

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan dan pembahasan, rumusan masalah dalam tugas akhir ini telah terjawab sebagai berikut:

Pertama, model *forward kinematics* untuk robot lengan tiga derajat kebebasan berbasis motor *stepper* berhasil dirancang menggunakan persamaan trigonometri sederhana. Model ini menghubungkan nilai sudut sendi (θ_0 , θ_1 , θ_2) dengan koordinat posisi *end-effector* (X , Y , Z) melalui rumus $r = L_1 \cos(\theta_1) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$, $z = L_1 \sin(\theta_1) + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)$, $x = r \cos(\theta_0)$, dan $y = r \sin(\theta_0)$. Dengan demikian, permasalahan pertama tentang bagaimana merancang model *forward kinematics* telah terpecahkan.

Kedua, persamaan *forward kinematics* berhasil diimplementasikan dalam program mikrokontroler Arduino menggunakan bahasa C++. Program mampu menerima input sudut melalui serial monitor, membatasi sudut pada rentang kerja mekanik, menggerakkan motor *stepper*, serta menampilkan koordinat siku dan *end-effector*. Dengan demikian, permasalahan kedua tentang bagaimana menerapkan persamaan *forward kinematics* pada program mikrokontroler telah terpecahkan.

Ketiga, hasil posisi siku dan *end-effector* berhasil ditampilkan melalui komunikasi serial ke antarmuka GUI berbasis Python. GUI menggunakan library `tkinter` dan `matplotlib` untuk menampilkan visualisasi 3D konfigurasi robot secara *real-time*. Dengan demikian, permasalahan ketiga tentang bagaimana menampilkan hasil posisi melalui komunikasi serial telah terpecahkan.

Keempat, pengaruh perubahan sudut sendi terhadap koordinat akhir robot berhasil dianalisis melalui pengujian dengan enam kombinasi sudut yang mencakup posisi Home, translasi sepanjang sumbu X positif dan negatif, translasi sepanjang sumbu Y positif dan negatif, serta kembali ke Home. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan sudut θ_0 memutar radial terhadap sumbu Z

tanpa mengubah ketinggian, perubahan θ_1 dan θ_2 mengubah konfigurasi lengan dan ketinggian *end-effector*. Dengan demikian, permasalahan keempat tentang bagaimana menganalisis pengaruh perubahan sudut sendi telah terpecahkan.

Kelima, sistem *forward kinematics* terbukti efektif untuk aplikasi robot lengan 3 DOF dengan hasil yang konsisten terhadap model geometri. Seluruh titik uji berada dalam zona workspace aman dengan nilai Z berkisar antara 103,77 mm hingga 163,78 mm dan jarak radial R antara 91,71 mm dan 217,00 mm. Rata-rata error Euclidean 3D untuk seluruh titik uji adalah 3,86 mm, yang masih berada dalam toleransi yang dapat diterima untuk aplikasi demonstrasi *forward kinematics* dengan panjang *link* 140 mm.

5.2 Saran

Saran pengembangan untuk penelitian berikutnya adalah menambahkan *inverse kinematics* agar robot dapat bergerak menuju target koordinat tertentu, menambahkan sensor posisi untuk membandingkan sudut perintah dengan sudut aktual, membuat visualisasi komputer untuk menampilkan posisi robot secara grafis, serta melakukan kalibrasi mekanik agar hasil perhitungan lebih dekat dengan kondisi fisik. Sistem juga dapat dikembangkan menjadi robot tiga derajat kebebasan agar mampu bergerak dalam ruang tiga dimensi.

Selain itu, pengujian sebaiknya dilakukan dengan pengukuran fisik menggunakan penggaris atau kamera agar selisih antara model teoritis dan posisi nyata dapat dihitung. Analisis error akan membuat laporan lebih kuat karena tidak hanya menampilkan hasil program, tetapi juga membahas akurasi sistem secara empiris.