

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengelasan

Pengelasan merupakan suatu proses penyambungan logam dengan cara mencairkan sebagian atau seluruh logam induk dan logam pengisi menggunakan energi panas, sehingga menghasilkan sambungan permanen yang memiliki sifat mekanis mendekati logam dasar.

Proses pengelasan melibatkan pembentukan ikatan metalurgi antara weld metal dan base metal serta membentuk *Heat Affected Zone* (HAZ). *Heat Affected Zone* (HAZ) merupakan daerah pada logam induk yang tidak mengalami pencairan, tetapi mengalami perubahan struktur mikro akibat siklus termal selama proses pengelasan, yang dapat mempengaruhi sifat mekanis seperti kekuatan, kekerasan, dan ketangguhan (Chamim et al., 2022). Dalam industri manufaktur, pengelasan menjadi metode penyambungan yang dominan karena kemampuannya menghasilkan sambungan dengan kekuatan tinggi, efisiensi produksi yang baik, serta aplikabilitas pada berbagai jenis material dan konfigurasi geometri. Pemilihan metode pengelasan yang tepat sangat bergantung pada jenis material yang akan disambung, ketebalan material, posisi pengelasan, persyaratan kualitas sambungan, serta pertimbangan ekonomis dan teknis dari proses fabrikasi (Marnanto & Anggono, 2023).

Kualitas hasil pengelasan sangat dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara parameter pengelasan, keterampilan operator, serta kondisi lingkungan kerja. Parameter utama yang harus dikontrol meliputi arus listrik, tegangan, kecepatan pengelasan, polaritas, dan jenis elektroda atau *filler* metal yang digunakan. Kontrol yang tidak tepat terhadap parameter-parameter ini dapat menyebabkan berbagai jenis cacat pengelasan seperti *porosity*, *slag inclusion*, *lack of fusion*, *incomplete penetration*, *undercut*, dan *crack* yang secara signifikan menurunkan integritas struktural sambungan (Fitri, 2024; Mubarok & Machfuroh, 2024).

2.2 Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)

Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), yang juga dikenal sebagai *Tungsten Inert Gas* (TIG) *welding*, merupakan salah satu metode pengelasan busur listrik presisi tinggi yang menggunakan elektroda tungsten *non-consumable* dan gas pelindung *inert* (argon, helium, atau campuran keduanya) untuk melindungi *weld pool* dari kontaminasi atmosfer. Berbeda dengan SMAW, pada proses GTAW logam pengisi (*filler metal*) diumpankan secara terpisah dalam bentuk kawat las (*filler wire*) oleh tangan *welder* atau secara otomatis, sementara busur listrik terbentuk antara elektroda *tungsten* dan *base metal* sebagai sumber energi pencairan.

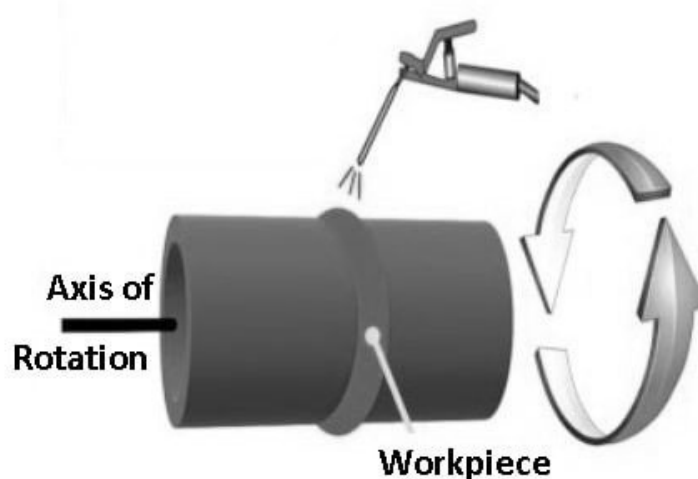
GTAW dapat menggunakan sumber arus listrik AC maupun DC. Untuk pengelasan baja karbon seperti ASTM A106, digunakan polaritas DC EN (*Direct Current Electrode Negative*) di mana elektroda berfungsi sebagai katoda dan *base metal* sebagai anoda. Pada polaritas DC EN, sekitar dua pertiga energi panas busur terkonsentrasi pada base metal, sehingga menghasilkan penetrasi yang lebih dalam dengan laju pencairan elektroda yang minimal. Kawat las (*filler wire*) BOHLER ER 70S-6 yang digunakan dalam penelitian ini merupakan kawat las solid *wire* standar untuk pengelasan baja karbon dan *low alloy steel*, dengan diameter 2,4 mm yang memberikan keseimbangan optimal antara laju deposisi dan kontrol *weld pool* untuk aplikasi pipa tebal (Shieddieque et al., 2021).

Keunggulan utama metode GTAW terletak pada kemampuannya menghasilkan deposit logam las yang sangat bersih tanpa slag, kontrol *heat input* yang lebih presisi dibandingkan SMAW, serta kemampuan mengelas material tipis maupun tebal dengan kualitas permukaan yang superior. Gas pelindung *inert* memberikan perlindungan penuh terhadap *weld pool* sehingga meminimalkan risiko oksidasi dan kontaminasi nitrogen yang dapat menyebabkan *porosity*. Namun, GTAW memiliki laju deposisi yang lebih rendah dibandingkan proses pengelasan lain dan memerlukan keterampilan operator yang sangat tinggi untuk mengontrol elektroda, *filler wire*, dan pedal arus secara bersamaan. Pemilihan

kawat las ER 70S-6 harus disesuaikan dengan material dasar, dengan klasifikasi mengikuti standar AWS A5.18.

