

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, dimana 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 & Fardiansyah, 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.

Pengelasan pipa pada posisi 2G (*horizontal fixed pipe*) merupakan salah satu posisi pengelasan yang paling menantang dalam praktik industri perpipaan. Posisi ini mengharuskan pipa dalam posisi horizontal dengan sumbu tetap, sementara *welder* harus mengelas sepanjang keliling pipa dengan perubahan sudut yang kontinyu dari *flat*, *overhead*, hingga *vertical*. Gravitasi mempengaruhi aliran logam cair secara berbeda pada setiap kuadran pengelasan, sehingga memerlukan penyesuaian teknik dan kontrol parameter yang presisi untuk mencegah cacat seperti *sagging*, *undercut*, atau *incomplete fusion*. Waranugraha et al (2025) membuktikan bahwa posisi pengelasan berpengaruh langsung terhadap kekuatan

tarik dan kekuatan impact sambungan, di mana posisi 2G menunjukkan karakteristik cacat yang berbeda dibandingkan posisi 1G dan 3G akibat pengaruh gravitasi yang tidak merata. Meskipun penelitian tentang pengelasan SMAW telah banyak dilakukan pada posisi 1G *flat* dan posisi 3G *vertical* (Hidayat et al., 2024), namun analisis mendalam tentang karakteristik cacat spesifik pada posisi 2G masih sangat terbatas, padahal posisi 2G merupakan konfigurasi yang paling umum dijumpai dalam instalasi sistem perpipaan industri dan posisi yang paling representatif dalam instalasi pipa industri. Penelitian terkini dari Assagaf et al (2025) yang menganalisis cacat las SMAW dengan variasi elektroda pada posisi 2G baja ST 37 menguatkan bahwa posisi 2G memiliki kompleksitas unik yang membutuhkan kajian parameter tersendiri.

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) membuktikan bahwa variasi arus pada proses *multilayer welding* mempengaruhi homogenitas struktur mikro, distribusi kekerasan, dan kuat tarik sambungan akibat perbedaan *heat input* antar lapisan. Selain itu, Munir et al (2019) menunjukkan bahwa ketidakterkendalian urutan lapisan pada *multi pass temper bead welding* dapat meningkatkan gradien termal dan tegangan sisa yang berpotensi memicu retak, terutama pada HAZ dari lapisan pertama. Burhanudin et al (2022) menemukan bahwa akumulasi siklus termal dari pengerjaan ulang menyebabkan perubahan pada struktur mikro dan distribusi kekerasan akibat semakin banyaknya pass yang diaplikasikan.

Arus pengelasan merupakan parameter fundamental dalam proses *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) yang mempengaruhi karakteristik busur las, penetrasi, laju deposisi, dan stabilitas proses pengelasan. Arus yang terlalu rendah menyebabkan penetrasi tidak sempurna dan meningkatkan risiko *lack of fusion* serta *slag inclusion*, sedangkan arus berlebihan dapat menimbulkan *excessive penetration*, *undercut*, *spatter*, dan porositas akibat *turbulence* dalam *weld pool* (Setiawan & Imran, 2019). Hal ini dikonfirmasi oleh penelitian terkini yang mengkaji cacat pengelasan SMAW pada material baja ST 41 posisi 1G, di mana variasi arus terbukti menjadi faktor determinan terhadap jenis dan frekuensi cacat yang terbentuk (Elga et al., 2025). Pada penelitian lain oleh Setia & Pranatal (2022) yang menganalisis cacat las SMAW posisi 2G baja A36 dengan variasi arus dan sudut pengelasan, ditemukan bahwa arus merupakan variabel paling dominan dalam menentukan profil cacat internal. Cacat las tidak hanya menurunkan kekuatan statis struktur, tetapi juga menjadi *stress concentrator* yang sangat berbahaya pada kondisi *cyclic loading* dan tekanan tinggi (Sulaiman et al., 2020). Pada aplikasi pipa bertekanan, keberadaan cacat dapat menyebabkan kegagalan prematur melalui mekanisme *fatigue crack growth* atau *brittle fracture*, yang pada sistem kritis seperti pipa gas atau *steam* dapat berujung pada ledakan atau kebocoran masif.

