

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian eksperimental yang meliputi proses pengelasan SMAW *multi-pass butt joint* pipa ASTM A106 Grade B NPS 6" *Schedule 80* posisi 2G dengan tiga variasi arus, inspeksi menggunakan *Phased Array Ultrasonic Testing* (PAUT) sesuai standar ASME *Section V*, dan evaluasi berdasarkan *acceptance criteria* ASME B31.3, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengaruh Variasi Arus terhadap Jenis, Ukuran, dan Jumlah Cacat Las

Variasi arus pengelasan SMAW pada kisaran 70A–130A terbukti berpengaruh terhadap jenis, ukuran, dan jumlah cacat internal yang terbentuk pada sambungan *butt joint* pipa ASTM A106 Grade B posisi 2G dengan pola *non-linier* yang mencerminkan dua mekanisme pembentukan cacat yang saling berlawanan. Arus rendah (Variasi 1: *root* 70A, *hot* 80A, *filler* 105A, *capping* 90A) menghasilkan total 15 indikasi dengan dominasi jenis *Planar* (7 indikasi) yang mengindikasikan cacat *lack of fusion* dan *incomplete penetration* akibat insufisiensi *heat input* (0,91–1,64 kJ/mm), dengan *rejection rate* 46,7% berdasarkan ASME B31.3. Arus tinggi (Variasi 3: *root* 95A, *hot* 115A, *filler* 130A, *capping* 120A) menghasilkan total 11 indikasi dengan dominasi jenis *Volumetric* (8 indikasi) yang mengindikasikan *porosity cluster* akibat turbulensi *weld pool* berlebihan pada *heat input* tinggi (1,26–2,26 kJ/mm), dengan *rejection rate* 54,5%. Arus menengah (Variasi 2: *root* 85A, *hot* 100A, *filler* 120A, *capping* 110A) menghasilkan jumlah indikasi paling sedikit (9 indikasi) seluruhnya bertipe *Round type* dan *Volumetric* kecil yang dinyatakan *Accept*, dengan *rejection rate* 0%. Pergeseran dominasi tipe cacat dari *Planar* (V1) ke *Round type* (V2) ke *Volumetric* (V3) merupakan bukti empiris bahwa mekanisme pembentukan cacat bergeser secara sistematis dari defisiensi fusi menuju *gas entrapment* seiring peningkatan arus dan *heat input*.

2. Karakteristik dan Distribusi Cacat Internal Berdasarkan Inspeksi PAUT

Inspeksi PAUT mengungkapkan bahwa cacat internal pada sambungan *butt joint* pipa ASTM A106 Grade B posisi 2G tidak terdistribusi merata, melainkan menunjukkan pola distribusi yang spesifik berdasarkan lapisan pengelasan dan kuadran posisi 2G. Berdasarkan lapisan, cacat *Planar (lack of fusion dan incomplete penetration)* pada Variasi 1 terkonsentrasi pada zona *root pass* dan *hot pass* (kedalaman 7–10 mm), konfirm bahwa lapisan-lapisan dengan *heat input* paling rendah paling rentan terhadap cacat jenis ini. Cacat *Volumetric (porosity cluster)* pada Variasi 3 terdistribusi lebih merata di seluruh kedalaman, dengan konsentrasi tertinggi pada zona *filler pass* dan *capping pass* (kedalaman 2–7 mm) akibat *heat input* berlebihan pada lapisan pengisi ini. Berdasarkan kuadran posisi 2G, frekuensi indikasi cacat tertinggi ditemukan pada kuadran *overhead* (240° – 300°) pada semua variasi, mengkonfirmasi bahwa gravitasi yang bekerja berlawanan dengan arah *weld pool* pada kuadran ini memperburuk kedua mekanisme pembentukan cacat secara simultan. Karakteristik cacat yang diperoleh secara kuantitatif melalui tampilan *A-scan*, *B-scan*, dan *S-scan* PAUT memberikan pemetaan tiga dimensi yang komprehensif dan lebih objektif dibandingkan metode inspeksi konvensional, memvalidasi keunggulan PAUT sebagai metode inspeksi untuk sambungan las pipa bertekanan tinggi.

3. Rentang Arus Pengelasan Optimal per Lapisan

Berdasarkan evaluasi hasil inspeksi PAUT terhadap seluruh sembilan spesimen dan pemenuhan *acceptance criteria* ASME B31.3, rentang arus pengelasan yang paling optimal untuk meminimalkan pembentukan cacat pada sambungan *butt joint* pipa ASTM A106 Grade B NPS 6" Schedule 80 posisi 2G menggunakan elektroda BOHLER E7018-H4R diameter 3,2 mm adalah: *root pass* 85A (*heat input* 2 kJ/mm) yang menjamin penetrasi penuh tanpa *lack of fusion*; *hot pass* 100A (*heat input* 1,05 kJ/mm) yang mengoptimalkan pembersihan *slag* dan penguatan ikatan akar las; *filler pass* 120A (*heat input* 1,16 kJ/mm) yang menghasilkan pengisian kampuh

sempurna tanpa *porosity*; dan *capping pass* 110A (*heat input* 1,06 kJ/mm) yang menghasilkan profil permukaan akhir yang baik tanpa cacat *subsurface*. Parameter optimal ini sepenuhnya konsisten dengan Variasi 2 (arus menengah) yang merupakan satu-satunya variasi dengan *rejection rate* 0%, ketiadaan indikasi *Planar*, dan seluruh *spesimen* dinyatakan *Accept* berdasarkan ASME B31.3. Rentang *heat input* optimal keseluruhan yang direkomendasikan untuk pengelasan *butt joint* pipa A106 Grade B posisi 2G adalah 1,05–2 kJ/mm, dengan penyesuaian per lapisan sesuai fungsi masing-masing lapisan dalam proses *multi-pass*.