2.3 Posisi Pengelasan Pipa 1G

Posisi pengelasan pipa 1G adalah posisi pengelasan di mana pipa diposisikan horizontal dengan sumbu yang dapat dirotasi selama proses pengelasan berlangsung. Pada posisi 1G, pipa diputar sehingga pengelasan selalu dilakukan pada posisi *flat* (datar) di bagian atas pipa, yang merupakan posisi paling menguntungkan secara ergonomis dan gravitasi. Hal ini memungkinkan *welder* untuk mempertahankan sudut elektroda dan jarak busur yang konsisten sepanjang



1G Flat Position

Gambar 2. 1 Posisi Pengelasan Pipa 1G

proses pengelasan tanpa harus menyesuaikan teknik akibat perubahan posisi. Posisi pengelasan pipa 1G dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**

(<https://www.theengineerspost.com/2026>)

Karakteristik utama posisi 1G adalah *weld pool* yang lebih stabil karena gravitasi selalu bekerja vertikal ke bawah terhadap *weld pool*, sehingga logam cair cenderung tetap berada di dalam kampuh tanpa risiko *sagging* atau *drop-through* yang umum terjadi pada posisi *overhead* atau vertical. Kondisi ini memungkinkan penggunaan arus yang lebih tinggi dengan *weld pool* yang lebih besar,

menghasilkan penetrasi yang lebih baik dan laju deposisi yang lebih tinggi dibandingkan posisi pengelasan lain.

Meskipun demikian, posisi 1G tetap memerlukan kontrol parameter yang cermat pada proses GTAW *multi-pass* untuk memastikan kualitas *fusion* antar lapisan, mencegah pembentukan cacat seperti *porosity*, atau *lack of fusion*, serta menjaga *interpass temperature* dalam rentang yang diizinkan. Kecepatan rotasi pipa dan kecepatan pengelasan harus dikontrol secara konsisten untuk menghasilkan *weld bead* yang seragam sepanjang keliling sambungan.

2.4 Material Carbon Steel ASTM A106

Carbon Steel ASTM A106 merupakan material spesifikasi standar yang ditetapkan oleh *American Society for Testing and Materials* (ASTM) untuk pipa baja karbon *seamless* yang digunakan pada layanan temperatur tinggi. Material ini dirancang khusus untuk aplikasi sistem perpipaan bertekanan tinggi yang mentransmisikan fluida dengan temperatur operasi tinggi, seperti pada sistem *steam*, *hydrocarbon processing*, serta transportasi minyak dan gas. ASTM A106 tersedia dalam tiga *grade* berdasarkan kekuatan mekanis dan komposisi kimianya, yaitu *Grade A*, *Grade B*, dan *Grade C*, dengan *Grade B* menjadi yang paling umum digunakan karena memberikan kombinasi optimal antara kekuatan mekanis, *weldability*, *toughness*, dan harga yang ekonomis (Nofri et al., 2018). *Chemical Requirements* ASTM A106 *Grade B* dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2. 1 Chemical Requirements ASTM A106 Grade B (Nofri et al., 2018)

<i>Chemical Composition</i>	(%)
<i>Carbon, max</i>	0.30
<i>Manganese</i>	0.29–1.06
<i>Phosphorus, max</i>	0.035
<i>Sulfur, max</i>	0.035
<i>Silicon, min</i>	0.10

<i>Chrome, max</i>	0.40
<i>Copper, max</i>	0.40
<i>Molybdenum, max</i>	0.15
<i>Nikel, max</i>	0.40
<i>Vanadium, max</i>	0.08

Komposisi kimia *Carbon Steel A106 Grade B* memiliki kandungan karbon maksimum 0,30%, mangan 0,29–1,06%, fosfor maksimum 0,035%, sulfur maksimum 0,035%, serta elemen paduan lain dalam jumlah terkontrol yang memberikan karakteristik superior dibandingkan baja karbon konvensional. Kandungan karbon yang dibatasi ketat bertujuan untuk meningkatkan *weldability* dan mengurangi risiko *hot cracking* serta *cold cracking* pada zona HAZ, sementara kontrol terhadap fosfor dan sulfur yang rendah meningkatkan *toughness* dan mengurangi segregasi yang dapat menyebabkan *embrittlement*.

Material *A106 Grade B* memiliki *tensile strength* minimum 415 MPa (60 ksi) dan *yield strength* minimum 240 MPa (35 ksi), serta elongasi minimum 30% yang menunjukkan *ductility* yang baik. *Carbon equivalent* (CE) material *A106 Grade B* umumnya berkisar antara 0,35–0,45, yang menunjukkan *weldability* yang baik. Namun, kontrol parameter pengelasan tetap krusial untuk mencegah pembentukan struktur martensit pada HAZ yang dapat menyebabkan *hardening* berlebihan dan meningkatkan *susceptibility* terhadap *hydrogen-induced cracking* (Fitri, 2024).

