaian parameter pengelasan, seperti daya laser, *travel speed*, atau *feed rate material*. Hal ini memungkinkan proses welding menjadi lebih aman dan konsisten, dengan risiko cacat internal yang diminimalkan.

d. Sensor Arus, Tegangan, dan Power

Sensor arus, tegangan, dan power penting dalam pengawasan proses pengelasan, khususnya pada *arc welding* dan *resistance welding*. Sensor ini mampu memantau fluktuasi arus dan tegangan secara real-time, sehingga operator atau sistem kontrol dapat segera mendeteksi adanya *short circuit*, ketidakstabilan busur, atau penetrasi sambungan yang tidak sesuai. Dengan informasi ini, kualitas las dapat dijaga agar tetap konsisten, dan potensi cacat yang diakibatkan oleh variasi listrik dapat diminimalkan. Parameter listrik yang stabil juga sangat krusial untuk memastikan molten pool terbentuk dengan baik dan penetrasi optimal, sehingga integritas mekanik sambungan tetap terjaga (Herzog *et al.*, 2016).

Data yang diperoleh dari sensor arus, tegangan, dan power biasanya diintegrasikan ke dalam sistem *closed-loop control*. Sistem ini dapat secara otomatis menyesuaikan arus, tegangan, atau kecepatan travel *Robot* untuk mengatasi ketidakteraturan yang terdeteksi, sehingga proses pengelasan menjadi lebih adaptif dan aman. Selain itu, informasi ini juga memungkinkan deteksi anomaly atau anomali secara dini, mendukung predictive maintenance dan mengurangi risiko kegagalan kritis pada komponen yang dilas.

2. Analisis Data Proses Las

a. *Data Acquisition* dan *Pre-processing*

Pada proses pengelasan modern, sensor menghasilkan data dalam jumlah besar (*big data*) yang mencakup time-series, citra, maupun sinyal akustik dari molten pool, busur las, dan HAZ. Data ini sangat penting untuk memantau kualitas sambungan, mendeteksi cacat, dan mengendalikan proses secara real-time. Namun, sebelum dapat digunakan untuk analisis atau kontrol adaptif, data mentah perlu melalui tahap *pre-processing* agar noise, fluktuasi, atau ketidakteraturan sensor tidak mempengaruhi akurasi hasil. Tahap ini memastikan bahwa informasi yang digunakan untuk pengambilan keputusan benar-benar relevan dan representatif terhadap kondisi proses pengelasan.

Pre-processing meliputi beberapa langkah penting. Pertama, *filtering noise* dilakukan menggunakan digital filter atau Kalman filter untuk menghilangkan gangguan yang tidak diinginkan. Selanjutnya, normalisasi dan standarisasi data dilakukan agar semua variabel berada pada skala yang seragam, sehingga mempermudah perbandingan dan analisis. Terakhir, *feature extraction* diterapkan untuk mengekstraksi parameter kunci seperti lebar molten pool, gradien temperatur, dan stabilitas busur las.

b. Analisis Statistik

Analisis statistik berperan penting dalam pengelolaan data proses pengelasan, karena membantu memahami karakteristik dasar dan hubungan antar parameter. *Descriptive statistics*, seperti mean, variance, dan skewness, digunakan untuk monitoring proses dasar, misalnya variasi temperatur molten pool, lebar bead, atau arus las. Dengan informasi ini, operator dapat mengetahui apakah proses berjalan normal atau terdapat deviasi yang berpotensi menurunkan kualitas sambungan. Statistik deskriptif juga membantu dalam mendeteksi tren atau pola awal yang bisa menjadi indikator potensi cacat atau inkonsistensi dalam produksi.

Analisis multivariat diterapkan untuk membahas faktor-faktor yang paling dominan memengaruhi kualitas las. *Principal Component Analysis (PCA)* dapat mereduksi dimensi data sensor yang kompleks, sehingga faktor-faktor kritis seperti heat input, *travel speed* atau *cooling rate* dapat diidentifikasi. Analisis korelasi juga digunakan untuk memahami hubungan antara parameter proses dan sifat mekanik sambungan, seperti kekuatan, keuletan, atau porositas.

c. *Machine Learning* dan AI

Penggunaan *Machine Learning (ML)* dan *Artificial Intelligence (AI)* dalam analisis data proses las telah merevolusi pendekatan tradisional dalam pengendalian kualitas. Algoritma *supervised learning* digunakan untuk memprediksi kualitas sambungan las berdasarkan data input dari sensor, seperti temperatur *molten pool*, *travel speed* dan arus las. Dengan model ini, parameter kritis dapat diidentifikasi dan disesuaikan sebelum cacat terjadi. Di sisi lain, *unsupervised learning* berfungsi untuk mendeteksi

pola cacat atau anomali dalam proses produksi melalui clustering data, sehingga defect yang jarang muncul tetap dapat dikenali dan dianalisis tanpa label data awal.

Reinforcement learning memungkinkan pengembangan sistem pengelasan adaptif yang menyesuaikan parameter las secara real-time berdasarkan feedback dari sensor. AI memproses data multi-sensor, termasuk *thermal*, *displacement*, dan *vision system*, untuk mengoptimalkan *laser power*, *travel speed*, atau *torch angle*.

B. Quality Control Berbasis Data

Perkembangan teknologi pengelasan modern, termasuk welding otomatis, robotik, dan *additive manufacturing*, telah mengubah paradigma *quality control* (QC) dari metode manual menjadi *data-driven quality control*. QC berbasis data memanfaatkan sensor real-time, sistem monitoring, dan analisis data lanjutan untuk memastikan integritas las, konsistensi mikrostruktur, dan properti mekanik sesuai spesifikasi (DebRoy *et al.*, 2018). *Quality control* tradisional, seperti inspeksi visual atau *destructive testing*, kini tidak cukup karena:

1. Kompleksitas geometri komponen modern.
2. Heterogenitas material pada proses *layer-by-layer* (AM).
3. Kebutuhan produksi dengan high-value components tanpa cacat.
4. Tekanan industri untuk efisiensi material dan pengurangan waste.

QC berbasis data memungkinkan monitoring *end-to-end* dan decision-making otomatis dengan presisi tinggi.

Konsep *quality control* (QC) berbasis data dalam proses pengelasan modern menekankan pemanfaatan data dari sensor dan parameter proses sebagai indikator utama kualitas sambungan. Parameter kritis seperti thermal profile digunakan untuk mengontrol evolusi microstructure dan *residual stress*, sementara geometri molten pool membantu mendeteksi porosity dan memastikan konsistensi bead. Selain itu, monitoring arc stability dan power profile memberikan informasi mengenai penetrasi dan kualitas fusion. Semua data ini dikumpulkan secara real-time dan dianalisis menggunakan metode statistik, *Machine Learning*, atau algoritma AI, sehingga memungkinkan identifikasi potensi cacat sebelum terbentuk serta optimalisasi proses secara otomatis (Zhang *et al.*, 2021).

Pendekatan data-driven QC juga mencakup monitoring *end-to-end*, dari input material hingga tahap post-processing. Data dari setiap tahap, seperti kondisi material, persiapan permukaan, parameter las, dan pendinginan, diintegrasikan ke dalam sistem QC terpusat. Dengan demikian, setiap deviasi dari standar yang ditentukan dapat segera terdeteksi dan dikoreksi melalui kontrol prediktif. Hal ini memungkinkan proses pengelasan berjalan dengan konsistensi tinggi, mengurangi resiko cacat, dan meminimalkan kebutuhan rework.

Contoh implementasi nyata dapat dilihat pada *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM) untuk industri aerospace, di mana data thermal dan optical monitoring digunakan untuk memprediksi microstructure sebelum tahap finishing. Sistem ini memungkinkan penyesuaian parameter las secara adaptif, menjaga kualitas lapisan deposit dan memastikan integritas struktural komponen. Pendekatan berbasis data ini tidak hanya meningkatkan efisiensi dan kualitas produksi, tetapi juga memungkinkan pengelolaan risiko lebih baik dalam pengelasan material kompleks seperti superalloy dan *nanocomposite*.

Parameter kunci untuk QC Data-Driven diantaranya:

1. *Temperature & Cooling Rate* → memengaruhi *grain size*, *phase formation* dan *residual stress*.
2. *Travel Speed & Feed Rate* → menentukan *bead geometry*, *fusion quality*, dan *penetration depth*.
3. *Arc/Laser Power* → *heat input* → kontrol HAZ dan molten pool.
4. *Layer Deposition Consistency* → integritas *layer-by-layer*, minimisasi porosity.
 - a. Real-Time Monitoring & Feedback

Metodologi *quality control* (QC) berbasis data dalam pengelasan modern menekankan pentingnya monitoring secara real-time untuk menjaga konsistensi kualitas sambungan. Sensor-sensor canggih, seperti thermal sensor dan optical camera, secara kontinu memantau molten pool, deteksi abnormalitas, serta perubahan geometri bead atau *Heat-Affected Zone* (HAZ). Setiap deviasi dari kondisi optimal segera teridentifikasi, memungkinkan intervensi cepat sebelum cacat berkembang menjadi masalah permanen. Hal ini sangat penting terutama pada material kompleks atau sambungan presisi tinggi,

seperti superalloy atau nanocomposite, di mana toleransi kesalahan sangat rendah.

Data yang diperoleh dari sensor kemudian diproses dan dianalisis menggunakan algoritma AI atau *Machine Learning* untuk menentukan penyesuaian parameter proses yang diperlukan. Misalnya, jika thermal sensor mendeteksi peningkatan suhu yang berpotensi menyebabkan overheating, AI feedback loop dapat secara otomatis menurunkan laser power atau mengubah *travel speed robot*. Demikian pula, optical monitoring memungkinkan deteksi variasi *bead geometry* yang bisa mengindikasikan kurangnya penetrasi atau porosity, sehingga parameter seperti *wire feed rate* atau *torch angle* dapat dioptimalkan secara adaptif.

b. Data Storage dan Analysis

Pada metodologi *quality control* (QC) berbasis data, penyimpanan dan analisis data berperan penting untuk mendukung pengambilan keputusan yang akurat. Semua data sensor, termasuk pembacaan temperatur, *geometri bead*, dan citra molten pool, disimpan secara sistematis dalam sistem *big data storage*. Penyimpanan ini memungkinkan rekam jejak lengkap setiap proses pengelasan, mulai dari material input, parameter proses, hingga hasil akhir sambungan. Dengan memiliki data historis yang lengkap, insinyur dapat menelusuri kembali penyebab cacat, mempelajari variasi proses, dan mengembangkan strategi perbaikan berkelanjutan.

Gambar 3. *Big Data*



Sumber: *Corporate Training*

Data yang tersimpan kemudian dianalisis menggunakan berbagai teknik, mulai dari statistik deskriptif hingga *Machine Learning*. Analisis offline memungkinkan identifikasi pola cacat yang mungkin tidak terlihat selama proses real-time. Misalnya, *clustering defect pattern* dapat menunjukkan hubungan antara variasi *travel speed*, *power input*, atau *cooling rate* dengan terjadinya *porosity* atau *undercut*. Selain itu, analisis data historis mendukung optimasi proses, seperti penentuan kombinasi parameter yang memberikan penetrasi homogen dan HAZ minimal, sehingga kualitas sambungan lebih konsisten pada batch produksi berikutnya.

c. *Decision Support System*

Pada metodologi *quality control* (QC) berbasis data, *Decision Support System* (DSS) berperan sebagai jembatan antara pengumpulan data dan pengambilan keputusan operasional. DSS mengintegrasikan berbagai sumber data, mulai dari *sensor thermal*, *optical*, dan *force*, hingga hasil analisis AI dan model prediktif, untuk memberikan rekomendasi yang akurat dan cepat. Sistem ini membantu operator memahami kondisi proses secara real-time dan menentukan tindakan korektif sebelum cacat terbentuk. Dengan demikian, DSS bukan hanya alat

monitoring, tetapi juga instrumen proaktif untuk menjaga konsistensi kualitas pengelasan.

Salah satu fungsi DSS adalah memberikan saran spesifik berdasarkan kondisi yang terdeteksi. Misalnya, apabila sensor menunjukkan heat input yang terlalu tinggi pada *laser cladding* atau DED, sistem dapat merekomendasikan pengurangan laser power untuk mencegah *overheating*, *microstructure degradation*, atau *residual stress* berlebih. Selain itu, jika molten pool menunjukkan geometri abnormal, DSS dapat menyarankan penyesuaian *travel speed* atau *feed rate* untuk memastikan penetrasi optimal dan uniformitas bead. Rekomendasi ini bisa diberikan kepada operator sebagai panduan atau langsung diterapkan melalui sistem kontrol otomatis, tergantung tingkat otomasi pabrik.

C. *Machine Learning* dalam Deteksi Cacat Las

Pada pengelasan modern, kualitas las merupakan faktor kritical untuk memastikan integritas struktural, umur fatigue, dan keamanan komponen. Metode tradisional seperti inspeksi visual dan uji *non-destructive testing* (NDT) seringkali memerlukan waktu lama, bersifat subjektif, dan tidak efektif untuk monitoring real-time, terutama pada proses otomatis atau additive manufacturing (DebRoy *et al.*, 2018). *Machine Learning* (ML) menawarkan pendekatan cerdas dengan memanfaatkan sensor data, citra, dan sinyal proses untuk deteksi cacat las secara otomatis, cepat, dan presisi. Sistem ML memungkinkan identifikasi porosity, *cracking*, *lack of fusion*, dan spatter sebelum komponen selesai diproduksi, sehingga meningkatkan efisiensi dan konsistensi kualitas las (Zhang *et al.*, 2021).

Machine Learning (ML) merupakan cabang dari *Machine Learning* yang memungkinkan sistem untuk belajar dari data dan membuat prediksi atau keputusan tanpa pemrograman eksplisit. Dalam konteks pengelasan, ML digunakan untuk meningkatkan kualitas sambungan dengan memanfaatkan data dari *sensor thermal*, *optical*, akustik, maupun *force/torque*. Data ini diproses untuk mengidentifikasi kondisi *molten pool*, *bead geometry*, dan *Heat-Affected Zone* (HAZ), sehingga sistem dapat memprediksi potensi cacat sebelum terbentuk. Penerapan ML memungkinkan pengendalian proses secara real-time

dan pengurangan ketergantungan pada intervensi manual, meningkatkan konsistensi kualitas dan efisiensi produksi.

Klasifikasi ML dalam pengelasan dapat dibagi menjadi beberapa jenis. *Supervised learning* menggunakan dataset yang sudah diberi label, seperti *defect* atau *non-defect*, untuk melatih model sehingga dapat memprediksi cacat baru pada kondisi serupa. *Unsupervised learning* memanfaatkan *clustering* atau *anomaly detection* untuk menemukan pola abnormal tanpa label sebelumnya, berguna untuk mendeteksi masalah yang jarang terjadi. Sementara *reinforcement learning* memungkinkan sistem adaptif belajar menyesuaikan parameter pengelasan misalnya *laser power*, *travel speed*, atau *feed rate* secara otomatis, dengan tujuan meminimalkan *defect* dan meningkatkan kualitas sambungan. Pendekatan ini mendukung pengelasan modern yang kompleks dan heterogen.

Data input untuk ML:

1. *Thermal Data* → temperatur molten pool, *cooling rate*, *thermal gradient*.
2. *Optical Data / Vision System* → *molten pool shape*, *bead geometry*, *surface roughness*.
3. *Acoustic / Ultrasonic Data* → *internal porosity*, *cracking*.
4. *Electrical Parameters* → arus, tegangan, *power fluctuations* pada arc welding.
5. *Combined Sensor Fusion* → meningkatkan akurasi prediksi defect.
 - a. *Data Acquisition dan Preprocessing*

Implementasi *Machine Learning* (ML) untuk deteksi cacat las dimulai dengan tahap akuisisi data yang komprehensif. Sensor thermal, optical, akustik, dan *force/torque* menghasilkan *data continuous* yang sangat besar dan *high-dimensional*, seringkali mengandung noise atau outlier akibat fluktuasi proses pengelasan atau gangguan lingkungan. Data mentah ini mencakup informasi penting seperti temperatur molten pool, lebar bead, variasi arus dan tegangan, serta perubahan posisi torch. Tanpa pengolahan awal yang tepat, kualitas model ML akan terpengaruh, karena model dapat belajar dari noise dan menghasilkan prediksi yang tidak akurat. Oleh karena itu, pengumpulan data yang sistematis dan reliable menjadi fondasi utama untuk pipeline ML dalam pengelasan (Zhang *et al.*, 2021).

Tahap *preprocessing* dilakukan untuk menyiapkan data agar siap digunakan pada algoritma ML. Filtering digunakan untuk mengurangi noise dengan metode seperti Kalman filter atau median filter, sehingga sinyal sensor lebih stabil dan representatif terhadap kondisi proses nyata. Selanjutnya, normalisasi dan standardisasi data memastikan skala variabel seragam, yang penting agar parameter dengan satuan berbeda (misal suhu dan displacement) tidak mendominasi proses training. *Feature extraction* menjadi langkah kritical berikutnya, di mana parameter penting seperti *molten pool width*, *temperature gradient*, dan *arc stability* dipilih sebagai input model. Parameter ini secara langsung berkaitan dengan kualitas las dan munculnya defect, sehingga kualitas fitur menentukan kemampuan prediksi model.

b. Training Model ML

Tahap berikutnya dalam implementasi *Machine Learning* (ML) untuk deteksi cacat las adalah training model. Pada pendekatan *supervised learning*, dataset yang sudah dilabeli dengan kategori defect dan non-defect digunakan untuk melatih model agar mampu mengenali pola yang menunjukkan adanya cacat. Algoritma yang umum digunakan antara lain *Random Forest*, *Support Vector Machine* (SVM), dan *Neural Networks*. Untuk data berbasis citra, seperti thermal imaging atau optical molten pool monitoring, *Convolutional Neural Networks* (CNN) sangat efektif karena kemampuannya mengekstraksi fitur spasial dan tekstural dari gambar, sehingga mendeteksi porositas, undercut, atau *bead irregularities* secara akurat (Sun *et al.*, 2020). Kunci dari *supervised learning* adalah kualitas labeling dan representasi dataset, karena model hanya akan belajar sesuai informasi yang diberikan.

Unsupervised learning memungkinkan deteksi anomaly tanpa membutuhkan label sebelumnya. Algoritma clustering atau autoencoder dapat mempelajari distribusi normal *molten pool* atau *bead morphology*, kemudian mendeteksi penyimpangan yang menandakan potensi defect. Pendekatan ini bermanfaat untuk kondisi proses baru atau material yang belum banyak data labeled-nya, sehingga model tetap dapat mengidentifikasi cacat secara real-time. Teknik ini juga membantu mengenali defect

yang jarang terjadi atau variasi proses ekstrem yang sulit dilabeli secara manual.

Hybrid learning menggabungkan keunggulan *supervised* dan *unsupervised learning*. *Data labeled* digunakan untuk prediksi defect utama, sementara deteksi *anomaly unsupervised* melengkapi model untuk mengenali pola baru atau outlier. Pendekatan hybrid ini meningkatkan akurasi dan robustness model, terutama dalam kondisi pengelasan adaptif yang variabel.

c. Validasi dan Testing

Tahap berikutnya adalah validasi dan testing untuk memastikan performa deteksi cacat las dapat diandalkan dalam kondisi nyata. Proses ini menggunakan dataset baru yang tidak digunakan selama training, sehingga model diuji kemampuannya untuk mengenali pola cacat pada data unseen. Evaluasi dilakukan menggunakan metrik standar seperti akurasi, *precision*, *recall*, dan F1-score. Akurasi menunjukkan sejauh mana prediksi model sesuai dengan label sebenarnya, sedangkan *precision* dan *recall* menilai kemampuan model meminimalkan *false-positive* dan *false-negative*, yang sangat penting dalam pengelasan industri karena kesalahan prediksi dapat berakibat pada kerusakan komponen atau biaya perbaikan yang tinggi.

Kriteria utama dalam validasi adalah kemampuan model mendeteksi cacat secara dini. Misalnya, model harus mampu mengenali porositas, undercut, atau spatter pada tahap awal molten pool formation, sebelum defect berkembang menjadi cacat kritis. Selain itu, model diuji untuk memastikan konsistensi prediksi pada variasi kondisi proses, termasuk material berbeda, variasi laser/arc power, dan travel speed yang bervariasi. Hal ini penting karena proses pengelasan adaptif menghadirkan dinamika yang tinggi, sehingga sistem deteksi harus robust terhadap perubahan kondisi real-time.

D. Sistem Inspeksi Otomatis

Pada pengelasan modern, terutama pada proses otomatis, robotik, dan *additive manufacturing*, kebutuhan akan inspeksi kualitas

secara cepat, akurat, dan konsisten semakin penting. Inspeksi manual tidak lagi memadai karena:

1. Kompleksitas geometri komponen.
2. Kebutuhan produksi dengan *high-volume* dan *high-value parts*.
3. Tekanan untuk mengurangi cacat dan biaya rework.

Sistem inspeksi otomatis (*Automated Inspection System/AIS*) memanfaatkan sensor, kamera, laser profilometer, ultrasonic, dan algoritma analitik canggih untuk mendeteksi cacat las secara real-time atau post-process. Sistem ini dapat digabungkan dengan *Machine Learning*, *computer vision*, dan *digital twin* untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi pengendalian mutu.

Automatic Inspection System (AIS) adalah teknologi yang dirancang untuk memantau kualitas pengelasan secara otomatis menggunakan sensor canggih dan sistem otomasi, tanpa memerlukan intervensi manusia secara langsung. Sistem ini mampu mendeteksi berbagai cacat las seperti porositas, retakan, lack of fusion, spatter, dan undercut, sehingga meminimalkan risiko kegagalan komponen yang dapat timbul akibat cacat tersembunyi. Selain itu, AIS juga memungkinkan pengukuran geometri bead, ketebalan lapisan, dan konsistensi sambungan secara presisi, memastikan bahwa hasil pengelasan memenuhi spesifikasi teknis dan standar kualitas yang ketat.

AIS tidak hanya berfungsi sebagai alat inspeksi pasif, tetapi juga mendukung proses adaptive welding melalui monitoring real-time. Data yang dikumpulkan dari sensor thermal, optical, dan *force/displacement* dapat diintegrasikan ke dalam sistem kontrol untuk menyesuaikan parameter las secara otomatis. Selanjutnya, informasi ini disimpan dalam *database quality control* untuk analisis tren, *predictive maintenance*, dan peningkatan proses berkelanjutan. Dengan demikian, AIS meningkatkan efisiensi produksi, konsistensi kualitas, serta mengurangi biaya perbaikan dan downtime akibat cacat las (Aminzadeh *et al.*, 2023).

Sistem inspeksi otomatis terdiri dari:

1. Sensor & Detektor → *thermal, optical, ultrasonic, eddy current*, dan *vision system*.
2. *Data Acquisition System* (DAQ) → menangkap dan mengkonversi sinyal sensor menjadi data digital.

3. Analitik & Algoritma → *Machine Learning, computer vision, dan digital twin* untuk identifikasi cacat.
4. *Actuator / Feedback System* → untuk *adaptive control* jika integrasi dengan proses las otomatis.

1. *Optical & Vision System*

Optical dan vision system menjadi komponen kunci dalam sistem inspeksi otomatis pengelasan, memanfaatkan kamera high-speed, laser profilometer, dan structured light untuk memantau kualitas sambungan secara real-time. Sistem ini mampu mengukur berbagai parameter kritikal seperti geometri molten pool, lebar dan tinggi bead, serta kualitas permukaan secara presisi. Dengan kemampuan ini, operator atau sistem kontrol otomatis dapat segera mengidentifikasi deviasi dari parameter ideal yang dapat memengaruhi kekuatan mekanik dan integritas sambungan (Cavaliere, 2021).

Vision system juga digunakan untuk deteksi cacat permukaan secara langsung. Beberapa cacat yang dapat dikenali antara lain spatter, undercut, dan porosity permukaan, yang biasanya menjadi indikator awal adanya masalah dalam proses pengelasan. Algoritma computer vision memproses citra dari kamera dan laser profilometer, melakukan segmentasi bead, dan membandingkan profil aktual dengan standar desain. Hal ini memungkinkan identifikasi cacat yang cepat, presisi, dan konsisten, jauh lebih efisien dibandingkan inspeksi manual.

2. *Thermal / Infrared Sensors*

Thermal atau infrared sensors berperan penting dalam sistem inspeksi otomatis pengelasan dengan kemampuan memonitor suhu molten pool dan *Heat-Affected Zone (HAZ)* secara real-time. Sensor ini menghasilkan data temperatur yang akurat, yang menjadi dasar untuk memahami distribusi panas selama proses pengelasan. Dengan informasi ini, operator maupun sistem kontrol adaptif dapat memprediksi pembentukan microstructure, *cooling rate*, dan potensi residual stress, sehingga kualitas sambungan dapat dijaga secara konsisten.

Thermal sensors juga berfungsi mendeteksi distribusi panas yang abnormal. Ketidakteraturan pada profil panas sering menjadi indikasi awal terjadinya cacat seperti *lack of fusion, undercut*, atau *hot*

cracking. Dengan deteksi dini ini, sistem dapat memberikan feedback untuk menyesuaikan parameter pengelasan, misalnya mengubah *laser power*, *travel speed*, atau *feed rate* pada layer yang sama. Hal ini memungkinkan proses welding menjadi lebih adaptif, mengurangi risiko cacat dan meningkatkan keandalan sambungan.

3. Ultrasonic / Acoustic Sensors

Ultrasonic dan *acoustic sensors* merupakan teknologi penting dalam sistem inspeksi otomatis pengelasan, terutama untuk mendeteksi cacat internal yang tidak terlihat secara visual. Berbeda dengan sensor optik atau thermal, ultrasonic sensors bekerja dengan mengirimkan gelombang suara frekuensi tinggi ke dalam material. Gelombang ini akan dipantulkan atau diubah arahnya ketika menemui perbedaan densitas, porosity, retakan, atau delaminasi. Analisis pola pantulan gelombang memungkinkan identifikasi lokasi, ukuran, dan sifat cacat secara akurat tanpa merusak material, sehingga cocok untuk aplikasi *non-destructive testing*.

Teknologi ini sangat efektif pada pengelasan komponen tebal atau struktur multi-layer, di mana cacat subsurface seperti porosity atau *lack of fusion* bisa terjadi akibat *heat accumulation* atau layer deposition yang tidak seragam. *Transducer ultrasonic* ditempatkan pada permukaan material, dan sinyal pantulnya dianalisis secara real-time menggunakan algoritma *digital signal processing*. Data ini dapat memberikan informasi penting untuk menilai integritas sambungan dan prediksi performa mekanik di kemudian hari.

4. Electrical & Arc Sensors

Electrical dan *arc sensors* berperan krusial dalam sistem inspeksi otomatis untuk proses pengelasan, khususnya pada teknik arc welding seperti MIG, TIG, atau plasma arc. Sensor ini memantau parameter listrik utama, yaitu arus (*current*), tegangan (*voltage*), dan daya (*power*), yang mencerminkan kondisi stabilitas busur listrik (*arc*). Fluktuasi pada parameter ini dapat menjadi indikator adanya masalah dalam proses, seperti *short circuit*, *arc instability*, atau penetrasi sambungan yang tidak memadai. Dengan pemantauan real-time, operator atau sistem kontrol adaptif dapat segera menyesuaikan parameter pengelasan untuk menjaga kualitas sambungan.

Ketidakstabilan busur listrik sering muncul akibat perubahan gap pada joint, variasi material, atau pergeseran torch. Misalnya, arus yang menurun secara tiba-tiba dapat mengindikasikan terjadinya partial contact atau spatter, sementara tegangan yang tidak stabil bisa menandakan arc blow atau deformasi permukaan material. Sensor listrik dan arc ini menyediakan data yang dapat dianalisis menggunakan algoritma statistik, *Machine Learning*, atau AI untuk mendeteksi pola abnormal dan memprediksi potensi cacat sebelum terjadi, sehingga mengurangi risiko defect seperti *undercut*, *porosity*, atau *lack of fusion*.

5. Eddy Current & Electromagnetic Sensors

Eddy current dan *electromagnetic sensors* merupakan teknologi inspeksi non-destruktif yang efektif untuk mendeteksi cacat pada permukaan dan area dekat permukaan material konduktif. Sensor ini bekerja dengan menghasilkan medan elektromagnetik yang menginduksi arus eddy pada logam. Perubahan arus ini, akibat adanya cacat seperti retakan, porosity, atau inklusi, direkam dan dianalisis untuk mengidentifikasi lokasi dan ukuran defect. Keunggulan utama metode ini adalah sensitivitas tinggi terhadap cacat mikro pada lapisan tipis dan *near-surface*, sehingga sangat berguna pada pengelasan presisi atau lapisan tipis overlay metal.

Keuntungan lain dari teknologi *eddy current* adalah sifatnya yang non-contact, sehingga tidak memerlukan kontak langsung dengan permukaan material. Hal ini memungkinkan integrasi mudah dengan *Robot welding* atau sistem otomatis lain dalam lini produksi. Dengan deteksi real-time, sensor *eddy current* dapat memberikan informasi segera kepada sistem kontrol untuk penyesuaian parameter pengelasan, misalnya mengurangi heat input atau menyesuaikan travel speed untuk mencegah terbentuknya cacat baru. Metode ini sangat bermanfaat pada pengelasan material sensitif seperti superalloy, stainless steel, atau lapisan logam tipis pada komponen aerospace.



BAB IX

DESAIN DAN SIMULASI

PROSES PENGELASAN

Desain dan simulasi proses pengelasan merupakan aspek penting dalam pengelasan modern, karena kualitas sambungan sangat dipengaruhi oleh geometri sambungan, distribusi panas, dan interaksi material. Pendekatan tradisional dengan trial-and-error tidak lagi efisien, terutama pada komponen kompleks atau material maju. Oleh karena itu, penggunaan perangkat lunak simulasi seperti ANSYS, SYSWELD, dan Comsol Multiphysics memungkinkan insinyur merancang sambungan yang optimal, memprediksi distorsi, tegangan sisa, dan perilaku termomekanik material sebelum pengelasan fisik dilakukan.

Simulasi proses pengelasan memungkinkan perhitungan tegangan, deformasi, dan distribusi panas secara akurat, sehingga meminimalkan risiko cacat sambungan dan distorsi komponen. Model numerik ini juga dapat digunakan untuk mengoptimalkan parameter proses seperti arus, kecepatan torak, dan pola pengelasan, serta memprediksi efek pemanasan berulang pada struktur mikro. Pendekatan ini sangat relevan untuk pengelasan material sensitif seperti titanium, aluminium, superalloy, dan komposit, di mana pengendalian mikrostruktur dan residual stress menjadi kunci kekuatan sambungan.

A. Perangkat Lunak Simulasi Pengelasan (ANSYS, SYSWELD)

Perkembangan teknologi pengelasan modern, termasuk pengelasan berbasis energi tinggi, robotik, dan *additive manufacturing*, menuntut desain proses yang optimal, efisien, dan bebas cacat. Proses pengelasan melibatkan fenomena fisika kompleks seperti transfer

panas, perubahan fase, residual stress, dan deformasi termomekanik, yang sulit dianalisis secara eksperimen murni (Lippold, 2014). Untuk itu, simulasi numerik berbasis komputer menjadi alat penting bagi engineer untuk:

1. Memahami distribusi suhu dan *Heat-Affected Zone* (HAZ).
2. Prediksi tegangan sisa dan distorsi.
3. Optimasi parameter las (*power, travel speed, preheating*).
4. Reduksi *trial-and-error* pada prototyping fisik.

Beberapa perangkat lunak populer yang banyak digunakan dalam simulasi pengelasan adalah ANSYS dan SYSWELD, yang menyediakan *finite element analysis* (FEA) dan modul khusus untuk welding simulation.

1. ANSYS untuk Simulasi Pengelasan

ANSYS merupakan platform simulasi multiphysics yang banyak digunakan dalam analisis rekayasa, termasuk pengelasan modern. Perangkat lunak ini memungkinkan insinyur untuk melakukan simulasi termomekanik, analisis struktur, dan aliran fluida secara terintegrasi. Dengan modul ANSYS Mechanical, pengguna dapat mengevaluasi distribusi tegangan, deformasi, dan respons termal selama proses pengelasan. Hal ini sangat penting untuk memprediksi potensi distorsi, residual stress, dan kemungkinan terjadinya *cracking* pada komponen logam yang dilas. Selain itu, ANSYS Workbench menyediakan integrasi CAD yang memudahkan alur kerja dari desain hingga analisis FEA (*Finite Element Analysis*) dan post-processing, sehingga simulasi dapat dilakukan dengan lebih efisien dan akurat.

Platform ini sangat cocok untuk berbagai jenis proses pengelasan, termasuk *laser welding, arc welding*, dan pengelasan multi-pass. Dengan kemampuan memodelkan interaksi antara panas, deformasi, dan *material properties*, ANSYS memungkinkan prediksi perilaku mikrostruktur dan mechanical properties secara realistis. Simulasi ini mendukung pengambilan keputusan dalam optimasi parameter pengelasan, seperti *heat input, travel speed*, dan *layer deposition*, sehingga kualitas sambungan dan integritas komponen dapat ditingkatkan.

a. Geometri dan Mesh Generation

Langkah awal dalam modeling proses pengelasan menggunakan ANSYS adalah pembuatan geometri komponen yang akurat.

Model CAD dari part yang akan dilas dibuat dengan mempertimbangkan semua fitur kritis, termasuk joint interface, weld bead, dan area yang rentan terhadap deformasi atau stress tinggi. Akurasi geometri ini penting untuk memastikan simulasi mencerminkan kondisi nyata, sehingga prediksi distribusi panas, deformasi, dan tegangan residual dapat dilakukan secara realistis. Selain itu, pemodelan yang tepat memungkinkan integrasi dengan modul termomekanik ANSYS untuk analisis lebih lanjut, seperti prediksi microstructure evolution dan pergerakan molten pool.

