



Perancangan Lengan Robot Berbasis Arduino dengan 4 Servo Motor

Andira¹, Awaluddin Harahap², Wandani Putri Siregar³, Eka Dodi Suryanto⁴, Dian Putra Saragih⁵

¹Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan, Jalan William Iskandar, Kota Medan, Sumatera utara, Indonesia, 20221

² Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan, Jalan William Iskandar, Kota Medan, Sumatera utara, Indonesia, 20221

³ Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan, Jalan William Iskandar, Kota Medan, Sumatera utara, Indonesia, 20221

⁴Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan, Jalan William Iskandar, Kota Medan, Sumatera utara, Indonesia, 20221

⁵Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan, Jalan William Iskandar, Kota Medan, Sumatera utara, Indonesia, 20221

*Penulis Korespondensi: andira0831@gmail.com, akunawaluddin176@gmail.com, wputrisiregar24@gmail.com, ekadodisuryanto@unimed.ac.id, dianpsaragi@unimed.ac.id

Abstract. *The rapid development of robotics technology drives the need for efficient automation systems, particularly in the industrial and educational sectors. One widely developed implementation is the robotic arm that can mimic human movements to manipulate objects with precision. This research aims to design and build a robotic arm prototype based on an Arduino microcontroller with four servo motors as the main actuators. The methods used include stages of information gathering, system requirements analysis, mechanical and electronic design, hardware construction, programming using the Arduino IDE, and system testing. The research results show that a robotic arm system with four degrees of freedom (4 DOF) is capable of performing basic movements such as picking up, lifting, and moving objects quite well. The integration between mechanical systems, electronics, and software works optimally, with the microcontroller able to controlling the movement of the servo in a coordinated manner. The robot can also be operated in manual mode using a joystick or in automatic mode based on predetermined parameters. Tests show that the robot is able to lift loads up to 350 grams optimally, but experiences limitations with larger loads. The implication of this research is that the designed system can be used as an effective learning medium for understanding basic robotics concepts, particularly related to actuators, control systems, and system integration.*

Keywords: Robot Arm; Microcontroller; Servo actuator; Robotics; Control

Abstrak. Perkembangan teknologi robotika yang pesat mendorong kebutuhan akan sistem otomasi yang efisien, khususnya dalam bidang industri dan pendidikan. Salah satu implementasi yang banyak dikembangkan adalah lengan robot (robot arm) yang mampu meniru gerakan manusia untuk melakukan manipulasi objek secara presisi. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun prototype lengan robot berbasis mikrokontroler Arduino dengan empat motor servo sebagai aktuator utama. Metode yang digunakan meliputi tahapan pengumpulan informasi, analisis kebutuhan sistem, perancangan mekanik dan elektronik, pembuatan perangkat keras, pemrograman menggunakan Arduino IDE, serta pengujian sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem lengan robot dengan empat derajat kebebasan (4 DOF) mampu melakukan gerakan dasar seperti mengambil, mengangkat, dan memindahkan objek dengan cukup baik. Integrasi antara sistem mekanik, elektronika, dan perangkat lunak berjalan secara optimal, di mana mikrokontroler mampu mengendalikan pergerakan servo secara terkoordinasi. Robot juga dapat dioperasikan dalam mode manual menggunakan joystick maupun mode otomatis berbasis parameter yang telah ditentukan. Pengujian menunjukkan bahwa robot mampu mengangkat beban hingga 350 gram secara optimal, namun mengalami keterbatasan pada beban yang lebih besar. Implikasi dari penelitian ini adalah bahwa sistem yang dirancang dapat digunakan sebagai media pembelajaran yang efektif dalam memahami konsep dasar robotika, khususnya terkait aktuator, sistem kendali, dan integrasi sistem.

Kata kunci: Lengan Robot; Mikrokontroler; Aktuator servo; Robotika; Sistem kendali

LATAR BELAKANG

Naskah Perkembangan teknologi robotika dalam beberapa tahun terakhir mengalami peningkatan yang signifikan, terutama dalam mendukung sistem otomasi di sektor industri, pendidikan, dan penelitian. Robot manipulator, khususnya lengan robot (robot arm), menjadi salah satu teknologi yang paling banyak dikembangkan karena kemampuannya dalam melakukan tugas berulang secara presisi dan efisien, seperti pemindahan material, perakitan komponen, serta simulasi proses industri (Zhang et al., 2021). Selain itu, dalam konteks pendidikan teknik, robot arm juga berperan penting sebagai media pembelajaran interaktif yang mengintegrasikan aspek mekanika, elektronika, dan pemrograman (Kumar & Singh, 2022).