2.5 Sambungan Las *Butt Joint* pada Pipa

Sambungan las *butt joint* merupakan konfigurasi sambungan di mana dua komponen logam diposisikan dengan ujung-ujungnya bertemu pada bidang yang sama dan disambung melalui proses pengelasan sepanjang ketebalan material. Pada aplikasi pipa, *butt joint* adalah jenis sambungan yang paling umum dan paling *critical* karena sambungan ini harus menahan beban *internal pressure*, *thermal stress*, serta *mechanical loading* yang sama dengan pipa dasar tanpa menimbulkan *stress concentration* yang berlebihan.

Desain kampuh untuk sambungan *butt joint* pipa harus mempertimbangkan beberapa faktor penting seperti ketebalan dinding pipa, metode pengelasan yang digunakan, posisi pengelasan, serta persyaratan aksesibilitas untuk inspeksi. Sudut kampuh V tunggal umumnya berkisar antara 60° hingga 75° dengan *root gap* 1,5–3 mm dan *root face* 1–2 mm, yang dirancang untuk memungkinkan penetrasi penuh pada *root pass* sambil meminimalkan *volume weld metal* yang diperlukan untuk mengisi sambungan.

Proses pengelasan *butt joint* pada pipa umumnya melibatkan *multiple-pass welding* dengan urutan yang terdefinisi dengan baik untuk membangun *weld metal* secara progresif dari *root* hingga *cap*. *Root pass* merupakan pass paling kritis karena menentukan kualitas penetrasi dan *fusion* pada bagian dalam pipa. *Hot pass* kemudian diaplikasikan untuk membersihkan sisa kontaminan dan memberikan ikatan yang kuat dengan *base metal*. *Fill pass* dan *cap pass* selanjutnya diaplikasikan untuk membangun ketebalan *weld metal* hingga mencapai ketinggian yang sedikit di atas permukaan *base metal* (Lopo et al., 2023).

2.6 Parameter Pengelasan

Parameter pengelasan merupakan variabel-variabel proses yang dikontrol selama operasi pengelasan untuk menghasilkan karakteristik *weld metal* dan kualitas sambungan yang diinginkan. Parameter utama dalam proses GTAW meliputi arus listrik (*welding current*), tegangan busur (*arc voltage*), kecepatan pengelasan (*travel speed*), polaritas, diameter *filler wire*, serta teknik gerakan tangan *welder* saat mengumpangkan *filler wire*. Interaksi kompleks antara parameter-parameter ini menentukan *heat input* yang masuk ke dalam *base metal*, karakteristik *weld pool*, geometri *weld bead*, tingkat penetrasi, serta mikrostruktur dan sifat mekanis dari *weld metal* dan HAZ yang terbentuk.

Arus listrik (*welding current*) adalah parameter paling fundamental yang mengendalikan laju pencairan *filler wire*, ukuran *weld pool*, serta kedalaman penetrasi. Arus yang lebih tinggi menghasilkan busur yang lebih panas dengan *energy density* yang lebih besar, meningkatkan laju deposisi dan penetrasi, namun juga meningkatkan risiko cacat seperti *excessive penetration*, *spatter*, dan *porosity*.

akibat *turbulence* dalam *weld pool* yang berlebihan. Sebaliknya, arus yang terlalu rendah menghasilkan busur yang tidak stabil, penetrasi yang dangkal, dan meningkatkan risiko *lack of fusion* serta *incomplete penetration* karena *weld pool* yang terlalu dingin.

Kecepatan pengelasan (*travel speed*) mengendalikan jumlah *heat input* per satuan panjang sambungan serta laju solidifikasi *weld pool*. *Travel speed* yang terlalu lambat menyebabkan *heat input* berlebihan dengan *weld pool* yang terlalu besar, meningkatkan risiko *burn-through* dan distorsi yang berlebihan. Sebaliknya, *travel speed* yang terlalu cepat menghasilkan *heat input* yang tidak cukup, *weld bead* yang sempit dengan penetrasi dangkal, serta meningkatkan risiko *lack of fusion* dan *incomplete penetration* (Saputra et al., 2024).

2.7 Multi-Pass Welding (Multilayer Welding)

Multi-pass welding atau *multilayer welding* merupakan teknik pengelasan di mana pengisian logam las dilakukan secara bertahap dalam beberapa lapisan (*pass*) hingga sambungan mencapai ketebalan penuh yang dipersyaratkan. Teknik ini menjadi keharusan pada sambungan *butt joint* pipa berdinding tebal seperti ASTM A106 *Schedule* 80 (ketebalan $\pm 10,97$ mm). Standar industri seperti ASME BPVC *Section IX* mengatur kualifikasi *Welding Procedure Specification* (WPS) dan variabel-variabel proses pengelasan yang harus dikendalikan, sehingga WPS yang *qualified* menjadi acuan parameter dan praktik *multi-pass* untuk memastikan integritas sambungan sesuai kode yang berlaku.

Secara umum, proses *multi-pass welding* pada pipa terdiri atas empat lapisan utama yang memiliki peran berbeda dalam pembentukan sambungan. *Root pass* merupakan lapisan pertama yang paling kritis karena menentukan kualitas penetrasi dan *fusion* di bagian dalam pipa. *Hot pass* diaplikasikan segera setelah *root pass* untuk memperkuat profil akar las. *Filler pass* berfungsi mengisi *volume* utama sambungan secara progresif hingga mendekati permukaan material. *Capping pass* merupakan lapisan penutup yang menentukan profil dan tampilan permukaan akhir sambungan (Lopo et al., 2023).