Tahap berikutnya adalah mesh generation. Mesh diatur sedemikian rupa sehingga area dengan gradien termal tinggi seperti HAZ, weld toe, dan *bead center* memiliki elemen mesh yang lebih halus untuk menangkap perubahan temperatur dan tegangan dengan presisi tinggi. Sementara area yang kurang kritis dapat menggunakan mesh lebih kasar untuk mengurangi waktu komputasi.

b. Material Properties

Pada simulasi pengelasan menggunakan ANSYS, pemilihan dan definisi material properties menjadi tahap krusial karena sifat material sangat dipengaruhi oleh temperatur tinggi selama proses pengelasan. Parameter seperti *thermal conductivity*, *specific heat*, Young's modulus, dan koefisien ekspansi termal tidak bersifat konstan tetapi berubah sesuai temperatur. ANSYS memungkinkan input *temperatur-dependent material properties*, sehingga distribusi panas, deformasi termal, dan residual stress dapat diprediksi secara realistis. Misalnya, konduktivitas termal yang menurun pada temperatur tinggi akan mempengaruhi penetrasi panas dan ukuran molten pool, sedangkan perubahan modulus elastis dapat memengaruhi deformasi HAZ dan tegangan residual.

ANSYS juga mendukung material yang sensitif terhadap fase-transform, seperti *steel*, *aluminum alloys*, dan superalloy. Dengan *user-defined material models*, pengguna dapat mendefinisikan transformasi fase, misalnya austenite \leftrightarrow martensite pada baja atau $\gamma \rightarrow \gamma'$ pada superalloy Ni-based. Hal ini memungkinkan simulasi tidak hanya memperhitungkan

distribusi temperatur, tetapi juga evolusi mikrostruktur dan sifat mekanik lokal setelah pendinginan.

c. *Boundary Conditions & Heat Source*

Pada simulasi pengelasan di ANSYS, definisi *boundary conditions* dan *heat source* merupakan tahap penting untuk merepresentasikan proses fisik secara akurat. *Heat source* biasanya dimodelkan dengan distribusi Gaussian untuk mensimulasikan intensitas energi yang bervariasi di sepanjang area molten pool. Posisi *heat source* bergerak mengikuti jalur las yang ditentukan, baik untuk *single-pass* maupun *multi-pass welding*, sehingga prediksi temperatur, penetrasi, dan distribusi panas dapat mendekati kondisi nyata. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi efek *thermal gradient* pada HAZ, deformasi termal, dan potensial terjadinya *residual stress*.

Boundary conditions juga kritikal, meliputi *convective* dan *radiative heat loss* ke lingkungan sekitar. Konveksi mewakili transfer panas ke udara atau pendingin, sedangkan radiasi menggambarkan kehilangan energi melalui pancaran inframerah dari permukaan material. Penentuan *boundary* ini mempengaruhi distribusi temperatur, *cooling rate*, dan akhirnya evolusi mikrostruktur material.

d. *Solver & Simulation*

Pada ANSYS, tahap solver dan simulasi menjadi kunci untuk memperoleh prediksi yang akurat terkait proses pengelasan. Analisis thermal transient digunakan untuk memodelkan distribusi temperatur molten pool dan *Heat-Affected Zone* (HAZ) seiring waktu. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi *cooling rate*, gradien temperatur, dan durasi pemanasan material, yang sangat penting untuk memahami evolusi mikrostruktur serta kemungkinan terbentuknya residual stress atau deformasi termal

Simulasi coupled thermal-structural memungkinkan integrasi efek termal dengan respons mekanik material. Dengan cara ini, deformasi, distorsi, dan tegangan sisa akibat pemanasan dan pendinginan dapat diprediksi secara realistis. Adaptive mesh refinement diterapkan pada area kritis seperti HAZ, joint interface, dan weld bead, sehingga akurasi hasil meningkat tanpa meningkatkan waktu komputasi secara signifikan.

e. *ANSYS Post-Processing*

Post-processing dalam ANSYS merupakan tahap penting untuk menganalisis hasil simulasi pengelasan dan mengevaluasi kualitas sambungan. Pada tahap ini, distribusi suhu, *Heat-Affected Zone* (HAZ), dan molten pool divisualisasikan secara detail, sehingga engineer dapat menilai gradien panas dan potensi perubahan mikrostruktur. Kontur tegangan sisa, defleksi, dan distorsi juga dianalisis untuk memprediksi area yang rawan deformasi atau retak akibat thermal cycling. Visualisasi ini membantu memahami interaksi antara input energi, geometri komponen, dan respons material secara menyeluruh.

Post-processing memungkinkan analisis sensitivitas terhadap parameter pengelasan seperti *laser/arc power*, *travel speed*, dan *preheat temperature*. Dengan membandingkan berbagai skenario, engineer dapat menentukan kombinasi parameter optimal yang meminimalkan residual stress dan distorsi sambil mempertahankan penetrasi molten pool yang memadai.

2. SYSWELD untuk Simulasi Pengelasan

SYSWELD adalah perangkat lunak berbasis FEA (*Finite Element Analysis*) yang dirancang khusus untuk simulasi proses pengelasan dan perlakuan panas. Software ini memungkinkan analisis termal, transformasi fase metalurgi, serta prediksi residual stress dan distorsi pada komponen las. SYSWELD mendukung berbagai jenis pengelasan, termasuk *arc welding*, *laser welding*, dan *resistance welding*, serta pengelasan multi-pass dan material dissimilar. Dengan kemampuan ini, engineer dapat memodelkan proses pengelasan secara realistis, termasuk efek panas berlapis-lapis dan interaksi antara logam berbeda pada sambungan kompleks.

SYSWELD juga memiliki modul khusus untuk *additive manufacturing*, memungkinkan simulasi *layer-by-layer deposition* dan prediksi *microstructure* pada material canggih. Analisis termal membantu memahami distribusi panas dan HAZ, sementara modul transformasi fase memprediksi perubahan mikrostruktur akibat heating dan cooling. Prediksi residual stress dan distorsi mendukung perencanaan *post-weld treatment* serta strategi pengelasan adaptif,

sehingga kualitas sambungan dapat dioptimalkan sebelum proses fisik dilakukan (Herzog *et al.*, 2016).

Fitur kunci SYSWELD sebagai berikut:

a. Material Database

Fitur kunci SYSWELD mencakup database material yang komprehensif, meliputi berbagai logam seperti steel, aluminum, titanium, dan nickel-based alloys. Database ini menyimpan sifat material yang bergantung pada temperatur, termasuk properti termal seperti konduktivitas dan kapasitas panas, properti mekanik seperti modulus elastisitas dan *yield strength*, serta parameter metalurgi yang berkaitan dengan transformasi fase. Dengan material database ini, pengguna dapat memodelkan respons komponen terhadap proses pengelasan secara realistis, memperkirakan evolusi microstructure, distribusi panas, dan potensi residual stress, sehingga simulasi mendekati kondisi nyata pada proses arc, laser, maupun *resistance welding*.

b. Heat Source Modeling

Fitur penting lainnya dalam SYSWELD adalah kemampuan *modeling heat source* yang canggih. Sistem ini mendukung simulasi *moving heat source* dengan distribusi energi berbentuk Gaussian, double-ellipsoidal, maupun *user-defined* sesuai kebutuhan spesifik proses pengelasan. Dengan fleksibilitas ini, SYSWELD dapat memodelkan berbagai metode pengelasan seperti *arc welding*, *laser welding*, dan *electron beam welding*, termasuk jalur pengelasan multi-pass. Pendekatan ini memungkinkan prediksi yang akurat terhadap distribusi panas, geometri molten pool, dan efek termal pada material, sehingga simulasi dapat digunakan untuk optimasi parameter pengelasan dan pengendalian kualitas weld secara efektif.

c. Phase Transformation Modeling

SYSWELD menawarkan kemampuan modeling transformasi fase yang sangat penting untuk prediksi *microstructure material* selama dan setelah pengelasan. Perangkat lunak ini dapat mensimulasikan kinetika fase seperti martensit (MART), ferrit (FERR), dan austenit (AUST), serta peralihan antar fase yang bergantung pada profil temperatur. Dengan memodelkan kinetika fase ini, SYSWELD mampu memprediksi perubahan microstructure secara akurat, yang secara langsung

memengaruhi sifat mekanik seperti kekerasan, kekuatan, dan keuletan pada area pengaruh panas (HAZ) maupun weld metal.

d. *Coupled Thermal-Mechanical Analysis*

SYSWELD menyediakan fitur analisis termal-mekanik terpadu (*coupled thermal-mechanical analysis*) yang menggabungkan simulasi transient thermal dengan analisis struktural berbasis FEA. Dengan pendekatan ini, perangkat lunak mampu memprediksi distribusi tegangan sisa (*residual stress*), distorsi geometri, dan distribusi regangan (*strain*) pada komponen yang dilas secara akurat. Analisis ini sangat penting untuk memahami efek akumulasi panas selama pengelasan, terutama pada sambungan multi-pass atau material dissimilar. Hasil simulasi memungkinkan insinyur untuk menyesuaikan parameter pengelasan seperti heat input, travel speed, dan strategi pendinginan guna meminimalkan deformasi dan menjaga integritas mekanik komponen.

e. *Post-Processing & Visualization*

Fitur *post-processing* dan visualisasi pada SYSWELD memungkinkan pengguna untuk melihat distribusi temperatur, zona terpengaruh panas (HAZ), serta tegangan sisa secara kontur, sehingga memudahkan analisis efek panas selama pengelasan. Selain itu, geometri bead las dan overlay multi-pass dapat dianalisis secara detail untuk mengevaluasi penetrasi, konsistensi lapisan, dan potensi cacat. Visualisasi ini mendukung pengambilan keputusan dalam optimasi parameter pengelasan, seperti penyesuaian *laser/arc power*, *travel speed*, dan strategi lapisan, guna meminimalkan distorsi, residual stress, serta memastikan kualitas sambungan yang lebih baik, khususnya pada material kompleks atau komponen *high-value*.

3. Perbandingan ANSYS dan SYSWELD

Aspek	ANSYS	SYSWELD
Fokus	Multiphysics general purpose	Welding & heat treatment khusus
Heat Source	Gaussian, user-defined	Gaussian, double-ellipsoidal, arc, laser
Material Phase	Terbatas, user-	Built-in phase

Modeling	defined	transformation kinetics
Multi-pass Welding	Bisa, memerlukan scripting	Native support multi-pass
Residual Stress & Distortion	Ya, FEA coupled	Ya, fokus pada welding & HAZ
Industry Use	Aerospace, automotive, general FEA	Welding-intensive industries, AM, steel, aerospace

B. Analisis Tegangan, Distorsi dan Deformasi

Pengelasan merupakan proses yang menyebabkan distribusi panas lokal tinggi pada material, sehingga menimbulkan fenomena thermal expansion, phase transformation, residual stress, dan deformasi. Tegangan sisa (*residual stress*), distorsi, dan deformasi adalah faktor kritis yang memengaruhi integritas struktural, kekuatan fatigue, dan akurasi dimensi komponen (DebRoy *et al.*, 2018). Analisis numerik dan simulasi FEA (*Finite Element Analysis*) telah menjadi metode utama untuk:

1. Memahami mekanisme pembentukan tegangan sisa dan deformasi.
2. Merancang strategi welding dan fixturing untuk minimisasi distorsi.
3. Prediksi perilaku komponen selama dan setelah pengelasan.

Perangkat lunak seperti ANSYS, SYSWELD, ABAQUS, dan *Simufact Welding* memungkinkan engineer melakukan thermal-mechanical coupled simulation dan memvisualisasi distribusi tegangan serta distorsi untuk optimasi proses.

1. Tegangan Sisa (*Residual Stress*) dalam Pengelasan

Residual stress adalah tegangan internal yang tetap ada setelah proses pengelasan selesai tanpa adanya beban eksternal. Disebabkan oleh perbedaan thermal expansion dan contraction selama pemanasan dan pendinginan. Residual stress dibagi menjadi:

1. Tegangan tarik (*tensile*) → berisiko crack dan fatigue.

2. Tegangan tekan (*compressive*) → dapat meningkatkan resistance terhadap crack pada beberapa material (Siefert & Palmer, 2016).

Faktor penyebab tegangan sisa meliputi:

1. *Heat input* → *arc power*, *travel speed*, dan *energy density*.
2. *Joint configuration* → butt, lap, T-joint.
3. *Material properties* → *thermal conductivity*, CTE, *phase transformation kinetics*.
4. *Fixturing & restraint* → pengaruh *clamp* dan *boundary conditions*.
5. *Multi-pass welding* → akumulasi tegangan sisa antar lapisan.

Prediksi tegangan sisa dalam proses pengelasan dapat dilakukan melalui simulasi berbasis *finite element analysis* (FEA) yang menggabungkan analisis termal dan mekanik secara coupled. Input utama meliputi karakteristik sumber panas, sifat material yang tergantung temperatur, dan kondisi batas seperti konveksi, radiasi, atau restriksi mekanik. Simulasi ini memungkinkan perhitungan distribusi temperatur molten pool, *cooling rate*, serta evolusi mikrostruktur, yang secara langsung memengaruhi pembentukan tegangan sisa sepanjang sambungan las dan material dasar. Dengan menggunakan metode ini, engineer dapat mengevaluasi risiko *cracking*, distorsi, atau deformasi sebelum proses pengelasan sebenarnya dilakukan, sehingga mengurangi *trial-and-error* pada produksi komponen kritis.

Sebagai contoh, simulasi ANSYS atau SYSWELD pada pelat titanium alloy yang dilas dengan laser menunjukkan bahwa tegangan tarik maksimum muncul di pusat bead las, sedangkan area HAZ mengalami tegangan tekan yang lebih tinggi. Hasil ini sesuai dengan fenomena fisik akibat ekspansi termal lokal dan pendinginan tidak merata. Informasi prediksi tegangan sisa ini penting untuk menentukan strategi preheating, penyesuaian travel speed, atau *inter-pass cooling* guna meminimalkan distorsi dan meningkatkan integritas struktural komponen, terutama pada material *high-value* atau geometris kompleks.

2. Distorsi dan Deformasi

Distorsi (*distortion*) adalah perubahan bentuk komponen akibat *thermal expansion* dan *contraction*. Jenis distorsi:

- a. *Angular distortion* → sudut joint berubah.
- b. *Longitudinal shrinkage* → pemendekan sepanjang arah weld.

- c. *Transverse shrinkage* → pemendekan lateral akibat penarikan material.
- d. *Buckling & warping* → pada plate tipis dengan heat input tinggi.

Sementara itu, faktor-faktor yang mempengaruhi distorsi berupa:

- 1) *Material thickness* → tipis lebih sensitif terhadap distorsi.
- 2) *Welding sequence* → *multi-pass sequence* mempengaruhi akumulasi distorsi.
- 3) *Fixture* dan *restraint* → *clamping* dapat mengontrol deformasi lokal.
- 4) *Heat input & travel speed* → *high energy* → HAZ luas → distorsi besar.

Prediksi distorsi pada proses pengelasan dapat dilakukan menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA), yang memungkinkan simulasi deformasi komponen akibat beban termal. Analisis ini memperhitungkan distribusi temperatur selama pengelasan, sifat material yang bergantung pada temperatur, dan kondisi batas mekanik. Dengan simulasi FEA, engineer dapat mengidentifikasi area rawan distorsi, defleksi, atau warp sebelum proses nyata dilakukan, sehingga dapat merencanakan strategi kompensasi atau penguatan struktur. Pendekatan ini sangat penting untuk komponen presisi tinggi atau geometris kompleks, di mana distorsi sekecil apa pun dapat mengganggu fungsionalitas atau assembly.

Untuk meningkatkan akurasi prediksi, model thermo-elasto-plastic digunakan agar efek plastisitas akibat pemanasan lokal diperhitungkan secara realistis. Selain itu, simulasi multi-pass atau layer-by-layer memungkinkan evaluasi deformasi pada setiap pass pengelasan, mencerminkan proses nyata pada sambungan multi-pass. Pendekatan ini membantu menentukan parameter pengelasan optimal, seperti travel speed, inter-pass cooling, dan urutan pengelasan, sehingga distorsi dapat diminimalkan dan integritas struktural komponen tetap terjaga.

3. Modeling dan Simulasi Tegangan & Distorsi

a. Heat Source Modeling

Modeling sumber panas (*heat source*) merupakan elemen kunci dalam simulasi pengelasan karena menentukan distribusi energi ke dalam material, yang secara langsung memengaruhi

pembentukan molten pool, gradien termal, serta tegangan sisa yang muncul setelah proses pendinginan. Model heat source seperti Gaussian, double-ellipsoidal, dan moving arc/laser digunakan untuk merepresentasikan karakteristik proses pengelasan yang berbeda. Model Gaussian biasanya diterapkan pada proses laser welding karena distribusi energinya sangat terfokus, sedangkan model double-ellipsoidal (Goldak model) lebih sesuai untuk arc welding karena mampu menggambarkan distribusi panas yang lebih menyebar pada bagian depan dan belakang molten pool. Pemilihan model yang tepat meningkatkan ketelitian prediksi temperatur dan perilaku termal selama pengelasan.

Distribusi panas dari heat source juga menentukan seberapa besar gradien termal terbentuk pada material, yang kemudian memengaruhi timbulnya tegangan residual dan distorsi. Gradien termal yang tajam menghasilkan ekspansi cepat pada area las dan kontraksi kuat saat pendinginan, menciptakan zona dengan konsentrasi tegangan tinggi. Oleh karena itu, modeling heat source yang tepat memungkinkan rekonstruksi fenomena fisik yang realistis, sehingga prediksi distorsi dan tegangan sisa dapat mendekati kondisi sebenarnya.

b. Material Model

Material model dalam simulasi tegangan dan distorsi pengelasan harus menggambarkan sifat termal dan mekanik yang berubah terhadap temperatur. Parameter seperti *thermal conductivity*, *specific heat*, dan *coefficient of thermal expansion* (CTE) sangat memengaruhi bagaimana panas mengalir dan bagaimana material berdeformasi selama siklus pemanasan-pendinginan. Selain itu, Young's modulus dan yield strength yang menurun pada temperatur tinggi berperan penting dalam memprediksi perilaku plastis dan deformasi lokal pada daerah las. Dengan memasukkan material properties yang temperature-dependent, simulasi mampu memetakan perubahan perilaku material secara lebih realistis, termasuk respon elastis-plastis pada HAZ dan bead.

Banyak material khususnya baja mengalami transformasi fasa selama pengelasan, misalnya dari austenite ke martensite atau ferrite. Transformasi fasa ini menyebabkan perubahan volume

yang signifikan, sehingga menambah sumber tegangan internal selain gradien termal. Jika model material tidak menangkap kinetika transisi fasa dan perubahan volumetriknya, prediksi tegangan residu dapat menjadi tidak akurat.

c. *Boundary Conditions* dan *Fixturing*

Boundary conditions dan *fixturing* merupakan elemen penting dalam simulasi tegangan dan distorsi karena menentukan bagaimana benda kerja dibatasi pergerakannya selama proses pengelasan. Penggunaan clamp, support, atau jig harus dimodelkan sesuai kondisi nyata di lapangan, misalnya dengan mendefinisikan constraint translasi atau rotasi pada titik-titik tertentu. Pembatasan ini memengaruhi distribusi tegangan internal, karena material yang dipanaskan dan memuai akan berinteraksi dengan batas mekanik yang menghambat deformasinya. Dengan demikian, memasukkan kondisi boundary yang tepat seperti *fixed support*, *frictional contact*, atau *elastic restraint* menjadi kunci untuk memprediksi distorsi secara realistis.

Urutan pengelasan (*weld sequence*) juga menjadi bagian dari *boundary condition* yang memengaruhi hasil simulasi. Setiap pass atau bead memberikan beban termal lokal yang menyebabkan ekspansi dan kontraksi, sehingga pola pengerjaan yang berbeda dapat menghasilkan distorsi yang berbeda pula. Simulasi yang mempertimbangkan urutan pengelasan secara akurat misalnya pass kiri dahulu, kanan kemudian, atau teknik back-step akan menghasilkan prediksi distorsi yang mendekati kondisi sebenarnya.

d. *Solver* dan *Time-Stepping*

Solver dan *time-stepping* memiliki peran penting dalam memastikan akurasi simulasi tegangan dan distorsi pada proses pengelasan. Pada tahap awal, solver transient thermal digunakan untuk menghitung penyebaran panas (*heat diffusion*), evolusi molten pool, dan perubahan temperatur secara dinamis selama *heat source* bergerak. Karena proses pengelasan melibatkan gradien panas yang tajam dan perubahan temperatur yang sangat cepat, pendekatan transient menjadi wajib agar fenomena seperti pembentukan HAZ, pemanasan lokal, dan pendinginan

dapat dimodelkan secara realistis. Hasil temperatur dari solver thermal kemudian menjadi input bagi solver struktural.

Solver coupled structural menghitung respons elasto-plastik material akibat siklus pemanasan dan pendinginan. Respons plastis yang terjadi selama pemuatan dan penyusutan inilah yang menghasilkan tegangan sisa dan distorsi permanen. Untuk menjaga efisiensi komputasi, adaptive time-stepping diterapkan. Metode ini secara otomatis memperkecil ukuran langkah waktu ketika terjadi perubahan temperatur sangat cepat misalnya saat *heat source* berada tepat di atas suatu titik dan memperbesar langkah waktu ketika perubahan sudah stabil.

e. *Post-Processing*

Post-processing merupakan tahap penting dalam analisis tegangan dan distorsi karena memberikan visualisasi komprehensif terhadap hasil simulasi. Salah satu output utama adalah kontur tegangan residual, yang menampilkan distribusi daerah tensile dan compressive di sepanjang weld bead, HAZ, dan base metal. Kontur ini membantu insinyur memahami mekanisme penyusutan termal dan lokasi potensi kegagalan struktural. Selain itu, simulasi juga menghasilkan plot deformasi dan distorsi, yang menggambarkan bentuk akhir komponen setelah proses pengelasan. Visualisasi seperti angular distortion, longitudinal shrinkage, maupun warping sangat penting untuk mengevaluasi apakah dimensi akhir komponen masih sesuai toleransi desain.

Tahap *post-processing* juga mencakup sensitivity analysis, yaitu analisis pengaruh perubahan parameter pengelasan terhadap tegangan sisa dan distorsi. Parameter seperti *heat input*, *travel speed*, *preheat temperature*, dan *weld sequence* dapat divariasikan untuk mengidentifikasi konfigurasi optimal yang meminimalkan distorsi tanpa mengorbankan kekuatan sambungan. Dengan memanfaatkan analisis sensitivitas, insinyur dapat menentukan process window terbaik, melakukan optimasi desain fixturing, serta memprediksi konsekuensi setiap modifikasi parameter sebelum penerapan di lapangan. Hasil ini menjadikan *post-processing* bukan sekadar evaluasi, tetapi juga alat strategis untuk *decision-making* dalam proses pengelasan.

4. Strategi Minimasi Tegangan dan Distorsi

a. Optimasi Welding Sequence

Optimasi urutan pengelasan (*welding sequence*) merupakan strategi kunci untuk meminimalkan tegangan residual dan distorsi pada komponen welded. Dengan menerapkan *symmetrical sequence*, panas diaplikasikan secara simetris sehingga distribusi thermal lebih merata, mengurangi gradient temperatur ekstrem yang menjadi penyebab utama deformasi. Teknik lain seperti *back-step welding* melibatkan pengelasan dalam arah berlawanan atau langkah-langkah kecil untuk menyeimbangkan kontraksi termal, sehingga *shrinkage* dan *angular distortion* dapat diminimalkan. Selain itu, *skip welding* diterapkan dengan cara melewati beberapa area untuk kemudian kembali mengisi gap, sehingga *heat accumulation* lokal dapat dikontrol dan mengurangi konsentrasi tegangan residual di satu titik.

Penerapan optimasi *welding sequence* tidak hanya berdampak pada pengurangan distorsi, tetapi juga meningkatkan integritas mikrostruktur dan kualitas sambungan. Distribusi panas yang lebih merata mencegah terjadinya *hot spot* yang dapat menimbulkan *cracking* atau deformasi tidak diinginkan. Strategi ini terutama penting pada komponen besar atau *multi-pass welding*, seperti pada *pressure vessel*, *aerospace structures*, dan *shipbuilding*, di mana toleransi dimensi sangat ketat.

b. Preheating dan Inter-pass Temperature

Preheating dan pengendalian *inter-pass temperature* merupakan strategi penting untuk mengurangi tegangan residual dan distorsi pada proses pengelasan. Dengan memanaskan material sebelum pengelasan (*preheating*), perbedaan temperatur antara area las dan base material dapat diminimalkan, sehingga *thermal gradient* lebih rendah. Hal ini mengurangi laju pendinginan lokal yang ekstrem, menekan terbentuknya *tensile residual stress*, dan mengurangi risiko retak atau deformasi akibat kontraksi termal yang tidak merata. *Preheating* juga membantu mencegah fenomena *cold cracking* pada material *high-strength* atau *low-alloy steels* yang sensitif terhadap pendinginan cepat.

Pengendalian *inter-pass temperature* pada multi-pass welding memastikan bahwa setiap lapisan tidak diterapkan pada suhu yang terlalu rendah atau tinggi. Temperatur antar lapisan yang konsisten memungkinkan distribusi panas yang lebih homogen dan menjaga mikrostruktur tetap stabil. Dengan demikian, residual stress dapat diminimalkan dan distorsi angular maupun longitudinal dapat dikontrol.

c. *Fixturing* dan *Clamping*

Fixturing dan *clamping* berperan krusial dalam mengendalikan distorsi dan tegangan residual selama proses pengelasan. Penempatan clamp yang strategis dapat menahan deformasi lokal yang terjadi akibat ekspansi termal dan kontraksi saat pendinginan. Dengan menahan bagian-bagian tertentu, tegangan yang muncul akibat perbedaan laju pendinginan antar area dapat didistribusikan lebih merata, sehingga mengurangi konsentrasi stress yang bisa memicu retak atau warping. Posisi dan jumlah clamp harus direncanakan berdasarkan geometri komponen, jenis material, dan urutan pengelasan agar efektivitasnya maksimal.

Fixturing yang baik memungkinkan pengelasan dilakukan dengan posisi optimal, meminimalkan jarak percikan dan memastikan penetrasi seragam. Kombinasi *fixturing* dan teknik *welding sequence* yang tepat juga mendukung kontrol deformasi secara keseluruhan, sehingga komponen akhir memiliki toleransi dimensi yang sesuai.

d. *Controlled Heat Input*

Controlled heat input merupakan strategi penting dalam meminimalkan tegangan residual dan distorsi pada proses pengelasan. Dengan mengatur *travel speed*, *arc/lase power*, dan *filler feed rate* secara optimal, energi yang masuk ke material dapat dikendalikan sehingga mengurangi overheating dan thermal gradient yang tajam. Thermal gradient yang tinggi cenderung menimbulkan tegangan tarik berlebih pada area pendinginan cepat, yang dapat memicu retak atau warping. Sebaliknya, energi yang terlalu rendah dapat menyebabkan *lack of fusion* atau *porosity*, sehingga kualitas sambungan juga terpengaruh.

Pengaturan heat input juga mendukung homogenisasi mikrostruktur di HAZ, menjaga distribusi grain dan fasa agar tetap stabil. Kombinasi dengan teknik *adaptive welding* dan sensor monitoring memungkinkan penyesuaian parameter secara real-time sesuai respon material, seperti perubahan konduktivitas termal atau ekspansi termal.

e. *Post-Weld Heat Treatment* (PWHT)

Post-Weld Heat Treatment (PWHT) merupakan strategi efektif untuk mengurangi tegangan residual dan meningkatkan stabilitas dimensi komponen setelah pengelasan. Proses ini melibatkan pemanasan material hingga temperatur tertentu di bawah titik leleh, diikuti dengan pendinginan terkontrol. Pemanasan ini memungkinkan redistribusi tegangan internal akibat thermal gradient dan kontraksi lokal selama pengelasan, sehingga mengurangi konsentrasi tegangan tarik yang dapat menyebabkan retak atau deformasi. PWHT juga membantu homogenisasi mikrostruktur di *Heat-Affected Zone* (HAZ), memperbaiki sifat mekanik seperti kekuatan dan keuletan, serta menstabilkan fasa yang sensitif terhadap panas.

PWHT sangat bermanfaat pada material dengan kecenderungan tinggi terhadap residual stress, seperti baja tahan karat, superalloy Ni-based, dan titanium alloy. Kombinasi optimal antara proses pengelasan yang dikontrol secara presisi dan PWHT memungkinkan peningkatan performa komponen, meminimalkan distorsi, serta memperpanjang umur layanan struktur.

C. Optimasi Desain Sambungan Las

Desain sambungan las merupakan salah satu faktor paling kritis dalam kualitas dan kekuatan komponen yang dilas. Sambungan las yang buruk dapat menyebabkan kegagalan struktural, cacat internal seperti *lack of fusion*, *porosity*, dan *cracking*, serta distorsi dan *residual stress* yang tinggi (Lippold, 2014). Optimasi desain sambungan las bertujuan untuk:

1. Meningkatkan kekuatan sambungan dan kemampuan menahan beban.
2. Mengurangi risiko cacat dan distorsi.

3. Meningkatkan efisiensi proses pengelasan dalam hal energi, waktu, dan filler material.
4. Mendukung integrasi dengan proses otomatis dan robotik.

Simulasi numerik, terutama dengan *finite element analysis* (FEA) menggunakan ANSYS, SYSWELD, atau *Simufact Welding*, telah menjadi alat utama dalam optimasi desain sambungan las karena mampu memprediksi:

1. Distribusi tegangan dan deformasi.
 2. Distribusi panas dan HAZ (*Heat Affected Zone*).
 3. Efek geometri sambungan terhadap performa mekanik.
- a. Jenis Sambungan Las dan Pengaruhnya terhadap Optimasi

Sambungan las dibagi menjadi beberapa tipe, masing-masing memiliki karakteristik desain, tantangan pengelasan, dan parameter optimasi:

1) *Butt Joint* (Sambungan Rata)

Butt joint atau sambungan rata merupakan salah satu tipe sambungan las yang paling umum digunakan, di mana dua plat atau material disambung secara linear sehingga permukaan yang bertemu sejajar. Sambungan ini optimal untuk aplikasi yang menuntut kekuatan tarik tinggi karena gaya yang bekerja searah dengan plane sambungan dapat didistribusikan secara merata. *Multi-pass welding* sering digunakan untuk *butt joint* tebal agar penetrasi penuh tercapai dan untuk mengontrol *Heat-Affected Zone* (HAZ), sehingga risiko *hot cracking* dan distorsi dapat diminimalkan. Parameter kritis dalam proses ini mencakup *bevel angle*, *root gap*, dan *root face height*, yang semuanya mempengaruhi homogenitas pengisian las serta integritas mekanik sambungan.

2) *Lap Joint* (Sambungan Tumpang)

Lap joint atau sambungan tumpang adalah tipe sambungan di mana dua material saling menumpuk, biasanya dengan satu permukaan berada di atas permukaan lain. Sambungan ini banyak digunakan untuk material tipis karena memungkinkan pengelasan tanpa memerlukan beveling atau persiapan edge yang kompleks. Optimasi *lap joint* melibatkan beberapa parameter penting, seperti panjang

overlapping, ukuran las, dan jumlah pass. Panjang overlapping yang cukup memastikan distribusi beban yang merata, sedangkan ukuran las dan jumlah pass menentukan penetrasi dan kekuatan sambungan. Pengaturan parameter ini krusial agar sambungan memiliki integritas mekanik yang tinggi dan meminimalkan risiko deformasi atau *cracking* pada material tipis.

3) *Corner, Tee, dan Edge Joints*

Sambungan *corner*, *tee*, dan *edge* banyak digunakan pada struktur frame, bracket, atau komponen dengan geometri kompleks. *Corner joint* menghubungkan dua material membentuk sudut, *tee joint* menyatukan satu material tegak lurus dengan permukaan lain, sedangkan *edge joint* menggabungkan tepi material yang sejajar. Optimasi sambungan ini melibatkan beberapa parameter kritis, seperti ukuran las, panjang kaki fillet, dan sudut pengelasan. Penentuan urutan atau sequencing las juga penting untuk mengurangi distorsi angular dan deformasi yang biasanya terjadi pada sambungan sudut atau tee. Dengan pengaturan parameter yang tepat, sambungan dapat mempertahankan integritas mekanik dan ketahanan terhadap beban statis maupun dinamis.

4) *Dissimilar Metal Joints*

Sambungan logam berbeda atau *dissimilar metal joints* menghubungkan dua material dengan sifat termal dan mekanik yang berbeda, misalnya steel dengan aluminium. Jenis sambungan ini banyak digunakan untuk mengombinasikan kekuatan dan sifat fungsional masing-masing material, seperti ringan tetapi kuat atau tahan korosi. Tantangan utama pada sambungan ini adalah perbedaan *Coefficient of Thermal Expansion* (CTE), yang dapat menyebabkan tegangan residual tinggi, distorsi, dan bahkan *cracking* selama proses pengelasan. Selain itu, perbedaan sifat konduktivitas termal dan kapasitas panas juga memengaruhi distribusi panas di molten pool, sehingga kontrol energi las menjadi krusial.

b. Parameter Desain Sambungan Las

Optimasi desain sambungan las melibatkan pengaturan geometri sambungan dan parameter proses pengelasan.

1) Geometri Sambungan

- a) *Bevel angle* dan *root gap* → mempengaruhi penetrasi, *fusion*, dan *stress distribution*.
- b) *Leg length* pada *fillet weld* → menentukan kekuatan sambungan terhadap shear.
- c) *Weld size* dan *throat thickness* → berpengaruh langsung terhadap *load-carrying capacity*.
- d) *Overlap length* pada *lap joint* → optimalisasi untuk distribusi tegangan merata dan minim distorsi.

2) Parameter Proses Welding

- a) Heat input (*arc power*, *travel speed*) → memengaruhi HAZ, *penetration*, dan *residual stress*.
- b) *Number of passes* → meminimalkan distorsi dan meningkatkan *metallurgical properties*.
- c) Preheat dan *inter-pass temperature* → mengurangi thermal gradient dan tensile residual stress.
- d) *Filler material selection* → kompatibilitas dengan *base metal*, *thermal conductivity*, dan *mechanical properties*.

