

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Industri manufaktur modern, khususnya sektor minyak dan gas, menghadapi tuntutan ketat terhadap kualitas sambungan las pada sistem perpipaan bertekanan tinggi. Pengelasan merupakan metode penyambungan yang umum digunakan karena kemampuannya menghasilkan sambungan permanen dengan kekuatan mendekati material dasar. Namun, kualitas sambungan las sangat bergantung pada kontrol parameter pengelasan dan keterampilan operator, di mana ketidaksesuaian dapat menimbulkan cacat las yang mengancam integritas struktur. *Carbon Steel A106* merupakan material standar yang secara luas diaplikasikan dalam konstruksi pipa bertekanan tinggi dan sistem transportasi fluida bertemperatur tinggi berdasarkan spesifikasi ASTM A106. Material ini dipilih karena memiliki kombinasi optimal antara kekuatan mekanis, ketahanan terhadap temperatur tinggi, *weldability*, dan ketahanan terhadap tekanan tinggi dengan harga yang ekonomis (Nofri et al., 2018). Berbeda dengan material baja karbon konvensional seperti ST 37, ST 45, atau ST 60 yang banyak diteliti dalam studi terdahulu, *Carbon Steel A106* memiliki komposisi kimia yang lebih terkontrol dengan kandungan karbon, mangan, fosfor, dan sulfur yang dibatasi ketat untuk meningkatkan *toughness* dan mengurangi risiko hot *cracking*, sehingga memerlukan penelitian komprehensif yang menganalisis cacat pengelasan spesifik pada material ini.

Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), yang juga dikenal sebagai TIG *welding*, merupakan salah satu metode pengelasan busur listrik yang menghasilkan kualitas sambungan tertinggi di antara berbagai proses pengelasan yang ada. Proses GTAW menggunakan elektroda tungsten yang tidak terumpan (*non-consumable*) dan gas pelindung *inert* untuk melindungi *weld pool* dari kontaminasi atmosfer. Keunggulan GTAW terletak pada kontrol *heat input* yang lebih presisi, deposit logam las yang lebih bersih, serta kemampuan menghasilkan sambungan dengan tampilan permukaan yang lebih halus dibandingkan SMAW. Pada posisi pengelasan 1G (*flat position*), pipa diposisikan horizontal dan dapat dirotasi selama

pengelasan berlangsung, sehingga *welder* selalu berada pada posisi *flat* yang paling menguntungkan secara gravitasi. Hal ini menjadikan posisi 1G sebagai posisi yang paling mudah dikontrol namun tetap memerlukan ketelitian dalam pengaturan parameter pengelasan untuk menghasilkan kualitas sambungan yang konsisten. Dibandingkan dengan posisi lainnya, perbedaan mendasar terletak pada pengaruh gravitasi dan kontrol weld pool. Pada posisi 2G (*horizontal fixed*), pipa berdiri vertikal dan pengelasan dilakukan secara horizontal, sehingga *welder* harus mengkompensasi kecenderungan logam cair untuk jatuh ke bawah akibat gravitasi, yang meningkatkan risiko cacat *undercut* dan *overlap*. Posisi 5G menuntut *welder* bergerak mengelilingi pipa yang diam horizontal, sehingga dalam satu putaran *welder* harus menghadapi seluruh variasi posisi mulai dari flat di bagian atas, horizontal di sisi pipa, hingga *overhead* di bagian bawah, menjadikannya jauh lebih menantang. Posisi 6G, yang merupakan posisi paling sulit, menetapkan pipa pada kemiringan 45° dan tidak dapat dirotasi, sehingga *welder* harus menguasai kombinasi seluruh posisi pengelasan sekaligus dalam satu sambungan (Capitol Iron Works, 2024). perlu dipahami bahwa *welder* yang memiliki kualifikasi posisi 1G tidak secara otomatis diizinkan melaksanakan pengelasan pada posisi yang lebih tinggi (2G, 5G, atau 6G), namun *welder* yang bersertifikasi 6G diperbolehkan mengerjakan semua posisi di bawahnya termasuk 1G (Make Piping Easy, 2020). Hal ini menunjukkan bahwa 1G merupakan basis fundamental dalam hirarki kualifikasi pengelasan, dan penguasaan parameter 1G yang optimal merupakan prasyarat penting sebelum meningkat ke posisi yang lebih kompleks. Dalam konteks penelitian ini, fokus pada posisi 1G juga memungkinkan karakterisasi cacat yang dihasilkan semata-mata oleh variasi arus tanpa pengaruh faktor posisi, sehingga hasil penelitian dapat dijadikan baseline data yang valid dan dapat diaplikasikan sebagai acuan dalam pengembangan *Welding Procedure Specification (WPS)* untuk pipa Carbon Steel A106.

