

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian eksperimental pengaruh variasi arus pengelasan GTAW *multi-pass* posisi 1G terhadap jenis, ukuran, dan distribusi cacat pada sambungan *butt joint* pipa *Carbon Steel* ASTM A106 Grade B yang diinspeksi menggunakan *Radiographic Testing (RT)* sinar-X sesuai standar ASME Section V dan ASME B31.3, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

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

Variasi arus pengelasan GTAW pada kisaran 80A–130A terbukti berpengaruh signifikan terhadap jenis, ukuran, dan jumlah cacat internal yang terbentuk pada sambungan *butt joint* pipa ASTM A106 Grade B posisi 1G. Variasi 1 (arus rendah: root 80A, hot 100A, filler/cap 100A) menghasilkan jumlah indikasi cacat terbanyak dengan total 9 indikasi pada 3 spesimen dan tingkat penolakan 100%, di mana cacat dominan berupa *porosity* berbagai ukuran dan *slag inclusion* akibat *heat input* yang tidak mencukupi. Variasi 2 (arus sedang: root 100A, hot 120A, filler/cap 120A) menghasilkan jumlah indikasi paling sedikit yakni 2 indikasi dengan seluruh spesimen dinyatakan *ACCEPT (0% rejection)*, membuktikan adanya rentang arus optimal yang meminimalkan pembentukan cacat. Variasi 3 (arus tinggi: root 120A, hot 130A, filler/cap 130A) menghasilkan 4 indikasi dengan jenis cacat berbeda yaitu *elongated slag inclusion* dan *tungsten inclusion* yang khas akibat *turbulensi weld pool* pada arus berlebihan, dengan tingkat penolakan 33,3%.

##### 2. Karakteristik dan Distribusi Cacat Internal Berdasarkan Inspeksi RT

Inspeksi *Radiographic Testing* sinar-X berhasil mengidentifikasi empat jenis cacat internal pada sambungan las, yaitu *porosity* (cacat dominan), *slag inclusion*, *elongated slag inclusion*, dan *tungsten inclusion (Ti F/m)*. Distribusi cacat berdasarkan lapisan pengelasan menunjukkan bahwa *hot pass zone* (segmen 7-14) merupakan zona paling rentan dengan 46,7% total indikasi terlokasi di area ini, diikuti *filler/capping pass zone* (33,3%) dan *root pass zone* (20%). Distribusi cacat secara melingkar pada posisi 1G bersifat merata tanpa konsentrasi pada kuadran

tertentu, mengkonfirmasi bahwa faktor gravitasi pada posisi 1G tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap distribusi cacat. Cacat pada arus rendah bersifat tersebar (*scattered porosity*) sedangkan cacat pada arus tinggi bersifat linier (*elongated slag*) dan volumetrik terlokasi (*tungsten inclusion*).

### 3. Rentang Arus Pengelasan Optimal per Lapisan

Berdasarkan evaluasi hasil pemeriksaan RT sinar-X sesuai *acceptance criteria* ASME Section V dan ASME B31.3, rentang arus pengelasan optimal untuk masing-masing lapisan pada pengelasan GTAW multi-pass butt joint pipa ASTM A106 Grade B posisi 1G adalah sebagai berikut: *root pass* pada 100A (10V, 30 mm/min) dengan *heat input* 1,40 kJ/mm, *hot pass* pada 120A (10V, 50 mm/min) dengan *heat input* 1,008 kJ/mm, *filler pass* pada 120A (12V, 70 mm/min) dengan *heat input* 0,864 kJ/mm, dan *capping pass* pada 120A (12V, 70 mm/min) dengan *heat input* 0,864 kJ/mm. Total *heat input kumulatif optimal* adalah 4,136 kJ/mm. Parameter ini menghasilkan kualitas sambungan yang memenuhi *acceptance criteria* ASME B31.3 dengan jumlah dan ukuran cacat minimal.

## 5.2 Saran

Berikut saran yang dirumuskan berdasarkan kesimpulan penelitian:

### 1. Saran untuk Industri dan Praktisi

Berdasarkan hasil penelitian, beberapa rekomendasi praktis yang dapat diterapkan oleh industri dan praktisi pengelasan adalah sebagai berikut:

Pertama, parameter arus pengelasan GTAW *multi-pass* pada pipa *Carbon Steel* ASTM A106 Grade B posisi 1G disarankan mengacu pada parameter optimal yang telah tervalidasi, yaitu *root pass* 100A, *hot pass* 120A, serta *filler* dan *capping pass* 120A dengan total *heat input kumulatif* 4,136 kJ/mm, sebagai acuan *Welding Procedure Specification* (WPS) di lapangan guna meminimalkan risiko cacat internal.

Kedua, praktisi dan welder disarankan untuk tidak semata-mata mengandalkan pengalaman empiris dalam penentuan parameter arus, melainkan mengacu pada WPS yang telah divalidasi melalui pengujian NDT, mengingat

penyimpangan arus yang kecil sekalipun terbukti berpengaruh signifikan terhadap jenis dan jumlah cacat yang terbentuk.

Ketiga, perhatian khusus perlu diberikan pada tahap *hot pass*, mengingat zona ini terbukti menjadi area paling rentan dengan 46,7% total indikasi cacat terlokasi di lapisan tersebut. Pengawasan ketat terhadap kestabilan arus dan teknik pengelasan pada tahap *hot pass* sangat direkomendasikan dalam praktik fabrikasi pipa bertekanan tinggi.

Keempat, industri disarankan mengintegrasikan *Radiographic Testing* sebagai prosedur inspeksi wajib pascapengelasan pada sistem perpipaan bertekanan tinggi, mengingat kemampuannya dalam mendeteksi cacat internal seperti *porosity*, *slag inclusion*, dan tungsten *inclusion* yang tidak terdeteksi oleh metode inspeksi visual semata.

## 2. Saran untuk Penelitian Lanjutan

Pertama, penelitian lanjutan disarankan memperluas variasi posisi pengelasan mencakup posisi 2G, 5G, dan 6G untuk mengevaluasi pengaruh gravitasi dan orientasi pengelasan terhadap distribusi cacat, mengingat penelitian ini hanya mencakup posisi 1G yang bersifat datar.

Kedua, perlu dilakukan penelitian yang mengkorelasikan hasil inspeksi *Radiographic Testing* dengan pengujian mekanis seperti uji tarik, uji bending, dan uji kekerasan untuk memverifikasi pengaruh cacat internal yang teridentifikasi terhadap degradasi sifat mekanis sambungan las secara kuantitatif.

Ketiga, penelitian lanjutan dapat mengeksplorasi kombinasi variasi parameter pengelasan yang lebih komprehensif, meliputi variasi tegangan, kecepatan pengelasan, dan jenis gas pelindung secara bersamaan menggunakan pendekatan *Design of Experiment* (DOE) untuk mengidentifikasi kombinasi parameter optimal secara multivariabel.

Keempat, studi komparasi antara metode inspeksi NDT perlu dilakukan, khususnya membandingkan efektivitas *Radiographic Testing* dengan *Phased Array Ultrasonic Testing* (PAUT) dalam mendeteksi jenis cacat yang sama pada material dan konfigurasi sambungan yang identik, guna memberikan rekomendasi metode inspeksi yang paling sesuai untuk aplikasi industri.

Kelima, penelitian serupa disarankan dilakukan pada material pipa dengan *grade* berbeda seperti ASTM A333 atau ASTM A335 untuk mengkaji apakah parameter optimal yang diperoleh dalam penelitian ini bersifat material-specific atau dapat digeneralisasi pada kelompok material *Carbon Steel* yang lebih luas.