Simulasi FEA dapat memprediksi pengaruh parameter ini terhadap tegangan sisa, distorsi, dan deformasi, sehingga engineer dapat merancang desain sambungan optimal sebelum proses fisik (Zhu *et al.*, 2019).

c. Metode Optimasi Desain Sambungan Las

1) Simulasi Numerik dan *Finite Element Analysis* (FEA)

Metode simulasi numerik dan *Finite Element Analysis* (FEA) menjadi alat penting dalam optimasi desain sambungan las, terutama untuk mengantisipasi masalah residual stress dan distorsi. Dengan menggunakan FEA thermal-mechanical, engineer dapat memprediksi distribusi suhu selama pengelasan, evolusi tegangan sisa, serta deformasi yang mungkin terjadi pada material. Input yang digunakan mencakup geometri joint, model heat source (misalnya Gaussian atau double-ellipsoidal untuk laser/arc), serta properti material temperatur-dependent seperti

thermal conductivity, specific heat, dan Young's modulus. Hasil simulasi memberikan informasi detail mengenai kontur tegangan residual, peta deformasi, dan lebar *Heat-Affected Zone* (HAZ), yang sangat berguna untuk mengevaluasi desain sambungan sebelum implementasi fisik.

2) *Design of Experiments* (DOE) dan *Parametric Study*

Metode *Design of Experiments* (DOE) dan *parametric study* digunakan untuk mengoptimalkan desain sambungan las dengan pendekatan sistematis berbasis variasi parameter. Dalam proses ini, berbagai kombinasi geometrik sambungan seperti *bevel angle, root gap, fillet leg length* dan parameter pengelasan termasuk laser/arc power, *travel speed*, dan *number of passes* dimodelkan melalui simulasi numerik. Hasil simulasi dievaluasi untuk menilai kekuatan sambungan, distribusi *residual stress*, deformasi, serta penetrasi dan fusion kualitas las. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi faktor-faktor yang paling berpengaruh terhadap performa sambungan, sehingga desain dan parameter pengelasan dapat disesuaikan secara lebih akurat.

3) *Optimization Algorithms*

Metode *optimization algorithms* digunakan untuk meningkatkan performa sambungan las dengan pendekatan berbasis komputasi canggih. *Genetic Algorithm* (GA), misalnya, meniru prinsip evolusi biologis untuk menemukan kombinasi optimal dari geometri joint, urutan pengelasan, dan input panas. Proses ini melibatkan seleksi, crossover, dan mutasi dari berbagai solusi potensial, sehingga dapat mengidentifikasi konfigurasi sambungan yang menghasilkan kekuatan maksimum dan distorsi minimum. GA sangat efektif untuk masalah non-linear dan multi-parameter, seperti dissimilar metal joints atau struktur kompleks dengan banyak pass welding (Efa, 2024).

D. Integrasi CAD/CAE untuk Proses Las

Perkembangan teknologi pengelasan modern menuntut perancangan sambungan las yang akurat, prediktif, dan efisien. Untuk itu, integrasi antara *Computer-Aided Design* (CAD) dan *Computer-Aided Engineering* (CAE) menjadi krusial. CAD memungkinkan perancangan geometri sambungan secara presisi, sedangkan CAE mendukung simulasi fisika proses pengelasan: distribusi panas, residual stress, distorsi, dan prediksi microstructure (DebRoy *et al.*, 2018). Integrasi CAD/CAE memberikan manfaat:

1. *Digital prototyping* → mengurangi kebutuhan *trial-and-error* fisik.
2. Optimasi desain sambungan sebelum produksi.
3. Prediksi kualitas las → meminimalkan cacat dan distorsi.
4. Efisiensi proses → waktu dan biaya lebih rendah, kualitas lebih tinggi.
5. Software CAD populer: SolidWorks, CATIA, Autodesk Inventor.
6. Software CAE untuk simulasi pengelasan: ANSYS, SYSWELD, ABAQUS, Simufact Welding. Integrasi CAD/CAE memungkinkan seamless workflow dari desain ke simulasi prediktif.

1. Peran CAD dalam Desain Sambungan Las

a. Geometri dan Modeling Sambungan

Peran CAD dalam desain sambungan las sangat krusial untuk memastikan kualitas, presisi, dan efisiensi produksi. Dengan menggunakan CAD, engineer dapat membuat model geometri sambungan seperti *butt joint*, *lap joint*, *corner joint*, *tee joint*, *fillet weld*, maupun dissimilar metal joints secara parametris. Parametric modeling memungkinkan perubahan geometri seperti *bevel angle*, *root gap*, atau *fillet leg* secara otomatis dan cepat, sehingga memudahkan iterasi desain dan optimasi sambungan. Hal ini mengurangi risiko kesalahan manual dan mempercepat proses desain, terutama untuk struktur kompleks atau komponen *multi-pass welding*.

b. Data Transfer ke CAE

Peran CAD dalam desain sambungan las tidak hanya terbatas pada pembuatan geometri, tetapi juga sebagai sumber data utama untuk CAE (*Computer-Aided Engineering*). File CAD, seperti STEP, IGES, atau Parasolid, diekspor dan diimpor ke

software CAE untuk proses simulasi, termasuk analisis termomekanik, distribusi tegangan, dan prediksi distorsi. Proses ini memungkinkan model digital yang akurat dari sambungan las digunakan untuk evaluasi numerik sebelum pengelasan fisik dilakukan, sehingga mengurangi risiko *trial-and-error* pada tahap produksi.

2. Peran CAE dalam Simulasi Proses Las

a. *Thermal Analysis*

Peran CAE (*Computer-Aided Engineering*) dalam simulasi proses las sangat penting, khususnya pada *thermal analysis*. Dengan menggunakan metode *transient thermal analysis*, distribusi panas selama pengelasan dapat diprediksi secara akurat. Input utama yang digunakan meliputi heat source baik Gaussian maupun double-elipsoidal serta parameter proses seperti travel speed dan preheat temperature. Simulasi ini memungkinkan engineer untuk melihat evolusi suhu secara waktu nyata, mengidentifikasi daerah molten pool, *Heat-Affected Zone* (HAZ), dan puncak temperatur yang terjadi selama pengelasan.

Hasil dari simulasi thermal ini berupa temperature contour, ukuran molten pool, serta lebar dan kedalaman HAZ. Informasi ini sangat berguna untuk memprediksi perubahan mikrostruktur, potensi residual stress, dan kemungkinan distorsi. Sebagai contoh, penggunaan ANSYS atau SYSWELD pada *laser welding titanium alloy* memungkinkan prediksi presisi terhadap HAZ dan *molten pool width* sebelum pengelasan nyata dilakukan.

b. *Mechanical Analysis*

Peran CAE dalam *mechanical analysis* pada proses pengelasan sangat penting untuk memprediksi efek termal terhadap sifat mekanik komponen. Dengan menggunakan pendekatan *coupled thermal-structural analysis*, simulasi dapat memperhitungkan interaksi antara distribusi panas dan respons mekanik material, termasuk *elastoplastic behavior*, *thermal expansion*, dan *phase transformation*. Analisis ini memungkinkan engineer untuk memahami bagaimana panas dari pengelasan memengaruhi

tegangan sisa dan deformasi pada komponen secara keseluruhan.

Hasil simulasi biasanya ditampilkan dalam bentuk contour residual stress, peta defleksi, dan prediksi angular distortion. Informasi ini sangat berguna untuk merancang strategi pengelasan yang meminimalkan distorsi dan tegangan sisa, seperti optimasi urutan pengelasan, penyesuaian heat input, dan pemilihan fixturing.

c. *Metallurgical Simulation*

Simulasi metallurgical dalam proses pengelasan menggunakan CAE memungkinkan prediksi perubahan fase material akibat siklus pemanasan dan pendinginan selama welding. Modul phase transformation pada perangkat lunak seperti SYSWELD dapat memodelkan transformasi martensite (MART), ferrite (FERR), dan austenite (AUST) pada baja, sehingga engineer dapat memahami bagaimana struktur mikro berkembang di zona *Heat-Affected Zone* (HAZ) dan molten pool. Informasi ini sangat penting untuk mengantisipasi risiko seperti *hot cracking*, pembentukan fasa rapuh, atau perubahan sifat mekanik akibat pendinginan cepat.

Hasil simulasi metallurgical biasanya ditampilkan sebagai hardness map, prediksi sifat mekanik, dan potensi zona retak. Dengan data ini, parameter pengelasan seperti *heat input*, *travel speed*, dan *inter-pass temperature* dapat disesuaikan untuk menjaga integritas microstructure dan performa mekanik komponen. Integrasi antara thermal, mechanical, dan metallurgical simulation memungkinkan pendekatan multi-physics, sehingga proses pengelasan dapat dioptimalkan secara lebih akurat dan prediktif, terutama untuk material sensitif seperti superalloy atau baja karbon tinggi.

d. Optimization via CAE

CAE tidak hanya digunakan untuk simulasi, tetapi juga sebagai alat optimasi proses pengelasan. Dengan memanfaatkan metode seperti *Design of Experiments* (DOE), engineer dapat merancang variasi geometri sambungan dan parameter pengelasan untuk dianalisis secara sistematis. *Response Surface Methodology* (RSM) kemudian memodelkan hubungan antara variabel input dan output, sehingga prediksi perilaku

sambungan las seperti distribusi tegangan residual, distorsi, dan penetrasi dapat dilakukan dengan akurasi tinggi. Pendekatan ini membantu menentukan kombinasi parameter optimal sebelum pelaksanaan pengelasan nyata, mengurangi *trial-and-error*, serta menghemat waktu dan biaya produksi.

Algoritma optimasi seperti *Genetic Algorithm* (GA) memungkinkan pencarian solusi multi-objektif. Dalam konteks pengelasan, tujuan optimasi biasanya mencakup minimisasi tegangan residual dan distorsi, sambil mempertahankan fusion dan penetration yang optimal. Dengan integrasi simulasi CAE dan algoritma optimasi, engineer dapat merancang proses pengelasan yang lebih efisien, prediktif, dan andal, terutama pada sambungan kompleks atau material sensitif.

3. Integrasi CAD/CAE Workflow

- a. Step 1: Design CAD
 - 1) Buat geometri sambungan las: *plate, joint type, weld bead*.
 - 2) Tentukan parametric variables: *bevel angle, root gap, fillet leg, overlap length*.
- b. Step 2: Import ke CAE
 - 1) Import CAD ke ANSYS, SYSWELD, atau ABAQUS.
 - 2) *Assign material properties, boundary conditions, heat source*.
 - 3) Mesh refinement di critical zones: root, HAZ, weld bead.
- c. Step 3: *Thermal-Mechanical Simulation*
 - 1) *Thermal analysis* → *transient temperature distribution*.
 - 2) *Structural analysis* → *coupled thermal-structural* → *residual stress, distortion*.
 - 3) *Multi-pass welding* → *simulate layer-by-layer*.
- d. Step 4: *Post-Processing*
 - 1) *Visualisasi temperature contour, HAZ, residual stress, distortion*.
 - 2) *Identify critical zones* → *potensi cracking, warping, distortion*.
 - 3) *Parametric study* → *optimize joint design dan welding parameters*.

- e. Step 5: Feedback ke CAD
 - 1) Modifikasi geometri joint berdasarkan hasil simulasi.
 - 2) Iterasi hingga parameter optimal → *minimum residual stress, minimum distortion, maksimal fusion*.
 - 3) *Workflow digital* → reduksi prototyping fisik, efisiensi biaya, waktu produksi lebih cepat.



BAB X

PENERAPAN TEKNOLOGI PENGELASAN DI INDUSTRI

Penerapan teknologi pengelasan modern di industri mencerminkan peran strategisnya dalam meningkatkan kualitas produk, efisiensi produksi, dan keselamatan kerja. Industri otomotif, minyak dan gas, pelayaran, konstruksi, serta aerospace merupakan sektor yang sangat bergantung pada sambungan las berkualitas tinggi. Di sektor otomotif, pengelasan presisi tinggi seperti *Laser Beam Welding* (LBW) dan *Robotik* MIG/TIG digunakan untuk sambungan bodi kendaraan, meningkatkan kekuatan struktural, mengurangi berat, dan mendukung produksi massal. Sementara itu, industri minyak dan gas memanfaatkan pengelasan energi tinggi untuk pipa, pressure vessel, dan komponen kritis yang menuntut integritas tinggi serta ketahanan terhadap korosi dan tekanan ekstrem.

Di industri pelayaran dan konstruksi, teknologi pengelasan modern memungkinkan pembuatan struktur baja besar dengan distorsi minimal, penetrasi las optimal, dan efisiensi waktu. *Robotik* dan sistem otomatis mendukung produksi panel kapal, jembatan, dan struktur berat dengan konsistensi tinggi. Selain itu, integrasi sensor monitoring, quality control berbasis data, dan simulasi numerik memungkinkan pengawasan proses secara real-time, sehingga mengurangi cacat, meningkatkan produktivitas, dan meminimalkan risiko keselamatan kerja.

A. Pengelasan di Industri Otomotif

Pesatnya perkembangan dunia perindustrian telah mendorong timbulnya berbagai inovasi dengan gagasan yang baru guna menghasilkan berbagai macam produk yang lebih unggul dan memiliki

kualitas yang lebih baik. Dalam industri otomotif, terobosan serta inovasi terbaru sangat diperlukan untuk menjaga dan meningkatkan hasil produksi sehingga pemanfaatan dan penerapan teknologi merupakan hal mutlak yang harus dilakukan, seperti halnya teknologi pengelasan (Amin, 2017).

Industri otomotif modern menuntut komponen kendaraan yang ringan, kuat, dan aman, sekaligus hemat biaya dan ramah lingkungan. Pengelasan menjadi salah satu teknologi kunci dalam proses fabrikasi *body-in-white* (BIW), chassis, dan structural parts. Jenis material yang digunakan:

1. *High-Strength Steel* (HSS) dan *Ultra High-Strength Steel* (UHSS): Digunakan untuk *crash zones* dan *safety cage*.
2. *Aluminium Alloy*: Digunakan untuk *body panels* dan *structural parts* untuk mengurangi weight.
3. *Multi-Material Joining*: Kombinasi steel-aluminium, aluminium-composite, dan HSS-aluminium.
 - a. *Resistance Spot Welding* (RSW)

Resistance Spot Welding (RSW) merupakan metode pengelasan yang paling umum digunakan dalam industri otomotif, terutama untuk assembly bodi, door panels, dan chassis. Proses ini bekerja dengan melewatkan arus listrik melalui dua lapisan logam yang ditekan oleh elektroda, sehingga menghasilkan panas resistif yang melelehkan area kontak dan membentuk nugget las. Kelebihan utama RSW adalah kecepatan tinggi, efisiensi biaya, dan kemampuan otomasi, sehingga sangat cocok untuk produksi massal. Dengan kemampuan integrasi ke lini perakitan otomatis, RSW mendukung konsistensi kualitas sambungan dan produktivitas tinggi, yang menjadi kunci dalam industri otomotif modern.

Meski efisien, RSW memiliki keterbatasan, terutama pada material tipis atau aluminium, di mana porosity, expulsion, dan deformasi lokal dapat terjadi. Penggunaan parameter yang tidak tepat seperti arus las terlalu tinggi, waktu las berlebihan, atau tekanan elektroda yang tidak optimal dapat menyebabkan nugget yang tidak stabil, meningkatkan risiko cacat las. Oleh karena itu, kontrol parameter proses menjadi sangat penting untuk menjamin kekuatan sambungan, terutama dalam

kendaraan ringan yang menuntut integritas struktural tinggi dan keamanan penumpang.

b. *Laser Beam Welding* (LBW)

Laser Beam Welding (LBW) telah menjadi teknologi penting dalam industri otomotif, khususnya untuk material aluminium, *high-strength steel* (HSS), dan sambungan material berbeda (*dissimilar metals*). Proses ini menggunakan laser sebagai sumber energi terfokus yang menghasilkan panas tinggi pada area kecil, sehingga memungkinkan penetrasi dalam dan pencapaian sambungan berkualitas tinggi. LBW sangat sesuai untuk komponen tipis dan kompleks, seperti closure panels dan structural reinforcements, karena heat input yang rendah dan area *Heat Affected Zone* (HAZ) yang minimal, sehingga mengurangi risiko distorsi dan residual stress pada bodi kendaraan.

Salah satu keunggulan utama LBW adalah presisi tinggi dan kontrol energi yang akurat, memungkinkan pengelasan dengan toleransi mikro dan reproduksibilitas tinggi. Karena panas yang terkonsentrasi terbatas pada area yang dilas, deformasi material minimal dibandingkan metode konvensional seperti *resistance spot welding*. Selain itu, penetrasi yang dalam mempermudah pengelasan multi-layer atau penggabungan material tipis dengan kekuatan tinggi, sehingga sambungan lebih andal dalam menghadapi beban operasional kendaraan.

c. *Friction Stir Welding* (FSW)

Friction Stir Welding (FSW) merupakan teknologi pengelasan solid-state yang banyak digunakan dalam industri otomotif, khususnya untuk aluminium dan magnesium alloy panels. Proses ini melibatkan pendorongan tool berputar ke dalam sambungan material, sehingga menghasilkan plastisitas lokal tanpa melebur logam. Karena tidak ada fusi, distorsi termal dan residual stress sangat minim, membuat FSW ideal untuk aplikasi yang membutuhkan presisi dimensi tinggi. Keunggulan lain adalah mechanical properties superior, termasuk kekuatan tarik dan fatigue resistance yang lebih baik dibanding sambungan las tradisional pada logam tipis.

FSW banyak diterapkan pada komponen kendaraan yang menuntut bobot ringan dan kekuatan tinggi, seperti chassis,

battery enclosures untuk kendaraan listrik (EV), dan lightweight body panels. Pada panel aluminium EV, FSW memungkinkan sambungan yang konsisten, bebas porosity, dan dengan microstructure homogen. Hal ini membantu meningkatkan integritas struktural sekaligus menjaga efisiensi berat kendaraan, sehingga mendukung performa dan jangkauan baterai lebih optimal.

d. Hybrid Welding

Hybrid Welding adalah metode pengelasan modern yang menggabungkan dua teknik, umumnya *Laser Beam Welding* (LBW) dan MIG/MAG arc welding, untuk memanfaatkan keunggulan masing-masing. Laser memberikan penetrasi dalam dan presisi tinggi, sedangkan arc welding menyuplai filler material tambahan dan meningkatkan toleransi pada joint gap. Kombinasi ini menghasilkan weld dengan porosity rendah, kekuatan tinggi, dan laju deposisi lebih cepat, sehingga sangat cocok untuk aplikasi industri otomotif yang menuntut efisiensi produksi sekaligus kualitas sambungan tinggi.

Metode ini banyak diterapkan pada thicker panels atau *high-strength steel* (HSS) joints, di mana pengelasan konvensional tunggal sering mengalami keterbatasan penetrasi atau risiko *cracking*. *Hybrid Welding* memungkinkan penetrasi penuh dengan heat input lebih terkendali, sehingga distorsi termal dan residual stress dapat diminimalkan. Pada komponen seperti *structural reinforcements*, *chassis sections*, atau *closure panels*, teknologi ini memastikan sambungan yang kuat dan konsisten tanpa mengorbankan presisi dimensi atau integritas material.

B. Pengelasan di Industri Minyak dan Gas

Industri minyak dan gas (O&G) merupakan sektor yang menuntut standar keselamatan, keandalan, dan ketahanan material yang tinggi. Infrastruktur O&G meliputi pipa transportasi, *offshore platforms*, *storage tanks*, dan *pressure vessels*, yang semuanya bergantung pada kualitas sambungan las untuk memastikan operasi aman dan berkelanjutan. Material yang digunakan:

1. *Carbon Steel* dan *Low-Alloy Steel*: Digunakan untuk *onshore pipelines* dan *storage tanks*.

2. *Stainless Steel* dan *Duplex Alloys*: Digunakan di corrosive environments, offshore platforms, dan risers.
3. *Nickel-Based Alloys*: Aplikasinya dalam subsea piping dan high-temperature separators.

- a. *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW/Manual Stick)

Shielded Metal Arc Welding (SMAW), yang sering dikenal sebagai manual stick welding, tetap menjadi salah satu metode pengelasan utama dalam industri minyak dan gas, terutama untuk aplikasi onshore pipelines dan repair welding. Kelebihan utama SMAW adalah portabilitas dan fleksibilitas, karena peralatan relatif sederhana dan dapat dibawa ke lokasi terpencil atau area kerja terbatas. Proses ini hanya memerlukan elektroda berlapis flux, arus listrik, dan keterampilan operator untuk menghasilkan sambungan las yang memadai, sehingga sangat cocok untuk pekerjaan lapangan di mana metode otomatis atau semi-otomatis sulit diterapkan.

Meskipun SMAW memiliki keunggulan praktis, metode ini memiliki keterbatasan produktivitas karena laju deposisi yang lebih rendah dibandingkan proses MIG atau *flux-cored arc welding*. Hasil pengelasan sangat bergantung pada keterampilan operator, mulai dari pengaturan arus, sudut elektroda, hingga teknik pemakaian elektroda. Variasi kecil dalam teknik dapat menyebabkan defek seperti porosity, slag inclusion, dan *lack of fusion*, yang kritis pada pipa tekanan tinggi atau material peka korosi. Oleh karena itu, kualitas las memerlukan pengawasan ketat selama proses pengelasan.

- b. *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW/TIG)

Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), atau lebih dikenal sebagai *Tungsten Inert Gas (TIG) welding*, banyak digunakan dalam industri minyak dan gas untuk pengelasan material kritis seperti stainless steel, duplex, dan nickel-based alloys. Proses ini menggunakan elektroda tungsten yang tidak meleleh untuk menghasilkan arc stabil dan sumber panas yang terkendali, dengan gas inert (biasanya argon) melindungi area las dari oksidasi. Keunggulan utama GTAW adalah kualitas las yang sangat tinggi, dengan penetrasi presisi, minimal dilution, dan bead yang halus. Hal ini menjadikannya ideal untuk sambungan yang menuntut integritas mekanik dan ketahanan korosi tinggi,

misalnya pada pipa pabrik kimia, refinery, dan offshore platforms.

Meskipun GTAW menawarkan precision dan kualitas superior, proses ini memiliki laju deposisi yang relatif lambat, sehingga kurang efisien untuk komponen besar atau produksi massal. Selain itu, biaya operasional tinggi karena membutuhkan operator terlatih, perlengkapan khusus, dan waktu las yang lebih lama dibandingkan metode seperti SMAW atau GMAW. Keterbatasan ini menuntut perencanaan welding yang matang, terutama untuk proyek skala besar atau sambungan panjang pada pipa diameter besar.

c. *Gas Metal Arc Welding (GMAW/MIG)*

Gas Metal Arc Welding (GMAW), yang juga dikenal sebagai Metal Inert Gas (MIG) welding, merupakan salah satu metode pengelasan yang umum digunakan dalam industri minyak dan gas, terutama untuk carbon steel pipelines dan structural steel. Proses ini memanfaatkan kawat elektroda yang terus-menerus dilelehkan sambil dilindungi oleh gas inert atau semi-inert untuk mencegah oksidasi. GMAW sangat populer karena laju deposisi yang tinggi, kontrol proses yang mudah, dan kemampuan untuk menghasilkan las konsisten pada sambungan panjang, sehingga ideal untuk proyek pipeline onshore maupun offshore.

Untuk mengatasi masalah heat input berlebih dan distorsi, varian pulsed MIG atau pulsed GMAW diterapkan. Teknik ini memungkinkan kawat elektroda dilelehkan secara terkontrol dalam pulsa, sehingga panas yang masuk ke material lebih rendah dibandingkan pengelasan konvensional. Pengendalian heat input ini penting untuk meminimalkan distorsi geometris, mengurangi residual stress, serta menjaga integritas sambungan pada pipa tipis atau struktur yang sensitif terhadap perubahan bentuk.

d. *Submerged Arc Welding (SAW)*

Submerged Arc Welding (SAW) merupakan metode pengelasan yang banyak digunakan dalam industri minyak dan gas untuk thick-wall pressure vessels dan large diameter pipelines. Proses ini menggunakan busur listrik yang berada di bawah lapisan fluks granular, sehingga busur terlindungi dari atmosfer. Salah satu keunggulan utama SAW adalah laju deposisi material yang

tinggi dan kemampuan menghasilkan las yang konsisten dengan penetrasi dalam. Perlindungan fluks juga mengurangi percikan las dan oksidasi, sehingga kualitas sambungan lebih stabil dibandingkan beberapa metode pengelasan konvensional.

SAW sangat ideal untuk aplikasi industri berat seperti tangki tekanan, pipa berdiameter besar, dan struktur bawah laut yang dibuat di fasilitas manufaktur atau shop. Karena busur terkubur, proses ini memungkinkan multi-pass welding secara efisien, menghasilkan sambungan tebal dengan distorsi yang relatif rendah. Thermal input yang tinggi sekaligus terkontrol membuat SAW cocok untuk material karbon steel atau baja paduan tinggi yang membutuhkan penetrasi mendalam dan kekuatan las maksimum.

e. Hybrid Welding

Hybrid Welding dalam industri minyak dan gas menggabungkan laser welding dengan MIG/GMAW, sehingga memanfaatkan keunggulan masing-masing metode. Laser menyediakan heat density tinggi dan presisi, sementara MIG/GMAW menambahkan material filler dengan laju deposisi yang tinggi. Kombinasi ini memungkinkan pengelasan thick-wall pipelines, sambungan dissimilar metal, dan struktur offshore yang menuntut penetrasi dalam, kontrol distorsi, serta kecepatan produksi tinggi. Keunggulan *Hybrid Welding* terletak pada kemampuan mengontrol thermal input secara lebih akurat sehingga HAZ (*Heat-Affected Zone*) lebih kecil dan distorsi geometris dapat diminimalkan.

Pada aplikasinya, *Hybrid Welding* banyak digunakan pada offshore pipelines dan pipa bertekanan tinggi di mana kualitas sambungan menjadi kritis. Proses ini memungkinkan multi-pass welding dengan pengendalian energi yang adaptif, sehingga material sensitif seperti stainless steel, duplex, atau superalloy dapat disambung tanpa risiko *cracking* atau residual stress yang berlebihan. Laser memberikan penetrasi mendalam, sedangkan MIG/GMAW menambah ketebalan las dan menyesuaikan bentuk bead untuk stabilitas mekanik yang optimal.

f. *Friction Welding* dan *Orbital Welding*

Friction welding merupakan metode pengelasan solid-state yang banyak diterapkan pada industri minyak dan gas untuk komponen tubular bertekanan tinggi dan tie-ins pipa. Proses ini mengandalkan gesekan mekanis untuk menghasilkan panas lokal, sehingga logam mencapai kondisi plastis tanpa melebur sepenuhnya. Keunggulannya termasuk kekuatan sambungan tinggi, minim distorsi, dan pengendalian mikrostruktur yang lebih baik dibandingkan pengelasan fusion. Friction welding ideal untuk sambungan pipa karbon steel atau alloy kritikal, terutama ketika presisi mekanik dan integritas material menjadi prioritas utama.

Orbital welding, khususnya menggunakan TIG (*Tungsten Inert Gas*), banyak digunakan untuk pipeline stainless steel dan aplikasi pipa presisi di offshore maupun onshore. Sistem orbital memungkinkan pengelasan otomatis dengan rotasi 360° di sekitar pipa, sehingga menghasilkan bead konsisten dan kualitas las yang tinggi. Metode ini sangat berguna untuk pipeline diameter kecil hingga menengah yang menuntut pengulangan las berkualitas tinggi tanpa ketergantungan pada keahlian operator secara langsung.

C. Pengelasan di Industri Pelayaran dan Konstruksi

Industri pelayaran dan konstruksi memiliki kebutuhan pengelasan yang unik dan kritis, karena struktur yang dibangun harus mampu menahan beban berat, tekanan lingkungan ekstrem, dan siklus dinamis. Dalam industri pelayaran, pengelasan diaplikasikan pada hull kapal, deck structures, bulkheads, dan superstructures, sedangkan dalam konstruksi, pengelasan digunakan pada steel frame, bridge girders, high-rise buildings, dan offshore platforms. Material yang digunakan:

1. *Structural Steel* (Mild Steel, HSS): Digunakan luas dalam jembatan, gedung bertingkat, dan kapal.
2. *Stainless Steel* dan *Weathering Steel*
 - a. *Stainless steel* → tahan korosi laut, untuk hull plating dan deck.
 - b. *Weathering steel* → digunakan pada jembatan dan bangunan outdoor, membentuk lapisan oksida pelindung.

3. *Aluminium Alloy*: Digunakan pada kapal ringan, ferries, dan high-speed vessels.

a. *Shielded Metal Arc Welding (SMAW)*

Shielded Metal Arc Welding (SMAW) tetap menjadi salah satu metode pengelasan utama di industri pelayaran dan konstruksi, terutama untuk pekerjaan perbaikan di galangan kapal dan konstruksi lapangan. Proses ini menggunakan elektroda berlapis fluks yang menghasilkan busur listrik untuk melelehkan logam dasar dan filler, sekaligus menciptakan atmosfer protektif dari fluks yang meleleh. SMAW sangat portabel dan fleksibel, sehingga ideal untuk pekerjaan di lokasi yang sulit dijangkau atau area outdoor, seperti perbaikan lambung kapal, deck, maupun struktur baja pada jembatan dan gedung bertingkat.

Kelebihan utama SMAW terletak pada kesederhanaan peralatan dan kemampuan beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang bervariasi. Operator dapat dengan cepat memulai pengelasan tanpa membutuhkan setup rumit, dan elektroda tersedia dalam berbagai ukuran dan material sesuai kebutuhan, dari mild steel hingga stainless steel. Fleksibilitas ini membuat SMAW tetap relevan di lapangan, terutama ketika peralatan otomatis atau sumber daya listrik terbatas.

b. *Gas Metal Arc Welding (GMAW/MIG)*

Gas Metal Arc Welding (GMAW/MIG) adalah metode pengelasan yang banyak digunakan di industri pelayaran dan konstruksi, terutama untuk *structural steel*, hull plating kapal, dan *bridge girders*. Proses ini memanfaatkan kawat elektroda kontinu yang dilelehkan oleh busur listrik di antara kawat dan logam dasar, dengan gas pelindung seperti argon atau campuran argon-CO₂ untuk mencegah oksidasi. Keunggulan utama GMAW adalah kecepatan pengelasan tinggi dan kemampuan menghasilkan las yang konsisten, sehingga ideal untuk proyek berskala besar di mana produktivitas menjadi faktor kritis.

Pada aplikasinya, pulled atau pulsed MIG welding sering diterapkan untuk mengendalikan heat input pada material tipis atau struktur sensitif. Dengan teknik ini, arus listrik dikontrol dalam pulsa sehingga panas yang diberikan ke material berkurang, mengurangi risiko distorsi dan residual stress. Hal ini sangat penting untuk hull plating kapal dan bridge girders, di

mana distorsi geometri dapat memengaruhi integritas struktural dan kesesuaian komponen. Selain itu, control heat input membantu mencegah masalah metallurgical seperti *grain coarsening* atau *cracking* pada logam dasar.

c. *Submerged Arc Welding* (SAW)

Submerged Arc Welding (SAW) adalah metode pengelasan yang sangat cocok untuk aplikasi thick plates dan girder welding di industri pelayaran dan konstruksi. Proses ini menggunakan elektroda kontinu yang dilelehkan oleh busur listrik di bawah lapisan fluks granular, sehingga panas dan percikan tetap tertahan di bawah permukaan. Salah satu keunggulan utama SAW adalah high deposition rate, yang memungkinkan pengelasan material tebal dalam waktu singkat, sangat ideal untuk proyek besar seperti hull kapal, jembatan, dan struktur offshore. Lapisan fluks juga menurunkan emisi asap dan percikan, sehingga lingkungan kerja lebih aman dan bersih.

SAW juga menghasilkan weld dengan kualitas tinggi dan penetrasi konsisten. Karena panas tersalurkan dengan baik melalui fluks, molten pool stabil, dan kemungkinan porosity atau slag inclusion relatif rendah. Hal ini menjadikan SAW andalan untuk joint kritis yang menuntut kekuatan tinggi dan integritas struktural, terutama pada plate dengan ketebalan besar. Pengendalian parameter seperti *travel speed*, *current*, dan *flux feeding rate* memungkinkan operator mengatur bentuk bead, penetration depth, dan profil HAZ secara akurat.

d. *Laser Beam Welding* (LBW) dan Hybrid Welding

Laser Beam Welding (LBW) dan *Hybrid Welding* semakin banyak digunakan dalam industri pelayaran dan konstruksi, terutama untuk material seperti aluminium kapal dan sambungan dissimilar metal antara aluminium dan steel. LBW menggunakan sinar laser terfokus sebagai sumber panas, sehingga memungkinkan penetrasi dalam dan presisi tinggi pada joint yang tipis maupun kompleks. Heat input yang rendah mengurangi area *Heat-Affected Zone* (HAZ) dan meminimalkan distorsi, yang sangat penting untuk menjaga geometri hull kapal atau struktur bangunan baja ringan. Proses ini cocok untuk aplikasi yang menuntut surface finish halus dan integritas

struktural tinggi, misalnya sambungan panel aluminium pada kapal cepat atau superstruktur yang tipis.

Hybrid Welding menggabungkan LBW dengan MIG/MAG atau arc welding, memanfaatkan keunggulan masing-masing metode. Laser menyediakan presisi dan penetrasi dalam, sementara arc atau MIG menambah *deposition rate* tinggi dan kemampuan mengisi *gap joint*. Kombinasi ini memungkinkan pengelasan material tebal maupun sambungan dissimilar metal dengan kecepatan lebih tinggi dibanding LBW murni, tanpa mengorbankan kualitas las. Optimasi parameter seperti *laser power*, *travel speed*, dan *filler feed rate* sangat penting untuk menghindari *cracking*, porosity, dan *distorsi residual*.

e. *Friction Stir Welding* (FSW)

Friction Stir Welding (FSW) merupakan teknologi pengelasan solid-state yang banyak digunakan dalam industri pelayaran dan konstruksi, khususnya untuk hull plates aluminium dan aluminium alloys. Berbeda dengan pengelasan fusi konvensional, FSW tidak melelehkan material, sehingga heat input rendah dan distorsi termal minimal. Proses ini melibatkan pahat berputar (*rotating tool*) yang menekan dan mengaduk material di sepanjang sambungan, menghasilkan ikatan metallurgi yang homogen dan kuat. Keunggulan ini membuat FSW ideal untuk aplikasi di mana presisi geometris dan kualitas mekanik sambungan sangat kritis, seperti lambung kapal dan superstruktur aluminium modern.