Sejumlah penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem lengan robot berbasis mikrokontroler dengan berbagai konfigurasi derajat kebebasan (degree of freedom/DOF) dan metode kendali. Misalnya, penelitian oleh Anwar et al. (2021) mengembangkan robot arm 4 DOF berbasis ATmega328 yang mampu melakukan gerakan dasar manipulasi objek. Penelitian lain oleh Rahman et al. (2022) menunjukkan bahwa penggunaan motor servo pada robot arm memberikan keunggulan dalam hal presisi sudut dan kemudahan pengendalian berbasis sinyal PWM. Sementara itu, studi oleh Li et al. (2023) mengungkapkan bahwa integrasi sistem kendali berbasis mikrokontroler dengan aktuator servo masih memiliki keterbatasan pada aspek kapasitas beban dan kestabilan gerakan.

Meskipun berbagai penelitian telah dilakukan, masih terdapat beberapa celah penelitian (research gap), khususnya dalam pengembangan robot arm yang sederhana, ekonomis, namun tetap mampu memberikan performa yang stabil dan aplikatif untuk pembelajaran. Banyak sistem yang dikembangkan masih berfokus pada kompleksitas tinggi atau biaya yang relatif mahal, sehingga kurang optimal untuk implementasi di lingkungan pendidikan dasar dan menengah. Selain itu, integrasi antara sistem mekanik, elektronika, dan perangkat lunak sering kali belum dioptimalkan secara menyeluruh untuk menghasilkan sistem yang stabil dan mudah digunakan (Patel & Joshi, 2021).

Berdasarkan gap tersebut, penelitian ini menawarkan kebaruan berupa perancangan lengan robot 4 DOF berbasis Arduino dengan pendekatan sederhana, ekonomis, dan

terintegrasi, serta dilengkapi dengan dua mode kendali yaitu manual dan otomatis. Sistem ini dirancang tidak hanya untuk memenuhi fungsi dasar robot manipulator, tetapi juga sebagai media pembelajaran yang efektif dan aplikatif dalam memahami konsep dasar robotika.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang dan membangun prototype lengan robot berbasis Arduino dengan empat motor servo, mengimplementasikan sistem kendali gerak yang terkoordinasi, serta mengevaluasi kinerja sistem dalam melakukan manipulasi objek secara presisi dan stabil.

LANDASAN TEORI

1.1 Robotika

Robotika merupakan bidang ilmu yang berfokus pada perancangan, pembuatan, pengoperasian, serta pemanfaatan robot. Bidang ini memadukan berbagai disiplin seperti sains, rekayasa, dan teknologi untuk menghasilkan mesin yang mampu menjalankan pekerjaan manusia, bahkan melampaui kemampuan manusia dalam kondisi tertentu. Sasaran utama robotika adalah meningkatkan kinerja dan produktivitas di beragam sektor, mulai dari industri manufaktur hingga misi eksplorasi antariksa.

Robot merupakan sistem elektromekanis yang dapat diprogram untuk menjalankan tugas tertentu secara otomatis. Berdasarkan klasifikasinya, robot manipulator seperti lengan robot dirancang untuk memanipulasi objek dengan memanfaatkan koordinasi antara sistem persendian dan aktuator yang bekerja secara terintegrasi (Siciliano & Khatib, 2016).

1.2 Lengan Robot (Robot Arm Manipulator)



Gambar 2. 1 Robot Manipulator

Lengan robot adalah robot manipulator yang dirancang menyerupai struktur lengan manusia untuk melakukan tugas pemindahan dan manipulasi objek. Sistem ini banyak digunakan pada lini produksi otomatis, proses pick-and-place, perakitan elektronik, dan simulasi pembelajaran robotika (Craig, 2018).

