

BAB V

SARAN DAN KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, pembuatan, pengujian, dan analisa data yang telah dilakukan terhadap prototipe Sistem Lengan Robot 4 DOF untuk Proses Pemasangan Baut, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut.

- a. Sistem kendali lengan robot 4 DOF berhasil dirancang dan diimplementasikan dengan mengintegrasikan Arduino Mega 2560, motor stepper NEMA 17, driver TB6600, sensor encoder AS5600, GUI berbasis Python Tkinter, serta end-effector berupa motor DC untuk proses penyekrupan. Sistem mampu menjalankan fungsi *teaching mode* untuk merekam dan mengeksekusi kembali *waypoint* yang telah diajarkan melalui antarmuka pengguna. Namun, berdasarkan hasil pengujian, proses *pick* and *place* secara otomatis belum dapat dilakukan secara konsisten karena akurasi posisi *end-effector* masih dipengaruhi oleh karakteristik mekanik sistem, sehingga masih diperlukan penyesuaian posisi melalui GUI sebelum proses penyekrupan dilakukan.
- b. Metode sinkronisasi data posisi sudut *encoder* dengan antarmuka *teaching* berhasil diimplementasikan. Data sudut dari sensor *encoder* AS5600 dapat ditampilkan secara real-time pada GUI sehingga pengguna dapat memantau posisi setiap joint selama proses *teaching* maupun *replay waypoint*. Mekanisme komunikasi antara Arduino Mega 2560 dan GUI juga berjalan dengan baik sehingga mendukung proses penyimpanan serta pemanggilan kembali *waypoint*.
- c. Integrasi fungsi kontrol dan sistem sensor berhasil diimplementasikan sehingga seluruh komponen utama sistem dapat bekerja secara terpadu. Mikrokontroler mampu mengendalikan aktuator lengan robot, membaca data dari sensor *encoder*, serta mengoordinasikan komunikasi dengan GUI sebagai antarmuka pengguna. Integrasi tersebut memungkinkan sistem melaksanakan proses *teaching*, pemantauan posisi *joint*, dan pengoperasian *end-effector* dalam satu sistem kendali yang terintegrasi.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian serta beberapa keterbatasan mekanik dan sistem yang telah diidentifikasi selama proses pengujian, berikut adalah saran-saran yang dapat dijadikan acuan untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

- a. Implementasi Sistem Keamanan Terpadu (*Safety Interlock System*): Sebagai prioritas utama untuk kesiapan implementasi sistem di lingkungan produksi atau industri riil, sangat disarankan untuk mengintegrasikan sistem keamanan interlock berlapis. Pengembangan ini harus meliputi penambahan sensor pendeteksi tabrakan (*collision detection*) serta sistem pemantauan batas area kerja. Sistem harus mampu mendeteksi anomali apabila lengan robot bergerak keluar dari *workspace* yang diizinkan dan secara otomatis memutus daya aktuator (*emergency halt*) guna menjamin keselamatan kerja operator dan mencegah kerusakan peralatan.
- b. Implementasi Sistem Kendali *Closed-Loop* (PID): Pada pengembangan selanjutnya, disarankan untuk mengimplementasikan algoritma kontrol PID (*Proportional-Integral-Derivative*) yang memanfaatkan data aktual dari sensor AS5600 sebagai kompensator galat (*error*) secara *real-time*, sehingga akurasi pergerakan motor stepper dapat menjadi jauh lebih tinggi dan mengurangi risiko kehilangan langkah (*missed steps*).
- c. Penambahan Sensor Torsi (*Torque Sensor* / Sensor Arus): Untuk menyempurnakan fungsi *end-effector*, perlu ditambahkan sensor torsi mekanik atau sensor pembaca arus (seperti INA219) pada motor DC obeng. Hal ini bertujuan untuk memastikan baut terpasang dengan tingkat kekencangan yang tinggi, serta memberikan fitur *auto-stop* untuk mencegah pengencangan berlebih (*over-tightening*) yang berisiko merusak ulir/drat baut.
- d. Performa aktuator pada beberapa joint masih dipengaruhi oleh keterbatasan torsi dan akurasi mekanik sehingga memengaruhi ketelitian posisi akhir lengan robot. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan menggunakan aktuator dengan kemampuan torsi yang lebih tinggi, seperti motor stepper NEMA 23 atau aktuator lain yang telah

- dilengkapi encoder *closed-loop* bawaan (*integrated closed-loop stepper motor*). Penggunaan aktuator tersebut diharapkan mampu meningkatkan kemampuan menahan beban, mengurangi kehilangan langkah (*missed steps*), serta meningkatkan akurasi dan kestabilan pergerakan lengan robot.
- e. kapasitas memori dan kemampuan pemrosesan pada Arduino Mega 2560 masih menjadi salah satu keterbatasan, khususnya dalam pengembangan fitur *teaching mode*, penyimpanan *waypoint*, serta implementasi algoritma kendali yang lebih kompleks. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan menggunakan mikrokontroler dengan kemampuan pemrosesan, kapasitas SRAM, dan memori *non-volatile* yang lebih tinggi, seperti STM32, Arduino Due, Teensy, atau *platform* mikrokontroler lain yang memiliki spesifikasi lebih tinggi. Penggunaan mikrokontroler tersebut diharapkan mampu mendukung implementasi algoritma yang lebih kompleks, meningkatkan kapasitas penyimpanan *data waypoint*, serta mempercepat proses komputasi dan komunikasi sistem secara keseluruhan.
 - f. Integrasi Sistem *Computer Vision* (Kamera): Sistem saat ini masih bergantung pada pemosisian manual melalui *teaching mode*. Ke depannya, dapat ditambahkan modul kamera dan pemrosesan citra digital (misalnya menggunakan OpenCV) agar robot mampu mendeteksi letak lubang baut pada part produksi secara mandiri dan melakukan kalibrasi titik secara otomatis.
 - g. Optimalisasi Desain dan Material Struktur Lengan: Untuk mengurangi beban inersia dan meminimalisir regangan atau getaran saat lengan berada pada jangkauan maksimum (*fully extended*), struktur mekanik dapat ditingkatkan dengan menggunakan material yang lebih ringan namun sangat kaku, seperti paduan aluminium (*aluminium alloy*) spesifik atau serat karbon (*carbon fiber*).