FSW juga menawarkan *mechanical properties superior* dibanding las konvensional. *Grain refinement* terjadi di zona nugget stir, menghasilkan *tensile strength* dan *fatigue resistance* tinggi. Selain itu, karena tidak ada fusi, risiko porosity, *cracking*, atau *hot cracking* berkurang secara signifikan. Proses ini juga memungkinkan sambungan panjang dan continuous tanpa perlu filler metal, sehingga efisiensi produksi meningkat, terutama untuk panel aluminium tipis hingga sedang yang sering digunakan pada kapal cepat dan ferry.

f. Multi-Pass Welding dan Preheating

Pada industri pelayaran dan konstruksi, multi-pass welding menjadi metode yang sangat penting, terutama untuk thick structural steel seperti hull plates kapal, girder jembatan, dan

komponen besar lainnya. Proses ini melibatkan pengelasan berlapis-lapis, di mana setiap lapisan material logam ditambahkan secara berurutan hingga penetrasi penuh tercapai. Keunggulan multi-pass welding terletak pada kemampuannya untuk memastikan fusion yang menyeluruh dan distribusi kekuatan yang lebih merata di sepanjang sambungan. Selain itu, teknik ini membantu mengurangi risiko porosity dan kekosongan internal yang dapat terjadi jika hanya menggunakan *single-pass welding*, terutama pada material tebal.

Preheating dan pengendalian interpass temperature sangat krusial untuk mengontrol kualitas sambungan. Preheating logam dasar sebelum pengelasan meningkatkan ductility dan mengurangi laju pendinginan, sehingga mengurangi kemungkinan hot *cracking* dan menurunkan residual stress yang menumpuk akibat thermal gradient tinggi. Kontrol interpass temperature antara lapisan las memastikan bahwa setiap lapisan memiliki suhu optimal sebelum lapisan berikutnya diterapkan, sehingga struktur mikro terbentuk lebih homogen dan distorsi termal dapat diminimalkan.

D. Studi Kasus Implementasi di Industri Modern

Pengelasan modern telah menjadi komponen kritis dalam berbagai industri, termasuk otomotif, minyak dan gas, pelayaran, kedirgantaraan, konstruksi, dan manufaktur berat. Studi kasus implementasi teknologi pengelasan di industri modern memberikan gambaran nyata tentang penerapan prinsip, metode, dan optimasi proses las. Kasus-kasus ini menunjukkan bagaimana integrasi teknologi informasi, robotik, sensor, dan analitik prediktif dapat meningkatkan kualitas, efisiensi, dan keselamatan.

1. Kasus di Industri Kapal Indonesia (Purnamasari, 2015)

Industri galangan kapal nasional memiliki peran sangat penting dalam mendukung perekonomian di sektor transportasi laut dan salah satu komponen penting dalam menciptakan kemandirian dan kedaulatan dunia maritim Indonesia, upaya peningkatan kapasitas dan produktifitas galangan melalui penguasaan dan pemanfaatan Iptek bagi kemandirian dan daya saing bangsa harus dijalankan. Kegiatan Audit

Teknologi Galangan Kelas Menengah Untuk Produksi kapal Feeder Guna mendukung Sistem Pendulum Nusantara dilaksanakan pada bulan Maret 2014 dengan menggunakan metode survei di galangan PT. Industri Kapal Indonesia Makassar yang merupakan salah satu galangan yang aktif melayani reparasi dan produksi kapal. Metode analisis data yang digunakan adalah analisis deskriptif untuk mendeskripsikan pembangunan kapal di galangan tersebut. Selanjutnya untuk menilai tingkat teknologi dilakukan dengan menghitung nilai TCC (*technology contribution coefficient*) pada galangan digunakan model teknometrik dengan menilai kontribusi komponen teknologi yang diterapkan di galangan meliputi komponen technoware, humanware, infoware, dan orgaware. Nilai kontribusi komponen humanware memiliki nilai kontribusi tertinggi sebesar 0,6778 sedangkan komponen infoware memiliki kontribusi terendah sebesar 0,4398. Nilai TCC dari galangan kapal PT. Industri Kapal Indonesia sebesar 0,5206 menunjukkan bahwa teknologi di galangan tersebut berada pada level semi modern.

PT. Industri Kapal Indonesia (IKI) Makassar melakukan audit teknologi pengelasan pada galangan kapal kelas menengah untuk produksi kapal feeder, dengan skor TCC 0,5206 menunjukkan level semi-modern pada technoware seperti pemotongan dan pembengkokan. Sementara itu, galangan kapal lokal lain mengintegrasikan laser cutting (pendukung pengelasan) yang mengurangi waktu produksi panel baja hingga 40%, scrap material 25%, dan kesalahan fitting. Implementasi ini mendukung produksi domestik melalui komponen technoware, humanware, infoware, dan orgaware.

2. Kasus Laser Spot Welding Elektronik Otomotif (Silva *et al.*, 2025)

Studi ini menyelidiki penerapan pengelasan titik laser untuk menyambung komponen rumah pelindung dalam industri elektronik otomotif. Komponen PBT GF 30 disambung menggunakan dua konfigurasi utama: sambungan tumpang tindih murni dan sambungan tumpang atas, keduanya autogenous (yaitu, tanpa *filler*). Untuk melengkapi analisis eksperimental, model numerik, yang sebelumnya divalidasi untuk konfigurasi sambungan yang lebih sederhana, diadaptasi dan diterapkan pada konfigurasi di luar sambungan tumpang atas dan tumpang atas, yang lebih representatif terhadap komponen

industri otomotif praktis. Hasilnya menunjukkan bahwa sambungan tumpang atas menunjukkan kekuatan yang jauh lebih tinggi (peningkatan 85%) dibandingkan sambungan tumpang atas murni. Peningkatan ini disebabkan oleh efek gabungan tegangan normal dan geser pada konfigurasi tumpang atas, sementara sambungan tumpang atas murni hanya mengandalkan tegangan geser. Model numerik yang divalidasi secara akurat memprediksi hasil eksperimen, termasuk nilai perpindahan dan gaya. Meskipun terdapat sedikit deviasi, prediksi model numerik tersebut konvergen dalam nilai eksperimen rata-rata dan deviasi standar, menunjukkan bahwa model tersebut dapat digunakan untuk merancang sambungan las laser secara presisi untuk aplikasi serupa.

Pengelasan laser spot digunakan untuk menyambung komponen housing PBT GF30 pada elektronik otomotif, dengan konfigurasi overlapping dan top-overlap tanpa filler material. Studi eksperimental dan numerik menunjukkan sambungan kuat untuk aplikasi praktis, melampaui joint sederhana. Teknologi ini memenuhi tuntutan industri otomotif dengan presisi tinggi.



BAB XI

ASPEK KESELAMATAN, LINGKUNGAN, DAN ENERGI

Aspek keselamatan, lingkungan, dan energi menjadi faktor penting dalam pengelasan modern, mengingat proses ini melibatkan panas tinggi, radiasi, gas berbahaya, dan material kimia yang berpotensi menimbulkan risiko bagi operator dan lingkungan. Manajemen risiko dan keselamatan kerja menjadi prioritas utama, dengan penerapan standar keselamatan, penggunaan alat pelindung diri (APD), ventilasi yang memadai, serta pelatihan rutin untuk tenaga kerja. Pengelasan modern juga menuntut sistem monitoring real-time untuk mendeteksi kondisi abnormal, sehingga kecelakaan dapat dicegah dan proses tetap berjalan aman.

Pengelolaan limbah dan gas hasil las merupakan perhatian utama dalam praktik industri berkelanjutan. Gas seperti ozone, nitrogen oksida, dan partikulat logam harus dikendalikan melalui sistem ventilasi, filter, atau scrubber untuk mengurangi dampak lingkungan. Limbah padat dan residu logam juga perlu dikelola dengan prinsip reduce, reuse, dan recycle. Pendekatan ini tidak hanya melindungi lingkungan, tetapi juga mendukung kepatuhan terhadap regulasi lingkungan nasional maupun internasional, serta memperkuat citra perusahaan sebagai produsen yang bertanggung jawab.

A. Manajemen Risiko dan Keselamatan Kerja

Pengelasan modern dalam industri manufaktur, otomotif, konstruksi, pelayaran, minyak & gas, serta kedirgantaraan membawa risiko tinggi bagi keselamatan pekerja, kualitas produk, dan lingkungan kerja. Manajemen risiko dan keselamatan kerja (*Occupational Health and Safety*, OHS) menjadi aspek krusial karena proses las melibatkan

panas tinggi, radiasi, gas beracun, dan partikel logam yang dapat membahayakan pekerja serta memengaruhi kualitas hasil las (Klimecka-Tatar *et al.*, 2023). Manajemen risiko tidak hanya meliputi proteksi fisik tetapi juga pengendalian proses, prosedur kerja, dan penerapan teknologi otomatisasi. Tujuannya adalah mengurangi potensi kecelakaan, kerugian material, serta meningkatkan efisiensi dan produktivitas.

1. Pendekatan Manajemen Risiko

a. *Risk Assessment*

Pendekatan manajemen risiko dalam pengelasan dimulai dengan tahap risk assessment, yang merupakan fondasi untuk memastikan keselamatan operator dan kualitas proses. Tahap pertama adalah identifikasi bahaya (*hazard identification*), di mana semua potensi bahaya dievaluasi secara menyeluruh. Dalam konteks pengelasan, hal ini mencakup paparan panas tinggi, busur listrik, asap dan gas las, percikan slag, hingga risiko listrik. Identifikasi bahaya ini tidak hanya terbatas pada lingkungan kerja, tetapi juga pada material dan peralatan yang digunakan, sehingga setiap sumber risiko dapat dicatat dan dianalisis secara sistematis.

Tahap berikutnya adalah evaluasi risiko (*risk evaluation*), di mana probabilitas terjadinya bahaya dan dampaknya dianalisis untuk menentukan skala risiko, mulai dari minor, major, hingga critical. Berdasarkan evaluasi ini, dilakukan pengendalian risiko (*risk control*) sesuai hierarki pengendalian: menghilangkan bahaya (*elimination*), mengganti dengan alternatif lebih aman (*substitution*), penerapan rekayasa teknis (*engineering control*), prosedur administrasi (*administrative control*), hingga penggunaan alat pelindung diri (PPE).

b. *Engineering Controls*

Pada pendekatan manajemen risiko pada pengelasan, *engineering controls* berperan penting untuk mengurangi paparan bahaya secara langsung. Salah satu implementasinya adalah penggunaan fume extraction dan ventilation systems, yang secara efektif menghilangkan gas berbahaya dan partikel logam dari area kerja, sehingga mengurangi risiko inhalasi bagi operator. Selain itu, *physical barriers* dan shields dipasang

untuk melindungi pekerja dari radiasi, percikan logam, dan slag yang dapat menyebabkan cedera atau iritasi kulit. Penerapan kontrol teknis ini tidak hanya meningkatkan keselamatan, tetapi juga membantu menjaga kualitas lingkungan kerja (Knott *et al.*, 2023).

Grounding dan insulation pada peralatan las mengurangi risiko kejutan listrik, yang sering menjadi bahaya serius dalam proses pengelasan. Penggunaan robotic welding juga semakin populer, karena mengurangi interaksi langsung manusia dengan sumber risiko. Dengan sistem otomatis ini, pekerja dapat mengawasi proses dari jarak aman, sementara *Robot* menangani operasi las yang berbahaya.

c. *Administrative Controls*

Pendekatan manajemen risiko dalam pengelasan juga melibatkan *administrative controls*, yang fokus pada pengaturan prosedur dan perilaku kerja untuk meminimalkan risiko. Salah satu langkah penting adalah penerapan *Standard Operating Procedures* (SOPs), yang menjabarkan langkah kerja secara sistematis dan aman, sehingga setiap pekerja mengikuti praktik yang konsisten dan mengurangi potensi kesalahan. SOP ini mencakup persiapan peralatan, pengaturan area kerja, serta langkah-langkah keselamatan sebelum, selama, dan setelah pengelasan.

Training dan certification menjadi aspek kritis, memastikan pekerja memahami potensi bahaya, prosedur kerja yang benar, serta penggunaan *Personal Protective Equipment* (PPE) yang sesuai. Sistem *permit-to-work* juga diterapkan untuk pekerjaan las di area berisiko tinggi, seperti ruang terbatas (*confined space*) atau lingkungan dengan atmosfer eksplosif.

d. *Personal Protective Equipment* (PPE)

Pada pendekatan manajemen risiko pengelasan, *Personal Protective Equipment* (PPE) berperan sebagai lini pertahanan terakhir untuk melindungi pekerja dari bahaya langsung. Helm las auto-darkening menjadi perlengkapan esensial untuk melindungi mata dan wajah dari radiasi UV/IR serta percikan logam panas. Selain itu, gloves, aprons, dan boots digunakan untuk melindungi tangan, tubuh, dan kaki dari panas, percikan logam cair, dan slag yang dapat menyebabkan luka bakar atau

cedera mekanis. PPE ini dirancang sesuai dengan standar keselamatan agar tahan panas, tahan aus, dan ergonomis bagi pengguna.

Respirator atau fume mask digunakan untuk melindungi sistem pernapasan dari paparan asap las, partikel logam, dan gas berbahaya yang dihasilkan selama proses pengelasan. Perlindungan mata tambahan juga diperlukan untuk pekerjaan arc welding yang menghasilkan radiasi intens. Penggunaan PPE secara konsisten dan benar, dikombinasikan dengan kontrol engineering dan prosedur administratif, memastikan risiko cedera dan paparan berbahaya diminimalkan secara efektif di lingkungan kerja pengelasan.

2. Implementasi Keselamatan Kerja di Industri Modern

a. Industri Otomotif

Di industri otomotif modern, implementasi keselamatan kerja pada proses pengelasan telah mengalami transformasi signifikan melalui adopsi *Robotik* MIG/TIG welding. Dengan otomatisasi ini, interaksi langsung pekerja dengan sumber panas, percikan logam, dan asap las diminimalkan, sehingga risiko luka bakar, paparan gas berbahaya, dan cedera mekanis berkurang secara signifikan. *Robotik* juga memungkinkan proses pengelasan dilakukan dengan presisi tinggi dan konsisten, yang sekaligus mengurangi kebutuhan intervensi manual pada area berisiko tinggi.

Sensor monitoring terintegrasi dalam sistem *Robotik* dan jalur produksi untuk mendeteksi kondisi abnormal, seperti overheating, misalignment, atau potensi bahaya listrik. Data dari sensor ini memberikan peringatan dini sehingga tindakan korektif dapat dilakukan sebelum terjadi insiden. Pekerja juga diwajibkan mengikuti training rutin, termasuk prosedur keselamatan darurat dan pengoperasian adaptive welding systems. Kombinasi teknologi otomatisasi, sensor cerdas, dan pelatihan memastikan keselamatan pekerja tetap menjadi prioritas utama di lingkungan produksi otomotif yang modern dan berkecepatan tinggi.

b. Industri Minyak & Gas

Di industri minyak dan gas, keselamatan kerja dalam proses pengelasan menjadi sangat kritis, terutama karena banyak pekerjaan dilakukan di confined space yang memiliki risiko tinggi, seperti terbatasnya ventilasi dan potensi akumulasi gas berbahaya. Lingkungan ini meningkatkan peluang terjadinya kebakaran, ledakan, dan keracunan akibat paparan gas seperti karbon monoksida (CO) dan hidrogen sulfida (H₂S). Oleh karena itu, prosedur keselamatan yang ketat dan pengawasan terus-menerus menjadi keharusan untuk melindungi pekerja selama operasi pengelasan.

Untuk mitigasi risiko, gas monitoring sensors dipasang secara strategis untuk mendeteksi kehadiran CO, H₂S, dan defisiensi oksigen (O₂) secara real-time, memberikan peringatan dini sebelum kondisi menjadi kritis. Selain itu, sistem hot-work permits diterapkan, memastikan bahwa area pengelasan telah bebas dari bahan mudah terbakar, ventilasi memadai, dan semua prosedur keselamatan dipatuhi sebelum pekerjaan dimulai. Kombinasi monitoring sensor, prosedur izin kerja, dan protokol keselamatan menjadikan operasi pengelasan di sektor minyak dan gas lebih aman meskipun lingkungan sangat berisiko.

c. Industri Pelayaran

Di industri pelayaran, keselamatan kerja dalam pengelasan menjadi sangat penting karena lingkungan kerja yang luas dan sering bersifat outdoor maupun semi-enclosed, seperti galangan kapal. Penerapan *Friction Stir Welding* (FSW) dan robotic welding membantu mengurangi interaksi langsung pekerja dengan panas, percikan logam, dan slag, sehingga meminimalkan risiko luka bakar dan cedera fisik. Teknologi otomasi ini juga memungkinkan proses pengelasan lebih presisi dan konsisten, sambil menjaga pekerja tetap berada di zona aman.

Ventilasi yang memadai di galangan kapal diperlukan untuk mengurangi paparan fume logam, terutama pada pengelasan aluminium yang menghasilkan partikel halus dan gas berbahaya. Pekerja diwajibkan menggunakan PPE lengkap, termasuk gloves, face shield, respirator, dan ear protection, untuk melindungi dari radiasi, partikel logam, dan kebisingan

mesin. Kombinasi penggunaan teknologi otomatis, ventilasi, dan PPE memastikan keselamatan kerja tetap terjaga meskipun kondisi pengelasan di galangan kapal menantang.

d. Industri Konstruksi

Di industri konstruksi, keselamatan kerja dalam pengelasan menjadi aspek krusial karena kondisi proyek yang sering berada di ketinggian dan melibatkan struktur besar. *Submerged Arc Welding* (SAW) multi-pass umumnya dilakukan menggunakan remote control atau robotic system, sehingga operator tidak perlu berada dekat dengan busur listrik dan molten pool, mengurangi risiko luka bakar atau cedera akibat percikan logam. Penerapan teknologi otomatis ini juga memungkinkan pengelasan dilakukan dengan lebih presisi, konsisten, dan efisien tanpa menempatkan pekerja di zona berbahaya secara langsung.

Pekerjaan di ketinggian memerlukan fall protection, safety harness, dan SOP khusus untuk memastikan keamanan pekerja saat melakukan welding pada struktur tinggi. Monitoring distortion dan heat input juga penting untuk meminimalkan risiko kegagalan las yang dapat membahayakan pekerja di sekitarnya. Kombinasi otomatisasi, proteksi fisik, dan prosedur kerja standar menciptakan lingkungan pengelasan yang lebih aman dan efisien di sektor konstruksi.

B. Pengelolaan Limbah dan Gas Hasil Las

Pengelasan modern menghasilkan limbah padat, cair, dan gas yang dapat berdampak negatif terhadap kesehatan pekerja, kualitas lingkungan, dan regulasi industri (Knott *et al.*, 2023). Limbah tersebut berasal dari percikan logam, slag, flux, gas las, dan fume logam yang terbentuk selama proses pengelasan. Pengelolaan limbah dan gas hasil las merupakan bagian dari *Environmental, Health, and Safety* (EHS) management, yang menekankan prinsip *Reduce, Reuse, Recycle* (3R), dan pengendalian emisi. Proses pengelasan industri modern harus mematuhi regulasi internasional terkait emisi udara, pengelolaan limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun), dan keselamatan pekerja.

1. Strategi Pengelolaan Limbah dan Gas Hasil Las

a. *Engineering Control*

Pada proses pengelasan, *engineering control* menjadi strategi utama untuk mengelola limbah gas dan fume yang dihasilkan. Salah satu pendekatan paling efektif adalah fume extraction dan ventilasi, terutama melalui *Local Exhaust Ventilation* (LEV) yang dipasang dekat sumber panas untuk langsung menangkap partikel dan gas berbahaya. Sistem ini sering dilengkapi dengan filter HEPA atau *electrostatic precipitators*, yang mampu menyaring partikel ultrafine dari fume las, sehingga mengurangi risiko paparan bagi operator. Selain itu, penggunaan enclosure atau *welding booths* membantu menahan penyebaran fume ke area kerja umum, menciptakan lingkungan kerja yang lebih bersih dan aman.

Gas capture dan scrubbing juga diterapkan untuk mengontrol polutan berbahaya seperti CO, NO_x, dan O₃. Sistem wet scrubbers atau activated carbon filters mampu menyerap atau menetralkan gas-gas ini sebelum dilepaskan ke atmosfer. Dengan kombinasi teknologi ini, paparan operator terhadap gas dan partikel berbahaya dapat diminimalkan, sekaligus mendukung kepatuhan terhadap regulasi keselamatan kerja dan lingkungan. Implementasi kontrol teknik ini menjadi fondasi bagi pengelolaan limbah las yang efektif dan berkelanjutan.

b. *Administrative Control*

Administrative control merupakan strategi penting dalam pengelolaan limbah dan gas hasil las yang menekankan pada kebijakan, prosedur, dan pelatihan untuk meminimalkan risiko bagi pekerja. Salah satu langkah utama adalah penerapan *Standard Operating Procedures* (SOPs), seperti penggunaan gas inert sesuai standar dan prosedur penanganan slag maupun flux untuk mengurangi kontak langsung dengan material berbahaya. SOP ini memastikan setiap pekerja mengikuti praktik kerja yang konsisten, aman, dan sesuai regulasi, sehingga potensi paparan gas, partikel, dan residu las dapat diminimalkan secara signifikan.

Scheduling menjadi alat administratif yang efektif, misalnya dengan menjadwalkan proses pengelasan pada shift tertentu sehingga pekerja non-welder tidak terpapar secara langsung

terhadap fume dan gas berbahaya. Pelatihan rutin juga sangat penting, agar pekerja memahami risiko inhalasi, prosedur handling limbah, serta langkah-langkah darurat jika terjadi kecelakaan atau kebocoran gas. Dengan kombinasi SOP, penjadwalan, dan pelatihan, pengelolaan limbah las menjadi lebih terstruktur dan aman bagi seluruh tenaga kerja.

c. *Personal Protective Equipment (PPE)*

Personal Protective Equipment (PPE) menjadi garis pertahanan terakhir namun krusial dalam pengelolaan limbah dan gas hasil pengelasan, melindungi pekerja dari paparan langsung terhadap bahaya fisik, termal, dan kimia. Respirator atau masker khusus digunakan untuk menyaring partikel ultrafine, gas CO, NO_x, dan O₃ yang dihasilkan selama proses pengelasan, sehingga risiko inhalasi dapat diminimalkan. Sementara itu, welding helmet dengan filter UV/IR melindungi mata dan wajah dari radiasi berbahaya, percikan molten metal, dan slag, yang dapat menyebabkan luka atau kerusakan jaringan mata.

Perlindungan tubuh juga penting melalui gloves, apron, dan footwear yang tahan panas dan bahan kimia. Gloves memastikan tangan aman dari percikan panas dan slag, apron melindungi tubuh bagian depan dari radiasi panas dan percikan logam, sedangkan footwear khusus mencegah cedera akibat benda berat atau panas di area kerja. Kombinasi PPE ini, jika digunakan dengan disiplin dan tepat, secara signifikan menurunkan risiko cedera serta paparan limbah dan gas berbahaya selama proses pengelasan.

2. Pengelolaan Limbah Padat

Pengelolaan limbah padat dalam proses pengelasan merupakan aspek penting untuk menjaga keselamatan kerja sekaligus meminimalkan dampak lingkungan. Tahap pertama adalah klasifikasi limbah, yang membedakan antara limbah B3 (*hazardous waste*) dan non-B3. Limbah B3 meliputi slag, flux, dan filler metals yang mengandung logam berat berpotensi berbahaya jika tidak dikelola dengan benar. Sementara itu, limbah non-B3 seperti scrap logam, potongan electrode, dan material sisa yang masih bisa digunakan, dapat dikumpulkan untuk didaur ulang atau digunakan kembali, sehingga mengurangi tekanan pada lingkungan dan biaya operasional.

Strategi pengelolaan limbah padat dimulai dari prinsip reduce, yaitu meminimalkan limbah sejak awal dengan mengoptimalkan parameter welding seperti heat input, travel speed, dan filler feed rate. Optimalisasi ini tidak hanya mengurangi slag, spatter, dan sisa material, tetapi juga meningkatkan kualitas las dan efisiensi proses. Selanjutnya adalah reuse, yaitu memanfaatkan kembali scrap logam atau filler yang masih layak untuk dipakai kembali dalam proses produksi. Dengan pendekatan ini, limbah yang dihasilkan tetap berada dalam siklus produksi sehingga mengurangi volume limbah yang harus dibuang.

Tahap terakhir meliputi recycle dan disposal. Material seperti elektroda, flux, dan scrap logam yang tidak habis digunakan dapat dikembalikan ke supplier atau smelter untuk diolah kembali menjadi bahan baku. Sementara limbah B3 yang berbahaya harus diproses sesuai regulasi pemerintah dan standar lingkungan seperti EPA atau ISO 14001, memastikan tidak menimbulkan risiko kesehatan atau kontaminasi lingkungan. Implementasi strategi ini secara sistematis memungkinkan industri pengelasan untuk menjalankan operasi yang lebih berkelanjutan, aman, dan efisien.

3. Pengelolaan Gas Hasil Las

Pengelolaan gas hasil las menjadi aspek penting dalam keselamatan kerja dan perlindungan lingkungan di industri pengelasan. Salah satu strategi utama adalah capture dan filtration, di mana gas dan fume ditangkap sedini mungkin menggunakan *Local Exhaust Ventilation* (LEV). Sistem ini dipasang dekat area pengelasan untuk menyedot gas berbahaya sebelum menyebar ke lingkungan kerja. Selanjutnya, wet scrubber dan activated carbon digunakan untuk menyerap atau menetralkan gas berbahaya seperti NO_x, O₃, dan CO₂, sementara electrostatic precipitator mampu menangkap partikel logam ultrafine yang dapat menimbulkan risiko inhalasi bagi pekerja. Kombinasi metode ini memastikan sebagian besar gas dan partikel logam berbahaya dapat dikontrol sebelum mencemari udara.

Pengendalian gas proses menjadi langkah penting untuk meminimalkan pembentukan gas berbahaya. Pemilihan shielding gas yang ramah lingkungan, seperti campuran Ar/CO₂, dapat mengurangi terbentuknya ozon dan gas residu lainnya. Optimasi flow rate, heat input, dan parameter welding lainnya tidak hanya meningkatkan efisiensi las tetapi juga meminimalkan jumlah gas yang tidak terpakai

dan fume yang dihasilkan. Dengan pengaturan ini, energi panas digunakan secara efisien dan paparan gas berbahaya bagi pekerja dapat diminimalkan.

Monitoring konsentrasi gas secara real-time menjadi bagian penting dari strategi pengelolaan. Sensor gas dan sistem alarm otomatis memungkinkan deteksi dini jika konsentrasi gas tertentu melebihi batas aman. Hal ini tidak hanya melindungi kesehatan pekerja, tetapi juga memungkinkan implementasi tindakan korektif cepat, seperti meningkatkan ventilasi atau menghentikan proses pengelasan sementara. Dengan penerapan capture, filtration, pengendalian gas, dan monitoring secara terpadu, industri pengelasan dapat menjamin lingkungan kerja yang lebih aman, efisien, dan ramah lingkungan.

4. Pengelolaan Limbah Cair

Pengelolaan limbah cair dalam proses pengelasan merupakan aspek penting untuk menjaga keselamatan lingkungan dan efisiensi operasional industri. Limbah cair umumnya berasal dari coolant yang digunakan untuk mendinginkan komponen selama pengelasan dan residu pembersihan dengan air. Sebelum dibuang, limbah ini biasanya ditampung di settling tanks, di mana partikel padat yang terbawa akan mengendap. Selain itu, proses pH neutralization dilakukan untuk menetralkan sifat asam atau basa yang terkandung dalam limbah, sehingga aman bagi sistem pembuangan dan lingkungan.

Langkah berikutnya adalah filtrasi, yang bertujuan mengurangi kontaminan logam dan partikel lain yang masih tersuspensi dalam limbah cair. Berbagai jenis filter, termasuk media filter atau cartridge filter, digunakan untuk menangkap partikel berbahaya yang dapat mencemari perairan jika dibuang langsung. Pengendalian kualitas limbah cair melalui filtrasi juga memastikan bahwa limbah yang keluar memenuhi standar lingkungan dan regulasi pemerintah, seperti ISO 14001 atau peraturan lokal tentang pembuangan limbah industri.

Recycling limbah cair menjadi strategi penting untuk efisiensi sumber daya dan pengurangan limbah. Coolant yang telah digunakan dapat diproses ulang melalui filtrasi dan treatment kimia sehingga bisa digunakan kembali dalam proses pendinginan berikutnya. Air hasil pembersihan juga dapat dikondisikan dan dipakai kembali untuk washing atau cooling, mengurangi konsumsi air bersih. Dengan pendekatan terpadu berupa settling, netralisasi, filtrasi, dan recycling,

industri pengelasan tidak hanya memenuhi standar lingkungan tetapi juga meningkatkan efisiensi operasional serta keberlanjutan proses produksi.

C. Efisiensi Energi dalam Sistem Las

Efisiensi energi dalam pengelasan modern menjadi aspek krusial, seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan produktivitas tinggi, kualitas las optimal, dan keberlanjutan industri. Proses las tradisional dan modern, seperti MIG, TIG, laser welding, dan hybrid welding, memerlukan konsumsi energi listrik tinggi, terutama pada logam tebal dan proses multi-pass (Lippold, 2014). Efisiensi energi bukan hanya mengurangi biaya listrik, tetapi juga menurunkan emisi CO₂, heat input berlebih, dan risiko deformasi. Integrasi sensor, otomasi, dan kontrol adaptif mendukung *energy-efficient welding* sekaligus meningkatkan keselamatan kerja dan kualitas produk.

1. Optimasi Parameter Welding

Strategi efisiensi energi dalam proses pengelasan berfokus pada optimasi parameter welding agar heat input dapat digunakan secara efektif tanpa mengorbankan kualitas sambungan. Pemilihan parameter seperti arus listrik (*current*), tegangan (*voltage*), dan kecepatan travel disesuaikan dengan jenis material dan ketebalan plat untuk memastikan energi yang diberikan cukup untuk melebur logam tanpa pemborosan. Parameter yang tepat juga membantu meminimalkan distorsi, porosity, dan *cracking*, sehingga mengurangi kebutuhan rework dan penggunaan energi tambahan.

Pemantauan real-time melalui *sensor thermal, optical*, dan arc monitoring memungkinkan operator atau sistem otomatis mendeteksi kondisi overheat atau over-welding. Dengan data ini, sistem dapat menyesuaikan parameter secara adaptif, misalnya menurunkan arus atau meningkatkan travel speed, sehingga energi digunakan secara lebih efisien. Selain meningkatkan kualitas las, pendekatan ini juga mengurangi konsumsi energi yang tidak perlu dan memperpanjang umur peralatan welding.

2. Penggunaan Peralatan Inverter dan Power Modulation

Strategi efisiensi energi dalam pengelasan juga dapat dicapai melalui penggunaan peralatan inverter dan power modulation. Mesin las inverter menawarkan keunggulan signifikan dibandingkan mesin konvensional, termasuk efisiensi energi yang lebih tinggi dan stabilitas arus yang lebih baik. Dengan desain elektronik yang canggih, inverter mampu menyesuaikan output arus sesuai kebutuhan proses secara cepat, sehingga mengurangi energi yang terbuang. Selain itu, ukuran dan bobot mesin inverter lebih ringan, memudahkan mobilitas di lapangan dan mengurangi beban operasional tanpa mengorbankan performa las.

Teknologi pulsed TIG atau MIG menjadi strategi tambahan untuk mengurangi konsumsi energi. Daripada memberikan arus konstan, *Pulsed Welding* melepaskan arus dalam bentuk pulsa, sehingga rata-rata arus lebih rendah tanpa menurunkan penetrasi atau kualitas sambungan. Pendekatan ini tidak hanya menghemat energi sekitar 20–30% dibandingkan metode DC konstan, tetapi juga mengurangi panas berlebih pada material. Pengurangan heat input ini membantu mengontrol distorsi, residual stress, dan risiko porosity, sehingga sambungan lebih presisi dan memerlukan sedikit rework.

3. Otomasi dan Robotic Welding

Strategi efisiensi energi dalam pengelasan semakin efektif dengan otomasi dan penggunaan *Robotik welding*. *Robot welding* memungkinkan optimasi trajectory, sehingga jarak tempuh torch atau gun las diminimalkan dan waktu idle berkurang secara signifikan. Dengan pergerakan yang terprogram secara presisi, energi yang digunakan hanya untuk proses las aktual, mengurangi pemborosan akibat gerakan tidak perlu atau penyesuaian manual. Pendekatan ini sangat bermanfaat untuk produksi massal di industri otomotif, kapal, dan konstruksi, di mana sambungan las berulang dengan pola geometrik kompleks sering dilakukan.

Robotik welding dapat dilengkapi dengan adaptive control yang menyesuaikan parameter proses secara real-time. Sensor thermal, arc voltage, dan current monitoring bekerja bersama sistem kontrol untuk memastikan energi hanya digunakan saat material benar-benar molten. Travel speed, arus, dan tegangan disesuaikan otomatis sesuai kondisi material, ketebalan, dan heat input yang dibutuhkan. Dengan cara ini, over-welding dan overheat dapat dihindari, mengurangi konsumsi

energi sekaligus meningkatkan kualitas sambungan dan mengurangi risiko distorsi atau porosity.

4. Heat Input dan Thermal Efficiency

Heat input dan efisiensi termal merupakan faktor krusial dalam pengelasan modern karena memengaruhi kualitas sambungan, distorsi, dan konsumsi energi. Heat input (HI) dihitung dengan rumus: $HI = (\text{Voltage} \times \text{Current} \times 60) / (\text{Travel speed} \times 1000)$, yang menunjukkan energi yang diberikan per satuan panjang las. Besarnya HI menentukan pemanasan material, lebar HAZ, dan microstructure yang terbentuk. Pengaturan HI yang terlalu tinggi dapat menyebabkan overheating, meningkatkan residual stress, distorsi, dan porosity, sedangkan HI terlalu rendah dapat menghasilkan penetration tidak cukup dan fusion defect. Oleh karena itu, perhitungan HI yang akurat menjadi kunci dalam optimasi proses las untuk memastikan kualitas sambungan konsisten dan risiko cacat minimal.