Metode *Non-Destructive Testing* (NDT) memainkan peran vital dalam *quality control* pengelasan. Dalam penelitian ini, *Phased Array Ultrasonic Testing* (PAUT) dipilih sebagai metode inspeksi utama. PAUT merupakan metode NDT ultrasonik generasi lanjut yang menggunakan *array transducer multi-element* yang dapat diaktifkan secara elektronik untuk menghasilkan berkas ultrasonik yang dapat dikontrol arah, sudut, dan fokusnya tanpa menggerakkan *probe* secara fisik. Pujono & Galih (2018) membuktikan keunggulan PAUT dalam inspeksi komponen kritis seperti *upper wing top skin* panel pesawat, di mana PAUT mampu menghasilkan pencitraan *S-scan* yang komprehensif dengan resolusi dan akurasi jauh lebih tinggi dibandingkan metode konvensional. Syarifuddin & Akbar (2024) secara khusus menerapkan PAUT pada analisis cacat las pipa pembakaran boiler dan membuktikan bahwa PAUT mampu mendeteksi dan memetakan cacat dengan

resolusi yang superior, termasuk cacat berukuran kecil yang tidak terdeteksi oleh radiografi konvensional. Dibandingkan dengan *Conventional Ultrasonic Testing* (UT) yang digunakan dalam penelitian-penelitian sebelumnya seperti Hidayat et al (2024), Sulaiman et al (2020), serta Wangsa (2023), PAUT menawarkan keunggulan berupa kemampuan pemindaian volumetrik secara elektronik, pencitraan *B-scan* dan *S-scan real-time*, akurasi *sizing* cacat yang lebih tinggi melalui metode 6 dB *drop* atau DAC yang terotomasi, serta kemampuan mendeteksi cacat *planar* yang berorientasi dalam berbagai sudut tanpa perlu mengganti *probe*. Widyawati et al (2021) juga membuktikan efektivitas metode ultrasonik lanjut dalam mengidentifikasi cacat lasan pada fondasi mesin kapal menggunakan FCAW, yang memperkuat dasar ilmiah pemilihan PAUT untuk inspeksi las pipa bertekanan.

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. 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. Setiawan & Imran (2019) membuktikan secara empiris bahwa variasi arus pada pengelasan SMAW *butt joint* berpengaruh signifikan terhadap jumlah dan ukuran cacat, di mana penggunaan arus rendah 70A menghasilkan 7 indikasi cacat dengan rata-rata panjang 5 mm, jauh lebih banyak dibandingkan arus 90A yang hanya menghasilkan 4 indikasi dengan rata-rata panjang 3 mm. Pada material pipa ASTM A106 *Grade B* khususnya, Rofiqie & Fitri (2024) mengidentifikasi bahwa cacat *porosity* dapat berkembang drastis hingga 150 mm pada kondisi kelembapan tinggi, mengindikasikan sensitivitas tinggi material ini terhadap parameter proses pengelasan. Lebih lanjut, Lopo et al (2023) menunjukkan bahwa variasi arus pada pengelasan *multilayer* SMAW material ASTM A106 berpengaruh terhadap kekuatan mekanik sambungan, di mana penggunaan arus yang lebih tinggi menghasilkan kuat tarik 470,4 MPa atau meningkat 2,5% dibanding kombinasi arus rendah. Abdulah et al (2021) juga

mengidentifikasi kasus keretakan pada sambungan las pipa ASTM A106 di area HAZ yang disebabkan oleh ketidaksempurnaan prosedur pengelasan pada sistem bertekanan operasi 6 Bar, mengkonfirmasi konsekuensi langsung dari kontrol parameter yang tidak memadai terhadap integritas sambungan. Kesenjangan data empiris tentang hubungan antara variasi arus pengelasan SMAW posisi 2G dengan jenis, serta distribusi cacat pada pipa A106 yang terdeteksi melalui PAUT 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 2G menggunakan metode SMAW. Melalui pendekatan eksperimental dengan *ampere range* 70A-130A, *volts range* 21V-25V, parameter kecepatan pengelasan (*travel speed*) 50-125 mm/min dan inspeksi menggunakan *Phased Array Ultrasonic Testing* (PAUT), penelitian ini diharapkan mampu memberikan rekomendasi parameter variasi arus pengelasan 2G SMAW yang optimal. Penelitian ini mengisi gap literatur dengan mengintegrasikan beberapa aspek yang belum pernah dikaji secara simultan, yaitu material *Carbon Steel* A106 yang banyak digunakan industri namun belum terdokumentasi karakteristik cacat lasnya pada posisi 2G, serta penggunaan PAUT sebagai metode karakterisasi cacat yang lebih objektif, kuantitatif, dan memiliki resolusi lebih tinggi dibandingkan metode UT konvensional.