Struktur dasar lengan robot terdiri dari:

1. *Base* — bagian dasar yang memungkinkan rotasi horizontal
2. *Shoulder* — sendi pengangkat lengan utama
3. *Elbow* — sendi tekuk lengan
4. *Wrist* — sendi pergelangan untuk orientasi
5. *End-effector* (Gripper) — alat penjepit objek

Robot lengan juga harus memiliki komponen-komponen pendukung sebagai bagian dari pembentuknya diantaranya ada aktuator dan kontroler (Cempaka F., dkk, 2016). Setiap sambungan digerakkan oleh aktuator yang dikontrol secara terkoordinasi untuk menghasilkan gerakan kompleks.

1.3 Degree of Freedom

Degree of Freedom (derajat kebebasan) pada sistem robotik dapat dianalogikan dengan cara tubuh manusia bergerak. Sama seperti manusia, setiap satu derajat kebebasan gerak pada robot memerlukan satu sendi. Secara umum, sebuah lengan robot memerlukan enam derajat kebebasan agar dapat bergerak dengan optimal, dan jumlah tersebut juga dibutuhkan untuk mencapai tingkat fleksibilitas maksimum (Uchrowi, Lasmadi, & Sutjianto, 2019).

Derajat kebebasan menggambarkan banyaknya kemungkinan gerakan yang dapat dilakukan secara bersamaan. Sebagai contoh, engsel pintu memiliki satu derajat kebebasan karena hanya memungkinkan gerakan rotasi dalam satu arah.

Dalam robot manipulator, DOF menentukan fleksibilitas dan kemampuan robot dalam menjangkau serta mengorientasikan objek di ruang kerja (Spong et al., 2020).

Contoh:

- a. 1 DOF → hanya dapat bergerak satu arah
- b. 3 DOF → dapat bergerak dalam ruang tiga dimensi
- c. 4 DOF → mampu rotasi dasar + gerak vertikal + tekuk + orientasi ujung

Semakin besar DOF, semakin luas ruang gerak dan kompleksitas kendalinya.

1.4 Mikrokontroler Arduino



Gambar 2. 2 Mikrokontroler Arduino Uno

Arduino adalah platform mikrokontroler *open-source* yang dirancang untuk mempermudah pengembangan sistem elektronika interaktif. Arduino Uno menggunakan mikrokontroler ATmega328P yang memiliki pin input-output digital, input analog, serta modul komunikasi serial (Banzi & Shiloh, 2014).

Arduino berfungsi sebagai pusat kendali sistem dengan tugas:

1. Membaca program dari memori
2. Menghasilkan sinyal kendali digital
3. Mengatur komunikasi dengan perangkat eksternal
4. Mengontrol aktuator seperti motor servo

Keunggulan Arduino meliputi kemudahan pemrograman, dokumentasi luas, serta kompatibilitas dengan berbagai modul elektronika.

1.5 Motor Servo



Gambar 2. 3 Motor Servo

Motor servo adalah aktuator elektromekanis yang dirancang untuk mengontrol posisi sudut secara presisi. Servo terdiri dari motor DC, rangkaian kontrol, sistem roda gigi, dan sensor umpan balik posisi (potensiometer) dalam satu paket terintegrasi (Futaba, 2019).

Karakteristik utama servo:

1. Kendali posisi sudut (0° – 180°)
2. Respon cepat
3. Torsi cukup besar untuk ukuran kecil
4. Sistem kontrol tertutup (closed-loop)

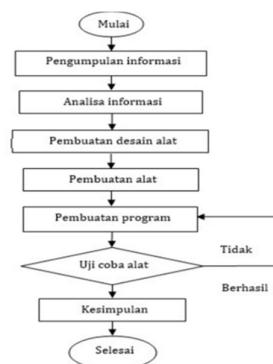
Servo sangat cocok digunakan pada robot arm karena mampu menggerakkan sendi dengan presisi tinggi.

1.6 Sistem Kerja Robot dengan Sensor

Otomatisasi pada robot lengan mencakup penggunaan sistem kendali cerdas yang dipadukan dengan sensor sebagai alat indera, sehingga robot dapat menjalankan tugas fisik sesuai perintah yang telah ditentukan. Sebagai contoh, pada robot lengan pemindah barang, sensor akan mendeteksi keberadaan objek lalu memproses instruksi yang telah diprogram. Selanjutnya robot bergerak secara otomatis untuk mengambil objek tersebut dan meletakkannya di lokasi yang telah ditetapkan. Setelah tugas selesai, robot kembali ke posisi awal dan menunggu perintah berikutnya atau hingga sensor kembali mendeteksi objek baru.