Efisiensi termal (*thermal efficiency*) mengukur seberapa besar energi yang efektif masuk ke material dibandingkan total energi yang digunakan selama proses pengelasan. Berbagai metode pengelasan memiliki efisiensi berbeda; misalnya, *Laser Beam Welding* (LBW) memiliki thermal efficiency tinggi, sekitar 70–90%, karena konsentrasi energi pada area kecil dan penetrasi dalam. Sebaliknya, MIG konvensional hanya memiliki efisiensi sekitar 25–35% karena heat loss lebih besar melalui radiasi, konveksi, dan sputtering. Pemilihan metode las dengan efisiensi tinggi memungkinkan pengurangan konsumsi energi sekaligus mengurangi risiko distorsi dan *residual stress*.

D. Pengelasan Ramah Lingkungan (*Green Welding*)

Seiring meningkatnya kesadaran industri terhadap keberlanjutan, pengelasan ramah lingkungan atau green welding menjadi salah satu aspek krusial dalam manufaktur modern. Konsep green welding mencakup minimasi emisi gas dan partikel, pengurangan konsumsi energi, pemilihan material ramah lingkungan, dan integrasi proses otomatisasi untuk mengurangi limbah (DebRoy *et al.*, 2018). *Green welding tidak* hanya berfokus pada aspek lingkungan, tetapi juga meningkatkan keselamatan pekerja, menurunkan biaya operasional jangka panjang, dan memastikan kepatuhan terhadap regulasi emisi

internasional. Teknologi modern, termasuk *robotic welding*, *hybrid welding*, dan *additive manufacturing* berbasis laser, berperan utama dalam implementasi *green welding*.

1. Prinsip Green Welding

a. Minimasi Emisi dan Fume

Prinsip Green Welding menekankan pengurangan dampak lingkungan dan kesehatan melalui kontrol emisi dan fume. Salah satu strategi utama adalah menggunakan proses pengelasan dengan heat input rendah, seperti *Laser Beam Welding* (LBW) atau *Electron Beam Welding* (EBW). Proses ini menghasilkan fume dan gas sisa lebih sedikit dibandingkan pengelasan konvensional, sekaligus meminimalkan distorsi dan residu panas pada material. Selain itu, optimisasi penggunaan shielding gas misalnya campuran Ar/CO₂ yang tepat dapat secara signifikan mengurangi terbentuknya gas berbahaya seperti O₃, NO_x, dan CO₂, sehingga lingkungan kerja menjadi lebih aman bagi operator.

Langkah tambahan dalam minimasi fume adalah penerapan *Local Exhaust Ventilation* (LEV) yang efektif menangkap partikel ultrafine langsung di sumbernya. Sistem ini sering dilengkapi dengan filter HEPA untuk menahan partikel logam yang sangat kecil sebelum terdispersi ke area kerja. Kombinasi teknologi proses las efisien, gas optimal, dan ventilasi lokal menciptakan ekosistem kerja yang lebih ramah lingkungan dan sehat, sekaligus mendukung standar keselamatan modern di industri manufaktur.

b. Efisiensi Energi

Prinsip Green Welding juga menekankan efisiensi energi sebagai komponen penting dalam praktik pengelasan ramah lingkungan. Salah satu langkah utama adalah pengaturan heat input yang tepat, menyesuaikan arus, tegangan, dan travel speed sesuai material. Hal ini tidak hanya menjaga kualitas las, tetapi juga mengurangi konsumsi listrik secara signifikan dengan meminimalkan energi yang terbuang akibat overheating atau over-welding. Penggunaan metode hybrid welding, seperti kombinasi laser dengan MIG atau TIG, memungkinkan

penetrasi cepat dan presisi tinggi, sehingga total waktu pengelasan berkurang (Krivtsun *et al.*, 2015).

Pemanfaatan inverter welding machines menghadirkan efisiensi energi lebih tinggi dibandingkan transformator konvensional. Mesin inverter dapat menjaga arus stabil dengan respons cepat terhadap perubahan beban, sehingga lebih hemat listrik dan meningkatkan kualitas busur las.

c. Penggunaan Material Ramah Lingkungan

Pada prinsip green welding, penggunaan material ramah lingkungan menjadi salah satu strategi utama untuk mengurangi dampak negatif proses pengelasan terhadap manusia dan lingkungan. Pemilihan filler metals dan flux yang mengandung kadar rendah atau bebas dari heavy metals seperti kromium (Cr), nikel (Ni), dan kadmium (Cd) membantu menurunkan potensi kontaminasi logam berat serta fume berbahaya yang dihasilkan selama pengelasan. Selain itu, scrap logam yang dihasilkan dari proses produksi atau sisa material dapat didaur ulang, sehingga mengurangi kebutuhan ekstraksi bahan baku baru dan menekan jejak lingkungan industri manufaktur.

Pengembangan nano-materials dan smart alloys memungkinkan peningkatan kualitas las tanpa menambah energi input atau emisi gas berbahaya. Material ini dapat memberikan kekuatan mekanik tinggi, daya tahan terhadap korosi, dan kompatibilitas dengan metode pengelasan low-heat input seperti laser atau hybrid welding. Dengan kombinasi penggunaan material ramah lingkungan dan teknologi canggih, proses pengelasan menjadi lebih sustainable, efisien, dan aman bagi pekerja maupun lingkungan sekitar.

d. Pengelolaan Limbah

Pada prinsip green welding, pengelolaan limbah menjadi aspek krusial untuk menjaga keberlanjutan proses pengelasan. Limbah padat, seperti slag, flux, dan sisa filler metals, dikelola melalui pendekatan reduce, reuse, dan recycle. Reduksi limbah dicapai dengan optimasi parameter pengelasan untuk meminimalkan slag dan spatter. Limbah yang masih dapat digunakan kembali, seperti potongan logam dan scrap, dimanfaatkan kembali melalui proses re-melting atau dijadikan bahan filler. Sementara itu, limbah yang tidak bisa digunakan lagi disalurkan sesuai

regulasi pengelolaan limbah berbahaya untuk mengurangi dampak lingkungan.

Limbah cair seperti coolant dan air pencuci diproses melalui filtrasi dan pH neutralization sebelum dibuang, dan dapat didaur ulang untuk menghemat sumber daya. Gas hasil las, termasuk fume dan emisi berbahaya, dikendalikan dengan capture system, wet scrubber, atau filter HEPA untuk menangkap partikel ultrafine dan gas beracun sebelum terlepas ke udara.

e. Otomasi dan Adaptive Control

Pada konteks green welding, otomasi dan adaptive control berperan penting untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi limbah. Penggunaan *Robot welding* dilengkapi sensor canggih memungkinkan pengelasan yang konsisten dan presisi, sehingga mengurangi kesalahan operator yang biasanya menyebabkan rework atau cacat las. Dengan proses yang lebih stabil, jumlah slag, spatter, dan bahan filler yang terbuang dapat diminimalkan, mendukung prinsip reduce dan reuse dalam pengelolaan limbah. *AI-based adaptive control* memungkinkan pengaturan parameter pengelasan secara real-time, termasuk arc voltage, current, dan travel speed. Sistem ini menyesuaikan heat input sesuai kondisi material dan geometri, sehingga energi digunakan secara optimal tanpa berlebihan.

2. Teknologi Green Welding

a. *Laser Beam Welding* (LBW)

Laser Beam Welding (LBW) merupakan salah satu teknologi *green welding* yang menonjol karena efisiensi energi dan kualitas lasnya. Proses ini menghasilkan penetrasi yang cepat sehingga heat affected zone (HAZ) lebih kecil dibanding metode konvensional, yang berarti energi yang digunakan untuk melebur material lebih optimal. Dengan input panas yang terkontrol, distorsi dan residual stress pada material juga berkurang, sehingga kebutuhan perbaikan atau rework menjadi minimal. Keunggulan ini menjadikan LBW pilihan tepat untuk material tipis maupun superalloy yang sensitif terhadap deformasi termal.

LBW menghasilkan fume dan slag yang minimal, sehingga lingkungan kerja menjadi lebih bersih dan aman bagi operator.

Penggunaan filler material juga dapat dikurangi karena penetrasi laser yang dalam memungkinkan penggabungan material secara efektif. Kombinasi efisiensi energi, pengurangan limbah, dan presisi tinggi membuat LBW sangat sesuai dengan prinsip green welding, mendukung pengelolaan sumber daya yang berkelanjutan dan mengurangi dampak lingkungan.

b. *Electron Beam Welding (EBW)*

Electron Beam Welding (EBW) adalah teknologi *green welding* yang menawarkan efisiensi energi tinggi melalui proses pengelasan di vacuum, sehingga kehilangan panas ke lingkungan dapat diminimalkan. Dengan konsentrasi energi yang tinggi, EBW mampu menghasilkan penetrasi dalam pada material dengan input panas yang lebih rendah dibanding metode konvensional. Hal ini tidak hanya mengurangi konsumsi energi tetapi juga menurunkan distorsi dan residual stress, menjadikan proses lebih presisi dan ramah lingkungan. Proses EBW juga menurunkan emisi gas rumah kaca, sehingga CO₂ footprint dari operasi pengelasan dapat diminimalkan. Keunggulan EBW sangat sesuai untuk industri yang menuntut akurasi tinggi, seperti aerospace dan komponen presisi tinggi. Karena proses dilakukan di vacuum, oksidasi dan kontaminasi pada las dapat dihindari, mengurangi kebutuhan rework dan scrap.

c. *Friction Stir Welding (FSW)*

Friction Stir Welding (FSW) merupakan teknologi *green welding* berbasis solid-state, yang berarti logam disambungkan tanpa meleleh. Karena tidak terjadi pencairan material, proses ini hampir tidak menghasilkan fume atau gas berbahaya, sehingga lingkungan kerja lebih aman dan bersih. Selain itu, FSW memiliki heat input rendah, sehingga konsumsi energi relatif minimal dibanding metode las tradisional. Energi yang efisien ini juga mengurangi distorsi dan residual stress, menjadikan FSW cocok untuk aplikasi yang menuntut dimensi presisi dan kualitas mekanik tinggi, seperti pada aluminium dan magnesium alloys.

Keuntungan lainnya adalah limbah padat yang sangat rendah, karena FSW tidak memerlukan flux, filler metal, atau shielding gas, sehingga material yang digunakan dapat dioptimalkan dan

sis material diminimalkan. Hal ini mendukung prinsip green manufacturing dengan mengurangi kebutuhan daur ulang atau pembuangan limbah.

d. *Hybrid Welding* (Laser + MIG/TIG)

Hybrid Welding yang menggabungkan laser beam dengan MIG/TIG merupakan inovasi penting dalam *green welding*. Kombinasi ini memanfaatkan kecepatan penetrasi laser dan stabilitas busur MIG/TIG, sehingga heat input dapat diminimalkan tanpa mengorbankan kualitas sambungan. Dengan pengaturan yang tepat, proses ini menghasilkan fume dan slag lebih sedikit, menjadikan lingkungan kerja lebih bersih dan aman. Selain itu, energi yang digunakan lebih efisien karena kombinasi metode memungkinkan penetrasi cepat dengan penggunaan listrik yang lebih rendah dibandingkan las konvensional.

Penerapan *Hybrid Welding* banyak ditemukan pada industri automotive panels dan aerospace skin, di mana presisi, efisiensi energi, dan minimisasi distorsi menjadi prioritas. Selain aspek lingkungan, *Hybrid Welding* juga meningkatkan produktivitas, karena kecepatan pengelasan lebih tinggi dan risiko rework akibat cacat las berkurang.

e. *Additive Manufacturing* dengan *Laser Cladding*

Additive Manufacturing (AM) dengan laser cladding merupakan salah satu teknologi green welding yang menekankan efisiensi material dan energi. Proses ini menambahkan material secara layer-by-layer, sehingga mengurangi limbah dan scrap logam dibandingkan metode konvensional. Heat input dikontrol secara presisi, memungkinkan efisiensi energi tinggi dan meminimalkan area *heat affected zone* (HAZ), sehingga distorsi dan residual stress berkurang.

Teknologi ini sangat cocok untuk repair atau coating komponen kritis, seperti permukaan yang aus, turbin, atau dies, karena hanya material yang diperlukan yang ditambahkan. Selain itu, AM dengan laser cladding mengurangi kebutuhan material baru, mendukung prinsip sustainability, dan memungkinkan perbaikan komponen mahal tanpa harus mengganti seluruh bagian. Integrasi sensor dan kontrol adaptif semakin

meningkatkan akurasi proses, mengurangi energi terbuang, dan meminimalkan risiko cacat las.



BAB XII

MANAJEMEN KEUANGAN DAN ANALISIS PENDIRIAN USAHA PENGELASAN

Pendirian usaha pengelasan modern tidak hanya bergantung pada kemampuan teknis, tetapi juga pada perencanaan bisnis dan manajemen keuangan yang matang. Konsep perencanaan bisnis mencakup penentuan segmen pasar, model layanan, pemilihan metode pengelasan, dan strategi operasional yang efektif. Sebuah usaha pengelasan harus mempertimbangkan target industri, mulai dari otomotif, konstruksi, minyak & gas, hingga manufaktur presisi. Perencanaan bisnis yang matang juga meliputi analisis biaya awal, kebutuhan modal kerja, dan proyeksi pertumbuhan usaha, sehingga investor dan pemilik usaha dapat mengambil keputusan yang tepat dan terukur.

Analisis kelayakan investasi menjadi elemen penting untuk memastikan usaha pengelasan dapat menghasilkan keuntungan yang optimal. Metode analisis ini mencakup perhitungan modal awal, *Return on Investment* (ROI), dan *Break Even Point* (BEP), serta proyeksi arus kas untuk periode tertentu. Evaluasi ini membantu pengusaha memahami risiko finansial, menentukan strategi pendanaan, dan menyesuaikan kapasitas produksi dengan permintaan pasar. Analisis kelayakan yang cermat juga menjadi dasar untuk pengambilan keputusan dalam pembelian peralatan pengelasan modern, otomasi, atau sistem robotik, sehingga investasi dapat memberikan hasil maksimal.

A. Konsep dan Perencanaan Bisnis Jasa Pengelasan

Pendirian usaha pengelasan modern memerlukan perencanaan bisnis yang matang, karena industri ini tidak hanya berkaitan dengan

aspek teknis las, tetapi juga dengan manajemen keuangan, strategi pemasaran, regulasi keselamatan, dan keberlanjutan operasional (Meredith & Shafer, 2021). Perencanaan bisnis berfungsi untuk menentukan visi, misi, target pasar, serta alokasi sumber daya modal dan tenaga kerja, sehingga usaha pengelasan dapat beroperasi secara efisien dan menguntungkan. Usaha pengelasan dapat bersifat jasa onsite (lapangan, industri konstruksi atau manufaktur) maupun jasa workshop (bengkel las, reparasi logam, produksi komponen).

Usaha jasa pengelasan adalah aktivitas ekonomi yang menyediakan layanan penyambungan logam atau material lain menggunakan berbagai teknik las, mulai dari proses tradisional seperti SMAW/MIG/TIG hingga metode modern berbasis energi tinggi seperti laser welding dan electron beam welding. Karakteristik utama jasa pengelasan:

1. Teknis dan Spesifik: membutuhkan keterampilan operator dan pemahaman material.
2. Variabel Kualitas: kualitas las sangat bergantung pada parameter proses dan keahlian tenaga kerja.
3. Berbasis Proyek dan Permintaan: pekerjaan dapat bersifat one-off atau produksi massal.

Jenis-jenis layanan pengelasan seperti:

1. Jasa Reparasi: perbaikan komponen logam, struktur baja, atau kendaraan.
2. Jasa Produksi Komponen: pembuatan tangki, rangka baja, atau part industri.
3. Jasa Konstruksi dan Infrastruktur: pengelasan pipeline, jembatan, dan struktur industri.
4. Jasa Spesialis *Advanced Welding*: *hybrid welding*, *laser welding*, atau *additive manufacturing welding*.

Perencanaan bisnis meliputi analisis pasar, strategi pemasaran, manajemen SDM, dan perencanaan keuangan.

1. Analisis Pasar

Analisis pasar merupakan langkah fundamental untuk memastikan usaha jasa pengelasan berkembang secara kompetitif dan berkelanjutan. Langkah pertama adalah mengidentifikasi target pelanggan secara jelas, mencakup industri otomotif, konstruksi, manufaktur, energi, hingga pertambangan. Setiap sektor memiliki

karakteristik kebutuhan yang berbeda otomotif membutuhkan presisi tinggi dan teknologi modern seperti robotic welding, sedangkan pertambangan membutuhkan sambungan kuat untuk peralatan berat. Pemahaman ini memungkinkan perusahaan menentukan fokus layanan dan alokasi investasi teknologi secara lebih tepat.

Dilakukan evaluasi kebutuhan pasar untuk mengetahui jenis layanan yang paling diminati, seperti reparasi komponen, produksi massal, fabrikasi khusus, atau konsultasi teknik pengelasan. Tren industri saat ini menunjukkan meningkatnya permintaan terhadap proses yang lebih cepat, lebih hemat energi, dan kualitas sambungan tinggi, terutama untuk manufaktur yang menerapkan automasi dan green manufacturing. Analisis kebutuhan ini juga harus mempertimbangkan tingkat urgensi layanan onsite, permintaan teknologi welding berpresisi tinggi seperti laser atau TIG, serta kebutuhan perawatan alat berat di sektor konstruksi dan energi.

Aspek terakhir adalah analisis kompetitor dan segmentasi layanan. Perbandingan harga, kapasitas produksi, teknologi yang digunakan, serta kualitas hasil pengelasan menjadi dasar untuk menentukan posisi kompetitif perusahaan. Selain itu, segmentasi layanan dapat dibedakan menjadi small-scale vs large-scale, onsite vs workshop, serta tradisional vs high-tech welding. Dengan segmentasi yang jelas, perusahaan dapat fokus pada niche market tertentu—misalnya layanan otomasi untuk industri besar atau reparasi cepat untuk sektor konstruksi.

2. Strategi Pemasaran

Strategi pemasaran dalam jasa pengelasan harus dibangun melalui branding dan reputasi yang kuat. Kepemilikan sertifikasi internasional seperti ISO 9001, AWS (*American Welding Society*), atau kualifikasi NDT (*Non-Destructive Testing*) menjadi faktor kunci untuk meningkatkan kepercayaan pelanggan. Sertifikasi tersebut menunjukkan bahwa proses kerja perusahaan mengikuti standar kualitas dan keselamatan global, sehingga klien dari sektor otomotif, konstruksi, maupun minyak dan gas merasa lebih aman bekerja sama. Selain itu, reputasi dapat diperkuat melalui portofolio proyek, testimoni pelanggan, serta konsistensi hasil pengelasan yang presisi dan tahan lama.

Penentuan harga juga menjadi elemen penting dalam strategi pemasaran. Harga perlu dihitung berdasarkan biaya produksi, konsumsi energi, waktu pengerjaan, serta margin keuntungan yang diharapkan. Pendekatan berbasis value bukan hanya biaya juga menjadi strategi efektif, terutama jika perusahaan menawarkan teknologi green welding, robotic welding, atau proses berkualitas tinggi seperti TIG dan laser. Perusahaan dapat menyediakan variasi paket harga untuk kebutuhan berbeda, mulai dari layanan fabrikasi ringan hingga proyek skala besar. Transparansi harga dan perincian layanan akan meningkatkan kepercayaan dan mempermudah pelanggan dalam mengambil keputusan.

Dari sisi promosi, perusahaan perlu memanfaatkan digital marketing seperti website profesional, media sosial, dan iklan berbasis target industri. Kolaborasi dengan kontraktor, bengkel otomotif, dan perusahaan manufaktur juga memperluas jangkauan pasar. Penawaran paket maintenance dan repair jangka panjang dapat meningkatkan loyalitas pelanggan, terutama untuk industri yang membutuhkan inspeksi rutin. Selain itu, membangun network industri dengan supplier logam, asosiasi pengelasan, dan kelompok profesi memberikan akses pada peluang tender, update teknologi baru, serta potensi kerja sama strategis.

3. Perencanaan Teknis

Perencanaan teknis dalam usaha jasa pengelasan dimulai dengan pemilihan peralatan yang tepat sesuai kebutuhan segmen pasar. Untuk pekerjaan konstruksi umum, peralatan SMAW menjadi pilihan karena fleksibel dan efisien di lapangan. Untuk industri manufaktur dan otomotif, MIG dan TIG menawarkan kualitas sambungan lebih presisi dan kecepatan tinggi. Sementara itu, sektor berteknologi tinggi seperti aerospace atau komponen presisi dapat memanfaatkan laser welding atau bahkan robotic welding untuk mencapai akurasi tinggi serta konsistensi produksi. Pemilihan teknologi yang tepat ini tidak hanya meningkatkan kualitas hasil, tetapi juga menentukan efisiensi waktu, biaya, dan tingkat keselamatan kerja.

Fasilitas workshop juga membutuhkan perencanaan yang matang, termasuk layout area las yang aman dan memenuhi standar keselamatan. Workshop harus memiliki ventilasi memadai, sistem *local exhaust ventilation* (LEV), dan fasilitas pemadam kebakaran untuk

mengurangi risiko paparan fume dan bahaya kebakaran. Kepatuhan pada standar keselamatan dan lingkungan sangat krusial dalam operasi pengelasan modern, terutama terkait manajemen fume logam berat. Selain itu, ruang penyimpanan material dan gas harus dirancang mengikuti regulasi B3 serta standar industri untuk memastikan keamanan operator dan lingkungan sekitar.

Komponen penting lainnya adalah pemeliharaan dan upgrade teknologi secara berkala. Penggunaan inverter welding machines, sensor monitoring, dan otomasi meningkatkan efisiensi energi dan konsistensi kualitas sambungan. Perusahaan juga harus selalu mengikuti standar kualitas internasional, seperti AWS D1.1 untuk struktur baja, ISO 3834 untuk sistem manajemen mutu pengelasan, dan ISO 14001 untuk pengelolaan lingkungan.

4. Manajemen Sumber Daya Manusia

Manajemen sumber daya manusia (SDM) berperan penting dalam keberhasilan usaha jasa pengelasan, terutama karena kualitas hasil las sangat bergantung pada kompetensi operator. Oleh karena itu, perusahaan harus memastikan bahwa operator las memiliki sertifikasi resmi, seperti dari BNSP, AWS, atau lembaga pelatihan industri lainnya. Sertifikasi ini menjamin bahwa pekerja memahami prinsip dasar pengelasan, teknik spesifik sesuai proses (SMAW, MIG, TIG, FSW, atau laser), serta prosedur keselamatan kerja. Selain itu, operator wajib memahami aspek risiko, seperti paparan fume, radiasi, dan bahaya listrik, sehingga pelaksanaan pekerjaan dapat dilakukan dengan aman dan sesuai standar operasional.

Training berkala juga menjadi bagian kunci dari strategi pengembangan SDM, terutama karena teknologi pengelasan terus berkembang menuju otomasi, digitalisasi, dan sistem cerdas. Pekerja perlu diperbarui pengetahuannya mengenai penggunaan robotic welding, *AI-based monitoring*, *adaptive welding control*, serta perangkat inspeksi *non-destruktif* (NDT) modern. Dengan pelatihan rutin, perusahaan dapat memastikan bahwa tenaga kerja selalu siap menghadapi tuntutan pekerjaan yang semakin kompleks dan memanfaatkan teknologi terbaru untuk meningkatkan produktivitas dan kualitas hasil. Pelatihan ini tidak hanya meningkatkan kompetensi teknis, tetapi juga menumbuhkan budaya kerja yang aman, efisien, dan responsif terhadap perubahan teknologi.

B. Analisis Kelayakan Investasi (Modal Awal, ROI, dan *Break Even Point*)

Tingginya tingkat persaingan usaha menjadikan seorang wiraswasta harus berusaha menjadi produktif, memiliki kemandirian yang tinggi, dan mampu melihat peluang dan tantangan yang ada. Strategi pemasaran yang baik akan menjamin kelancaran pada aktivitas penjualan yang dilakukan (Sylvi *et al.*, 2022).

Pada pendirian usaha pengelasan, analisis kelayakan investasi menjadi tahap krusial untuk memastikan bahwa modal yang ditanamkan menghasilkan keuntungan yang memadai, risiko dapat diminimalkan, dan operasional dapat berjalan secara berkelanjutan (Brigham, 2020). Analisis ini mencakup evaluasi modal awal, estimasi *return on investment* (ROI), serta perhitungan *break-even point* (BEP). Investasi dalam usaha pengelasan modern tidak hanya meliputi peralatan dasar seperti SMAW, MIG, TIG, tetapi juga peralatan robotik, laser welding, electron beam welding, sensor monitoring, serta sistem keamanan dan lingkungan (*green welding*) yang meningkatkan efisiensi energi dan keselamatan.

1. Modal Awal (*Initial Capital Investment*)

Modal awal adalah seluruh biaya yang diperlukan untuk memulai usaha, termasuk peralatan, fasilitas, sumber daya manusia, dan modal kerja awal. Kategori modal awal

- a. Peralatan dan Mesin
 - 1) *Welding machine*: SMAW, MIG, TIG, laser, EBW, *robotic welding system*.
 - 2) Fasilitas pendukung: *exhaust system, workshop tools, CNC workstation, safety equipment*.
 - 3) *Software & monitoring*: *welding simulation, CAD/CAE integration, sensor-based control*.
- b. Fasilitas dan Infrastruktur
 - 1) Workshop/lokasi operasi.
 - 2) Gudang dan area penyimpanan material.
 - 3) Ventilasi dan sistem keselamatan kerja (*fire suppression, fume extraction*).
- c. Sumber Daya Manusia
 - 1) Operator bersertifikat AWS/ISO.

- 2) Supervisor teknis.
 - 3) Tenaga administrasi dan keuangan.
- d. Modal Kerja Awal
- 1) Pembelian bahan baku: logam, flux, shielding gas.
 - 2) Biaya listrik, air, dan utilitas.
 - 3) Promosi awal dan pemasaran.
- e. Estimasi Modal Awal

Skala Usaha	Modal Awal (USD)	Keterangan
Workshop kecil	30,000–50,000	MIG/TIG tradisional, 2–3 operator
Workshop menengah	100,000–200,000	Hybrid welding, laser cladding, sensor-based monitoring
Workshop besar	>500,000	Robotic welding, EBW, integrasi AI/IoT, advanced safety & green welding

Catatan: Modal awal lebih tinggi untuk teknologi canggih karena efisiensi energi, kualitas las tinggi, dan potensi produktivitas lebih besar.

2. Return on Investment (ROI)

ROI adalah indikator utama keberhasilan investasi, menunjukkan persentase keuntungan dibandingkan modal yang ditanamkan.

- a. Rumus ROI

$$ROI(\%) = \frac{\text{Laba Bersih Tahunan}}{\text{Modal Awal}} \times 100$$

- 1) Laba Bersih Tahunan = Pendapatan – Biaya Operasional – Depresiasi – Pajak
 - 2) Modal Awal = Total investasi termasuk peralatan, fasilitas, dan modal kerja awal
- b. Faktor yang Mempengaruhi ROI
- 1) Efisiensi Energi dan Material: Hybrid laser-MIG atau *robotic welding* → mengurangi konsumsi energi 20–30%, mengurangi scrap logam → profit margin lebih tinggi (DebRoy *et al.*, 2018).

- 2) Produktivitas Tenaga Kerja: *Robotik* dan sensor → mengurangi rework → output lebih banyak per jam kerja.
 - 3) Pricing dan Market Demand: Jasa spesialis seperti laser welding atau additive manufacturing → harga per joint lebih tinggi.
 - 4) Biaya Operasional: Gaji operator, utilitas, pemeliharaan, dan bahan habis pakai.
- c. Contoh Perhitungan ROI
- 1) Modal awal workshop menengah: USD 150,000
 - 2) Pendapatan tahunan: USD 120,000
 - 3) Biaya operasional tahunan: USD 60,000
 - 4) Laba bersih tahunan: USD 60,000

$$ROI = \frac{60000}{150000} \times 100 = 40\%$$

Interpretasi: ROI 40% → investasi menguntungkan dengan waktu balik modal ±2,5 tahun.

3. *Break-Even Point (BEP)*

BEP adalah volume pendapatan di mana total pendapatan = total biaya, menandakan titik tanpa rugi atau untung.

- a. Rumus BEP

$$BEP = \frac{\text{Biaya Tetap Tahunan}}{\text{Harga per Unit} - \text{Biaya Variabel per Unit}}$$

- 1) Biaya Tetap: Depresiasi mesin, gaji staf tetap, sewa, asuransi.
 - 2) Biaya Variabel: Consumables, energi per joint, maintenance per produksi unit.
 - 3) Harga per Unit: Tarif jasa per weld/joint atau proyek.
- b. Contoh Perhitungan BEP

- 1) Biaya tetap: USD 50,000/tahun
- 2) Biaya variabel: USD 20/unit
- 3) Harga jasa las: USD 50/unit

$$BEP = \frac{50000}{50 - 20} = \frac{50000}{30} \approx 1,667 \text{ unit/tahun}$$

Interpretasi: Workshop harus menyelesaikan minimal 1,667 joint/tahun untuk menutupi biaya tetap dan variabel.

- c. Analisis Sensitivitas BEP

Analisis sensitivitas BEP penting untuk memahami bagaimana perubahan variabel kunci seperti harga jual, biaya bahan baku, atau kapasitas produksi dapat memengaruhi titik impas suatu usaha pengelasan. Ketika harga bahan naik atau biaya operasi meningkat, total biaya variabel ikut bertambah sehingga BEP akan bergeser lebih tinggi. Sebaliknya, peningkatan kapasitas produksi atau efisiensi kerja dapat menurunkan biaya per unit, sehingga titik impas menjadi lebih rendah. Dengan memahami hubungan ini, manajemen dapat mengambil keputusan strategis yang lebih akurat dalam mengendalikan biaya dan menjaga margin keuntungan.

Analisis sensitivitas sering dikombinasikan dengan scenario planning, yaitu memproyeksikan BEP pada tiga kondisi berbeda: optimis, realistis, dan pesimis. Melalui pendekatan ini, perusahaan dapat menilai risiko usaha serta kesiapan menghadapi fluktuasi pasar atau biaya produksi. Penggunaan teknologi pengelasan yang efisien seperti *inverter welding machine* atau *robotic welding* secara langsung menurunkan biaya variabel, sehingga mempercepat tercapainya titik impas dan meningkatkan stabilitas finansial. Pendekatan ini memastikan usaha tetap kompetitif meski menghadapi dinamika biaya dan permintaan.

4. Evaluasi Kelayakan Investasi

a. Kriteria Evaluasi

- 1) $ROI \geq 20\text{--}30\%$ → umumnya dianggap layak untuk usaha kecil-menengah (Brigham, 2020).
- 2) BEP tercapai dalam 1–3 tahun → investasi dianggap aman.
- 3) Payback period (PP): waktu yang diperlukan untuk modal kembali → ideal <5 tahun.
- 4) Profitabilitas jangka panjang → mempertimbangkan pertumbuhan pasar dan inovasi teknologi.

b. Faktor Risiko

Faktor risiko menjadi aspek krusial dalam evaluasi kelayakan investasi usaha pengelasan. Salah satu risiko utama adalah fluktuasi harga logam, yang dapat secara signifikan mempengaruhi biaya variabel produksi. Kenaikan harga bahan baku tanpa peningkatan harga jual akan menekan margin

keuntungan. Selain itu, persaingan industri yang ketat dapat menurunkan tarif jasa las, sehingga mengurangi potensi pendapatan. Perusahaan harus mempertimbangkan strategi mitigasi, seperti kontrak pasokan jangka panjang atau diversifikasi layanan, untuk mengurangi dampak risiko ini.

Risiko operasional juga perlu diperhatikan. Penggunaan peralatan canggih, termasuk *robotic welding* atau *laser systems*, meningkatkan efisiensi tetapi juga membawa risiko downtime akibat kerusakan atau maintenance. Demikian pula, regulasi keselamatan dan lingkungan yang semakin ketat menuntut investasi tambahan untuk compliance, seperti sistem ventilasi, PPE, dan pengelolaan limbah. Evaluasi risiko secara menyeluruh memungkinkan perusahaan menyiapkan rencana kontinjensi dan menjaga stabilitas operasional serta finansial.

c. Strategi Mitigasi Risiko

Strategi mitigasi risiko merupakan elemen penting dalam memastikan kelayakan investasi di sektor pengelasan. Salah satu pendekatan efektif adalah diversifikasi layanan, mencakup repair, onsite welding, maupun robotic welding. Dengan variasi layanan, perusahaan tidak bergantung pada satu segmen pasar sehingga dapat menahan fluktuasi permintaan. Selain itu, pemeliharaan preventif peralatan menjadi langkah kunci untuk mengurangi risiko downtime, memastikan produksi tetap lancar, dan meminimalkan kerugian akibat gangguan operasional.

Perlindungan finansial dan operasional dapat diperkuat melalui asuransi industri, yang mencakup risiko kebakaran, kecelakaan, dan tanggung jawab proyek (*liability*). Strategi investasi bertahap juga dianjurkan: memulai dari workshop kecil dan kemudian melakukan upgrade ke sistem hybrid atau robotic welding sesuai pertumbuhan permintaan dan kapasitas finansial.

C. Manajemen Keuangan, Operasional dan Sumber Daya Manusia

Keberhasilan usaha pengelasan tidak hanya bergantung pada kualitas teknis las, tetapi juga pengelolaan keuangan yang efisien, manajemen operasional yang terstruktur, dan sumber daya manusia (SDM) yang kompeten (Meredith & Shafer, 2021). Sektor jasa

pengelasan modern menghadapi tantangan kompleks: modal awal tinggi, teknologi canggih, risiko keselamatan kerja, serta fluktuasi harga material logam.

