

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, pembuatan, pengujian, dan analisa yang telah dilakukan terhadap Robot *Soldering SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm)* 4 DOF (*Degree of Freedom*) Berbasis Arduino Mega 2560 dengan Metode Kinematik, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Prototipe Robot Soldering SCARA 4 DOF berbasis Arduino Mega 2560 berhasil dirancang dan dibangun dengan struktur mekanik yang terdiri dari dua *Joint* rotasi (J1 dan J2), satu *Joint* linear (Z), dan satu end-effector berupa *soldering iron* yang digerakkan oleh motor servo MG90s sebagai feeder timah. Sistem elektronik yang terdiri dari RAMPS 1.6 Board, driver A4988, sensor *Magnetic Encoder* AS5600, multiplexer TCA9548A, sensor *thermocouple* tipe-K dengan modul MAX6675, *Solid State Relay* 40DA, dan HMI Nextion terintegrasi dengan baik dan berfungsi sesuai spesifikasi perancangan.
2. Robot SCARA 4 DOF berhasil diimplementasikan untuk proses soldering PCB melalui dua mode operasi, yaitu mode *manual* dan mode *teaching*. Pada mode *teaching*, robot mampu merekam hingga 50 *Waypoint* posisi soldering dan mengeksekusinya secara berurutan secara otomatis. Pengujian keseluruhan sistem menunjukkan bahwa robot berhasil bergerak menuju setiap *Waypoint*, menurunkan end-effector ke titik solder, melakukan proses feeding timah selama 3 detik (menghasilkan 3 cm timah per siklus), mempertahankan *dwel time* 4 detik, kemudian berpindah ke *Waypoint* berikutnya secara konsisten dan berulang tanpa kegagalan.
3. Sistem *teaching* dan kontrol *manual* menggunakan *Rotary Encoder KY-040* berhasil diimplementasikan pada kontrol stepper motor Nema 17 berbasis Arduino Mega 2560. *Rotary Encoder KY-040* berhasil mendeteksi arah putaran CW dan CCW melalui perubahan sinyal CLK dan DT, dan mengkonversinya menjadi penambahan atau pengurangan pulsa STEP

secara akurat. Fungsi JOG pada HMI Nextion juga berfungsi dengan baik untuk menggerakkan setiap sumbu secara independen. Tidak terjadi step skip, step loss, maupun gerakan berlawanan arah selama pengujian, yang membuktikan keandalan sistem kontrol *manual*.

Selain ketiga poin utama di atas, beberapa hasil pengujian tambahan yang mendukung keberhasilan sistem adalah sebagai berikut:

- Implementasi algoritma *forward kinematic* menghasilkan error pembulatan maksimal 0,68 mm dari nilai kalkulasi ke bilangan bulat terdekat menggunakan fungsi `roundf()`, yang masih berada dalam toleransi yang dapat diterima untuk aplikasi soldering through-hole PCB.
- Sensor *Magnetic Encoder* AS5600 yang diakses melalui multiplexer TCA9548A menunjukkan akurasi pembacaan posisi yang tinggi dengan error maksimal 0,03% pada sumbu J1, mengindikasikan bahwa sistem umpan balik posisi berjalan handal.
- Sistem kontrol suhu menggunakan sensor *thermocouple* tipe-K, modul MAX6675, dan SSR 40DA berhasil mempertahankan suhu *soldering iron* pada setpoint 350°C dengan fluktuasi hanya $\pm 3^\circ\text{C}$ pada kondisi operasional stabil, memastikan kualitas proses penyolderan yang konsisten.
- Sistem *homing* menggunakan *limit switch* pada seluruh sumbu berfungsi dengan baik. Mekanisme *back-off* setelah *limit switch* terpicu memastikan titik referensi posisi nol dapat ditetapkan secara konsisten dan stabil sebagai dasar perhitungan kinematik.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan keterbatasan sistem yang telah diidentifikasi selama proses pengujian, berikut adalah saran-saran yang dapat dijadikan acuan untuk pengembangan sistem pada penelitian selanjutnya:

1. Implementasi kontroler PID (*Proportional-Integral-Derivative*) pada sistem kontrol suhu *soldering iron* untuk menggantikan kontrol ON-OFF yang saat ini digunakan. Kontroler PID akan menghasilkan respons suhu yang lebih halus dengan overshoot dan fluktuasi yang lebih kecil, sehingga

dapat meningkatkan kualitas sambungan solder terutama untuk komponen PCB yang sensitif terhadap perubahan suhu mendadak.

2. Penambahan sistem *camera vision* menggunakan kamera dan pemrosesan citra untuk mendeteksi posisi titik solder secara otomatis pada PCB. Hal ini akan menghilangkan kebutuhan proses *teaching manual* dan meningkatkan *fleksibilitas* robot dalam menangani berbagai jenis PCB dengan *layout* komponen yang berbeda-beda, sekaligus meningkatkan akurasi penempatan *end-effector* hingga level yang dibutuhkan untuk komponen SMD (*Surface Mount Device*).
3. Peningkatan kapasitas penyimpanan *Waypoint* dari 50 titik menjadi lebih besar, misalnya dengan menggunakan modul memori eksternal seperti EEPROM atau kartu SD, sehingga robot dapat diprogram untuk menangani PCB dengan kepadatan komponen yang lebih tinggi dalam satu siklus operasi tanpa perlu memuat ulang program.
4. Penerapan algoritma *inverse kinematic* secara penuh untuk memungkinkan pengguna memasukkan koordinat Cartesian (X, Y, Z) target secara langsung melalui HMI tanpa harus melakukan proses *teaching* secara fisik. Implementasi ini akan meningkatkan kemudahan penggunaan dan memungkinkan integrasi dengan software desain PCB seperti KiCad atau Eagle yang dapat mengekspor koordinat titik solder secara otomatis.
5. Penambahan mekanisme prosedur *re-homing periodik* atau implementasi encoder absolut untuk mencegah akumulasi error posisi pada operasi jangka panjang. Hal ini terutama penting apabila robot dioperasikan secara terus menerus untuk memproses PCB dalam jumlah besar, di mana kesalahan langkah kecil yang terakumulasi dapat menggeser posisi *end-effector* dari titik solder yang dituju.
6. Pengembangan desain mekanik *end-effector* agar lebih modular, sehingga *soldering iron* dapat dengan mudah diganti dengan *tool* lain, serta penyempurnaan untuk mekanik posisi motor servo dan gulungan timah tembaga, sehingga dapat mempermudah proses pengantian timah tembaga.

7. Penambahan sistem deteksi dan penanganan kesalahan (*error handling*) yang lebih komprehensif, seperti deteksi kondisi suhu tidak tercapai, deteksi putusnya timah solder, dan *alarm visual* maupun suara apabila terjadi kegagalan pada salah satu komponen sistem. Hal ini akan meningkatkan keandalan dan keselamatan operasional robot dalam lingkungan produksi nyata.