

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Era Revolusi Industri 4.0 telah mendorong transformasi besar dalam sektor manufaktur melalui penerapan otomatisasi, digitalisasi, dan integrasi teknologi cerdas. Salah satu proses manufaktur yang mengalami perkembangan signifikan adalah pengelasan berbasis robotik, khususnya dengan metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW). Industri mobil, konstruksi, dan perkapalan telah banyak mengadopsi teknologi ini karena mampu memberikan konsistensi kualitas sambungan, meningkatkan efisiensi produksi, dan mengurangi ketergantungan operator pada tangan. Sistem pengelasan robotik modern kini dilengkapi dengan sensor adaptif dan kontrol cerdas yang memungkinkan penyesuaian parameter pengelasan secara real-time untuk menjaga mutu hasil produksi dan efisiensi proses (Biber et al., 2024; Curiel et al., 2023).

Robot industri telah menjadi tulang punggung otomatisasi dalam proses manufaktur modern, terutama pada aplikasi pengelasan. Diperkirakan bahwa sekitar 25 % dari seluruh robot industri yang beroperasi di dunia digunakan untuk tugas pengelasan, termasuk *arc welding* dan *spot welding*, karena kebutuhan akan produktivitas tinggi, konsistensi kualitas, dan kemampuan untuk mengulang operasi secara cepat dalam produksi massal. Selain itu, laporan *World Robotics* dari *International Federation of Robotics* menunjukkan bahwa instalasi robot industri terus mencapai rekor tertinggi setiap tahun, dengan sektor otomotif sebagai pengguna terbesar, diikuti oleh industri elektronik dan *metal-machinery* semua sektor yang sangat mengandalkan *robot welding* untuk efisiensi dan kualitas proses produksi (Robots, 2025). Statistik terbaru juga menunjukkan bahwa pada tahun 2021 terdapat sekitar 96.000 robot industri yang digunakan khusus untuk pengelasan secara global, menegaskan peran signifikan teknologi ini dalam manufaktur modern (Intelligence & Report, 2023).

Metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) dipilih dalam penelitian ini karena menawarkan keseimbangan yang lebih baik antara kualitas hasil las,

produktivitas, dan konsistensi proses, terutama untuk tujuan mengoptimalkan parameter secara sistematis. Proses GMAW memungkinkan integrasi penuh dengan robot industri untuk menghasilkan lintasan las yang presisi, pengaturan parameter yang seragam, serta reproduktibilitas hasil yang tinggi, sehingga sangat mendukung penerapan otomatisasi dan robotisasi dalam lingkungan manufaktur modern. Dibandingkan dengan *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW), GMAW menggunakan kawat elektroda kontinu dan gas pelindung, sehingga kualitas las lebih stabil dan cacat seperti porositas, *slag inclusion*, dan *undercut* dapat diminimalkan. Ketergantungan tinggi pada operator pada proses SMAW menyebabkan variasi hasil las yang besar, sehingga kurang sesuai untuk penelitian berbasis data yang membutuhkan pengulangan eksperimen yang konsisten (Xiao et al., 2023; Singh et al., 2020).

Meskipun *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) memiliki kemampuan untuk menghasilkan kualitas permukaan las yang luar biasa, laju deposisinya rendah dan waktu pengelasan yang lebih lama, sehingga kurang efektif untuk studi yang bertujuan untuk mengoptimalkan parameternya. Selain itu, kontrol *heat input* yang tidak tepat pada GTAW berpotensi memperlebar *heat-affected zone* (HAZ) dan memengaruhi sifat mekanik sambungan (Agustina, 2019). Adapun *Submerged Arc Welding* (SAW) unggul dalam laju deposisi dan penetrasi, tetapi penerapannya terbatas pada posisi datar dan pelat tebal (Pereira et al., 2018).

Dengan karakteristik tersebut, GMAW dinilai paling sesuai karena mampu menghasilkan kualitas las yang konsisten, efisiensi deposisi tinggi, serta mudah diintegrasikan dengan sistem otomatisasi atau *robot welding*. Penggunaan kawat elektroda kontinu memungkinkan proses berlangsung tanpa interupsi, mendukung produktivitas tinggi dan reproduktibilitas hasil, sehingga GMAW menjadi metode yang paling tepat untuk menentukan parameter pengelasan yang terbaik.