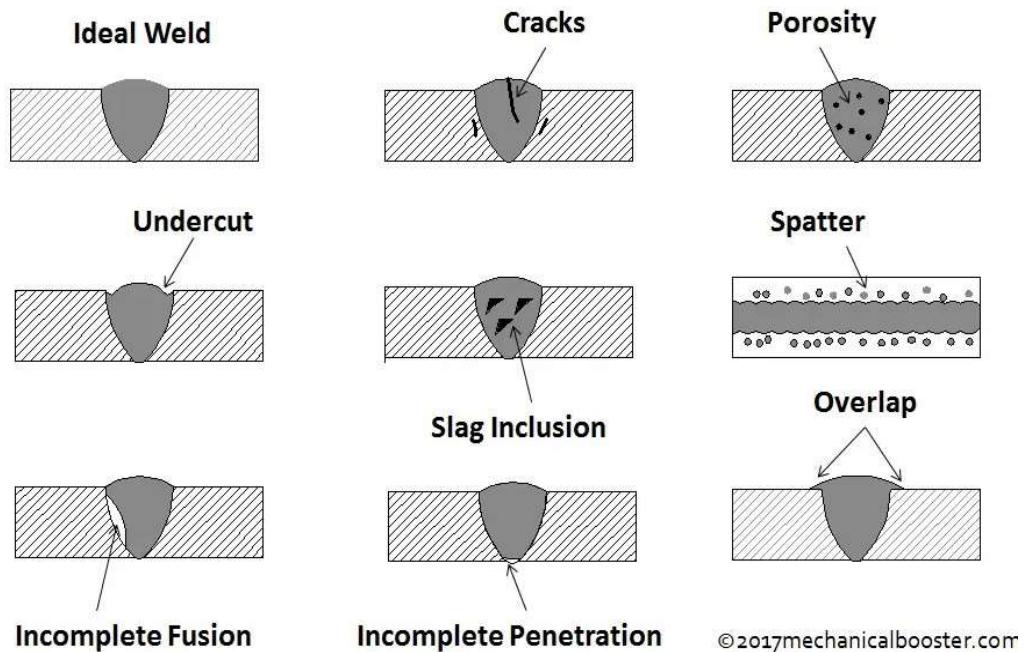
Salah satu aspek paling kritis dalam *multi-pass welding* adalah siklus termal berulang (*repeated thermal cycling*) yang dialami oleh setiap lapisan yang telah diendapkan akibat pemanasan lapisan berikutnya. Kondisi ini disebut sebagai *temper bead effect*, di mana panas dari *pass* berikutnya dapat memperbaiki HAZ dari lapisan sebelumnya. Namun, bila *interpass temperature* tidak dikontrol dengan baik, akumulasi panas berlebihan dapat menyebabkan *grain coarsening* yang menurunkan *toughness* sambungan secara signifikan (Lopo et al., 2023).

Pembersihan antarlapis (*interpass cleaning*) merupakan prosedur penting dalam *multi-pass welding* GTAW untuk menghilangkan oksida dan kontaminan permukaan sebelum mengaplikasikan lapisan berikutnya. Pada GTAW, karena tidak ada *slag* seperti pada SMAW, *interpass cleaning* lebih berfokus pada pembersihan oksida permukaan menggunakan sikat kawat *stainless steel* untuk mencegah kontaminasi yang dapat menyebabkan *porosity* atau *lack of fusion*.

2.8 Heat Input pada Proses Pengelasan

Heat input merupakan parameter termodinamika yang menggambarkan jumlah energi panas yang dimasukkan ke dalam *base metal* per satuan panjang sambungan selama proses pengelasan. *Heat input* dihitung dengan formula $HI = (V \times I \times 60 \times \eta) / (1000 \times v)$, di mana **HI** adalah *Heat Input* (kJ/mm), **V** adalah tegangan busur (*volt*), **I** adalah arus pengelasan (*ampere*), **v** adalah kecepatan pengelasan (mm/min), dan **η** adalah efisiensi *thermal* proses pengelasan. Untuk proses GTAW, efisiensi *thermal* berkisar antara 0,60–0,80 tergantung pada jenis gas pelindung dan kondisi pengelasan.

Heat input yang berlebihan menyebabkan laju pendinginan yang lambat, menghasilkan *grain coarsening* pada HAZ yang menurunkan *toughness* dan meningkatkan risiko *brittle fracture*. Sebaliknya, *heat input* yang terlalu rendah menyebabkan laju pendinginan yang sangat cepat yang meningkatkan *susceptibility* terhadap *hydrogen-induced cracking*, serta menghasilkan *weld pool* yang kecil dan dingin, meningkatkan risiko *lack of fusion* dan *incomplete penetration* (Marthiana et al., 2020).