Pada pengelasan sambungan *butt joint* pipa berdinding tebal seperti ASTM A106 Schedule 80 (ketebalan $\pm 10,97$ mm), proses penyambungan tidak dapat dilakukan dalam satu lintasan, melainkan harus menggunakan teknik pengelasan berlapis atau *multi-pass (multilayer welding)*, yang terdiri atas *root pass*, *hot pass*,

filler pass, dan *capping pass*. Setiap lapisan memiliki fungsi dan kondisi termal yang berbeda, sehingga memerlukan pengaturan arus yang tepat secara individual. *Root pass* yang dikerjakan dengan arus paling rendah menentukan kualitas penetrasi dan *fusion* di bagian dalam pipa, sementara *hot pass* berfungsi membersihkan sisa *slag* dan memperkuat ikatan akar las; adapun *filler pass* dan *capping pass* secara progresif mengisi dan menutup sambungan hingga mencapai ketebalan penuh yang dipersyaratkan (Lopo et al., 2023). Setiap kali lapisan baru diaplikasikan, lapisan di bawahnya mengalami *reheating* yang memengaruhi struktur mikro dan sifat mekanis yang telah terbentuk sebelumnya, kondisi yang dikenal sebagai *temper bead effect*.

Justifikasi teknis dari batas bawah 80A merujuk pada kebutuhan minimum heat input untuk mencapai penetrasi yang memadai pada ketebalan material ≈ 11 mm. Pada root pass yang menggunakan filler wire diameter 2,4 mm (3/32 inch), arus minimum sekitar 80–90A diperlukan untuk membentuk keyhole yang cukup guna memastikan full penetration pada root. Welding Tips and Tricks (2024) menyebutkan bahwa pada root pass GTAW untuk pipa *carbon steel* schedule 80 dengan *filler wire* 3/32 inch, arus sekitar 90A dengan arc yang ketat mampu membentuk keyhole yang diperlukan. Demikian pula, dari forum praktisi Miller *Welding Discussion*, disebutkan bahwa root dan hot pass pada pipa carbon steel schedule 80 secara umum dikerjakan pada sekitar 100A, dan arus di bawah 75A lebih sesuai untuk elektroda berdiameter lebih kecil (0.8–1.6 mm). Batas atas 130A didasarkan pada kapasitas tungsten elektroda yang digunakan (diameter 2,4 mm / 3/32 inch) dan kebutuhan filler pass serta capping pass pada tebal material. Elektroda tungsten berdiameter 3/32 inch pada polaritas DCEN mampu menangani arus hingga sekitar 130–150A secara aman tanpa mengalami overheating atau burn-off yang dapat mengkontaminasi weld pool dengan partikel tungsten. Pada pass pengisian (*filler pass*) dan *capping pass* yang menyambung lapisan lebih tebal di atas hot pass, arus yang sedikit lebih tinggi diperlukan untuk memastikan penetrasi lateral yang cukup ke dinding *groove* dan *fusion* yang baik dengan lapisan sebelumnya. Penentuan batas 130A sebagai titik maksimum juga bertujuan untuk menghindari heat input berlebihan yang dapat menyebabkan *excessive penetration*,

burn-through, atau terbentuknya cacat akibat *overheating* seperti *hot cracking* dan *porosity* pada *Carbon Steel A106* yang memiliki kandungan karbon terkontrol. Dengan demikian, range arus 80A–130A pada penelitian ini bukan merupakan penetapan arbitrer, melainkan rentang yang secara teknis bermakna dan mencakup seluruh kondisi pengelasan dari kondisi arus terlalu rendah (*underheat*) hingga kondisi arus yang berisiko menyebabkan *overheat*, sehingga memberikan variasi yang cukup untuk mengidentifikasi cacat yang representatif pada kedua ekstrem kondisi pengelasan.

Metode Non-Destructive Testing (NDT) memainkan peran vital dalam *quality control* pengelasan, karena kemampuannya mengevaluasi integritas sambungan las tanpa merusak komponen yang diinspeksi. *Radiographic Testing* (RT) dengan sinar-X merupakan metode NDT yang sudah lama dikenal dan banyak diaplikasikan dalam industri perpipaan karena kemampuannya memberikan gambaran volumetrik dari seluruh penampang sambungan las dalam bentuk rekaman permanen (*radiograph*). Keunggulan RT sinar-X terletak pada kemampuannya mendeteksi cacat internal seperti *porosity*, *lack of fusion*, dan *incomplete penetration* secara visual dan kuantitatif, serta memberikan dokumentasi permanen yang dapat diarsipkan sebagai bukti kualitas inspeksi. Zayadi dkk (2021) membuktikan bahwa radiografi sinar-X efektif mendeteksi cacat internal pada sambungan las GTAW, termasuk ketidaksempurnaan yang terjadi akibat variasi arus pengelasan.