METODOLOGI PERANCANGAN

1.7 Metode Perancangan



Gambar 3. 1 Metode Perancangan

Metode perancangan pada proyek lengan robot ini dilakukan secara terstruktur melalui beberapa tahapan yang berurutan. Tahap awal dimulai dengan

pengumpulan informasi, yaitu mencari referensi mengenai konsep lengan robot, penggunaan motor servo, serta mikrokontroler Arduino dari berbagai sumber seperti buku, jurnal, dan internet. Selanjutnya dilakukan analisis terhadap informasi tersebut untuk menentukan kebutuhan sistem, pemilihan komponen, serta metode pengendalian yang akan digunakan.

Tahap berikutnya adalah perancangan alat yang mencakup desain struktur mekanik lengan robot, penempatan motor servo, serta perancangan rangkaian elektronik. Setelah desain selesai, dilakukan proses pembuatan alat dengan merealisasikan rancangan ke dalam bentuk fisik melalui perakitan rangka, pemasangan servo, dan penyusunan rangkaian Arduino.

Setelah perangkat keras selesai dibuat, tahap selanjutnya adalah pembuatan program menggunakan Arduino IDE dengan bahasa pemrograman C/C++ untuk mengatur gerakan serta logika kerja robot. Kemudian dilakukan pengujian sistem untuk memastikan seluruh komponen dapat bekerja dengan baik sesuai dengan program yang telah dibuat.

Apabila pada tahap pengujian ditemukan kendala atau sistem belum bekerja secara optimal, maka dilakukan perbaikan baik pada program maupun rangkaian, kemudian dilakukan pengujian ulang hingga sistem berfungsi dengan baik. Setelah sistem dinyatakan berhasil, tahap akhir adalah penarikan kesimpulan berdasarkan hasil pengujian. Proses ini diakhiri dengan selesainya perancangan, yang menandakan bahwa lengan robot telah berhasil dibuat dan dapat beroperasi sesuai tujuan yang diharapkan

1.8 Perangkat Keras (Hardware)

Komponen utama:

1. Arduino Uno
2. 4x Servo Motor SG90/MG90
3. Rangka lengan robot akrilik
4. Catu daya 5–6V
5. Kabel jumper
6. Breadboard

1.9 Perangkat Lunak (Software)

Bahasa pemrograman: C/C++ (Arduino IDE)

Program dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan bahasa C/C++ yang kompatibel dengan board ESP32. Program bertugas membangun logika kendali, mengontrol perangkat keras, serta memastikan lengan robot dapat bergerak secara terkoordinasi, presisi, dan stabil.

Fungsi utama program:

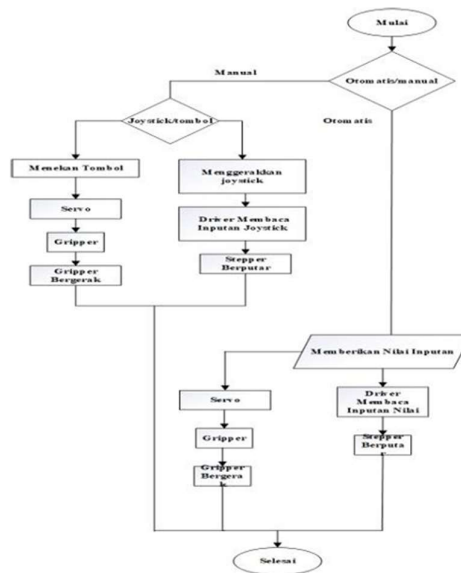
1. Melakukan konfigurasi pin input-output serta menginisialisasi objek servo yang digunakan untuk menggerakkan tiap sendi lengan robot.
2. Program menentukan sudut awal masing-masing servo agar robot berada pada posisi siaga sebelum melakukan gerakan.
3. Pengendalian Motor Servo

Mikrokontroler mengirim sinyal Pulse Width Modulation (PWM) ke setiap servo untuk mengatur sudut putaran. Setiap servo merepresentasikan satu derajat kebebasan (DOF).