2.9 Discontinuity dan Cacat Pengelasan

Discontinuity dalam konteks pengelasan merujuk pada setiap diskontinuitas atau ketidaksempurnaan dalam struktur atau komposisi material las. Suatu *discontinuity* dikategorikan sebagai cacat hanya jika ukuran, lokasi, orientasi, atau distribusinya melebihi kriteria *acceptance* yang ditetapkan dalam *welding code* atau *engineering specification* yang berlaku. Klasifikasi *discontinuity* umumnya dibedakan menjadi cacat internal seperti *porosity*, *slag inclusion*, *lack of fusion*, *incomplete penetration*, dan *crack*, serta cacat permukaan seperti *undercut*, *overlap*, *surface porosity*, dan *crater crack*. *Discontinuity* dapat dilihat pada Gambar 2.2.

Gambar 2. 2 Discontinuity

(<https://www.zintilon.com/2026>)

Porosity adalah cacat berupa rongga-rongga gas yang terperangkap dalam *weld metal* selama proses solidifikasi. Pada proses GTAW, *porosity* dapat terbentuk akibat kontaminasi *moisture* pada *base metal*, gas pelindung yang tidak cukup, atau *arc length* yang tidak tepat. *Slag inclusion* pada proses GTAW jarang terjadi karena tidak ada *flux* yang digunakan, namun inklusi oksida atau *tungsten* (*tungsten inclusion*) dapat terjadi akibat kontaminasi elektroda *tungsten* pada *weld pool*. *Lack of fusion* adalah cacat berupa tidak terjadinya penyatuan metalurgi yang sempurna

antara *weld metal* dengan *base metal* atau antara *weld beads* pada *multipass welding*. *Incomplete penetration* adalah cacat di mana *weld metal* tidak mencapai kedalaman penetrasi yang disyaratkan, khususnya pada *root* dari sambungan *butt joint* (Zayadi & Cahyono, 2021).

2.10 Non-Destructive Testing (NDT)

Non-Destructive Testing (NDT) merupakan sekumpulan metode inspeksi dan evaluasi material yang memungkinkan deteksi, lokasi, dan karakterisasi *discontinuity* atau cacat tanpa merusak atau mengubah kemampuan komponen untuk melakukan fungsinya. NDT memainkan peran vital dalam *quality assurance* dan *quality control* pada industri manufaktur, khususnya dalam inspeksi sambungan las, di mana integritas struktural sangat kritis untuk *safety*, *reliability*, dan *compliance* terhadap *codes* dan *standards*.

Metode NDT yang umum digunakan untuk inspeksi sambungan las meliputi *Visual Testing* (VT), *Liquid Penetrant Testing* (PT), *Magnetic Particle Testing* (MT), *Radiographic Testing* (RT), *Ultrasonic Testing* (UT), dan *Eddy Current Testing* (ET). *Radiographic Testing* menggunakan penetrasi radiasi *pengion* (*X-ray* atau *Gamma-ray*) melalui komponen untuk menghasilkan *image* pada film atau *digital detector*, di mana *discontinuity internal* akan menyebabkan variasi intensitas radiasi yang terekam sebagai perbedaan densitas pada *image*. RT memberikan *permanent record* yang baik dan mampu mendeteksi berbagai jenis internal *defects* seperti *porosity*, *lack of fusion*, atau *incomplete penetration* (Artika et al., 2020).

2.11 Radiographic Testing (RT) Sinar-X

Radiographic Testing (RT) sinar-X adalah metode NDT yang menggunakan radiasi elektromagnetik berenergi tinggi (sinar-X) yang dipancarkan dari tabung sinar-X dan diteruskan melalui material yang diinspeksi untuk membentuk bayangan pada film radiografi atau detektor digital. Prinsip dasar RT adalah perbedaan atenuasi radiasi pada daerah cacat dibandingkan material padat di sekitarnya; cacat berupa rongga (*porosity*) akan menyerap lebih sedikit radiasi sehingga menghasilkan area yang lebih gelap pada film radiografi yang disebut sebagai indikasi radiografi.

Keunggulan utama RT sinar-X dalam inspeksi sambungan las meliputi kemampuannya memberikan gambaran visual seluruh penampang sambungan las secara serentak dalam bentuk *permanent record* yang dapat diarsipkan, kemampuan mendeteksi berbagai jenis cacat volumetrik seperti *porosity* dan *tungsten inclusion* dengan sensitivitas yang baik, serta kemampuan mendeteksi *incomplete penetration* dan *crack* yang berorientasi searah dengan berkas sinar-X. Artika dkk (2020) membuktikan bahwa radiografi sinar-X digital mampu mendeteksi cacat internal pada material las dengan akurasi tinggi, termasuk untuk material yang memiliki ketebalan bervariasi.

Prosedur RT untuk inspeksi *weld* mengikuti standar seperti ASME *Section V Article 2* yang menspesifikasikan parameter inspeksi, *geometric unsharpness*, *film sensitivity*, serta *acceptance criteria* untuk berbagai jenis cacat. *Exposure parameter* (kV, mA, waktu) ditetapkan berdasarkan ketebalan material dan jenis film yang digunakan untuk memastikan densitas film yang optimal antara 2,0–4,0. *Source-to-Films Distance* (SFD) dipilih untuk meminimalkan *geometric unsharpness*, sementara penetrometer (IQI/*Image Quality Indicator*) digunakan untuk memverifikasi sensitivitas dan kualitas teknik inspeksi. Wardhani (2019) menegaskan bahwa prosedur radiografi yang terstandar merupakan kunci keberhasilan inspeksi sambungan las dalam industri.