Pada proses pengelasan otomatis, pemilihan parameter pengelasan yang tepat merupakan faktor kunci dalam menghasilkan sambungan las yang berkualitas. Kesalahan dalam menentukan parameter pengelasan dapat memengaruhi kualitas sambungan las, baik dari aspek metalurgi maupun sifat mekaniknya. Parameter utama proses pengelasan, yaitu arus las (*welding current*) dan laju aliran gas

pelindung (*shielding gas flow*), dengan porositas sebagai variabel respon utama. Pemilihan kedua parameter tersebut didasarkan pada perannya yang langsung memengaruhi stabilitas busur listrik, karakteristik kolam las, serta interaksi logam cair dengan gas di sekitarnya. Arus las menentukan besarnya *heat input* yang masuk ke material, sedangkan laju aliran gas pelindung berfungsi menjaga kolam las dari kontaminasi atmosfer selama proses pengelasan berlangsung. Kedua variabel ini merupakan parameter proses yang relatif mudah dikontrol, memiliki pengaruh dominan terhadap kualitas internal sambungan las, serta sering dijadikan faktor kunci dalam menentukan parameter pengelasan berbasis eksperimen.

Salah satu cacat las yang paling umum terjadi selama proses pengelasan adalah porositas, yang dapat berdampak negatif pada kualitas sambungan las. Cacat porositas terjadi ketika gas terperangkap di dalam logam cair selama proses pendinginan, menghasilkan rongga-rongga internal yang tidak terisi logam solid. Porositas ini secara signifikan dapat menurunkan luas penampang efektif sambungan las, sehingga menyebabkan penurunan kekuatan mekanik dan peningkatan risiko retak di bawah beban siklik maupun statis terutama pada struktur truss yang mengalami pembebanan berulang (misalnya, beban angin atau getaran).

Parameter proses pengelasan seperti arus las (*welding current*) dan aliran gas pelindung (*shielding gas flow*) terbukti berpengaruh terhadap pembentukan porositas. Banyak penelitian menunjukkan bahwa variasi arus pengelasan dapat mempengaruhi *heat input* dan stabilitas kolam las sehingga menentukan kemampuan gas terlarut untuk keluar dari logam cair sebelum mengeras. Kondisi arus yang terlalu rendah atau tidak optimal berpotensi mempercepat pembekuan kolam las, sehingga gas tidak sempat keluar dan meningkatkan jumlah porositas yang terbentuk (Yang et al., 2022). Laju aliran gas pelindung juga memiliki peran penting dalam melindungi kolam las dari kontaminasi atmosfer seperti oksigen dan nitrogen. Laju aliran gas yang tidak tepat, baik terlalu rendah maupun terlalu tinggi dapat menyebabkan perlindungan gas yang tidak efektif dan turbulensi di sekitar kolam las, yang pada gilirannya meningkatkan peluang terbentuknya porositas pada sambungan las

Dalam studi pengelasan MIG pada paduan aluminium 5083, ditemukan bahwa jumlah porositas berkurang dengan peningkatan kecepatan aliran gas, menunjukkan bahwa laju gas yang lebih tinggi membantu meminimalkan gas terjebak di dalam kolam las dan memperbaiki kualitas lasan (Asep Sudargo, 2022). Penelitian lain juga menunjukkan variasi arus dan laju aliran gas pelindung secara bersama-sama memengaruhi terjadinya cacat porositas melalui perubahan struktur mikro dan sifat mekanik hasil lasan (Mesin et al., 2015).

Dukungan data eksperimental semakin menegaskan bahwa porositas merupakan faktor dominan dalam kegagalan kelelahan sambungan las. Penelitian pada sambungan las baja AH36 menunjukkan bahwa keberadaan cacat porositas menyebabkan penurunan signifikan pada kekuatan, serta porositas berperan sebagai lokasi awal terbentuknya retak ketika struktur mengalami pembebanan berulang (Wang et al., 2021). Secara praktis, porositas terbentuk akibat gas yang terjebak dalam kolam logam cair selama proses pembekuan, umumnya disebabkan oleh masuknya gas atmosfer atau perlindungan gas yang tidak optimal selama pengelasan. Oleh karena itu, porositas secara luas diakui sebagai cacat las yang secara langsung melemahkan sambungan dan meningkatkan kecenderungan terjadinya retak, terutama pada kondisi tegangan tinggi.

