

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan proses perancangan, pembuatan, implementasi, dan pengujian sistem lifting robot mobile berbasis sensor load cell, sensor ultrasonik HC-SR04, metode *Finite State Machine* (FSM), dan *Fuzzy Logic Mamdani*, dapat disimpulkan bahwa sistem berhasil direalisasikan sesuai dengan tujuan penelitian. Keberhasilan sistem dipengaruhi oleh integrasi perangkat keras dan perangkat lunak yang bekerja secara sinkron, proses kalibrasi sensor yang baik, serta penerapan metode FSM dan Fuzzy Logic Mamdani dalam mengatur alur kerja dan pengendalian linear actuator. Adapun kesimpulan yang diperoleh adalah sebagai berikut.

1. Sistem lifting robot mobile berhasil direalisasikan menggunakan empat sensor load cell, sensor HC-SR04, linear actuator, dan mikrokontroler ATmega2560 sehingga mampu menjalankan proses pengangkatan beban secara otomatis sesuai urutan kerja yang telah dirancang.
2. Metode *Finite State Machine* (FSM) berhasil mengatur seluruh tahapan operasi sistem secara terstruktur, mulai dari kondisi *Idle*, *Pre-Lift*, *Weighing*, *Classification*, *Lifting*, *Hold*, hingga *Lower*, sehingga setiap proses berjalan sesuai urutan yang telah dirancang tanpa terjadi kesalahan transisi antar keadaan.
3. Sistem berhasil mengklasifikasikan beban menjadi tiga kategori, yaitu ringan, sedang, dan berat, kemudian menentukan target ketinggian lifting sesuai kategori tersebut sehingga proses pengangkatan dapat berlangsung secara otomatis berdasarkan hasil pembacaan sensor load cell.
4. Penerapan Fuzzy Logic Mamdani memberikan performa yang lebih baik dibandingkan metode ON-OFF dalam mengendalikan linear actuator. Pada pengujian beban 2–10 kg, metode Fuzzy menghasilkan selisih posisi terhadap target sebesar 0,11–0,17 cm, sedangkan metode ON-OFF memiliki selisih yang lebih besar yaitu 0,39–1,41 cm. Selain itu, standar deviasi getaran pada metode Fuzzy berada pada rentang 0,72–0,94 deg, lebih rendah

dibandingkan metode ON-OFF sebesar 1,25–1,62 deg, yang menunjukkan bahwa gerakan lifting menjadi lebih stabil.

5. Metode Fuzzy Logic Mamdani juga menghasilkan keluaran PWM yang menyesuaikan dengan kondisi beban, yaitu rata-rata 105,08 (2 kg), 94,85 (4 kg), 58,44 (6 kg), 56,96 (8 kg), dan 55,79 (10 kg). Sebaliknya, metode ON-OFF selalu memberikan PWM maksimum sebesar 255 pada seluruh variasi beban. Hal ini menunjukkan bahwa Fuzzy Logic mampu mengatur kecepatan linear actuator secara adaptif sesuai kondisi beban sehingga menghasilkan pergerakan yang lebih halus, mengurangi getaran, dan meningkatkan ketepatan posisi lifting.
6. Hasil perbandingan menggunakan indikator *Mean Absolute Error* (MAE) dan standar deviasi menunjukkan bahwa metode *Fuzzy Logic* Mamdani memiliki performa yang lebih baik dibandingkan metode konvensional ON-OFF. Metode *Fuzzy Logic* menghasilkan nilai MAE sebesar 0,142 cm, lebih kecil dibandingkan metode ON-OFF sebesar 0,942 cm, sehingga mampu mencapai posisi target dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi. Selain itu, rata-rata standar deviasi getaran pada metode *Fuzzy Logic* sebesar 0,81deg, sedangkan metode ON-OFF sebesar 1,46 deg, yang menunjukkan bahwa metode *Fuzzy Logic* mampu menghasilkan proses *lifting* yang lebih stabil dengan tingkat getaran yang lebih rendah.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat dijadikan sebagai pengembangan pada penelitian selanjutnya, yaitu sebagai berikut.

1. Sistem pembacaan posisi lifting dapat dikembangkan dengan menggunakan sensor jarak yang memiliki tingkat akurasi dan resolusi lebih tinggi, seperti sensor *Time of Flight* (ToF) atau sensor laser distance, sehingga kesalahan pembacaan posisi dapat diminimalkan dan akurasi pencapaian target lifting dapat ditingkatkan.
2. Sistem penimbangan dapat dikembangkan dengan menggunakan *load cell* yang memiliki kapasitas lebih besar serta rancangan mekanik yang lebih

kaku dan simetris agar distribusi beban lebih merata, sehingga akurasi pembacaan tetap terjaga pada variasi beban yang lebih besar maupun penggunaan dalam jangka panjang.

3. Metode pengendalian dapat dikembangkan dengan membandingkan *fuzzy logic* terhadap metode lain, seperti PID, Adaptive Fuzzy, Fuzzy-PID, atau metode berbasis pembelajaran (*machine learning*), sehingga dapat diketahui metode yang memberikan performa terbaik berdasarkan parameter akurasi, waktu respons, kestabilan, dan efisiensi pengendalian.
4. Sistem dapat dilengkapi dengan sensor keselamatan, seperti *limit switch*, sensor arus motor, atau encoder, untuk meningkatkan keamanan operasi, mendeteksi kondisi abnormal, serta mencegah kerusakan aktuator akibat *overload* atau gangguan mekanik.
5. Integrasi antara robot mobile dan sistem lifting dapat dikembangkan menggunakan komunikasi dua arah yang lebih adaptif antara Raspberry Pi dan mikrokontroler, sehingga proses navigasi, identifikasi beban, dan pengangkatan barang dapat dilakukan secara lebih terkoordinasi dan otonom.
6. Pengujian sistem dapat diperluas dengan jumlah variasi beban, siklus operasi, dan kondisi lingkungan yang lebih beragam, seperti permukaan lantai yang berbeda, penggunaan secara kontinu, maupun variasi kecepatan perpindahan robot. Pengujian tersebut diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai keandalan dan performa sistem ketika diterapkan pada lingkungan industri.