Keterbatasan RT sinar-X meliputi kebutuhan akses dari dua sisi komponen, kesulitan mendeteksi *planar defects* yang berorientasi paralel terhadap arah radiasi, memerlukan *safety precautions* yang ketat karena penggunaan radiasi pengion, serta memerlukan ruang gelap untuk pemrosesan film konvensional. Namun, dengan perkembangan teknologi digital *radiography*, beberapa keterbatasan ini telah dapat diminimalkan. Oleh karena itu, *Radiographic Testing* sinar-X dipilih dalam penelitian ini karena kemampuannya memberikan *permanent record visual* yang komprehensif dari seluruh penampang sambungan las GTAW posisi 1G.

2.12 Penelitian Terdahulu

Tabel 2. 2 Literatur Review

No	Nama	Judul	Tujuan	Metode dan Objek	Hasil dan Kesimpulan / GAP
1	Artika et al. (2020)	Uji Tak Merusak Pelat Elemen Bakar U3Si2/Al Menggunakan Radiografi Sinar-X Digital	Mendeteksi cacat internal menggunakan RT digital	RT digital pada pelat elemen bakar; inspeksi volumetrik	RT digital efektif mendeteksi cacat internal. GAP: belum diaplikasikan pada sambungan las GTAW pipa baja karbon A106 posisi 1G.
2	Wardhani (2019)	<i>Radiographic Examination Procedure as NDT</i>	Menyusun prosedur RT yang terstandar untuk inspeksi industri	Prosedur RT standar; berbagai material industri	Prosedur RT yang terstandar krusial untuk keberhasilan inspeksi. GAP: belum spesifik pada variasi arus GTAW <i>multi-pass</i> .
3	Zayadi & Cahyono (2021)	Analisis Radiografi Sinar-X Terhadap Sambungan Pelat Baja Tahan Karat AISI 304 Hasil Pengelasan TIG dengan Arus	Menganalisis pengaruh arus TIG terhadap cacat yang terdeteksi RT	RT sinar-X; pelat baja AISI 304; variasi arus GTAW	Variasi arus GTAW berpengaruh signifikan terhadap jenis cacat yang terdeteksi RT. GAP: menggunakan material baja tahan karat bukan pipa baja karbon A106, dan bukan posisi 1G <i>multi-pass</i> .

No	Nama	Judul	Tujuan	Metode dan Objek	Hasil dan Kesimpulan / GAP
4	Lopo et al. (2023)	Analisis Pengaruh Arus pada Pengelasan Bertingkat (<i>Multilayer Welding</i>) Terhadap Struktur Mikro, Kekerasan dan Kuat Tarik	Menganalisis pengaruh arus pada <i>multilayer welding</i> terhadap sifat mekanis	<i>Destructive testing</i> ; variasi arus <i>multilayer</i> ; baja karbon	Variasi arus pada pengelasan bertingkat signifikan mempengaruhi homogenitas struktur mikro. GAP: tidak menggunakan material A106, bukan posisi 1G, tidak menggunakan RT sebagai metode karakterisasi.
5	Fitri (2024)	Analisis Kelembapan Udara Terhadap Terjadinya Porositas Pada Sambungan Las SMAW Material Baja A106 <i>Grade B</i> Menggunakan RT dan <i>Liquid Penetrant Test</i>	Menganalisis pengaruh kelembapan terhadap <i>porosity</i> pada A106	RT dan PT; material A106 <i>Grade B</i> ; pengelasan SMAW	Kelembapan merupakan faktor kritis pembentukan <i>porosity</i> pada material A106. GAP: menggunakan SMAW bukan GTAW, tidak menganalisis variasi arus secara komprehensif pada posisi 1G <i>multi-pass</i> .
6	Chamim et al. (2022)	Efek Perbaikan Las Berulang (<i>Multilayer Repair Welding</i>) pada Baja Carbon SS400 terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan	Mengkaji efek siklus termal berulang pada <i>multilayer repair welding</i>	<i>Destructive testing</i> ; baja SS400; <i>multilayer repair welding</i>	Akumulasi siklus termal menyebabkan perubahan signifikan pada struktur mikro dan kekerasan. GAP: tidak menggunakan material A106, bukan GTAW, tidak menggunakan RT sinar-X.

No	Nama	Judul	Tujuan	Metode dan Objek	Hasil dan Kesimpulan / GAP
7	Shieddieque et al. (2021)	<i>Mechanical Strength Analysis A304 Used Metal Filler E308 on GTAW dengan Variasi Parameter</i>	Menganalisis kekuatan mekanis hasil GTAW dengan variasi parameter	<i>Destructive testing</i> ; GTAW; baja A304; variasi parameter	GTAW memberikan kontrol <i>heat input</i> yang presisi. GAP: menggunakan material <i>austenitic stainless steel</i> bukan pipa baja karbon A106, tidak menggunakan RT, tidak menganalisis cacat <i>multi-pass</i> posisi 1G.
8	Valve (Abdulah et al., 2021)	Analisis Keretakan pada Sambungan Las antara Pipa ASTM A106 dengan <i>Globe Valve</i>	Menganalisis penyebab keretakan pada sambungan pipa A106	Analisis kegagalan; pipa ASTM A106; sambungan las	Keretakan pada pipa A106 disebabkan oleh <i>heat input</i> tidak terkontrol. GAP: analisis kegagalan bukan penelitian parameter pengelasan GTAW <i>multi-pass</i> posisi 1G dengan RT.
9	Nofri et al. (2018)	Analisis Sifat Mekanik Pipa <i>Carbon Steel Grade A A106 dan Grade B A53</i> untuk Proses Produksi pada Kilang LNG	Membandingkan sifat mekanis A106 dan A53 untuk aplikasi LNG	<i>Destructive testing</i> ; pipa <i>Carbon Steel A106 dan A53</i>	A106 memiliki kombinasi kekuatan, <i>toughness</i> , dan <i>weldability</i> yang lebih baik. GAP: tidak menganalisis cacat pengelasan akibat variasi arus GTAW posisi 1G dengan RT sinar-X.