1.2 Perumusan Masalah

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

1. Bagaimana pengaruh variasi arus pengelasan SMAW (70A-130A) dengan parameter tegangan 21V-25V dan kecepatan pengelasan 50-125 mm/min terhadap jenis, ukuran, dan jumlah cacat las pada sambungan *butt joint* pipa ASTM A106 *Grade B* posisi 2G?
2. Bagaimana karakteristik, lokasi, dan distribusi cacat internal (*porosity*, *slag inclusion*, *lack of fusion* dan *incomplete penetration*) pada sambungan hasil

pengelasan tersebut berdasarkan inspeksi *Phased Array Ultrasonic Testing* (PAUT)?

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 2G, berdasarkan evaluasi hasil pemeriksaan PAUT?

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 ± 10.97 mm).

2. **Metode Pengelasan**

Proses pengelasan menggunakan metode *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) dengan elektroda merk BOHLER E 7018-H4R (diameter 3,2mm).

3. **Posisi Pengelasan**

Pengelasan dilakukan pada posisi 2G (*horizontal fixed pipe*).

4. **Jenis Sambungan**

Sambungan yang digunakan adalah *butt joint* dengan sudut kampuh V 70°, *root face* : 2mm, *root gap* : 3mm dan *Polarity* : DC EP (*Direct Current Electrode Positive*).

5. **Parameter Variasi**

Parameter yang divariasikan adalah arus pengelasan dengan variasi arus *ampere range* 70A–130A dan *volts range* 21V–25V dengan parameter kecepatan pengelasan (*travel speed*) 50–125 mm/min dan dijaga konstan.

6. **Metode Inspeksi**

Inspeksi cacat las menggunakan metode *Non-Destructive Testing* (NDT) dengan teknik *Phased Array Ultrasonic Testing* (PAUT).

7. Jenis Cacat

Penelitian terfokus pada identifikasi cacat internal dan *subsurface* seperti *porosity*, *slag inclusion*, *lack of fusion* dan *incomplete penetration* yang dapat dideteksi menggunakan PAUT.

8. Analisis

Analisis dilakukan secara kualitatif (jenis dan lokasi cacat) dan kuantitatif (ukuran dan frekuensi kemunculan cacat) berdasarkan hasil pembacaan sinyal PAUT 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 (RT, PT, MPI, UT Konvensional).
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 SMAW (70A–130A) dengan tegangan 21V–25V dan kecepatan pengelasan 50–125 mm/min terhadap jenis, ukuran, dan jumlah cacat las pada sambungan *butt joint* pipa ASTM A106 *Grade B* posisi 2G.
2. Mengidentifikasi karakteristik dan distribusi cacat internal (*porosity*, *slag inclusion*, *lack of fusion* dan *incomplete penetration*) pada hasil pengelasan tersebut berdasarkan inspeksi *Non-Destructive Testing* (NDT) – *Phased Array Ultrasonic Testing* (PAUT).
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 2G sebagai dasar rekomendasi parameter proses.

1.5 Manfaat Penelitian

A. 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 dan berbasis data PAUT.

B. Bagi Masyarakat

1. Menambah sumber pembelajaran terkait hubungan parameter pengelasan SMAW dengan kualitas sambungan pipa melalui deteksi PAUT.
2. Dapat digunakan sebagai acuan penelitian lanjutan yang berkaitan dengan optimasi parameter pengelasan dan pengembangan standar inspeksi kualitas sambungan las menggunakan teknologi PAUT.