Permasalahan yang melatarbelakangi penelitian ini adalah masih tingginya kasus kegagalan sambungan las pada pipa *Carbon Steel A106* yang disebabkan oleh cacat pengelasan akibat parameter arus yang tidak terkontrol secara optimal. Studi pada pengelasan GTAW material baja A106 Grade B menunjukkan bahwa variasi kelembapan udara dan parameter arus yang tidak tepat dapat menyebabkan tingkat porositas hingga melebihi batas toleransi *acceptance* criteria standar industri (Fitri, 2024). Dalam praktik industri, pemilihan arus pengelasan sering didasarkan pada pengalaman empiris welder atau rekomendasi umum dari manufacturer elektroda, tanpa mempertimbangkan karakteristik spesifik material, geometri sambungan, dan

posisi pengelasan secara komprehensif. Penelitian pada pengelasan GTAW material baja SS400 mengungkapkan bahwa variasi arus berpengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik sambungan, di mana penyimpangan arus sebesar 10–20% dari parameter optimal dapat menurunkan kekuatan tarik hingga 15% (Saputra et al., 2024). Abdulah et al. (2021) mengidentifikasi kasus keretakan pada sambungan las antara pipa ASTM A106 dengan globe valve yang mengindikasikan pentingnya kontrol parameter pengelasan pada material ini. Selain itu, penelitian multilayer welding pada baja karbon menunjukkan bahwa kesalahan pengaturan arus antar lapisan dapat meningkatkan jumlah cacat internal hingga 40% dibandingkan pengelasan dengan parameter terkontrol (Lopo et al., 2023). Kesenjangan data empiris tentang hubungan antara variasi arus pengelasan GTAW posisi 1G dengan jenis serta distribusi cacat pada pipa A106 yang terdeteksi melalui Radiographic Testing menjadi problematika yang mendesak untuk dijawab guna meningkatkan reliability sistem perpipaan bertekanan tinggi.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara komprehensif pengaruh variasi arus pengelasan terhadap jenis, ukuran, dan distribusi cacat yang terbentuk pada sambungan *butt joint* pipa *Carbon Steel* A106 dengan posisi pengelasan 1G menggunakan metode GTAW. Melalui pendekatan eksperimental dengan *ampere range* 80A–130A, *volts range* 10V–12V, parameter kecepatan pengelasan (*travel speed*) 30–70 mm/min, dan inspeksi menggunakan *Radiographic Testing* sinar-X, penelitian ini diharapkan mampu memberikan rekomendasi parameter variasi arus pengelasan 1G GTAW yang optimal, sehingga dapat meminimalkan pembentukan cacat sambungan las. Selain itu penelitian ini mengisi gap literatur dengan mengintegrasikan beberapa aspek yang belum pernah dikaji secara simultan dalam studi terdahulu, yaitu material *Carbon Steel* A106 yang banyak digunakan industri namun belum terdokumentasi dengan baik karakteristik cacat lasnya, posisi pengelasan 1G yang merupakan konfigurasi paling umum dalam fabrikasi pipa namun kurang diteliti dalam konteks GTAW *multi-pass*, serta penggunaan *Radiographic Testing* sinar-X sebagai metode karakterisasi cacat yang objektif dan memberikan *permanent record*.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh variasi arus pengelasan GTAW (80A–130A) dengan parameter tegangan 10V–12V dan kecepatan pengelasan 30–70 mm/min terhadap jenis, ukuran, dan jumlah cacat las pada sambungan *butt joint* pipa ASTM A106 Grade B posisi 1G?
2. Bagaimana karakteristik, lokasi, dan distribusi cacat internal (*porosity*, *lack of fusion*, dan *incomplete penetration*) pada sambungan hasil pengelasan tersebut berdasarkan inspeksi *Radiographic Testing* (RT) sinar-X?
3. Berapakah rentang arus pengelasan (*root pass*, *hot pass*, *filler*, dan *capping*) yang paling optimal untuk meminimalkan pembentukan cacat las pada sambungan *butt joint* pipa ASTM A106 Grade B posisi 1G, berdasarkan evaluasi hasil pemeriksaan RT sinar-X?