5.2 Saran

1. Saran untuk Industri dan Praktisi

Berdasarkan temuan penelitian ini, beberapa rekomendasi praktis berikut dapat dipertimbangkan untuk implementasi langsung di lingkungan industri perpipaan:

1. Parameter arus optimal yang ditetapkan dalam penelitian ini (*root pass* 85A, *hot pass* 100A, *filler pass* 120A, *capping pass* 110A) direkomendasikan untuk diadopsi ke dalam *Welding Procedure Specification* (WPS) yang digunakan pada pengelasan *butt joint* pipa ASTM A106 Grade B NPS 6" *Schedule* 80 posisi 2G dengan elektroda BOHLER E7018-H4R diameter 3,2 mm, khususnya pada industri minyak, gas, dan petrokimia.
2. Inspeksi sambungan las menggunakan *Phased Array Ultrasonic Testing* (PAUT) sebaiknya diprioritaskan sebagai metode NDT utama untuk sambungan pipa bertekanan tinggi, mengingat kemampuannya menghasilkan pemetaan cacat tiga dimensi yang komprehensif dengan akurasi *sizing* superior dibandingkan metode konvensional, sehingga memungkinkan keputusan *accept/reject* yang lebih akurat dan dapat dipertanggungjawabkan.
3. Pada pelaksanaan pengelasan posisi 2G di lapangan, perhatian khusus perlu diberikan pada kuadran *overhead* (240°–300°) yang terbukti menjadi zona dengan frekuensi cacat tertinggi akibat pengaruh

gravitasi. *Welder* disarankan untuk menyesuaikan teknik ayunan elektroda dan kecepatan pengelasan secara adaptif pada kuadran ini untuk mengimbangi pengaruh gravitasi terhadap *weld pool*.

4. Pengawasan *interpass temperature* perlu dilakukan secara ketat (tidak melebihi 250°C) untuk memastikan kondisi termal yang konsisten antar lapisan. *Monitoring* arus aktual menggunakan *amperemeter* kalibrasi juga disarankan untuk memastikan kesesuaian antara *arus setting* dan arus aktual, mengingat deviasi arus aktual dari *setting* dapat mempengaruhi kualitas sambungan.

2. Saran untuk Penelitian Lanjutan

Penelitian ini membuka peluang pengembangan lebih lanjut di berbagai arah yang akan memperkaya *body of knowledge* di bidang pengelasan dan inspeksi material:

1. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengkombinasikan analisis cacat PAUT dengan pengujian sifat mekanis (*tensile test*, *impact test*, *hardness test*, dan analisis struktur mikro) pada spesimen yang sama, sehingga dapat dibangun korelasi yang komprehensif antara jenis dan distribusi cacat PAUT dengan degradasi sifat mekanis akibat variasi arus pengelasan.
2. Studi perluasan dengan menggunakan dimensi pipa yang berbeda (NPS 4", NPS 8", NPS 10") dan *schedule* yang berbeda (*Schedule 40*, *Schedule 160*, *XXH*) direkomendasikan untuk mengevaluasi apakah parameter arus optimal yang ditemukan dalam penelitian ini bersifat universal atau spesifik terhadap dimensi pipa tertentu.
3. Penelitian dengan memperluas rentang variasi arus pada kisaran yang lebih sempit di sekitar arus optimal Variasi 2 (misalnya *root pass*: 80A, 83A, 85A, 87A, 90A) dapat menghasilkan kurva korelasi yang lebih presisi dan memungkinkan penentuan arus optimal dengan resolusi yang lebih tinggi.
4. Studi komparasi antara metode PAUT dengan teknik ToFD (*Time of Flight Diffraction*) dan *Full Matrix Capture* (FMC) – *Total Focusing*

Method (TFM) pada spesimen yang sama direkomendasikan untuk memberikan validasi silang terhadap akurasi *sizing* cacat yang diperoleh dalam penelitian ini dan mengkuantifikasi keunggulan komparatif masing-masing metode untuk jenis cacat spesifik.

5. Pengembangan model prediktif berbasis *machine learning* atau *artificial neural network* (ANN) yang menggunakan data arus, tegangan, *heat input*, dan karakteristik sinyal PAUT sebagai *input* untuk memprediksi jenis dan ukuran cacat secara *real-time* merupakan arah penelitian lanjutan yang sangat menjanjikan untuk implementasi *automated quality control* pada proses pengelasan pipa industri.