1. Manajemen Keuangan

a. Perencanaan Keuangan

Perencanaan keuangan menjadi fondasi utama dalam manajemen usaha pengelasan, memastikan ketersediaan dana yang cukup untuk operasional, investasi, dan pengembangan teknologi. Salah satu aspek penting adalah forecasting pendapatan, yang dilakukan dengan menganalisis segmentasi pasar, seperti workshop, industri otomotif, aerospace, dan konstruksi. Proyeksi pendapatan didasarkan pada tarif jasa per joint atau per proyek serta volume proyek tahunan. Misalnya, layanan robotic welding biasanya dikenakan tarif antara USD 50–100 per joint, sementara hybrid laser welding berada di kisaran USD 80–150 per joint.

Estimasi biaya operasional menjadi langkah penting berikutnya. Biaya tetap mencakup gaji operator, sewa gedung, depresiasi peralatan, dan asuransi, sementara biaya variabel meliputi bahan habis pakai, listrik, gas shielding, dan maintenance harian. Pemisahan biaya tetap dan variabel membantu manajemen untuk mengidentifikasi potensi penghematan dan melakukan kontrol biaya lebih efektif. Analisis ini juga mempermudah evaluasi profitabilitas setiap jenis layanan, dari SMAW tradisional hingga robotic atau *Hybrid Welding* yang lebih canggih.

Modal kerja dan likuiditas merupakan elemen ketiga dalam perencanaan keuangan. Menjaga ketersediaan dana operasional harian penting untuk kelancaran aktivitas, termasuk pembelian material, pembayaran gaji, dan pengadaan energi. Selain itu, perusahaan perlu menyiapkan buffer untuk cadangan biaya tak terduga, seperti fluktuasi harga logam, kerusakan peralatan, atau kebutuhan maintenance mendadak.

b. Pengendalian Keuangan

Pengendalian keuangan merupakan elemen penting dalam manajemen usaha pengelasan untuk memastikan operasi berjalan lancar dan risiko finansial diminimalkan. Salah satu

langkah utama adalah monitoring arus kas, yang bertujuan menjaga saldo kas tetap positif, menjamin pembayaran tepat waktu kepada supplier, dan mencegah keterlambatan proyek akibat kekurangan dana. Pemantauan ini juga memungkinkan manajemen mengantisipasi kebutuhan modal kerja tambahan, terutama saat menghadapi fluktuasi volume proyek atau harga material. Dengan arus kas yang sehat, perusahaan dapat menjaga kelancaran operasional sekaligus meningkatkan kepercayaan pelanggan dan mitra bisnis.

Analisis varians antara anggaran dan realisasi menjadi alat penting untuk mengevaluasi efektivitas pengeluaran dan pengalokasian sumber daya. *Key Performance Indicators* (KPI) keuangan seperti *Return on Investment* (ROI), margin keuntungan, *break-even point* (BEP), dan *payback period* membantu manajemen menilai profitabilitas dan efisiensi investasi.

c. Investasi dan Strategi Pembiayaan

Investasi dalam teknologi canggih menjadi kunci untuk meningkatkan produktivitas, kualitas, dan efisiensi dalam industri pengelasan modern. Perusahaan yang mengadopsi robotic welding, laser beam welding, dan sistem sensor monitoring dapat meminimalkan kesalahan operator, mengurangi limbah, serta meningkatkan konsistensi hasil las. Selain itu, teknologi ini memungkinkan pemantauan real-time terhadap heat input, travel speed, dan kondisi material, sehingga proses pengelasan lebih aman, efisien, dan ramah lingkungan. Keuntungan jangka panjang dari investasi ini tidak hanya terlihat pada peningkatan kualitas produk, tetapi juga pada penghematan energi dan biaya operasional.

Strategi pembiayaan untuk investasi tersebut harus mempertimbangkan kombinasi modal sendiri, pinjaman bank, leasing peralatan, atau partisipasi investor. Setiap opsi memiliki risiko dan manfaat tersendiri, seperti bunga pinjaman, fleksibilitas leasing, dan ekspektasi return investor. Evaluasi risiko yang cermat mencakup fluktuasi harga logam, biaya energi, serta potensi downtime peralatan.

d. Penerapan Teknologi Informasi

Penerapan teknologi informasi dalam manajemen keuangan, khususnya melalui sistem ERP (Enterprise Resource Planning) atau software akuntansi modern, menjadi salah satu langkah strategis untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi pengelolaan finansial. Sistem ini memungkinkan perusahaan memantau biaya dan pendapatan secara real-time, sehingga manajer keuangan dapat segera mengambil keputusan berbasis data terkini. Integrasi antara modul keuangan dan operasional memastikan bahwa setiap transaksi tercatat dengan konsisten, mengurangi risiko kesalahan manual, dan menghasilkan laporan keuangan yang lebih akurat serta transparan.

Teknologi informasi membantu pengendalian persediaan material, terutama bahan habis pakai seperti elektroda, shielding gas, dan logam filler, sehingga pemborosan dapat diminimalkan. Dengan monitoring persediaan secara otomatis dan prediksi kebutuhan material, perusahaan dapat menyesuaikan pembelian dengan produksi aktual, mengurangi biaya penyimpanan dan risiko kekurangan bahan.

2. Manajemen Operasional

a. Perencanaan Produksi

Manajemen operasional dalam industri las menekankan pada efisiensi produksi, kualitas hasil las, serta pemanfaatan sumber daya secara optimal. Salah satu aspek penting adalah perencanaan workflow dan penjadwalan yang terstruktur, dimulai dari preparasi material, proses pengelasan, inspeksi kualitas, hingga tahap finishing. Penentuan urutan pekerjaan yang sistematis memastikan setiap tahap berjalan lancar dan mengurangi kemungkinan bottleneck. Penjadwalan shift operator yang efektif juga berperan penting dalam memaksimalkan waktu produksi sekaligus mengurangi downtime, sehingga produktivitas keseluruhan meningkat tanpa mengorbankan kualitas hasil las (DebRoy *et al.*, 2018).

Penggunaan teknologi canggih menjadi faktor kunci dalam mendukung manajemen operasional modern. Penerapan *Robotik welding* memungkinkan konsistensi kualitas las yang tinggi dan percepatan produksi, terutama untuk proyek skala besar atau

high-volume manufacturing. Sensor monitoring dan vision system dapat mendeteksi cacat las secara real-time, memungkinkan koreksi segera dan mengurangi jumlah produk yang gagal. Integrasi sistem AI memungkinkan optimasi parameter las secara adaptif, menyesuaikan kondisi material yang bervariasi, sehingga proses produksi menjadi lebih presisi dan efisien.

b. Pengendalian Kualitas

Pengendalian kualitas dalam proses pengelasan merupakan aspek krusial untuk memastikan integritas dan keamanan sambungan las. Salah satu metode utama adalah inspeksi visual, yang mampu mendeteksi cacat permukaan seperti undercut, porositas, dan retak. Selain itu, teknik *Non-Destructive Testing* (NDT) seperti *ultrasonic testing*, *radiographic testing*, dan *dye penetrant testing* digunakan untuk mengevaluasi cacat internal maupun permukaan tanpa merusak komponen. Penerapan inspeksi yang sistematis memungkinkan identifikasi masalah sejak dini, sehingga tindakan korektif dapat dilakukan sebelum produk mencapai tahap akhir produksi.

Monitoring parameter las juga menjadi bagian penting dalam pengendalian kualitas. Parameter seperti arus listrik, tegangan, travel speed, dan suhu material diawasi secara real-time untuk memastikan proses pengelasan sesuai spesifikasi. Kesalahan parameter dapat menyebabkan cacat las atau distorsi yang mengurangi kekuatan sambungan. Selain itu, penerapan standar dan sertifikasi internasional seperti AWS D1.1, ISO 3834, dan ISO 9001 menjadi pedoman dalam memastikan prosedur las dan kualitas produk konsisten, aman, dan memenuhi persyaratan pelanggan maupun regulasi industri.

c. Efisiensi Energi dan Lingkungan

Efisiensi energi dalam manajemen operasional pengelasan menjadi faktor penting untuk menekan biaya produksi sekaligus mengurangi dampak lingkungan. Penggunaan peralatan hemat energi seperti inverter welding machines dan *Hybrid Welding systems* memungkinkan pemanfaatan listrik lebih optimal dengan heat input yang terkontrol. Peralatan modern ini tidak hanya meningkatkan efisiensi energi, tetapi juga menjaga kualitas las tetap konsisten, mengurangi risiko over-welding,

dan memperpanjang umur peralatan. Monitoring real-time dari sensor dan *adaptive control* turut memastikan energi hanya digunakan saat diperlukan, sehingga konsumsi listrik berlebih dapat diminimalkan.

Pengelolaan limbah dan emisi gas las menjadi bagian integral dari praktik operasional yang ramah lingkungan. Limbah padat, limbah cair, dan gas hasil las dikelola sesuai standar ISO 14001, melalui sistem *reduce, reuse, recycle*, dan penggunaan scrubbers atau filter HEPA untuk fume capture. Penerapan green welding practices ini tidak hanya memenuhi regulasi lingkungan, tetapi juga dapat menjadi diferensiasi kompetitif bagi perusahaan, menunjukkan komitmen terhadap keberlanjutan, keselamatan pekerja, dan kualitas produksi yang tinggi.

3. Manajemen Sumber Daya Manusia (SDM)

a. Rekrutmen dan Seleksi

Rekrutmen dan seleksi dalam manajemen sumber daya manusia pada industri pengelasan berperan krusial untuk menjamin kualitas dan kontinuitas operasional. Operator las yang direkrut harus memiliki sertifikasi resmi seperti AWS atau ISO, serta pengalaman praktis sesuai dengan teknologi yang digunakan, baik itu SMAW, MIG/TIG, laser welding, maupun robotic welding. Pemilihan operator yang kompeten memastikan setiap sambungan las memenuhi standar kualitas, mengurangi risiko cacat, dan meningkatkan efisiensi produksi. Selain operator, perekrutan supervisor berpengalaman dan teknisi maintenance juga sangat penting untuk mengawasi jalannya proses las dan memastikan peralatan beroperasi optimal tanpa downtime.

Rekrutmen staf administrasi yang kompeten menjadi bagian integral dari keberhasilan manajemen SDM. Staf administrasi bertanggung jawab mendukung manajemen keuangan, pencatatan proyek, serta koordinasi pemasaran dan pelanggan. Kombinasi tim teknis dan administratif yang terlatih serta terstruktur dengan baik memungkinkan perusahaan pengelasan menjaga operasional yang efisien, kualitas produk yang tinggi, serta kepatuhan terhadap prosedur keselamatan dan regulasi lingkungan. Proses seleksi yang matang menjadi fondasi bagi

pengembangan sumber daya manusia yang berkelanjutan dalam jangka panjang.

b. Pelatihan dan Pengembangan Kompetensi

Pelatihan dan pengembangan kompetensi merupakan elemen penting dalam manajemen sumber daya manusia di industri pengelasan untuk memastikan operator dan staf tetap terampil dan adaptif terhadap teknologi terbaru. Program training rutin mencakup pembaruan teknik welding, penggunaan robotic welding, pengoperasian mesin laser atau MIG/TIG, serta prosedur keselamatan kerja. Dengan pelatihan berkesinambungan, operator mampu menyesuaikan diri dengan perkembangan teknologi, mengurangi kesalahan operasional, dan meningkatkan efisiensi produksi. Selain itu, penerapan skill matrix memungkinkan perusahaan memetakan kompetensi setiap operator terhadap kebutuhan proyek, sehingga penugasan pekerjaan dapat lebih optimal dan sesuai dengan kemampuan individu.

Pengembangan kompetensi juga dikombinasikan dengan sistem insentif yang dirancang untuk meningkatkan motivasi, loyalitas, dan produktivitas karyawan. Operator yang memiliki keterampilan tinggi dan produktivitas yang konsisten diberi penghargaan atau bonus, sehingga mendorong peningkatan performa secara berkelanjutan. Dengan strategi ini, perusahaan tidak hanya menjaga kualitas hasil las, tetapi juga menciptakan lingkungan kerja yang kondusif, mendorong pertumbuhan karier karyawan, dan membangun tim yang kompeten serta adaptif terhadap perubahan teknologi dan tuntutan proyek di industri pengelasan modern.

c. Penjadwalan dan Distribusi Kerja

Penjadwalan dan distribusi kerja merupakan aspek krusial dalam manajemen sumber daya manusia di industri pengelasan untuk meningkatkan efisiensi tenaga kerja dan pemanfaatan energi. Penentuan shift yang tepat memungkinkan operasi produksi berlangsung secara kontinyu tanpa overloading operator, sekaligus memaksimalkan penggunaan peralatan seperti mesin las dan robotic welding. Dengan penjadwalan yang efektif, perusahaan dapat mengurangi waktu idle, menekan biaya energi, dan memastikan proyek selesai sesuai target

waktu. Selain itu, distribusi kerja yang seimbang antar operator membantu menjaga kualitas hasil las, karena setiap pekerja dapat fokus pada tugas spesifik tanpa tergesa-gesa akibat overwork.

Rotasi tugas menjadi strategi tambahan untuk mengurangi kelelahan operator dan meningkatkan keterampilan cross-functional. Operator yang terbiasa dengan berbagai jenis welding dan peralatan dapat lebih fleksibel dalam penugasan proyek, serta meningkatkan kesiapan menghadapi situasi tak terduga. Monitoring KPI SDM, seperti produktivitas per operator, downtime peralatan, dan jumlah cacat las, memberikan data objektif untuk evaluasi kinerja.

d. Kesejahteraan dan Keselamatan

Kesejahteraan dan keselamatan operator las menjadi prioritas utama dalam manajemen sumber daya manusia di industri pengelasan. Penyediaan Alat Pelindung Diri (APD) yang memadai, seperti helm las auto-darkening, sarung tangan tahan panas, apron, dan respirator, memastikan pekerja terlindungi dari percikan logam, panas, radiasi UV/IR, serta paparan gas dan partikel fume. Implementasi APD yang konsisten membantu mengurangi risiko cedera dan penyakit akibat kerja, sekaligus meningkatkan kenyamanan dan produktivitas operator selama bekerja dengan proses las energi tinggi atau robotic welding.

pengawasan kesehatan menjadi aspek penting untuk meminimalkan dampak jangka panjang dari paparan fume, gas, dan radiasi. Pemeriksaan rutin dan monitoring lingkungan kerja memastikan tingkat eksposur berada dalam batas aman. Kepatuhan terhadap regulasi nasional dan internasional, seperti OSHA dan ISO 45001, tidak hanya memenuhi persyaratan hukum, tetapi juga membangun budaya keselamatan yang kuat di tempat kerja. Kombinasi APD, pengawasan kesehatan, dan compliance regulasi menciptakan lingkungan kerja yang aman, sehat, dan mendukung produktivitas jangka panjang.

D. Strategi Pemasaran dan Inovasi Layanan Jasa Pengelasan

Pada industri pengelasan modern, keberhasilan usaha tidak hanya ditentukan oleh kualitas teknik las atau efisiensi operasional, tetapi juga oleh strategi pemasaran yang tepat dan inovasi layanan yang mampu memenuhi kebutuhan pasar yang beragam dan kompetitif. Jasa pengelasan kini bukan sekadar menyambung logam, tetapi menawarkan solusi terpadu bagi sektor otomotif, kedirgantaraan, konstruksi, minyak dan gas, serta manufaktur presisi (Chaturvedi & Vendan, 2022).

Strategi pemasaran mencakup identifikasi pasar, positioning jasa, penentuan harga, promosi, dan distribusi layanan, sedangkan inovasi layanan mencakup pengembangan teknologi, fleksibilitas proyek, dan *value-added services*. Integrasi keduanya memungkinkan usaha pengelasan untuk meningkatkan profitabilitas, memperluas pangsa pasar, dan mempertahankan loyalitas pelanggan.

1. Strategi Pemasaran Layanan Jasa Pengelasan

a. Positioning dan Diferensiasi

Strategi positioning dan diferensiasi menjadi kunci dalam pemasaran layanan jasa pengelasan untuk memenangkan persaingan industri. Diferensiasi berbasis kualitas dan teknologi menekankan penggunaan peralatan canggih seperti robotic welding, laser welding, dan sistem sensor monitoring yang memungkinkan hasil las konsisten, presisi tinggi, dan repeatable. Integrasi prinsip green welding juga menjadi nilai tambah, karena tidak hanya menjamin efisiensi energi tetapi juga menurunkan emisi dan limbah, sehingga workshop dapat diposisikan sebagai penyedia jasa premium yang mengutamakan kualitas sekaligus keberlanjutan.

Fleksibilitas layanan juga menjadi aspek diferensiasi penting. Layanan on-site welding dan repair memberikan kemudahan bagi klien industri yang membutuhkan perbaikan atau produksi di lokasi, tanpa harus memindahkan material ke workshop. Sementara itu, *customized welding solutions* memungkinkan penyesuaian teknik, parameter, dan material sesuai spesifikasi proyek, sehingga memberikan nilai tambah berupa pelayanan yang adaptif dan responsif terhadap kebutuhan pelanggan. Kombinasi kualitas tinggi, teknologi modern, dan fleksibilitas

layanan membangun reputasi yang kuat serta meningkatkan loyalitas klien.

b. Penentuan Harga (*Pricing Strategy*)

Strategi harga harus mempertimbangkan:

- 1) Biaya tetap dan variabel → modal peralatan, gaji operator, consumables, listrik.
- 2) Nilai tambah → layanan robotic, green welding, inspeksi kualitas, warranty.
- 3) Persaingan pasar → tarif jasa tradisional vs premium service.

Contoh:

Jenis Layanan	Harga (USD/unit atau per joint)	Keterangan
Manual MIG/TIG	20–50	Workshop kecil-menengah
Hybrid Laser-MIG	80–150	Automotive & aerospace
Robotic Welding	100–250	High precision, minimal rework
On-site Welding	50–120	Flexibility, repair & maintenance

c. Promosi dan Branding

Promosi dan branding menjadi elemen penting dalam strategi pemasaran layanan jasa pengelasan untuk meningkatkan visibilitas dan kredibilitas workshop. Digital marketing melalui website, media sosial, dan platform industri seperti LinkedIn atau forum profesional memungkinkan penyebaran informasi tentang layanan, teknologi, dan keunggulan green welding secara luas. Selain itu, partisipasi dalam trade shows dan exhibition menjadi sarana efektif untuk menampilkan teknologi terbaru, demonstrasi robotic atau laser welding, serta praktik ramah lingkungan, yang sekaligus menarik perhatian calon klien dan mitra industri (Zhang *et al.*, 2021).

Penguatan branding juga dapat dilakukan melalui testimonial klien dan studi kasus proyek yang sukses, yang memberikan bukti konkret kualitas layanan serta kemampuan workshop dalam menangani berbagai tantangan teknis. Kemitraan strategis dan pendekatan B2B, termasuk kontrak jangka panjang dengan perusahaan manufaktur, konstruksi, dan energi, juga

meningkatkan stabilitas bisnis serta reputasi sebagai penyedia jasa pengelasan profesional dan terpercaya. Kombinasi promosi digital, pameran industri, dan branding berbasis bukti menjadi strategi komprehensif untuk membangun keunggulan kompetitif.

2. Inovasi Layanan Jasa Pengelasan

a. Pengembangan Teknologi

Pengembangan teknologi menjadi inti dari inovasi layanan jasa pengelasan untuk meningkatkan kualitas, efisiensi, dan daya saing workshop. Penerapan robotic welding dengan kontrol adaptif berbasis AI memungkinkan proses las yang konsisten, mengurangi cacat, dan meningkatkan throughput produksi, sekaligus menurunkan ketergantungan pada tenaga kerja manual. Sensor monitoring dan sistem vision secara real-time mampu mendeteksi cacat las, memprediksi kebutuhan perawatan peralatan, serta meminimalkan downtime, sehingga operasional lebih efisien dan biaya pemeliharaan dapat ditekan. Penggunaan teknologi canggih seperti *Laser Beam Welding* (LBW) dan *Electron Beam Welding* (EBW) memungkinkan pengerjaan material khusus, termasuk superalloy, titanium, dan nanocomposite, dengan presisi tinggi dan heat input minimal. Layanan ini menambah nilai bagi klien yang membutuhkan kualitas las superior dan spesifikasi material yang menantang. Kombinasi robotic, sensor, dan teknologi las presisi menjadikan workshop lebih adaptif, produktif, dan mampu memenuhi tuntutan industri modern secara berkelanjutan.

b. Diversifikasi Layanan

Diversifikasi layanan menjadi strategi penting untuk memperluas jangkauan pasar dan meningkatkan nilai tambah bagi klien. Integrasi additive manufacturing atau 3D printing dengan proses pengelasan memungkinkan produksi komponen kustom dan perbaikan bagian yang rusak secara presisi, mengurangi kebutuhan material baru, serta meminimalkan limbah. Layanan ini memberikan solusi fleksibel untuk industri yang membutuhkan repair atau pembuatan parts unik, sekaligus membuka peluang untuk proyek-proyek high-tech dan industri presisi.

Penerapan mobile welding units memungkinkan workshop memberikan layanan onsite, termasuk fabrikasi, perbaikan, dan maintenance di lokasi klien. Hal ini meningkatkan kenyamanan bagi pelanggan dan mempercepat waktu pengerjaan, terutama untuk proyek konstruksi atau industri minyak dan gas. Layanan konsultasi green welding juga menjadi bagian dari diversifikasi, membantu klien mengadopsi praktik efisiensi energi, pengelolaan limbah, dan kepatuhan terhadap regulasi lingkungan, sehingga membangun reputasi sebagai penyedia jasa las berkelanjutan dan inovatif.

c. *Value-Added Services*

Penyedia jasa pengelasan dapat meningkatkan daya saing melalui layanan bernilai tambah (*value-added services*) yang melengkapi penawaran utama. Salah satunya adalah warranty dan *quality assurance*, di mana setiap sambungan las dilengkapi dengan inspeksi *Non-Destructive Testing* (NDT) dan laporan digital yang terdokumentasi secara transparan. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan kepercayaan klien terhadap kualitas hasil las, tetapi juga meminimalkan risiko kegagalan di lapangan, terutama pada proyek kritis seperti aerospace, otomotif, dan konstruksi industri.

Penyedia jasa dapat menawarkan training services untuk operator internal klien, sehingga klien memiliki tenaga kerja yang terlatih dalam penggunaan teknologi las canggih dan prosedur keselamatan. Dukungan material sourcing dan logistics juga menjadi nilai tambah, dengan menyediakan pengadaan bahan las yang tepat waktu dan manajemen pengiriman ke lokasi proyek. Layanan-layanan ini mempermudah klien dalam operasional sehari-hari, meningkatkan efisiensi proyek, serta memperkuat hubungan jangka panjang antara penyedia jasa dan pelanggan.



BAB XIII

INOVASI DAN ARAH MASA DEPAN TEKNOLOGI PENGELASAN

Teknologi pengelasan modern terus berkembang seiring dengan kemajuan industri, digitalisasi, dan kebutuhan material canggih. *Smart Welding System* dan *Internet of Things (IoT)* menjadi inovasi penting yang memungkinkan integrasi sensor, monitoring real-time, dan kontrol adaptif dalam proses pengelasan. Sistem ini tidak hanya meningkatkan kualitas sambungan, tetapi juga memungkinkan prediksi cacat, optimasi parameter proses, dan efisiensi produksi. Dengan IoT, data pengelasan dapat dikumpulkan, dianalisis, dan digunakan untuk perbaikan berkelanjutan, mendukung manufaktur cerdas dan digital.

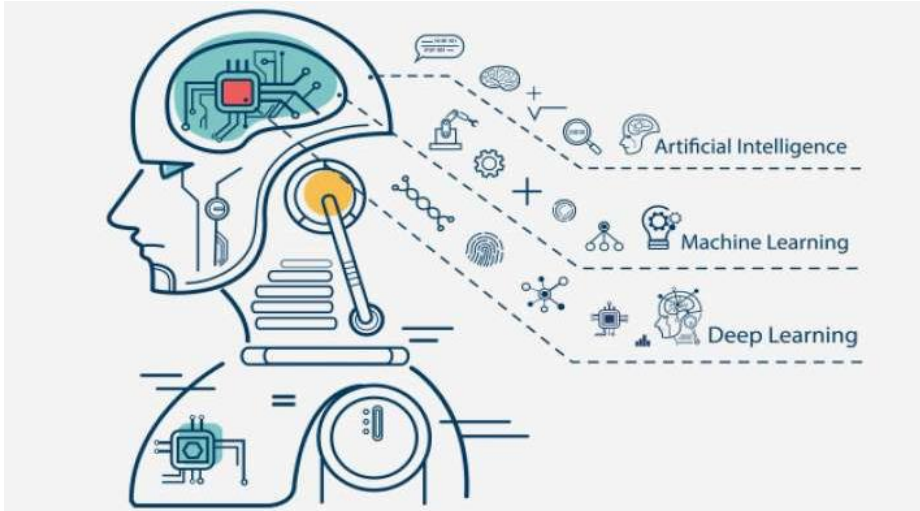
Selain itu, integrasi pengelasan dengan Industri 4.0 dan *Artificial Intelligence (AI)* membuka peluang baru untuk otomasi, adaptasi, dan optimalisasi proses. AI memungkinkan *Robot* pengelasan untuk menyesuaikan parameter secara real-time, memprediksi kegagalan, dan melakukan kontrol presisi tinggi pada material sensitif. Pengelasan berbasis data, analitik prediktif, dan sistem otomatis mendukung efisiensi energi, pengurangan limbah, serta peningkatan produktivitas, sehingga menjadikan proses pengelasan lebih fleksibel, aman, dan berkelanjutan.

A. Smart Welding System dan Internet of Things (IoT)

Industri pengelasan modern menghadapi tuntutan yang semakin kompleks terkait kecepatan, presisi, kualitas, dan keberlanjutan. Untuk menghadapi tuntutan ini, teknologi *Smart Welding System (SWS)* berbasis *Internet of Things (IoT)* menjadi arah inovasi utama. SWS menggabungkan sensor canggih, otomatisasi, kecerdasan buatan (AI), dan konektivitas digital untuk meningkatkan kualitas las,

meminimalkan cacat, serta mengoptimalkan efisiensi produksi (DebRoy *et al.*, 2018).

Gambar 4. Kecerdasan Buatan



Sumber: Codepolitan

IoT memungkinkan peralatan las berkomunikasi secara real-time dengan sistem manajemen produksi, basis data material, dan kontrol kualitas otomatis, sehingga operator dapat mengambil keputusan berbasis data secara cepat dan akurat. Dengan integrasi ini, *Smart Welding System* bukan hanya meningkatkan produktivitas, tetapi juga mendukung strategi Industry 4.0 dan manufaktur cerdas.

Smart Welding System adalah sistem pengelasan yang dilengkapi dengan sensor cerdas, aktuator, AI, dan modul komunikasi IoT untuk melakukan pengelasan adaptif dan monitoring kualitas secara real-time. Karakteristik utamanya meliputi:

1. Monitoring real-time → memantau arus, tegangan, kecepatan travel, temperatur, dan posisi las.
2. Kontrol adaptif → AI menyesuaikan parameter las secara otomatis berdasarkan kondisi material dan lingkungan.
3. *Data-driven decision making* → data sensor tersimpan di cloud untuk analisis kualitas, prediksi cacat, dan optimasi proses.
4. Interoperabilitas IoT → integrasi dengan sistem ERP, MES (*Manufacturing Execution System*), dan SCADA untuk pengelolaan produksi terpadu.

a. Komponen Utama *Smart Welding System*

1) Sensor dan Instrumentasi

Komponen sensor dan instrumentasi dalam *smart welding system* berperan krusial untuk memastikan proses las yang presisi dan konsisten. Sensor arus dan tegangan digunakan untuk mengukur energi input secara real-time, sehingga heat input dapat dikontrol sesuai parameter optimal. Kamera vision system memantau posisi dan bentuk seam, mendeteksi ketidaksesuaian geometri atau potensi cacat pada jalur las. Sementara itu, thermal sensors memonitor distribusi panas dan *cooling rate* material, memungkinkan kontrol termal yang tepat untuk mengurangi residual stress dan distorsi. Integrasi data dari berbagai sensor ini mendukung *adaptive control* dan meningkatkan kualitas serta repeatability proses las secara signifikan.

2) Kontrol dan AI

Komponen kontrol dan AI pada *smart welding system* berperan penting dalam meningkatkan kualitas dan efisiensi proses las. Algoritma *Machine Learning* menganalisis data historis untuk memprediksi potensi cacat las, sehingga tindakan korektif dapat dilakukan secara proaktif. Adaptive control memanfaatkan informasi dari sensor real-time untuk menyesuaikan parameter welding secara otomatis, termasuk arus, tegangan, travel speed, dan heat input, sehingga proses las tetap optimal meski terdapat variasi material atau kondisi lingkungan. Kombinasi AI dan adaptive control ini memungkinkan pengurangan cacat, minimisasi distorsi, serta peningkatan repeatability dan produktivitas, menjadikan proses las lebih andal dan efisien.

3) Konektivitas IoT

Konektivitas IoT pada *smart welding system* memungkinkan integrasi dan pengelolaan data secara efisien melalui cloud storage, di mana informasi dari berbagai workstation tersentralisasi dan dapat diakses secara real-time. Dengan sistem ini, operator dan manajer produksi dapat memantau proses las dari jarak jauh melalui perangkat terhubung, mengamati parameter penting seperti arus, tegangan, heat input, dan kondisi seam. Remote

monitoring juga mendukung deteksi dini terhadap potensi cacat atau ketidaksesuaian proses, memungkinkan intervensi cepat tanpa harus berada di lokasi. Hal ini meningkatkan efisiensi operasional, memastikan kualitas konsisten, serta memfasilitasi analisis data untuk continuous improvement dan predictive maintenance.

b. Integrasi IoT dalam Proses Welding

1) IoT dan Real-Time Monitoring

Integrasi IoT dalam proses welding memungkinkan pengumpulan data proses las secara real-time dan transmisi ke server atau cloud untuk dianalisis lebih lanjut (Zhang *et al.*, 2021). Data yang dikumpulkan meliputi arus, tegangan, travel speed, distribusi panas, serta posisi seam, yang kemudian digunakan untuk mendeteksi potensi cacat las seperti misalignment, porositas, undercut, atau incomplete fusion. Dengan pemantauan terus-menerus, sistem dapat memberikan peringatan dini kepada operator sehingga intervensi cepat dapat dilakukan, mengurangi risiko kegagalan sambungan dan meningkatkan konsistensi kualitas produk.

IoT mendukung pengendalian variabilitas material melalui algoritma AI yang menyesuaikan parameter welding secara otomatis berdasarkan karakteristik material dan kondisi lingkungan. Remote monitoring memungkinkan operator atau engineer untuk mengontrol proses dari jarak jauh, termasuk melakukan troubleshooting atau penyesuaian parameter saat proses berlangsung. Pendekatan ini meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi downtime, dan memungkinkan predictive maintenance, sekaligus mendukung praktik green welding dengan meminimalkan limbah energi dan material.

2) Data Analitik dan *Machine Learning*

Data yang dikumpulkan dari sensor pada sistem welding IoT dapat dianalisis menggunakan algoritma *Machine Learning* untuk meningkatkan kualitas dan efisiensi proses las. Analisis ini memungkinkan prediksi cacat las seperti porositas, misalignment, undercut, atau incomplete fusion sebelum menjadi masalah kritis, sehingga operator dapat

melakukan koreksi lebih awal. Dengan pemodelan berbasis data historis, *Machine Learning* membantu memahami pola cacat dan faktor penyebabnya, meningkatkan konsistensi kualitas seam pada batch produksi berikutnya. Pendekatan ini juga mendukung dokumentasi digital untuk audit kualitas dan sertifikasi proses las, sesuai standar AWS atau ISO.

Data analitik dan *Machine Learning* memungkinkan optimasi parameter las secara otomatis, termasuk arus, tegangan, travel speed, dan heat input, menyesuaikan kondisi spesifik material atau proyek. Efisiensi energi dan penggunaan material dapat dievaluasi, sehingga proses las menjadi lebih hemat energi dan minim limbah.

3) *Smart Maintenance*

Integrasi IoT dalam sistem welding memungkinkan implementasi smart maintenance yang berbasis predictive maintenance, sehingga pengelolaan peralatan menjadi lebih proaktif. Sensor yang terpasang pada mesin welding memantau kondisi operasional secara real-time, seperti suhu, arus, getaran, dan tegangan, untuk mendeteksi tanda-tanda awal kerusakan atau degradasi komponen. Dengan informasi ini, potensi kerusakan dapat diantisipasi sebelum terjadi kegagalan mendadak, sehingga downtime produksi berkurang dan biaya perbaikan yang mahal dapat diminimalkan. Pendekatan ini sangat penting dalam sistem high-tech seperti robotic welding atau hybrid laser welding, di mana kerusakan tiba-tiba dapat menyebabkan penurunan kualitas las dan keterlambatan proyek.

Data histori yang dikumpulkan dari sensor dan sistem monitoring IoT dapat digunakan untuk merencanakan penggantian komponen secara berkala atau upgrade peralatan secara tepat waktu. Analisis tren kerusakan membantu manajemen dalam menentukan interval maintenance optimal, mengoptimalkan umur mesin, dan memastikan kontinuitas operasional. Smart maintenance berbasis IoT tidak hanya meningkatkan produktivitas dan efisiensi energi, tetapi juga mendukung strategi green

welding dengan mengurangi pemborosan material akibat kerusakan peralatan.

c. Aplikasi *Smart Welding System*

1) Industri Otomotif

Pada industri otomotif, implementasi *Smart Welding System* yang menggabungkan robotic welding dan IoT telah merevolusi proses produksi body assembly. *Robot welding* dilengkapi sensor real-time yang memantau penekanan seam, posisi kawat las, dan distribusi panas secara akurat, sehingga setiap sambungan memiliki kualitas yang konsisten dan sesuai spesifikasi desain. Data yang dikumpulkan oleh sensor ini dikirim secara real-time ke sistem terpusat, memungkinkan monitoring jarak jauh dan pengambilan keputusan cepat jika terjadi deviasi dari parameter ideal. Pendekatan ini mengurangi risiko cacat las seperti undercut, misalignment, atau incomplete fusion, yang kritis pada produksi massal kendaraan.