Proses pengelasan *Gas Metal Arc Welding* berbasis sistem robotik perlu dioptimalkan untuk mencapai tingkat konsistensi dan kualitas hasil las yang tinggi. Dalam praktiknya, hasil pengelasan dipengaruhi oleh berbagai variasi proses, seperti ketebalan pelat, jenis material dasar, serta parameter utama pengelasan. Di antara berbagai parameter tersebut, arus pengelasan memengaruhi besarnya heat input, yang selanjutnya memengaruhi laju pendinginan (*cooling rate*), evolusi mikrostruktur, serta sifat mekanik sambungan las, seperti kekuatan tarik dan kekerasan (Shafeek et al., 2024).

Laju aliran gas yang terlalu rendah diperkirakan tidak mampu melindungi kolam las secara optimal, sedangkan laju aliran yang terlalu tinggi dapat menimbulkan turbulensi yang memungkinkan masuknya udara ke dalam kolam las. Variasi kedua parameter ini sangat menentukan terbentuk atau tidaknya cacat internal, khususnya porositas, yang berdampak langsung terhadap kualitas dan

keandalan sambungan las. Oleh karena itu, diperlukan studi eksperimental yang secara khusus bertujuan untuk mengevaluasi dan mengoptimalkan arus las dan aliran gas pelindung pada proses GMAW berbasis robotik dengan porositas sebagai indikator kualitas sambungan.

Untuk memperkuat justifikasi bahwa cacat porositas berpengaruh terhadap kekuatan sambungan las, perlu dilengkapi pengujian sifat mekanik. Uji tarik ini tidak dimaksudkan sebagai variabel utama penelitian, melainkan sebagai pengujian pendukung untuk mengonfirmasi dampak porositas terhadap kekuatan mekanik sambungan las. Berdasarkan uraian tersebut, ketidaktepatan pengaturan arus las dan laju aliran gas pelindung dapat menyebabkan ketidakstabilan busur dan perlindungan kolam las yang tidak optimal, sehingga meningkatkan risiko terbentuknya cacat porositas.

Cacat ini tidak hanya menurunkan kualitas internal sambungan las, tetapi juga berpotensi memicu retak dan kegagalan struktur pada penggunaan jangka panjang. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini difokuskan pada penentuan parameter terbaik, khususnya pada arus las dan laju aliran gas pelindung terhadap porositas pada proses GMAW berbasis robotik, dengan tujuan memperoleh kombinasi parameter optimal yang mampu menghasilkan sambungan las berkualitas tinggi, konsisten, serta efisien dari sisi waktu dan biaya produksi.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, dapat dirumuskan bahwa diperlukan kombinasi parameter pengelasan GMAW berbasis robotik yang optimal, khususnya terkait pengaturan arus las dan laju aliran gas pelindung, yang mampu menghasilkan sambungan las dengan tingkat porositas minimal dan kualitas yang konsisten. Justifikasi terhadap kombinasi parameter optimal perlu dilakukan melalui pemeriksaan mikrostruktur dan pengujian sifat mekanik untuk memastikan kualitas sambungan las yang dihasilkan. Penelitian eksperimental ini untuk mengkaji pengaruh arus las dan laju aliran gas pelindung terhadap porositas, serta menentukan kombinasi parameter terbaik pada proses GMAW berbasis robotik.

### 1.3 Tujuan Penelitian

#### 1. Tujuan Umum

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan parameter pengelasan *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) berbasis robotik yang optimal, khususnya arus las dan laju aliran gas pelindung, guna meminimalkan terbentuknya porositas pada sambungan las sehingga diperoleh kualitas hasil las yang konsisten dan andal.

#### 2. Tujuan Khusus

Memperoleh kualitas sambungan las terbaik melalui variasi kombinasi parameter pada proses pengelasan robotik *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) serta mendapatkan kombinasi parameter pengelasan yang mampu menghasilkan tingkat porositas paling rendah pada sambungan las.