Contoh pembagian kendali:

- a. Servo 1 → Rotasi dasar (base)
 - b. Servo 2 → Gerak bahu (shoulder)
 - c. Servo 3 → Tekukan siku (elbow)
 - d. Servo 4 → Gripper (buka-tutup penjepit)
4. Mengatur kombinasi sudut servo sehingga membentuk gerakan terkoordinasi, misalnya:
 - a. Mengambil objek
 - b. Mengangkat objek
 - c. Memindahkan objek
 - d. Meletakkan objek
 5. Pengatur waktu agar perpindahan posisi servo berlangsung stabil dan tidak terjadi gerakan mendadak.
 6. Instruksi dijalankan berulang menggunakan struktur loop sehingga robot dapat bekerja secara kontinu.

1.10 Prinsip Kerja Sistem



Gambar 3. 2 Prinsip Kerja Sistem

Saat robot diaktifkan, tersedia dua mode pengendalian yang dapat digunakan, yaitu mode otomatis dan mode manual. Pada mode manual, tombol dimanfaatkan untuk mengatur pergerakan servo yang terdapat pada gripper, sehingga gripper dapat menjepit benda kerja. Sementara itu, pergerakan robot dikendalikan menggunakan joystick yang memberikan input ke driver. Driver kemudian memproses sinyal tersebut dan mengirimkan perintah ke motor stepper sehingga motor dapat bergerak sesuai perintah. Pada mode otomatis, penentuan nilai titik koordinat dilakukan melalui kontroler. Nilai koordinat tersebut digunakan sebagai parameter oleh driver motor melalui mikrokontroler untuk menggerakkan sistem secara otomatis.

Saat robot diaktifkan, tersedia dua metode pengendalian, yaitu mode manual dan mode otomatis. Pada mode manual, pergerakan servo pada gripper diatur menggunakan tombol sehingga gripper dapat menjepit benda kerja. Sementara itu, pergerakan robot dikendalikan melalui joystick yang memberikan sinyal masukan ke driver. Driver kemudian memproses sinyal tersebut dan meneruskannya sebagai perintah ke motor stepper sehingga motor dapat bergerak sesuai kendali pengguna.

Pada mode otomatis, nilai titik koordinat dimasukkan melalui kontroler. Nilai tersebut digunakan sebagai parameter oleh driver motor yang dikendalikan mikrokontroler untuk menggerakkan robot secara otomatis (Anwar et al., 2021).

HASIL DAN PEMBAHASAN

1.11 Hasil

4.1.1 Rancangan Mekanik

Berdasarkan perancangan, alur rancangan mekanik lengan robot 4 DOF disusun berdasarkan susunan komponen dan fungsi tiap bagian sebagai berikut:

1. Penentuan Axis Lengan Robot

Rancangan dimulai dengan menentukan jumlah derajat kebebasan (DOF) yaitu 4 axis yang berfungsi sebagai penggerak utama sistem mekanik, meliputi:

- a. Axis 1 sebagai base rotation (perputaran dasar robot)
- b. Axis 2 sebagai shoulder (lengan atas)
- c. Axis 3 sebagai elbow (lengan bawah)
- d. Axis 4 sebagai penggerak linear

2. Perancangan Struktur Lengan

Setiap axis dihubungkan dalam bentuk struktur mekanik menyerupai lengan manusia, yang terdiri dari base, lengan atas, lengan bawah, dan ujung lengan (end-effector). Struktur ini memungkinkan robot melakukan gerakan mengangkat dan memindahkan benda.

3. Penempatan Aktuator (Motor Stepper/Servo)

Setiap axis dipasangkan aktuator sebagai penggerak sendi. Aktuator berfungsi untuk menggerakkan tiap bagian lengan robot sesuai perintah dari sistem kontrol.

4. Perancangan End-Effector (Gripper)

Pada bagian ujung lengan dipasang gripper yang berfungsi untuk mencengkam dan memindahkan benda. Gripper menjadi bagian penting dalam proses manipulasi objek.