Penelitian tentang pengaruh parameter pengelasan terhadap kualitas sambungan las telah banyak dilakukan dengan fokus pada berbagai variabel, material, dan metode evaluasi. Zayadi dan Cahyono (2021) menganalisis cacat sambungan las TIG pada pelat baja tahan karat AISI 304 dengan variasi arus menggunakan metode radiografi sinar-X dan menemukan bahwa arus pengelasan berpengaruh signifikan terhadap pembentukan cacat, di mana arus rendah cenderung menghasilkan *lack of fusion* dan *incomplete penetration*, sedangkan arus tinggi meningkatkan risiko *porosity* akibat *turbulensi weld pool*. Temuan ini sejalan dengan penelitian Shieddieque et al. (2021) yang menganalisis kekuatan mekanis sambungan GTAW dengan variasi parameter dan mengonfirmasi bahwa kontrol heat input melalui pengaturan arus merupakan kunci kualitas sambungan GTAW. Namun, kedua penelitian tersebut tidak menggunakan material *Carbon Steel A106* yang merupakan material standar pipa bertekanan tinggi, serta tidak menganalisis kondisi *multi-pass* posisi 1G secara spesifik. Penelitian ini mengisi gap tersebut dengan menganalisis pengaruh variasi arus GTAW khusus pada material ASTM A106 Grade B posisi 1G.

Penelitian yang berkaitan dengan *multi-pass welding* mencakup beberapa kajian yang saling melengkapi. Lopo dkk (2023) menganalisis pengaruh arus pada pengelasan bertingkat (*multilayer welding*) terhadap struktur mikro, kekerasan, dan kuat tarik, menemukan bahwa variasi arus antar lapisan secara signifikan memengaruhi homogenitas struktur mikro dan distribusi kekerasan akibat perbedaan *heat input* yang diterima setiap lapisan. Chamim et al. (2022) mengkaji efek perbaikan las berulang (*multilayer repair welding*) pada baja karbon SS400 dan menemukan bahwa akumulasi siklus termal dari pengerjaan ulang menyebabkan perubahan signifikan pada struktur mikro dan distribusi kekerasan. Kedua penelitian ini mengonfirmasi bahwa kontrol parameter arus pada setiap lapisan dalam pengelasan bertingkat merupakan variabel *fundamental* yang menentukan jenis dan distribusi cacat internal. Namun, kedua penelitian tidak menggunakan material A106, tidak fokus pada posisi 1G, dan tidak menggunakan RT sinar-X sebagai metode karakterisasi cacat utama.

Dari aspek inspeksi menggunakan radiografi, Artika et al. (2020) membuktikan bahwa radiografi sinar-X digital mampu mendeteksi cacat internal pada material las dengan akurasi tinggi. Wardhani (2019) menegaskan pentingnya prosedur radiografi yang terstandar sebagai kunci keberhasilan inspeksi. Fitri (2024) menemukan bahwa metode RT efektif mendeteksi *porosity* pada material baja A106, meskipun penelitian tersebut menggunakan metode SMAW, bukan GTAW. Berdasarkan kajian komprehensif terhadap penelitian terdahulu, terdapat gap signifikan dalam literatur yang akan diisi oleh penelitian ini: belum ada kajian yang mengintegrasikan secara simultan material *Carbon Steel* ASTM A106 Grade B, posisi pengelasan 1G, variasi arus GTAW *multi-pass*, dan karakterisasi cacat menggunakan *Radiographic Testing* sinar-X dalam satu kajian komprehensif.

2.13 Kerangka Pemikiran Penelitian

Tabel 2. 3 Kerangka Berpikir

MATERIAL DAN PROSES Pipa <i>Carbon Steel</i> ASTM A106 Grade B – <i>Butt Joint</i> – GTAW – Posisi 1G
PERSIAPAN <i>Filler Wire</i> : BOHLER ER 70S-6 □ 2,4 mm Kampuh V 70° <i>Root Face</i> : 2 mm <i>Root Gap</i> : 3 mm
PARAMETER PENGELASAN <i>Root Pass</i> (80A, 100A, 120A) <i>Hot Pass</i> (100A, 120A, 130A) <i>Filler Pass</i> (100A, 120A, 130A) <i>Capping Pass</i> (100A, 120A, 130A)
HEAT INPUT → KARAKTERISTIK WELD POOL → PERILAKU LOGAM CAIR
MEKANISME PEMBENTUKAN CACAT: Termal Fluida Kolam Las Peleburan & Fusi Pelepasan Gas Metalurgi & Solidifikasi Gravitasi Posisi 1G
RADIOGRAPHIC TESTING (RT) SINAR-X 1. Deteksi cacat 2. Jenis dan ukuran cacat 3. Distribusi dan lokasi cacat
EVALUASI STANDAR: ASME <i>Section V</i> & ASME B31.3
ANALISIS KORELASI: Arus vs Jenis, Ukuran, dan Frekuensi Cacat