### 1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian ini terfokus dan berjalan secara terarah, maka ruang lingkup penelitian dibatasi pada beberapa aspek teknis dan praktis yaitu :

1. Proses pengelasan yang diteliti dibatasi pada metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) berbasis robotik, tidak mencakup proses pengelasan manual maupun metode pengelasan lainnya seperti *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) atau *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW).
2. Variabel bebas (X) dalam penelitian ini dibatasi pada arus pengelasan dan laju aliran gas pelindung, sedangkan parameter pengelasan lain seperti tegangan, kecepatan pengelasan, sudut *torch*, dan swing arc time dijaga tetap (konstan).
3. Variabel terikat (Y) yang dianalisis dibatasi pada tingkat porositas hasil las, tanpa membahas secara mendalam sifat mekanik lainnya seperti kekuatan tarik, kekerasan, atau ketangguhan impak.
4. Material yang digunakan dibatasi pada satu jenis material dasar baja karbon rendah dengan ketebalan pelat 5 mm.
5. Jenis gas pelindung yang digunakan dibatasi pada satu jenis gas CO<sub>2</sub> dengan variasi hanya pada laju aliran gas, bukan pada komposisi gas.

6. Penilaian porositas dibatasi pada metode pengamatan makrostruktur, tanpa menggunakan metode lanjutan seperti radiografi industri atau CT-scan.
7. Uji tarik tidak dilakukan pada seluruh spesimen hasil eksperimen, melainkan hanya pada dua spesimen terpilih yang memiliki tingkat porositas paling tinggi dan paling rendah, sehingga hasil uji tarik digunakan sebagai data pendukung (justifikasi), bukan sebagai variabel respon utama penelitian.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa manfaat yang signifikan, baik dari sisi teoretis, praktis dalam bidang pendidikan vokasi, maupun penerapan industri.

### 1. Sisi Teoretis

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan pengetahuan di bidang teknik pengelasan, khususnya mengenai pengaruh parameter arus pengelasan dan laju aliran gas pelindung terhadap terbentuknya porositas pada proses *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) berbasis robotik. Hasil penelitian ini dapat menjadi referensi akademik dalam studi penentuan parameter pengelasan serta memperkaya literatur terkait pengendalian cacat las pada sistem pengelasan terotomatisasi.

### 2. Sisi Pendidikan Vokasi

Hasil penelitian dapat dijadikan acuan dalam pengembangan kurikulum praktik pengelasan berbasis teknologi robotik di SMK, khususnya di SMKN 5 Padang. Temuan ini membantu guru produktif dalam menjelaskan pengaruh parameter terhadap kualitas sambungan serta meningkatkan kompetensi siswa agar lebih siap kerja dan sesuai kebutuhan industri.

### 3. Sisi Industri

Penelitian ini memberikan panduan praktis dalam menentukan parameter optimal pengelasan GMAW robotik pada baja karbon rendah untuk berbagai sektor industri. Penelitian ini diharapkan menurunkan cacat las, meningkatkan efisiensi produksi, memperpanjang umur sambungan, dan memberikan manfaat ekonomi melalui penghematan biaya.

#### 1.6 Sistematika Penulisan

Tesis ini disusun secara sistematis dalam lima bab utama yang saling berkesinambungan untuk menjelaskan proses dan hasil penelitian yang dilakukan. Adapun sistematika penulisannya adalah sebagai berikut:

##### **Bab I        Pendahuluan**

Berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

##### **Bab II       Tinjauan Pustaka**

Memuat teori-teori yang relevan mengenai proses pengelasan GMAW, parameter las, karakteristik baja karbon rendah, sambungan las, serta hasil penelitian terdahulu.

##### **Bab III      Metodologi Penelitian**

Menjelaskan metode penelitian, variabel, rancangan eksperimen, alat dan bahan, prosedur pengelasan, serta metode pengujian hasil las.

##### **Bab IV      Hasil dan Pembahasan**

Bab ini berisi hasil pengujian dan analisis data penelitian yang meliputi hasil pengujian porositas, analisis varians (ANOVA), pengaruh parameter pengelasan terhadap porositas, hasil pengujian tarik, serta hubungan antara porositas terhadap kekuatan tarik sambungan las GMAW robotik pada baja karbon rendah.

##### **Bab V        Penutup**

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan serta saran yang dapat digunakan untuk pengembangan penelitian selanjutnya maupun penerapan proses pengelasan GMAW robotik dalam dunia industri dan pendidikan vokasi.