5. Integrasi Sistem Kontrol pada Mekanik

Mekanik robot diintegrasikan dengan sistem kontrol yang terdiri dari:

- a. Joystick sebagai kontroler gerakan
- b. Push button sebagai input tambahan

6. Perancangan Panel Kontrol

Seluruh komponen kontrol seperti joystick, dan push button ditempatkan di breadboard untuk memudahkan pengoperasian robot.

7. Perakitan Sistem Mekanik

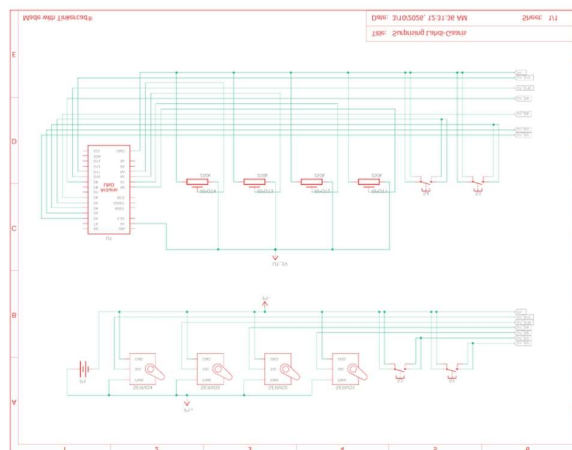
Setelah semua komponen dirancang, dilakukan proses perakitan dari base hingga gripper sehingga membentuk satu kesatuan sistem robot arm yang utuh.

8. Pengujian Gerakan Mekanik

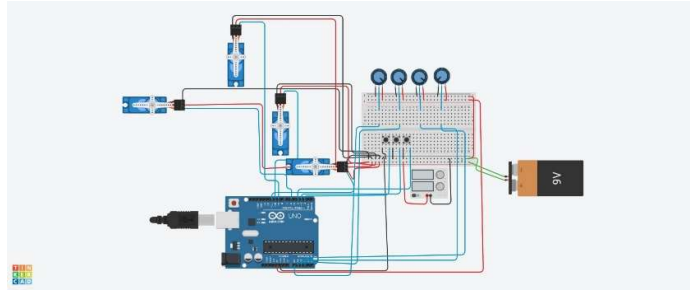
Tahap akhir dilakukan pengujian untuk memastikan:

- a. Setiap axis dapat bergerak dengan baik
- b. Gripper dapat mencengkam objek
- c. Sistem mekanik stabil saat beroperasi.

4.1.2 Rancang Sistem Minimum dan Hardware

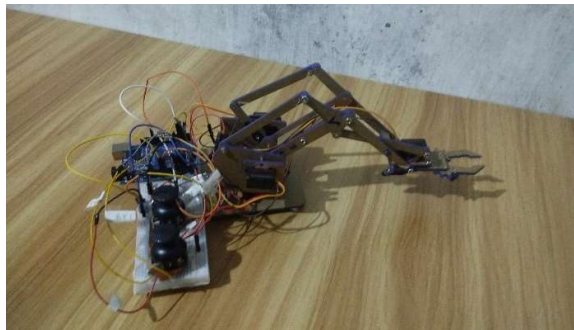


Gambar 4. 1 Skematik Mikrokontroler



Gambar 4. 2 Sistem Hardware

1.12 Pembahasan



Gambar 4. 3 Hasil Keseluruhan

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian yang telah dilakukan, sistem lengan robot 4 motor servo yang dirancang menunjukkan bahwa integrasi antara sistem mekanik, elektronik, dan perangkat lunak dapat bekerja dengan baik dalam menjalankan fungsi pemindahan benda. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa robot manipulator mampu membantu pekerjaan manusia menjadi lebih efektif dan efisien, khususnya pada proses pemindahan barang.

Dari sisi mekanik, lengan robot yang terdiri dari empat derajat kebebasan (DOF) mampu menghasilkan gerakan yang cukup fleksibel, meliputi rotasi dasar (base), gerakan bahu (shoulder), siku (elbow), serta gerakan linear tambahan. Penambahan satu axis linear memberikan keunggulan dibandingkan robot dengan DOF lebih rendah, karena mampu memperluas jangkauan kerja robot. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak derajat kebebasan, maka semakin kompleks namun juga semakin fleksibel pergerakan robot dalam memanipulasi objek.