2) Industri Aerospace

Pada industri aerospace, proses pengelasan menghadapi tantangan unik karena penggunaan material canggih seperti superalloy dan titanium yang memerlukan presisi tinggi serta kontrol panas yang ketat. *Smart Welding System* dengan integrasi laser welding atau *Electron Beam Welding* (EBW) dan IoT memungkinkan pemantauan parameter las secara real-time, termasuk distribusi panas, posisi seam, dan kecepatan travel. Data ini membantu operator dan sistem AI menyesuaikan parameter proses secara otomatis, sehingga menghasilkan sambungan yang konsisten dengan kualitas mekanik optimal, minim distorsi, dan bebas cacat. Pendekatan ini sangat penting untuk komponen kritis seperti turbine blades, fuselage panels, dan structural assemblies.

3) Industri Minyak dan Gas

Pada industri minyak dan gas, pengelasan pipa merupakan kegiatan kritis yang membutuhkan presisi tinggi, keamanan, dan konsistensi kualitas. *Smart Welding System* dengan integrasi sensor IoT memungkinkan adaptive

welding onsite, di mana parameter seperti arus, tegangan, travel speed, dan panas las dapat disesuaikan secara real-time berdasarkan karakteristik material dan kondisi lapangan. Sistem ini memantau posisi seam, penetrasi las, serta potensi cacat seperti porositas atau incomplete fusion, sehingga mengurangi risiko kegagalan sambungan yang dapat berdampak pada keselamatan dan operasional pipeline. Pemantauan berkelanjutan memastikan setiap sambungan memenuhi standar keselamatan industri dan regulasi pemerintah.

4) Manufaktur Presisi dan *Additive Manufacturing*

Pada sektor manufaktur presisi dan *additive manufacturing*, *Smart Welding System* memungkinkan integrasi mulus antara proses additive dan subtractive. Penggunaan *Hybrid Welding* yang dikombinasikan dengan 3D printing memungkinkan penambahan material secara layer-by-layer sekaligus melakukan finishing atau pengelasan tambahan tanpa mengganggu toleransi desain. Sistem ini sangat penting untuk komponen aerospace, otomotif high-performance, dan peralatan industri presisi, di mana setiap bagian harus memenuhi spesifikasi geometris dan mekanis yang ketat. Dengan kontrol otomatis, risiko cacat las atau deformasi material dapat diminimalkan, sehingga kualitas produk akhir tetap konsisten.

B. Integrasi Pengelasan dengan Industri 4.0 dan AI

Perkembangan teknologi pengelasan saat ini tidak hanya menekankan pada kualitas sambungan dan efisiensi energi, tetapi juga pada transformasi digital dalam kerangka Industri 4.0. Integrasi pengelasan dengan sistem cerdas berbasis AI, IoT, sensor, dan *big data* memungkinkan pengendalian proses las secara real-time, optimasi parameter las, prediksi cacat, dan peningkatan produktivitas secara keseluruhan.

Konsep Industri 4.0 mengedepankan sistem terhubung, otomasi cerdas, dan analitik berbasis data. Dalam konteks pengelasan, pendekatan ini memungkinkan pembuatan smart welding cells, di mana mesin las, robot, sensor, dan software AI saling berinteraksi untuk

menghasilkan sambungan logam dengan kualitas tinggi, efisiensi tinggi, dan keamanan proses yang lebih baik (Zhang *et al.*, 2021).

Integrasi pengelasan dengan konsep Industri 4.0 membawa transformasi signifikan dalam praktik manufaktur modern. Smart Factory memungkinkan proses pengelasan menjadi bagian dari sistem manufaktur cerdas dengan konektivitas end-to-end, di mana robotik, sensor, AI, dan IoT saling terhubung untuk mengoptimalkan alur produksi. Welding 4.0 menekankan kemampuan adaptif dan self-optimizing, sehingga parameter las seperti arus, tegangan, dan travel speed dapat disesuaikan secara real-time berdasarkan kondisi material dan desain sambungan. Pendekatan ini meningkatkan konsistensi kualitas, mengurangi cacat, dan memaksimalkan efisiensi energi serta penggunaan material, sekaligus memungkinkan pemantauan jarak jauh dan intervensi cepat saat diperlukan.

Digital twin menjadi komponen kunci dalam implementasi pengelasan berbasis Industri 4.0. Representasi virtual dari proses las fisik ini memungkinkan simulasi untuk berbagai material dan tipe sambungan, sehingga potensi deformasi, residual stress, dan cacat las dapat diprediksi sebelum produksi fisik dimulai (DebRoy *et al.*, 2018). Selain itu, digital twin mendukung analisis efisiensi energi dan konsumsi material secara real-time, memungkinkan pengambilan keputusan berbasis data untuk optimasi proses. Dengan demikian, integrasi digital twin dan smart factory tidak hanya meningkatkan kualitas produk, tetapi juga mendorong praktik green welding yang lebih berkelanjutan.

Karakteristik utama Welding 4.0:

1. Otomasi cerdas → *Robot* las mampu menyesuaikan arus, tegangan, dan kecepatan travel berdasarkan sensor feedback.
2. Data-driven monitoring → pemantauan real-time kualitas las, temperatur, dan distribusi panas.
3. Prediktif maintenance → AI memprediksi kebutuhan perawatan *Robot* dan peralatan las.
4. Interoperabilitas sistem → integrasi dengan MES, ERP, SCADA, dan supply chain digital.
 - a. *Machine Learning* dan *Deep Learning*
Machine Learning (ML) telah menjadi alat penting dalam pengelasan modern untuk meningkatkan kualitas dan konsistensi sambungan las. Dengan memanfaatkan data historis

dari sensor seperti arus, tegangan, travel speed, dan temperatur material algoritma ML dapat memprediksi kemungkinan cacat las seperti porositas, undercut, atau incomplete fusion sebelum terjadi. Prediksi ini memungkinkan operator atau sistem otomatis untuk melakukan koreksi secara proaktif, sehingga mengurangi jumlah rework dan pemborosan material. Selain itu, ML mendukung pemeliharaan prediktif dengan mengidentifikasi pola yang menunjukkan potensi kerusakan peralatan, sehingga downtime dapat diminimalkan dan produktivitas tetap optimal.

Deep learning (DL) melengkapi kemampuan ML dengan memproses data gambar dari vision system yang memantau seam las secara real-time. Algoritma DL mampu mendeteksi cacat mikro yang mungkin tidak terlihat oleh inspeksi visual manusia, termasuk retak halus atau ketidakteraturan dalam struktur mikro. Dengan analisis ini, sistem dapat memberikan feedback instan untuk menyesuaikan parameter pengelasan, seperti arus, tegangan, atau kecepatan travel, guna memastikan konsistensi kualitas di seluruh batch produksi. Pendekatan ini sangat penting terutama pada material presisi tinggi seperti titanium atau superalloy, yang memiliki toleransi cacat sangat rendah.

b. *Adaptive Control* dan AI

Adaptive control berbasis AI telah merevolusi proses pengelasan modern dengan memungkinkan penyesuaian parameter secara real-time berdasarkan feedback dari sensor yang terpasang pada sistem. Sensor ini memonitor arus, tegangan, jarak elektroda, dan kecepatan travel, sehingga AI dapat mengatur kondisi pengelasan secara dinamis sesuai dengan karakteristik material, desain sambungan, dan kondisi lingkungan kerja (Zhang *et al.*, 2021). Pendekatan ini berbeda dari pengelasan konvensional yang menggunakan parameter tetap, karena *adaptive control* dapat menanggapi variasi material atau toleransi desain yang tidak ideal, sehingga kualitas sambungan tetap optimal.

Salah satu manfaat utama dari *adaptive control* adalah konsistensi kualitas las yang tinggi. Dengan AI yang menyesuaikan parameter secara otomatis, variasi dalam

penetration, fusion, atau bentuk bead dapat diminimalkan. Hal ini mengurangi risiko cacat seperti undercut, porositas, atau incomplete fusion, sehingga kebutuhan untuk rework atau scrap material dapat ditekan secara signifikan. Bagi industri manufaktur, terutama sektor otomotif, aerospace, dan energi, pengurangan rework ini bukan hanya meningkatkan efisiensi produksi tetapi juga menurunkan biaya operasional secara keseluruhan.

c. *Predictive Maintenance* dan AI

Predictive maintenance berbasis AI telah menjadi komponen penting dalam pengelasan modern, terutama bagi sistem *Robotik* dan peralatan canggih. Sensor IoT yang terpasang pada mesin dan *Robot welding* secara terus-menerus memantau kondisi operasional, termasuk arus, tegangan, getaran, suhu, dan beban mekanis. Data yang dikumpulkan ini dikirim ke sistem analitik berbasis AI untuk diproses, sehingga pola keausan, degradasi komponen, atau penurunan performa dapat dideteksi lebih awal sebelum menimbulkan kerusakan serius (Barot & Patel, 2021). Dengan pendekatan ini, perawatan tidak lagi bersifat periodik atau reaktif, tetapi berbasis kondisi aktual peralatan, meningkatkan efisiensi operasional secara keseluruhan.

Salah satu dampak signifikan dari *predictive maintenance* adalah pengurangan downtime mendadak. Karena AI mampu memprediksi kapan komponen tertentu kemungkinan akan gagal, jadwal perawatan dapat dilakukan secara proaktif tanpa menghentikan seluruh lini produksi secara tiba-tiba. Hal ini sangat krusial di industri otomotif, aerospace, dan minyak & gas, di mana keterlambatan produksi dapat menyebabkan kerugian finansial yang besar. Selain itu, deteksi dini potensi kerusakan juga memungkinkan operator menyiapkan suku cadang atau penyesuaian proses sehingga intervensi menjadi lebih cepat dan efisien.

C. Arah Penelitian dan Tren Global

Perkembangan teknologi pengelasan modern telah memasuki era transformasi digital, robotik, dan material maju, yang selaras dengan prinsip Industry 4.0. Penelitian dan inovasi global saat ini

menekankan pada integrasi *Robotik* cerdas, sensor IoT, kecerdasan buatan (AI), material superalloy dan komposit, *additive manufacturing*, serta green welding. Tren ini muncul karena kebutuhan industri untuk meningkatkan efisiensi, kualitas, fleksibilitas, dan keberlanjutan sambungan las dalam skala global (DebRoy *et al.*, 2018).

1. *Autonomous Welding Systems*

Autonomous welding systems merupakan tren masa depan dalam industri manufaktur dan pengelasan, di mana *Robot* las mampu bekerja secara sepenuhnya otonom tanpa intervensi manusia. Sistem ini memanfaatkan sensor canggih, vision system, dan algoritma AI untuk menyesuaikan parameter las secara real-time, termasuk arus, tegangan, travel speed, dan posisi elektroda. Dengan kemampuan adaptasi ini, *Robot* dapat menanggapi variasi material, toleransi sambungan, dan kondisi lingkungan kerja secara otomatis, memastikan kualitas las yang konsisten dan presisi tinggi di berbagai aplikasi industri seperti otomotif, aerospace, dan konstruksi berat.

Keunggulan utama *autonomous welding systems* terletak pada peningkatan produktivitas dan pengurangan ketergantungan pada operator manusia. Selain itu, sistem otonom mampu meminimalkan cacat las, mengurangi rework dan scrap, serta meningkatkan efisiensi energi sesuai prinsip green welding. Penerapan teknologi ini juga membuka peluang integrasi dengan smart factory, IoT, dan digital twin, sehingga proses pengelasan dapat dipantau, dianalisis, dan dioptimalkan secara real-time dari jarak jauh, mendukung manufaktur cerdas yang adaptif dan berkelanjutan.

2. *Smart Materials Welding*

Smart materials welding menjadi fokus penelitian masa depan karena meningkatnya penggunaan nano-materials, superalloy, dan smart composites di sektor otomotif, aerospace, energi, dan elektronik canggih. Pengelasan material ini menuntut kontrol panas dan energi yang sangat presisi untuk mencegah kerusakan mikrostruktur, deformasi, atau cacat sambungan. Teknologi seperti laser beam welding, electron beam welding, dan *Friction Stir Welding* banyak digunakan karena mampu mengontrol heat input dengan akurat serta menghasilkan fusion yang optimal tanpa degradasi material.

Integrasi sensor cerdas, adaptive control, dan algoritma AI memungkinkan pemantauan real-time dan penyesuaian parameter las sesuai karakteristik unik setiap material. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan kualitas sambungan, tetapi juga meminimalkan limbah dan konsumsi energi, sejalan dengan prinsip green welding. Penelitian lebih lanjut fokus pada optimasi interaksi energi-material, prediksi microstructure, dan pengembangan metode pengelasan yang kompatibel dengan smart composites serta material fungsional untuk aplikasi industri masa depan.

3. Edge Computing dan AI Real-Time

Edge computing dan AI real-time menjadi tren penting dalam pengelasan industri karena memungkinkan analitik data langsung di lokasi proses, tanpa harus mengirim data ke cloud. Dengan memproses informasi sensor, thermal imaging, dan vision system secara lokal, sistem dapat mendeteksi cacat las, deviasi parameter, atau overheating hampir seketika. Hal ini mempercepat pengambilan keputusan, seperti penyesuaian arus, tegangan, atau kecepatan travel, sehingga meningkatkan konsistensi kualitas sambungan dan mengurangi risiko rework atau scrap.

Integrasi edge computing dengan algoritma AI mendukung *predictive maintenance* dan *adaptive control* secara real-time. Sensor yang terhubung secara lokal dapat mengirimkan peringatan atau menyesuaikan parameter welding tanpa delay jaringan, menjadikan proses lebih efisien dan aman. Pendekatan ini sangat relevan untuk robotic welding, hybrid welding, dan proses manufaktur presisi tinggi, di mana response time cepat dan kontrol yang akurat menjadi kunci keberhasilan produksi.

4. Hybrid Manufacturing

Hybrid manufacturing menggabungkan proses *additive manufacturing* (AM) dengan pengelasan tradisional atau robotic welding untuk menciptakan komponen dengan desain kompleks dan presisi tinggi. Pendekatan ini memungkinkan material ditambahkan secara selektif pada area yang membutuhkan penguatan atau perbaikan, sekaligus melakukan finishing atau joinery menggunakan proses las konvensional. Hasilnya adalah komponen dengan kekuatan struktural optimal, toleransi geometris tinggi, dan penggunaan material yang lebih

efisien dibanding metode konvensional. Integrasi ini juga membuka peluang untuk produksi customized parts dalam jumlah terbatas tanpa membuang banyak scrap logam, sejalan dengan prinsip green manufacturing.

Hybrid manufacturing meningkatkan fleksibilitas desain dan produktivitas. Proses additive dapat digunakan untuk membangun geometri internal yang kompleks, sementara welding memastikan integritas struktural dan sambungan antar bagian. Dengan kombinasi teknologi ini, industri otomotif, aerospace, dan energi dapat menghasilkan komponen ringan namun kuat, mengurangi biaya bahan, dan mempercepat siklus produksi. Tren global ini menunjukkan arah masa depan manufaktur cerdas yang menggabungkan fleksibilitas desain, efisiensi energi, dan pengelolaan sumber daya yang lebih baik.

5. Green Welding

Green welding menekankan penerapan prinsip efisiensi energi dan pengurangan dampak lingkungan dalam proses pengelasan. Dengan memanfaatkan teknologi seperti laser beam welding, friction stir welding, dan hybrid welding, proses las dapat dilakukan dengan heat input yang lebih rendah sehingga konsumsi energi berkurang signifikan. Selain itu, penggunaan sensor dan sistem monitoring real-time memungkinkan prediksi emisi gas dan fume, sehingga pengelolaan ventilasi dan filtrasi menjadi lebih efektif. Strategi ini tidak hanya menurunkan biaya operasional, tetapi juga mendukung kepatuhan terhadap regulasi lingkungan dan standar sustainability internasional.

Green welding juga menekankan pengurangan limbah padat dan gas, misalnya melalui penggunaan material ramah lingkungan, daur ulang scrap logam, dan pemilihan flux atau filler yang minim heavy metals. Integrasi otomatisasi dan *adaptive control* berbasis AI memungkinkan optimalisasi proses las dengan meminimalkan rework dan scrap.

6. Digital Twin Lanjutan

Digital twin lanjutan menghadirkan kemampuan simulasi yang lebih kompleks dalam pengelasan, termasuk multi-material dan multi-layer welding. Dengan memodelkan proses las secara virtual, industri dapat mengevaluasi berbagai kombinasi material, geometri sambungan,

dan parameter proses tanpa harus melakukan uji fisik yang mahal dan memakan waktu. Simulasi ini memungkinkan prediksi deformasi, residual stress, penetrasi las, dan potensi cacat secara akurat sebelum produksi nyata dilakukan, sehingga mengurangi kebutuhan trial-and-error yang biasanya meningkatkan biaya dan limbah material.

Digital twin lanjutan juga mendukung integrasi data real-time dari sensor IoT dan sistem AI. Parameter proses dapat dioptimalkan secara adaptif berdasarkan hasil simulasi dan feedback lapangan, sehingga produktivitas meningkat dan kualitas sambungan konsisten. Pendekatan ini memungkinkan perencanaan proses las yang lebih efisien, penggunaan energi lebih hemat, serta pemenuhan standar keselamatan dan lingkungan secara simultan. Dengan demikian, digital twin menjadi alat strategis dalam inovasi welding industri masa depan.

7. *Global Collaboration & Welding as a Service (WaaS)*

Tren global menunjukkan munculnya konsep *Welding as a Service* (WaaS), di mana layanan pengelasan disediakan berbasis cloud dan didukung teknologi AI. Perusahaan skala kecil dan menengah dapat mengakses fasilitas pengelasan canggih tanpa perlu investasi besar pada peralatan *Robotik* atau laser. Data proses las dikirim dan dianalisis secara real-time melalui platform cloud, memungkinkan kontrol kualitas, optimasi parameter, dan monitoring progres proyek dari lokasi mana pun. Model ini juga memungkinkan kolaborasi global, di mana pakar welding dari berbagai negara dapat memberikan rekomendasi dan supervisi jarak jauh.

Integrasi WaaS dengan teknologi IoT dan digital twin memungkinkan prediksi cacat, penyesuaian adaptive control, dan efisiensi energi sesuai prinsip green welding. Dengan demikian, perusahaan yang sebelumnya terbatas oleh kapasitas modal dapat memanfaatkan teknologi canggih untuk meningkatkan kualitas sambungan, produktivitas, dan kepatuhan lingkungan. Tren ini mendorong aksesibilitas, kolaborasi internasional, serta inovasi dalam manajemen layanan pengelasan masa depan.

D. Kompetensi dan SDM Pengelasan di Era Digital

Era digital dan integrasi Industry 4.0 telah mengubah paradigma kompetensi di sektor pengelasan. Tidak lagi cukup menguasai teknik

las manual atau pengetahuan konvensional; tenaga kerja harus memiliki keterampilan digital, robotik, sensor, dan analitik data (Zhang *et al.*, 2021). Transformasi ini didorong oleh adopsi *Robotik* cerdas, AI, IoT, digital twin, dan additive manufacturing dalam proses pengelasan modern, sehingga peran SDM lebih kompleks dan strategis. Secara global, kebutuhan kompetensi pengelasan mencakup tiga dimensi utama:

1. Keterampilan teknis tradisional: penguasaan metode las, pemahaman material, kualitas sambungan.
2. Keterampilan digital dan data-driven: penggunaan software simulasi, monitoring sensor, analitik AI.
3. Keterampilan manajemen dan keamanan: pengelolaan risiko, keselamatan kerja, efisiensi energi, dan keberlanjutan.

a. Kompetensi Teknis Modern

Kompetensi teknis modern bagi tenaga kerja di industri pengelasan saat ini menuntut penguasaan berbagai metode pengelasan berbasis energi tinggi dan non-konvensional, termasuk *Laser Beam Welding* (LBW), *Electron Beam Welding* (EBW), plasma arc welding (PAW), *Friction Stir Welding* (FSW), *Ultrasonic Welding*, dan hybrid additive manufacturing. Pemahaman ini tidak hanya mencakup pengoperasian peralatan, tetapi juga pengaturan parameter proses seperti arus, tegangan, travel speed, fokus laser, dan total energi input. Selain itu, operator harus memahami karakteristik material yang kompleks, seperti titanium, superalloy, aluminium alloy, komposit, maupun *smart materials*, serta efek panas yang ditimbulkan, termasuk residual stress, distorsi, dan heat affected zone (HAZ). Studi global menunjukkan bahwa SDM yang terlatih dalam teknologi canggih dapat mengurangi cacat las hingga 50% sekaligus meningkatkan produktivitas (DebRoy *et al.*, 2018).

Kemampuan dalam simulasi dan digital twin menjadi kompetensi wajib. Operator dan engineer modern harus mahir menggunakan software simulasi seperti ANSYS, SYSWELD, atau Simufact Welding untuk merencanakan dan memprediksi hasil pengelasan sebelum produksi fisik. Digital twin memungkinkan prediksi distorsi, tegangan sisa, performa sambungan, serta efisiensi energi dan penggunaan material. Pendekatan ini membantu mengurangi trial-and-error,

mengoptimalkan kualitas sambungan, dan menurunkan limbah material, sejalan dengan prinsip green welding.

b. Kompetensi Digital dan Data-Driven

Kompetensi digital dan data-driven menjadi aspek krusial bagi tenaga kerja modern di industri pengelasan, terutama seiring dengan meningkatnya integrasi teknologi Industry 4.0. Pemahaman penggunaan sensor dan IoT menjadi keharusan, mulai dari sensor arus dan tegangan, thermal imaging, vision system, hingga sensor gas untuk memantau proses las secara real-time. Melalui IoT, data dari berbagai workstation dapat tersentralisasi, memungkinkan integrasi dengan sistem MES (*Manufacturing Execution System*) atau ERP, serta analisis data untuk optimasi proses las. Tenaga kerja harus mampu mengonfigurasi dan mengkalibrasi sensor, menafsirkan data yang diperoleh, serta melakukan pemrograman dasar untuk integrasi dengan *Robot* las dan sistem otomasi. Kemampuan ini memungkinkan monitoring akurat, pengendalian kualitas, dan efisiensi energi yang lebih tinggi dalam produksi.

Penguasaan *Machine Learning*(AI) dan *Machine Learning* (ML) menjadi kompetensi penting bagi SDM modern. Tenaga kerja harus memahami prinsip-prinsip ML dan Deep Learning untuk deteksi cacat las seperti porositas, undercut, atau incomplete fusion, serta untuk prediksi degradasi peralatan dan implementasi predictive maintenance. Sistem AI mampu menyesuaikan parameter las secara adaptif dan real-time berdasarkan feedback sensor, sehingga kualitas seam lebih konsisten dan risiko cacat berkurang.

c. Kompetensi Manajemen dan Keselamatan

Kompetensi manajemen dan keselamatan menjadi pilar penting bagi tenaga kerja modern di industri pengelasan, terutama dalam menghadapi risiko tinggi yang terkait dengan proses energi tinggi seperti *Laser Beam Welding* (LBW), *Electron Beam Welding* (EBW), dan robotic welding. Tenaga kerja harus mampu mengidentifikasi dan mengelola berbagai risiko, mulai dari paparan asap, gas, dan radiasi, hingga potensi kebakaran atau ledakan yang dapat terjadi selama proses pengelasan. Selain itu, aspek ergonomi dan keselamatan operator juga menjadi perhatian utama, khususnya pada robotic welding cells,

di mana interaksi manusia dengan peralatan otomatis memerlukan prosedur keamanan yang ketat untuk mencegah cedera. Pelatihan keselamatan berbasis simulasi digital kini menjadi praktik global, memungkinkan operator berlatih dalam lingkungan virtual yang meniru kondisi lapangan tanpa risiko fisik, meningkatkan kesiapan menghadapi situasi nyata.

Kompetensi modern juga menuntut penguasaan prinsip efisiensi energi dan green welding. SDM harus memahami optimasi penggunaan energi dan material, pengurangan limbah, serta penerapan teknologi ramah lingkungan dalam proses las. Hal ini mencakup kemampuan untuk memantau konsumsi energi secara real-time, memprediksi kebutuhan energi untuk berbagai jenis material dan ketebalan, serta mengatur parameter proses las agar heat input optimal tercapai tanpa memboroskan energi. Penerapan strategi ini tidak hanya menurunkan biaya operasional tetapi juga mendukung keberlanjutan industri dan kepatuhan terhadap regulasi lingkungan.

d. Pendidikan dan Pelatihan SDM

Pendidikan dan pelatihan SDM menjadi faktor krusial dalam mempersiapkan tenaga kerja yang mampu menghadapi tuntutan industri pengelasan modern, terutama di era Welding 4.0. Berbagai perguruan tinggi dan politeknik di Eropa, Jepang, dan Amerika Serikat telah mengembangkan kurikulum yang menekankan integrasi teknologi canggih. Kurikulum ini mencakup pembelajaran tentang *Robotik* dan *collaborative robotics*, digital twin serta simulasi proses las, hingga penerapan AI dan *Machine Learning* untuk prediksi cacat las. Selain itu, integrasi additive manufacturing juga diperkenalkan untuk memberikan wawasan mengenai fleksibilitas desain dan pengurangan limbah material. Program magang industri menjadi komponen penting dalam pendidikan ini, memungkinkan mahasiswa mengalami secara langsung penerapan *smart welding systems* dan memahami tantangan nyata di lapangan (DebRoy *et al.*, 2018).

Pelatihan *on-the-job* di industri global berperan penting dalam meningkatkan kompetensi SDM. Program training modular berbasis digital kini umum diterapkan untuk membekali operator dengan kemampuan menggunakan vision system

dalam inspeksi las, adaptive control untuk penyesuaian parameter real-time, serta monitoring energi dan proses berbasis IoT. Pelatihan semacam ini memungkinkan tenaga kerja untuk langsung mengaplikasikan pengetahuan digital pada proses produksi, meningkatkan akurasi sambungan las, mengurangi kesalahan, serta meminimalkan limbah dan energi terbuang.



BAB XIV

KESIMPULAN

Perkembangan teknologi pengelasan modern menunjukkan pergeseran signifikan dari metode konvensional menuju sistem pengelasan berbasis energi tinggi, otomasi, dan digitalisasi. Pengelasan tidak lagi dipandang sekadar sebagai proses penyambungan material, tetapi sebagai sistem manufaktur cerdas yang melibatkan pemahaman mendalam terhadap ilmu material, fisika proses, mekanika, serta pengendalian mutu berbasis data. Transformasi ini menjadi fondasi penting dalam memenuhi tuntutan industri modern yang mengedepankan presisi, efisiensi, dan konsistensi kualitas.

Berbagai proses pengelasan modern seperti *Laser Beam Welding*, *Electron Beam Welding*, *Friction Stir Welding*, dan *Ultrasonic Welding* terbukti mampu menjawab tantangan penyambungan material maju dan material tak sejenis. Proses-proses tersebut menawarkan keunggulan dalam pengendalian panas, minim distorsi, serta peningkatan kualitas mikrostruktur sambungan. Dengan demikian, pemilihan metode pengelasan yang tepat menjadi faktor kunci dalam menjamin kinerja struktural dan umur pakai komponen industri.

Integrasi robotik, sensor, dan sistem kontrol adaptif telah menjadikan pengelasan sebagai proses yang lebih andal dan terstandarisasi. Penggunaan sistem monitoring real-time, vision system, serta kecerdasan buatan memungkinkan deteksi dini cacat dan penyesuaian parameter secara otomatis. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan produktivitas, tetapi juga mengurangi ketergantungan pada keterampilan manual semata, sehingga kualitas sambungan dapat direproduksi secara konsisten.

Pada konteks material maju dan additive manufacturing, teknologi pengelasan modern berperan strategis dalam mendukung inovasi desain dan manufaktur. Integrasi pengelasan dengan proses manufaktur aditif membuka peluang baru dalam produksi komponen kompleks dengan efisiensi material yang lebih tinggi. Tantangan

metalurgi, kontrol mikrostruktur, dan stabilitas proses menjadi fokus utama yang terus berkembang seiring kemajuan teknologi.

Penerapan teknologi pengelasan modern di berbagai sektor industri seperti otomotif, kedirgantaraan, migas, perkapalan, dan elektronik menunjukkan bahwa pengelasan merupakan elemen vital dalam rantai nilai industri. Selain aspek teknis, perhatian terhadap keselamatan kerja, efisiensi energi, dan dampak lingkungan menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari sistem pengelasan modern yang berkelanjutan.

Buku referensi ini menegaskan bahwa masa depan teknologi pengelasan akan semakin terintegrasi dengan konsep Industri 4.0, *Internet of Things*, dan kecerdasan buatan. Penguasaan teknologi, peningkatan kompetensi sumber daya manusia, serta penguatan riset dan inovasi menjadi kunci untuk menghadapi tantangan industri global. Dengan pemahaman yang komprehensif, teknologi pengelasan modern diharapkan mampu mendukung pembangunan industri yang efisien, aman, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Acherjee, B. (2018). Hybrid laser arc welding: State-of-art review. *Optics & Laser Technology*, 99, 60–71.
- Akinlabi, E. T., & Mahamood, R. M. (2021). *Solid-State Welding: Friction and Friction Stir Welding Processes*. Springer International Publishing. <https://books.google.co.id/books?id=FWgbzgEACAAJ>
- Amin, A. (2016). *PENGARUH VARIASI TEMPERATUR INTERPASS TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN FRAKTOGRAFI HAZ HASIL PENGELASAN GMAW METODE TEMPER BEAD WELDING PADA BAJA KARBON SEDANG*. 02(01).
- Amin, A. (2017). *PENGARUH VARIASI ARUS LISTRIK TERHADAP KEKUATAN TARIK DAN STRUKTUR MIKRO SAMBUNGAN LAS TITIK (SPOT WELDING) LOGAM DISSIMILAR STAINLESS STEEL DAN BAJA KARBON RENDAH*. 02(02), 63–67.
- Aminzadeh, A., Rahmatabadi, D., Pahlavani, M., Moradi, M., & Lawrence, J. (2023). Smart laser welding: a strategic roadmap toward sustainable manufacturing in industry 4.0. In *Sustainable Manufacturing in Industry 4.0: Pathways and Practices* (pp. 41–56). Springer.
- Andersson, O., Semere, D., Melander, A., Arvidsson, M., & Lindberg, B. (2016). Digitalization of process planning of spot welding in body-in-white. *Procedia CIRP*, 50, 618–623.
- Arnichand, R., Boscolo, M., Butera, L., Scaglione, F., Castellero, A., & Baricco, M. (2025). Optimization of Laser-Welded Cu-Al Joints for Electric Vehicle Battery Cases. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1–11.
- Babu, N. R., Kumar, S., Thyla, P. R., & Sripriyan, K. (2023). *Advances in Additive Manufacturing and Metal Joining: Proceedings of AIMTDR 2021*. Springer Nature Singapore. https://books.google.co.id/books?id=sE2_EAAAQBAJ
- Bachmann, M., Gumenyuk, A., & Rethmeier, M. (2016). Welding with high-power lasers: Trends and developments. *Physics Procedia*, 83, 15–25.