Kerangka pemikiran penelitian pada Tabel 2.3 dibangun berdasarkan pemahaman bahwa kualitas sambungan las *butt joint* pada pipa *Carbon Steel* ASTM A106 Grade B sangat bergantung pada kontrol parameter pengelasan, khususnya arus listrik yang merupakan parameter fundamental dalam proses GTAW. Alur pemikiran penelitian ini dimulai dari penetapan material dan proses, persiapan, parameter pengelasan, *heat input*, karakteristik *weld pool*, perilaku logam cair, mekanisme pembentukan cacat, hasil las, inspeksi RT sinar-X, evaluasi standar, hingga analisis korelasi akhir.

Penelitian ini menggunakan pipa *Carbon Steel* ASTM A106 Grade B *seamless* ukuran NPS 6" (OD ± 168 mm), *Schedule* 80 (ketebalan $\pm 10,97$ mm) sebagai objek utama penelitian. Jenis sambungan yang digunakan adalah *butt joint* dengan metode GTAW pada posisi 1G (*flat rotated pipe*). Posisi 1G dipilih karena merupakan konfigurasi pengelasan pipa yang umum dijumpai dalam fabrikasi di *workshop* dan memberikan kondisi *weld pool* yang paling stabil secara gravitasi, sehingga memungkinkan isolasi pengaruh variasi arus terhadap pembentukan cacat tanpa gangguan faktor gravitasi yang berubah-ubah.

Parameter pengelasan ditetapkan secara *multi-pass* (*multilayer welding*) sesuai dengan karakteristik pipa tebal A106 *Schedule* 80. Parameter yang digunakan adalah *ampere*: *root pass* (80A, 100A, 120A), *hot pass* (100A, 120A, 130A), *filler pass* (100A, 120A, 130A), dan *capping pass* (100A, 120A, 130A) dengan *volts* (*root pass* dan *hot pass*: 10V; *filler pass* dan *capping pass*: 12V) dan *travel speed* (*root pass*: 30 mm/min; *hot pass*: 50 mm/min; *filler pass* dan *capping pass*: 70 mm/min), dengan seluruh variabel selain arus dijaga konstan.

2.14 Hipotesis Penelitian

Berdasarkan kajian teori, tinjauan pustaka, dan penelitian terdahulu yang telah diuraikan, maka dapat dirumuskan hipotesis penelitian sebagai berikut:

1. Pengaruh Variasi Arus terhadap Jenis, Ukuran, dan Jumlah Cacat Las: Variasi arus pengelasan GTAW pada kisaran 80A–130A berpengaruh signifikan terhadap jenis dan jumlah cacat internal yang terbentuk pada sambungan *butt joint* pipa ASTM A106 Grade B posisi 1G, di mana arus

yang terlalu rendah pada setiap lapisan (*root pass* $\leq 80\text{A}$, *hot pass* $\leq 100\text{A}$, *filler pass* $\leq 100\text{A}$, *capping pass* $\leq 100\text{A}$) cenderung menghasilkan cacat dominan berupa *lack of fusion* dan *incomplete penetration*, sedangkan arus yang terlalu tinggi (*root pass* $\geq 120\text{A}$, *hot pass* $\geq 130\text{A}$, *filler pass* $\geq 130\text{A}$, *capping pass* $\geq 130\text{A}$) cenderung menghasilkan cacat dominan berupa *porosity* akibat turbulensi *weld pool* yang berlebihan.

2. Karakteristik dan Distribusi Cacat Internal Berdasarkan Inspeksi RT Sinar-X: Cacat internal yang terdeteksi melalui inspeksi *Radiographic Testing* sinar-X pada sambungan *butt joint* pipa ASTM A106 Grade B posisi 1G tidak terdistribusi merata, melainkan menunjukkan pola distribusi yang spesifik berdasarkan lapisan pengelasan, di mana *incomplete penetration* dan *lack of fusion* cenderung dominan pada zona *root pass* dan *hot pass*, serta *porosity* cenderung terbentuk lebih merata pada *filler pass* dan *capping pass*.
3. Rentang Arus Pengelasan Optimal pada Setiap Lapisan: Terdapat rentang arus pengelasan yang optimal untuk masing-masing lapisan pada pengelasan GTAW *multi-pass butt joint* pipa ASTM A106 Grade B posisi 1G, yaitu pada kisaran arus menengah dari rentang yang diuji (*root pass* sekitar 100A, *hot pass* sekitar 120A, *filler pass* sekitar 120A, dan *capping pass* sekitar 120A) yang menghasilkan *heat input* cukup untuk menjamin penetrasi dan *fusi* yang sempurna sekaligus tidak menyebabkan turbulensi *weld pool* berlebihan, sehingga menghasilkan jumlah, ukuran, dan jenis cacat paling minimal berdasarkan evaluasi *Radiographic Testing* sesuai standar ASME Section V dan ASME B31.3.