Pada aspek sistem kendali, penggunaan mikrokontroler sebagai pusat kontrol terbukti efektif dalam mengatur pergerakan aktuator. Mikrokontroler menerima input dari pengguna (baik melalui joystick, tombol, maupun program otomatis), kemudian mengirimkan sinyal ke driver motor untuk menggerakkan motor stepper dan servo. Sistem ini mampu bekerja dalam dua mode, yaitu manual dan otomatis. Mode manual memberikan fleksibilitas bagi pengguna dalam

mengontrol langsung pergerakan robot, sedangkan mode otomatis memungkinkan robot bekerja berdasarkan parameter koordinat yang telah ditentukan sebelumnya.

KESIMPULAN DAN SARAN

1.13 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian yang telah dilakukan, penelitian ini berhasil merancang dan merealisasikan sistem lengan robot berbasis Arduino dengan empat motor servo yang mampu menjalankan fungsi dasar manipulasi objek. Sistem yang dikembangkan menunjukkan bahwa integrasi antara komponen mekanik, elektronika, dan perangkat lunak dapat bekerja secara sinergis dalam menghasilkan gerakan yang terkoordinasi dan cukup stabil. Penggunaan motor servo sebagai aktuator terbukti mampu memberikan kontrol posisi yang relatif presisi, sementara implementasi dua mode kendali, yaitu manual dan otomatis, memberikan fleksibilitas dalam pengoperasian sistem.

1.14 Saran

Meskipun sistem telah berfungsi dengan baik sebagai media pembelajaran robotika, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan, terutama pada kapasitas beban, tingkat presisi gerakan, serta belum diterapkannya metode kendali lanjutan seperti inverse kinematics. Selain itu, sistem belum dilengkapi dengan sensor umpan balik yang memadai untuk meningkatkan akurasi dan adaptabilitas terhadap lingkungan. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan aktuator dengan torsi yang lebih besar, material mekanik yang lebih kuat dan stabil, serta mengembangkan sistem kendali yang lebih canggih berbasis perhitungan kinematika dan integrasi sensor. Dengan pengembangan tersebut, diharapkan sistem lengan robot dapat memiliki performa yang lebih optimal dan dapat diaplikasikan pada skala yang lebih luas, baik dalam bidang pendidikan maupun industri.

DAFTAR PUSTAKA

- Anwar, M. A. S., Mirna, M., Rifaldi, M., Nur, M., & Ishak. (2021). Rancang bangun robot arm 4 DOF berbasis mikrokontroler ATmega328. *MAPLE: Mechatronics Journal in Professional and Entrepreneur*, 3(2), 1–10.
- Alam, M., & Reza, S. (2022). Embedded system design using Arduino. *Journal of Embedded Systems*, 14(2), 88–97.

- Rahman, M., Islam, S., & Ahmed, F. (2022). Design and implementation of 4 DOF robotic arm. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 19(1), 1–10.
- Uchrowi, A., Lasmadi, & Sutjipto. (2019). Pemodelan dan simulasi robot lengan 3 DOF menggunakan V-Rep. *AVITEC*, 1(1), 87–98.
- Zhang, L., Wu, H., & Sun, Q. (2021). Industrial robot applications in automation systems. *Automation in Construction*, 125, 103598.
- Chen, G., Liu, Y., & Zhao, X. (2023). Multi-DOF robotic arm optimization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70(3), 2456–2465.
- Kumar, R., & Singh, P. (2022). Educational robotics for engineering learning: A review. *Education and Information Technologies*, 27(4), 5231–5250.
- Wang, Z., & Li, X. (2023). Control systems for robotic manipulators. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(2), 1234–1241.
- Axelsson, J. (2015). *Embedded Systems with ARM Cortex-M Microcontrollers*. Pearson.
- Craig, J. J. (2018). *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Pearson
- Banzi, M., & Shiloh, M. (2014). *Getting Started with Arduino*. Maker Media.
- Arduino. (2023). *Arduino Uno Rev3 Documentation*. Arduino.cc
- Ogata, K. (2020). *Modern control engineering* (6th ed.). Pearson.
- Futaba Corporation. (2019). *Servo Motor Technical Guide*.