1.3 Ruang Lingkup

Untuk memfokuskan penelitian agar mendalam dan terarah, maka penelitian ini dibatasi pada ruang lingkup sebagai berikut:

1. **Material:** Penelitian menggunakan pipa ASTM A106 Grade B *seamless* ukuran NPS 6" (OD ± 168 mm), *Schedule 80* (*thickness* $\pm 10,97$ mm).
2. **Metode Pengelasan:** Proses pengelasan menggunakan metode *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dengan elektroda merk BOHLER ER 70S-6 (diameter 2,4 mm).
3. **Posisi Pengelasan:** Pengelasan dilakukan pada posisi 1G (*flat/rotated pipe*).
4. **Jenis Sambungan:** Sambungan yang digunakan adalah *butt joint* dengan sudut kampuh V 70°, *root face*: 2 mm, *root gap*: 3 mm, dan *Polarity*: DC EN (*Direct Current Electrode Negative*).

5. **Parameter Variasi:** Parameter yang divariasikan adalah arus pengelasan dengan variasi *ampere range* 80A–130A dan *volts range* 10V–12V dengan parameter kecepatan pengelasan (*travel speed*) 30–70 mm/min.
6. **Metode Inspeksi:** Inspeksi cacat las menggunakan metode *Non-Destructive Testing* (NDT) dengan teknik *Radiographic Testing* (RT) sinar-X.
7. **Jenis Cacat:** Penelitian terfokus pada identifikasi cacat internal dan *subsurface* seperti *porosity*, *lack of fusion*, dan *incomplete penetration* yang dapat dideteksi menggunakan RT sinar-X.
8. **Analisis:** Analisis dilakukan secara kualitatif (jenis dan lokasi cacat) dan kuantitatif (ukuran dan frekuensi kemunculan cacat) berdasarkan hasil pembacaan film radiografi sesuai acuan standar: ASME *Section V* & ASME B31.3 (inspeksi pipa).
9. Tidak membahas sifat mekanik (*tensile*, *impact*, *hardness*, mikrostruktur).
10. Tidak membahas perbandingan metode NDT lain (UT, PT, MPI).
11. Tidak menganalisis WPS secara menyeluruh; fokus pada parameter arus.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dengan tujuan:

1. Menganalisis pengaruh variasi arus pengelasan GTAW (80A–130A) dengan tegangan 10V–12V dan kecepatan pengelasan 30–70 mm/min terhadap jenis, ukuran, dan jumlah cacat las pada sambungan *butt joint* pipa ASTM A106 *Grade B* posisi 1G.
2. Mengidentifikasi karakteristik dan distribusi cacat internal (*porosity*, *lack of fusion*, dan *incomplete penetration*) pada hasil pengelasan tersebut berdasarkan inspeksi *Non-Destructive Testing* (NDT) – *Radiographic Testing* (RT) sinar-X.
3. Menentukan rentang arus pengelasan (*root pass*, *hot pass*, *filler*, dan *capping*) yang paling optimal untuk meminimalkan cacat pada sambungan

butt joint pipa ASTM A106 Grade B posisi 1G sebagai dasar rekomendasi parameter proses.

1.5 Manfaat Penelitian

A. Bagi Peneliti

1. Meningkatkan pemahaman mendalam tentang *metallurgy of welding*, khususnya hubungan antara variasi arus pengelasan GTAW dengan mekanisme pembentukan cacat pada sambungan *butt joint* pipa *Carbon Steel* A106 posisi 1G.
2. Memberikan pengalaman praktis dalam menerapkan dan menganalisis hasil *Radiographic Testing* (RT) sinar-X sebagai metode evaluasi kualitas sambungan las yang objektif dan memberikan permanent *record*.
3. Mengembangkan kompetensi dalam perancangan eksperimen, pengolahan data inspeksi RT, serta analisis berbasis data ilmiah yang menjadi bekal akademik dan profesional di bidang pengelasan dan inspeksi material.

B. Bagi Industri

1. Menjadi referensi empiris dalam menentukan rentang arus yang lebih tepat untuk sambungan *butt joint* pipa A106 dalam penyusunan *Welding Procedure Specification* (WPS).
2. Membantu mengurangi kemungkinan cacat las, *rework*, dan *rejection rate*, sehingga berdampak pada peningkatan efektivitas biaya dan produktivitas fabrikasi.
3. Mendukung peningkatan keandalan sambungan perpipaan bertekanan melalui pilihan parameter arus yang lebih terukur.

C. Bagi Akademisi / Pendidikan / Masyarakat

1. Menambah sumber pembelajaran terkait hubungan parameter pengelasan GTAW dengan kualitas sambungan pipa melalui deteksi RT sinar-X.

2. Dapat digunakan sebagai acuan penelitian lanjutan yang berkaitan dengan optimasi parameter pengelasan dan pengembangan standar inspeksi kualitas sambungan las.