- Bansal, A., Kumar, M. S., Shekhar, I., Chauhan, S., & Bhardwaj, S. (2021). Effect of welding parameter on mechanical properties of TIG welded AA6061. *Materials Today: Proceedings*, 37, 2126–2131.
- Barot, R. S., & Patel, V. J. (2021). Process monitoring and *internet of things* feasibility for *Submerged Arc Welding*: State of art. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4441–4446.
- Barrick, E. J., & DuPont, J. N. (2020). Microstructural characterization and toughness evaluation of 10 wt% Ni steel weld metal gas tungsten arc and gas metal arc weld fusion zones. *Materials Science and Engineering: A*, 796, 140043.
- Beygi, R., Marques, E., & da Silva, L. F. M. (2022). *Computational Concepts in Simulation of Welding Processes*. Springer International Publishing. <https://books.google.co.id/books?id=6XxlEAAAQBAJ>
- Breitenbach, J., Dauser, T., Illenberger, H., Traub, M., & Buettner, R. (2021). A Systematic Literature Review on *Machine Learning Approaches for Quality Monitoring and Control Systems for Welding Processes*. *2021 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, 2019–2025.
- Brigham, E. F. (2020). *Financial management: Theory & practice*.
- Brizes, E., Jaskowiak, J., Abke, T., Ghassemi-Armaki, H., & Ramirez, A. J. (2021). Evaluation of heat transfer within numerical models of resistance spot welding using high-speed thermography. *Journal of Materials Processing Technology*, 297, 117276.
- Buang, A. S., Bakar, M. S. A., & Rohani, M. Z. (2024). A review of trend advanced welding process and welding technology in industries. *International Journal of Technical Vocational and Engineering Technology*, 5(1), 133–145.
- Carlone, P., & Astarita, A. (2019). *Dissimilar Metal Welding*. MDPI AG. <https://books.google.co.id/books?id=baLDDwAAQBAJ>
- Casalino, G. (2018). Computational intelligence for smart laser materials processing. *Optics & Laser Technology*, 100, 165–175.
- Cavaliere, P. (2021). *Laser Cladding of Metals*. Springer International Publishing. <https://books.google.co.id/books?id=CFGwzgeEACAAJ>
- Chaturvedi, M., & Vendan, S. A. (2022). *Advanced Welding Techniques: Holistic View with Design Perspectives*. Springer

- Nature Singapore.
<https://books.google.co.id/books?id=VBjdzgEACAAJ>
- Cho, D.-W., Park, Y.-D., & Cheepu, M. (2021). Numerical simulation of slag movement from Marangoni flow for GMAW with computational fluid dynamics. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 125, 105243.
- Cooke, K., & Cozza, R. C. (2022). *Engineering Principles: Welding and Residual Stresses*. IntechOpen.
<https://books.google.co.id/books?id=8Ch4EAAAQBAJ>
- Dave, R., Dave, I. B., Vora, J. J., Chaudhari, R., Das, S., & Gangwar, P. K. (2024). Multiobjective optimization of welding process variables in RMD and FCAW techniques using a heat transfer search algorithm for 316LN stainless steel. *Discover Applied Sciences*, 7(1), 12.
- Davim, J. P. (2022). *Welding Technology*. Springer International Publishing.
<https://books.google.co.id/books?id=WVXozgEACAAJ>
- de Leon, M., & Shin, H.-S. (2023). Prediction of optimum welding parameters for weld-quality characterization in dissimilar ultrasonic-welded Al-to-Cu tabs for Li-ion batteries. *Metals and Materials International*, 29(4), 1079–1094.
- DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Beese, A. M., Wilson-Heid, A. de, De, A., & Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112–224.
- Dwivedi, D. K. (2022). *Fundamentals of Metal Joining: Processes, Mechanism and Performance*. Springer Nature Singapore.
<https://books.google.co.id/books?id=tx52zwEACAAJ>
- Efa, D. A. (2024). Enhancing the efficiency of laser beam welding: multi-objective parametric optimization of dissimilar materials using finite element analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 133(9), 4525–4541.
- Eren, B., Demir, M. H., & Mistikoglu, S. (2023). Recent developments in computer vision and Machine Learningaided intelligent robotic welding applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(11), 4763–4809.
- Gibson, I. (2015). *Additive manufacturing technologies 3D printing*,

- rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. Springer.
- Gogulraj, G., & Rajamurugan, G. (2025). A systematic review of AI-assisted residual stress control in WAAM: real-time defect management and industrial implementation. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 1–48.
- Groover, M. P. (2016). *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing*. Pearson Education India.
- Gyasi, E. A., Kah, P., Wu, H., & Kesse, M. A. (2017). Modeling of an *Machine Learning* system to predict structural integrity in robotic GMAW of UHSS fillet welded joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(1), 1139–1155.
- Haghshenas, M. (2020). *Science, Characterization and Technology of Joining and Welding*. Mdpi AG. <https://books.google.co.id/books?id=IEjmDwAAQBAJ>
- Hamzah. (2023). Development of Welding Technology in the Future: Analysis of Trends and Impacts on Industry and the Environment. *Collaborate Engineering Daily Book Series*, 1(1), 100–106.
- Haque, S. R. (2023). Investigation on welding defects of alloys using TIG and MIG welding. *Hybrid Advances*, 3, 100066.
- Hashimoto, K., Hirata, Y., Kadota, K., & Ogino, Y. (2020). Three-dimensional numerical model of *Short-Circuiting Transfer* in GMAW. *Welding in the World*, 64(12), 2011–2017.
- Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371–392.
- Herzog, T., Brandt, M., Trinchi, A., Sola, A., & Molotnikov, A. (2024). Process monitoring and *Machine Learning* for defect detection in laser-based metal additive manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 35(4), 1407–1437.
- Houldcroft, P. T. (2014). *Submerged-Arc Welding*. Woodhead Publishing. <https://books.google.co.id/books?id=jPvJCgAAQBAJ>
- Kah, P., Layus, P., Hiltunen, E., & Martikainen, J. (2014). Real-time weld process monitoring. *Advanced Materials Research*, 933, 117–124.
- Kah, P., & Martikainen, J. (2012). Current trends in welding processes and materials: improve in effectiveness. *Rev. Adv. Mater. Sci*, 30(2), 189–200.
- Kanemaru, S., Sasaki, T., Sato, T., Mishima, H., Tashiro, S., & Tanaka, M. (2014). Study for TIG–MIG *Hybrid Welding* process. *Welding*

- in the World*, 58(1), 11–18.
- Katayama, S. (2021). *Fundamentals and Details of Laser Welding*. Springer Nature Singapore. <https://books.google.co.id/books?id=qeSizgEACAAJ>
- Kicukov, E., & Gursel, A. (2015). Ultrasonic Welding of dissimilar materials: A review. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 3(1), 28–36.
- King, W. E., Barth, H. D., Castillo, V. M., Gallegos, G. F., Gibbs, J. W., Hahn, D. E., Kamath, C., & Rubenchik, A. M. (2014). Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(12), 2915–2925.
- Klimecka-Tatar, D., Ulewicz, R., & Ingaldi, M. (2023). Minimizing occupational risk by automation of the special processes-based on occupational risk assessment. *Procedia Computer Science*, 217, 1145–1152.
- Knott, P., Csorba, G., Bennett, D., & Kift, R. (2023). Welding fume: a comparison study of industry used control methods. *Safety*, 9(3), 42.
- Korzhyk, V. M., Grynyuk, A. A., Khaskin, V. Y., Illiashenko, Y. V., Klochkov, I. M., Ganushchak, O. V., Yu, X., & Liuyi, H. (2021). Improving the efficiency of robotic fabrication of steel truss welded structures. *Paton Weld. J*, 5, 12–18.
- Kotler, P., Keller, K. L., Ang, S. H., Tan, C. T., & Leong, S. M. (2018). *Marketing management: an Asian perspective*. Pearson London.
- Krivtsov, I. V., Khaskin, V. Y., Korzhik, V. N., & Ziyi, L. (2015). Industrial application of hybrid laser-arc welding. *The Paton Welding Journal*, 7, 41–46.
- Kumar, R., Prasad, A., & Kumar, A. (2023). *Sustainable Smart Manufacturing Processes in Industry 4.0*. CRC Press. <https://books.google.co.id/books?id=6f7SEAAAQBAJ>
- Kumar, R. R., Gupta, R. K., Sarkar, A., & Prasad, M. (2022). Vacuum diffusion bonding of α -titanium alloy to stainless steel for aerospace applications: Interfacial microstructure and mechanical characteristics. *Materials Characterization*, 183, 111607.
- Kumari, S., Bandhu, D., Muchhadiya, A., & Abhishek, K. (2024). Recent trends in parametric influence and microstructural analysis of Friction Stir Welding for polymer composites. *Advances in*

- Materials and Processing Technologies*, 10(3), 1464–1484.
- Kunar, S., & Mandal, G. (2025). *Advanced Welding Technologies*. Wiley. <https://books.google.co.id/books?id=QxVbEQAAQBAJ>
- Kurc-Lisiecka, A., & Lisiecki, A. (2020). Laser welding of stainless steel. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 98(1), 32–40.
- Leggatt, R. H. (2008). Residual stresses in welded structures. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85(3), 144–151.
- Lippold, J. C. (2014). *Welding Metallurgy and Weldability*. Wiley. <https://books.google.co.id/books?id=EldwBQAAQBAJ>
- Lu, Y., Deng, Y., Shi, L., Jiang, L., & Gao, M. (2023). Numerical simulation of thermal flow dynamics in oscillating laser welding of aluminum alloy. *Optics & Laser Technology*, 159, 109003.
- Ma, G., Liu, J., Yu, L., Hong, L., & He, Y. (2020). Numerical simulation of droplet transfer process in ultrasonic-assisted MIG welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 25(3), 179–189.
- Ma, Y., Fan, J., Hou, J., Fu, Y., Tao, R., Wang, S., Tan, M., & Jing, F. (2025). Vision-based Autonomous Robotic Arc Welding: State-of-the-art Review and Perspectives. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*.
- Mahore, N., Sharma, T., & Singh, R. (2017). Study of MIG welding process with different type technique: A review. *IJSTE-International J. Sci. Technol. Eng./*, 4(6), 1–5.
- Martinez-Conesa, E. J., Egea, J. A., Miguel, V., Toledo, C., & Meseguer-Valdenebro, J. L. (2017). Optimization of geometric parameters in a welded joint through response surface methodology. *Construction and Building Materials*, 154, 105–114.
- Meredith, J. R., & Shafer, S. M. (2021). *Project Management: A Strategic Managerial Approach*. Wiley. <https://books.google.co.id/books?id=tL9zzgEACAAJ>
- Messler, R. W. (2024). *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. Wiley. <https://books.google.co.id/books?id=tRFIEQAAQBAJ>
- Meyghani, B., Awang, M. B., Poshteh, R. G. M., Momeni, M., Kakooei, S., & Hamdi, Z. (2019). The effect of friction coefficient

- in thermal analysis of *Friction Stir Welding (FSW)*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 495(1), 12102.
- Minoli, D., Sohraby, K., & Occhiogrosso, B. (2017). IoT considerations, requirements, and architectures for smart buildings—Energy optimization and next-generation building management systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(1), 269–283.
- Mishra, A. (2018). *Friction Stir Welding of dissimilar metal: a review*. Available at SSRN 3104223.
- Mishra, R. S., De, P. S., & Kumar, N. (2016). *Friction Stir Welding and Processing: Science and Engineering*. Springer International Publishing. <https://books.google.co.id/books?id=ZaZdvgAACAAJ>
- Moinuddin, S. Q., Saheb, S. H., Dewangan, A. K., Cheepu, M. M., & Balamurugan, S. (2024). *Automation in the Welding Industry: Incorporating Artificial Intelligence, Machine Learning and Other Technologies*. Wiley. <https://books.google.co.id/books?id=zELyEAAAQBAJ>
- Mondal, B., Gao, M., Palmer, T. A., & DebRoy, T. (2022). Solidification *cracking* of a nickel alloy during high-power keyhole mode laser welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 305, 117576.
- Morgado, L., Silva, F. J. G., & Fonseca, L. M. (2019). Mapping occupational health and safety management systems in Portugal: outlook for ISO 45001: 2018 adoption. *Procedia Manufacturing*, 38, 755–764.
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196.
- Ollero, A., Sanfeliu, A., Montano, L., Lau, N., & Cardeira, C. (2017). *ROBOT 2017: Third Iberian Robotics Conference: Volume 2*. Springer International Publishing. <https://books.google.co.id/books?id=xAxEDwAAQBAJ>
- Papavasileiou, A., Michalos, G., & Makris, S. (2025). Quality control in manufacturing—review and challenges on robotic applications. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 38(1), 79–115.

- Patil, P. C., & Shelke, R. D. (2015). Review on welding parameter effects on TIG welding of aluminium alloy. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 3(3), 1479–1486.
- Patnaik, S., Chattopadhyaya, S., & Shankar, S. (2022). *Friction Stir Welding* and its applications: An overview. *AIP Conference Proceedings*, 2681(1), 20018.
- Peng, P., Fan, K., Fan, X., Zhou, H., & Guo, Z. (2023). Real-time defect detection scheme based on deep learning for laser welding system. *IEEE Sensors Journal*, 23(15), 17301–17309.
- Perka, A. K., John, M., Kuruveri, U. B., & Menezes, P. L. (2022). Advanced high-strength steels for automotive applications: Arc and laser welding process, properties, and challenges. *Metals*, 12(6), 1051.
- Pîrvu, V., Cicic, D. T., Rontescu, C., & Bogatu, A. M. (2023). Research On Establishing Correlations Between The Requirements Of EN ISO 9001: 2015 And EN ISO 3834-2: 2021 Standards For Welded Structure Manufacturing Organizations. *2023 15th International Conference on Electronics, Computers and Machine Learning (ECAI)*, 1–9.
- Purnamasari, D. (2015). *AUDIT TEKNOLOGI GALANGAN KAPAL (STUDI KASUS di PT. IKI)*. 39–48.
- Quintino, L., Liskevich, O., Vilarinho, L., & Scotti, A. (2013). Heat input in full penetration welds in *Gas Metal Arc Welding (GMAW)*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68(9), 2833–2840.
- Rahadian, N. (2025). Advancements in Welding Technology: A Comprehensive Review of Techniques, Materials, and Applications. *Journal PEP Bandung*, 2(1), 62–110.
- Rethmeier, M., Gumenyuk, A., & Bachmann, M. (2022). High-power *Laser Beam Welding* for thick section steels—new perspectives using electromagnetic systems. *Science and Technology of Welding and Joining*, 27(1), 43–51.
- Rezayat, H., Ghassemi-Armaki, H., & Babu, S. S. (2018). *Effects of Heat Affected Zone Softening Extent on the strength of Advanced High Strength Steels Resistance Spot Weld*.
- Ribeiro, R. A., AssunçãO, P. D. C., Dos Santos, E. B. F., Braga, E. M., & Gerlich, A. P. (2021). Globular-to-spray transition in cold wire *Gas Metal Arc Welding*. *Weld. J*, 100, 121–131.

- Salvador, D. C. (2023). Welding safety and health: occupational hazards and risk mitigation. *Int J Adv Res Sci Commun Technol*, 993–997.
- Satpathy, M. P., & Sahoo, S. K. (2017). Experimental and numerical studies on *Ultrasonic Welding* of dissimilar metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(5), 2531–2545.
- Schumacher, S., Hall, R., Waldman-Brown, A., & Sanneman, L. (2022). *Technology adoption of collaborative robots for welding in small and medium-sized enterprises: A case study analysis*.
- Shevchik, S., Le-Quang, T., Meylan, B., Farahani, F. V., Olbinado, M. P., Rack, A., Masinelli, G., Leinenbach, C., & Wasmer, K. (2020). Supervised deep learning for real-time quality monitoring of laser welding with X-ray radiographic guidance. *Scientific Reports*, 10(1), 3389.
- Silva, L. R. R., Nunes, P. D. P., Marques, E. A. S., Carbas, R. J. C., & Silva, L. F. M. da. (2025). *Experimental and Numerical Study of Laser Beam Welding of PBT-G30 for Electronic Housings in Automotive Applications*. 1–15.
- Singh, R. (2021). *Arc Welding Processes Handbook*. Wiley. <https://books.google.co.id/books?id=u1I5EAAAQBAJ>
- Sylvia, R., Setiawati, D., & Titania, R. (2022). Analisis Bauran Pemasaran Untuk Meningkatkan Pendapatan Pada Bengkel Las Iwan Banjarmasin. *Dinamika Ekonomi: Jurnal Ekonomi dan Bisnis*, 15(2), 336-345.
- Udoh, V. E., Ekanem, I. I., & Ikpe, A. E. (2024). A Review of Welding and Fabrication Processes and Resulting Impacts on Environmental Sustainability: Risk and Control Measures. *Risk Assessment and Management Decisions*, 1(1), 142–153.
- Vimalraj, C., & Kah, P. (2021). Experimental review on *Friction Stir Welding* of aluminium alloys with nanoparticles. *Metals*, 11(3), 390.
- Wang, G., Zhao, Y., & Hao, Y. (2018). *Friction Stir Welding* of high-strength aerospace aluminum alloy and application in rocket tank manufacturing. *Journal of Materials Science & Technology*, 34(1), 73–91.
- Wang, X., Hua, Y., Gao, J., Lin, Z., & Yu, R. (2023). Digital twin implementation of autonomous planning arc welding *Robot*

- system. *Complex System Modeling and Simulation*, 3(3), 236–251.
- Wang, Z., Gong, M., Zhou, L., & Gao, M. (2023). A review of numerical simulation of laser–arc hybrid welding. *Materials*, 16(9), 3561.
- Węglowski, M. S. (2018). Friction stir processing–State of the art. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(1), 114–129.
- Węglowski, M. S., Błacha, S., & Phillips, A. (2016). Electron beam welding–Techniques and trends–Review. *Vacuum*, 130, 72–92.
- Weman, K. (2011). *Welding Processes Handbook*. Woodhead Publishing.
<https://books.google.co.id/books?id=oaNgAgAAQBAJ>
- Zavadski, A. (2018). *Advanced welding technologies used in aerospace industry*.
- Zeng, X. H., Xue, P., Wu, L. H., Ni, D. R., Xiao, B. L., Wang, K. S., & Ma, Z. Y. (2019). Microstructural evolution of aluminum alloy during *Friction Stir Welding* under different tool rotation rates and cooling conditions. *Journal of Materials Science & Technology*, 35(6), 972–981.
- Zhang, L.-J., Bai, Q.-L., Ning, J., Wang, A., Yang, J.-N., Yin, X.-Q., & Zhang, J.-X. (2016). A comparative study on the microstructure and properties of copper joint between MIG welding and laser-MIG hybrid welding. *Materials & Design*, 110, 35–50.
- Zhang, Y., Wang, Q., & Liu, Y. (2021). Adaptive intelligent welding manufacturing. *Weld J*, 100(1), 63–83.
- Zhang, Z., Wen, G., & Chen, S. (2019). Weld image deep learning-based on-line defects detection using convolutional neural networks for Al alloy in robotic arc welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 45, 208–216.
- Zhu, Z., Chen, B., Gou, G., Zhang, Z., Ma, C., & Gao, W. (2019). Effect of solid state phase transformation on the residual stress in multi-pass weld plates of S355J2W steel. *International Journal of Modern Physics B*, 33(01n03), 1940046.
- Zinigrad, M., & Borodianskiy, K. (2020). *Welding, Joining and Coating of Metallic Materials*. Mdpi AG.
<https://books.google.co.id/books?id=mFOREAAAQBAJ>



GLOSARIUM

Las	Proses satukan dua logam dengan panas tinggi hingga titik lebur untuk buat sambung yang kuat dan tahan beban.
Busur Listrik	Nyala listrik yang lompat antara dua titik dan jadi sumber panas utama pada banyak teknik las modern.
Gas	Zat cair atau padat yang diuap-kan untuk lindung kolam cair dari oksidasi dan kontaminasi saat proses las.
Panas	Kondisi naik suhu logam hingga cukup untuk ubah bentuk dan lebur dalam proses penyambungan.
Molten Pool	Kolam cair dari logam lebur yang jadi dasar terbentuknya sambung kuat saat dingin dan mengeras.
Luminous Arc	Sinar kuat dari busur listrik yang butuh pelindung mata karena radiasinya sangat tinggi.
Percikan (Spatter)	Percik logam kecil yang terlepas saat busur menyala akibat naiknya suhu dan tekanan.
Kupasan Terak	Lapisan tipis yang lindungi permukaan sambung dari karat atau udara selama tahap pendinginan.
Tekanan	Gaya tekan yang digunakan untuk satukan dua permukaan logam pada las tekan atau las titik.

Kekuatan Tarik	Nilai tahan tarik logam yang tentukan kuat tidaknya sambung setelah proses las selesai.
Uji	Proses cek mutu sambung melalui tahap visual, mekanik, atau non-destruktif untuk pastikan hasil sesuai standar.
Arah Gerak	Jalur gerak busur yang harus stabil supaya sambung rapi, kuat, dan bebas cacat.
Kurang Lebur	Cacat yang muncul saat sambung tidak terbentuk penuh sehingga lemah dan harus diperbaiki.
Retak Las	Celah halus pada logam hasil las yang timbul karena sisa tegangan panas dan pendinginan cepat.
Lurusan	Garis sambung yang tampak jelas dan jadi indikator kualitas teknik dan arah gerak las.

INDEKS

domestik, 193

A

adaptabilitas, 16
aksesibilitas, 250
akuntansi, 227
audit, 21, 193, 241

B

behavior, 178
big data, 14, 18, 93, 142, 146, 243

C

cloud, 18, 21, 238, 239, 240, 248, 250

D

diferensiasi, 229, 232
digital, i, 1, 2, 3, 4, 7, 13, 14, 15, 18, 21,
22, 39, 59, 96, 120, 122, 128, 134, 143,
152, 153, 154, 177, 180, 218, 234, 235,
237, 241, 243, 244, 246, 247, 250, 251,
252, 253, 260
digitalisasi, 7, 11, 13, 14, 16, 219, 237
distribusi, 10, 25, 26, 29, 30, 33, 34, 38,
39, 40, 41, 42, 43, 48, 70, 71, 72, 75,
89, 92, 93, 94, 99, 101, 109, 110, 111,
112, 113, 114, 115, 117, 121, 122, 125,
127, 131, 132, 133, 134, 137, 139, 140,
150, 153, 157, 158, 159, 160, 161, 162,
163, 164, 165, 166, 168, 169, 170, 171,
172, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 192,
230, 232, 239, 240, 242, 244

E

ekonomi, 216
ekspansi, 35, 36, 38, 40, 74, 92, 103, 105,
115, 126, 159, 165, 167, 168, 171, 172
emisi, 17, 19, 49, 80, 190, 200, 205, 207,
208, 209, 210, 211, 229, 232, 249
energi, i, 1, 2, 3, 4, 7, 10, 12, 13, 15, 16,
19, 21, 26, 28, 29, 31, 40, 45, 46, 47,
48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 58,
59, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 72, 75, 76,
77, 84, 87, 89, 97, 99, 101, 102, 104,
105, 110, 111, 113, 114, 115, 117, 118,
119, 120, 121, 122, 124, 126, 128, 129,
131, 133, 136, 139, 157, 160, 161, 162,
166, 171, 173, 174, 181, 183, 187, 195,
204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211,
212, 213, 216, 217, 218, 219, 220, 221,
222, 225, 226, 228, 230, 231, 232, 233,
235, 237, 239, 240, 241, 243, 244, 246,
247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254,
255, 256, 275

F

finansial, 215, 223, 224, 225, 227, 246
fleksibilitas, 1, 9, 20, 52, 56, 57, 60, 84,
85, 87, 100, 128, 130, 162, 185, 226,
232, 247, 249, 253
fluktuasi, 34, 90, 95, 133, 142, 149, 223,
224, 225, 226
forecasting, 225

fundamental, 108, 123, 216

G

gas, 2, 6, 7, 8, 9, 17, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 35, 40, 42, 48, 49, 53, 54, 57, 59, 61, 77, 104, 116, 122, 125, 126, 127, 132, 137, 181, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 192, 195, 196, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 207, 208, 209, 210, 211, 215, 217, 219, 221, 225, 227, 229, 231, 232, 235, 242, 246, 249, 252, 258

I

industri, i, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 21, 29, 30, 32, 39, 40, 45, 46, 47, 49, 50, 51, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 60, 63, 65, 66, 68, 72, 73, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 85, 86, 88, 93, 95, 97, 98, 101, 102, 106, 118, 119, 128, 129, 130, 131, 133, 144, 145, 151, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 198, 199, 200, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 211, 212, 215, 216, 217, 218, 219, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 237, 242, 243, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 255, 256, 275

inovasi, i, 8, 11, 101, 181, 212, 223, 232, 234, 237, 246, 250, 255, 256

inovatif, 130, 235

integrasi, 1, 7, 12, 13, 15, 20, 21, 22, 83, 86, 88, 92, 93, 112, 119, 131, 134, 135, 136, 139, 153, 155, 158, 159, 160, 173, 177, 180, 181, 182, 192, 207, 221, 237,

238, 239, 242, 243, 244, 247, 250, 252, 253

integritas, 7, 9, 11, 12, 14, 35, 36, 37, 40, 42, 52, 67, 70, 77, 79, 82, 99, 101, 106, 108, 109, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 127, 133, 141, 142, 144, 145, 148, 153, 154, 158, 163, 164, 165, 166, 170, 173, 174, 179, 181, 183, 184, 185, 186, 188, 190, 228, 249

internet of things, 258

investasi, 59, 61, 215, 217, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 250

investor, 215, 226

K

kolaborasi, 250

komprehensif, 149, 162, 169, 234

komputasi, 159, 160, 169, 176

konkret, 233

konsistensi, 3, 8, 14, 16, 17, 23, 29, 31, 39, 49, 64, 83, 87, 88, 91, 94, 97, 113, 133, 134, 139, 141, 144, 145, 148, 149, 151, 152, 163, 181, 182, 217, 218, 219, 226, 227, 240, 241, 242, 244, 245, 248

kualitas, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 32, 34, 35, 40, 41, 42, 45, 47, 48, 49, 50, 52, 55, 56, 57, 59, 60, 63, 64, 68, 71, 72, 73, 78, 80, 81, 82, 83, 85, 86, 87, 88, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 104, 105, 108, 110, 112, 113, 116, 121, 122, 125, 126, 127, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 157, 158, 161, 162, 163, 170, 171, 172, 176,

177, 181, 182, 184, 185, 186, 187, 188,
190, 191, 192, 195, 196, 197, 200, 203,
204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211,
212, 216, 217, 218, 219, 221, 224, 226,
227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234,
235, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243,
244, 245, 247, 248, 250, 251, 252, 255,
268, 275

L

las, i, 1, 4, 8, 9, 10, 11, 14, 15, 16, 25, 26,
27, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 37,
38, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 46, 48, 49,
50, 51, 54, 55, 56, 57, 58, 64, 71, 83,
84, 85, 87, 89, 91, 93, 94, 95, 96, 97,
98, 99, 101, 108, 110, 111, 112, 113,
114, 115, 133, 139, 140, 141, 142, 143,
144, 145, 148, 149, 150, 151, 152, 153,
158, 160, 161, 163, 165, 167, 170, 172,
173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180,
181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188,
189, 191, 192, 194, 195, 196, 197, 198,
200, 201, 202, 203, 205, 206, 207, 208,
209, 210, 211, 212, 213, 216, 218, 219,
221, 222, 224, 226, 227, 228, 229, 230,
231, 232, 234, 235, 237, 238, 239, 240,
241, 242, 243, 244, 245, 247, 248, 249,
250, 251, 252, 253, 254, 267, 268, 275

likuiditas, 225

lingkungan, i, 5, 6, 16, 19, 23, 31, 51, 103,
106, 123, 127, 139, 149, 160, 182, 188,
189, 190, 195, 196, 197, 198, 199, 200,
201, 202, 203, 204, 205, 207, 208, 209,
210, 211, 212, 219, 220, 224, 226, 228,
229, 230, 231, 233, 235, 238, 239, 240,
245, 247, 249, 250, 253, 256

logam, 1, 2, 3, 5, 7, 8, 10, 12, 13, 15, 16,
19, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33,
34, 35, 36, 37, 38, 40, 41, 42, 43, 45,
46, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56,
58, 59, 60, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69,
70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 79, 81,
84, 90, 97, 98, 102, 103, 104, 109, 115,
120, 121, 122, 123, 124, 127, 128, 129,
130, 131, 132, 133, 134, 139, 141, 155,
158, 161, 162, 174, 182, 183, 188, 189,
190, 192, 195, 196, 197, 198, 199, 200,
202, 203, 204, 205, 208, 209, 211, 212,
216, 218, 219, 221, 223, 225, 226, 227,
231, 232, 244, 249, 267, 268, 275

M

manipulasi, 59, 61

manufaktur, i, 1, 2, 4, 7, 11, 13, 14, 15, 21,
29, 40, 46, 47, 49, 56, 57, 58, 68, 83,
88, 101, 106, 120, 128, 129, 131, 187,
192, 195, 207, 208, 209, 215, 216, 217,
218, 232, 233, 237, 238, 243, 244, 246,
247, 248, 249, 255, 275

material, i, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11,
12, 13, 15, 16, 19, 20, 23, 25, 26, 27,
28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37,
38, 39, 41, 42, 43, 45, 46, 47, 48, 49,
50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59,
60, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71,
72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81,
82, 83, 84, 85, 87, 88, 89, 90, 92, 93,
94, 95, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103,
104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111,
112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119,
120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127,
128, 129, 130, 131, 132, 133, 135, 136,

137, 139, 140, 141, 144, 145, 146, 150,
151, 154, 155, 157, 158, 159, 160, 161,
162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169,
170, 171, 172, 173, 174, 175, 178, 179,
180, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188,
189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196,
201, 202, 203, 205, 206, 207, 208, 209,
210, 211, 212, 216, 219, 220, 225, 226,
227, 228, 232, 234, 235, 237, 238, 239,
240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247,
248, 249, 251, 253, 255, 275

metodologi, 146, 147

mutu, i, 18, 139, 152, 219, 255, 268

O

otomasi, i, 1, 2, 4, 7, 15, 21, 22, 83, 148,

152, 182, 199, 205, 206, 210, 215, 217,
219, 237, 243, 252, 255

P

payback period, 226

pengelasan, i, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10,
11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20,
21, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31,
32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41,
42, 43, 45, 46, 47, 49, 50, 51, 52, 53,
54, 55, 56, 58, 59, 63, 64, 65, 67, 68,
69, 70, 72, 73, 76, 77, 78, 80, 81, 82,
83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92,
93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 101, 102,
103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110,
111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118,
119, 120, 123, 124, 125, 128, 129, 130,
139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146,
148, 149, 151, 152, 153, 154, 155, 157,

158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165,
166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173,
174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181,
182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189,
190, 191, 192, 193, 195, 196, 197, 198,
199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206,
207, 208, 209, 210, 211, 212, 215, 216,
217, 218, 219, 220, 223, 224, 225, 226,
227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234,
235, 237, 238, 242, 243, 244, 245, 246,
247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 255,
256, 275

prototyping, 120, 158, 177, 180, 260

proyeksi, 215

R

rates, 266

real-time, 2, 11, 14, 17, 20, 21, 22, 23, 39,
40, 42, 43, 59, 60, 83, 84, 85, 87, 88,
89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98,
99, 101, 102, 105, 107, 108, 110, 111,
112, 114, 115, 116, 117, 118, 125, 126,
127, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 136,
139, 140, 141, 142, 144, 145, 147, 148,
150, 151, 152, 153, 154, 155, 172, 181,
195, 199, 204, 205, 206, 210, 226, 227,
228, 234, 237, 238, 239, 240, 241, 242,
243, 244, 245, 247, 248, 249, 250, 252,
253, 254, 260, 265

regulasi, 195, 200, 201, 203, 204, 207,
210, 216, 219, 224, 228, 229, 231, 235,
243, 249, 253

revolusi, 13

S

sistem, i, 1, 2, 4, 6, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 39, 59, 60, 61, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 94, 96, 98, 99, 101, 105, 107, 108, 112, 116, 130, 131, 133, 134, 136, 139, 140, 141, 142, 144, 145, 146, 148, 149, 151, 152, 153, 154, 155, 181, 195, 197, 198, 199, 204, 205, 206, 215, 218, 219, 220, 224, 226, 227, 228, 229, 230, 232, 234, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 252, 255, 256, 275

stabilitas, 5, 10, 20, 27, 28, 29, 31, 41, 48, 49, 50, 57, 60, 64, 68, 82, 88, 90, 97, 101, 102, 111, 116, 133, 134, 143, 154, 172, 187, 206, 212, 223, 224, 234

sustainability, 212, 249

T

tarif, 224, 225, 233

tarik, 34, 36, 37, 42, 70, 74, 122, 133, 164, 165, 171, 172, 173, 183, 268

tegangan, 1, 14, 17, 22, 23, 25, 28, 29, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 45, 49, 50, 51, 52, 57, 58, 59, 70, 74, 76, 77, 78, 80, 81, 82, 84, 87, 89, 90, 93, 94, 96, 97, 98, 101, 103, 104, 109, 111, 112, 115, 129, 131, 132, 139, 142, 149, 154, 155, 157, 158, 159, 160, 161, 163, 164, 165, 167, 168, 169, 170, 171,

172, 173, 174, 175, 177, 178, 179, 180, 194, 205, 206, 208, 228, 238, 239, 240, 241, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 251, 252, 268

tekanan, 2, 6, 42, 49, 63, 64, 65, 66, 67, 69, 71, 72, 73, 74, 76, 77, 79, 88, 89, 90, 92, 98, 103, 105, 108, 113, 117, 118, 136, 181, 182, 185, 187, 188, 202, 267

teknologi, i, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 15, 19, 21, 40, 45, 49, 53, 63, 68, 79, 81, 89, 90, 97, 98, 99, 101, 106, 120, 121, 122, 123, 124, 128, 131, 132, 133, 134, 135, 139, 144, 152, 154, 155, 157, 176, 181, 182, 183, 184, 191, 192, 193, 196, 198, 200, 201, 208, 209, 210, 211, 212, 217, 218, 219, 221, 223, 225, 226, 227, 229, 230, 232, 233, 234, 235, 237, 243, 246, 247, 249, 250, 251, 252, 253, 255, 256, 275

transformasi, 7, 33, 35, 38, 40, 110, 111, 112, 113, 116, 159, 161, 162, 167, 179, 198, 243, 244, 246

U

universal, 113

W

workshop, 216, 217, 218, 220, 222, 224, 225, 232, 233, 234, 235

BIOGRAFI PENULIS



Ahmadil Amin, S.T., M.T.

Lahir di Malintang, 7 Juli 1976. Lulus S2 di Program Magister Teknik Mesin Universitas Brawijaya tahun 2011. Saat ini aktif sebagai Dosen di Universitas Islam Kalimantan Muhammad Arsyad Al Banjari (UNISKA MAB) Banjarmasin pada Program Studi Teknik Mesin.



Hj. Rika Sylvia, S.E., M.M.

Lahir di Banjarmasin, 24 September 1975. Lulus S2 di Program Magister Manajemen Universitas Lambung Mangkurat tahun 2010. Saat ini aktif sebagai Dosen di Sekolah Tinggi Ilmu Ekonomi Nasional (STIENAS) Banjarmasin pada Program Studi Manajemen.



Rendi, S.T., M.T.

Lahir di Rodok, 14 Juli 1989. Lulus S2 di Program Magister Teknik Mesin Universitas Pancasila tahun 2015. Saat ini aktif sebagai Dosen di Universitas Islam Kalimantan Muhammad Arsyad Al Banjari (UNISKA MAB) Banjarmasin pada Program Studi Teknik Mesin.



Jainal Arifin, S.T., M.T.

Lahir di Gunung Rantau, 30 Oktober 1986. Lulus S2 di Program Magister Teknik Mesin Universitas Pancasila tahun 2015. Saat ini aktif sebagai Dosen di Universitas Islam Kalimantan Muhammad Arsyad Al Banjari (UNISKA MAB) Banjarmasin pada Program Studi Teknik Mesin.

TEKNOLOGI PENGELASAN MODERN

PRINSIP, PROSES,
DAN APLIKASI INDUSTRI

Buku referensi “Teknologi Pengelasan Modern: Prinsip, Proses, dan Aplikasi Industri” ini membahas perkembangan teknologi pengelasan yang menjadi fondasi penting dalam industri manufaktur, konstruksi, perkapalan, otomotif, hingga energi. Disusun secara sistematis, buku referensi ini membahas dasar-dasar pengelasan, karakteristik material, dan prinsip kerja proses penggabungan logam yang menjadi inti dari berbagai aktivitas produksi modern. Buku referensi ini membahas beragam proses pengelasan, mulai dari metode konvensional seperti SMAW, MIG/MAG, dan TIG, hingga teknologi mutakhir seperti pengelasan laser, friction stir welding, dan sistem otomatis berbasis robotik. Selain membahas teknik, buku referensi ini juga membahas aspek keselamatan kerja, kualitas hasil las, pemilihan peralatan, hingga standar industri yang relevan.



 mediapenerbitindonesia.com
 +6281362150605
 Penerbit Idn
 @pt.mediapenerbitidn

