



Perancangan dan Evaluasi Lengan Robot 4-DOF Berbasis ESP32 Dengan Kendali Manual Menggunakan Aplikasi Bluetooth Android

Deswen Lumban Gaol^{1*}, Michael Oklando Sihotang², Albert Sebastian Siahaan³,
Eka Dodi Suryanto⁴, Dian Putra Saragi⁵

¹ Program Studi Teknik Elektro, Jurusan Pendidikan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan, Jalan Willem Iskandar Pasar V, Kota Medan, Provinsi Sumatera Utara, Indonesia, 20221

² Program Studi Teknik Elektro, Jurusan Pendidikan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan, Jalan Willem Iskandar Pasar V, Kota Medan, Provinsi Sumatera Utara, Indonesia, 20221

³ Program Studi Teknik Elektro, Jurusan Pendidikan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan, Jalan Willem Iskandar Pasar V, Kota Medan, Provinsi Sumatera Utara, Indonesia, 20221

⁴ Program Studi Teknik Elektro, Jurusan Pendidikan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan, Jalan Willem Iskandar Pasar V, Kota Medan, Provinsi Sumatera Utara, Indonesia, 20221

⁵ Program Studi Teknik Elektro, Jurusan Pendidikan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan, Jalan Willem Iskandar Pasar V, Kota Medan, Provinsi Sumatera Utara, Indonesia, 20221

*Penulis Korespondensi: deswenmarbun@gmail.com

Abstract. *The development of robotics and embedded systems has increased the need for accessible learning media to support the understanding of basic control concepts. However, industrial robotic systems are generally expensive and complex, making them less suitable for introductory learning. This study aims to design and evaluate a 4-degree-of-freedom (4-DOF) robotic arm based on ESP32 as a learning medium for basic control systems. The research method includes hardware and software system design, implementation of a Bluetooth-based control system using an Android gamepad interface, and experimental testing. The system applies an incremental control method combined with a Degree of Freedom mechanism to regulate actuator movement gradually. The evaluation covers control mapping accuracy, system responsiveness, angle constraints, startup stability, serial monitoring, and response consistency. The results show that the system successfully executes all control commands with accurate input-output mapping and stable performance. The system maintains actuator movement within safe angle limits and operates without disturbance during startup. In addition, the serial monitoring feature enables real-time visualization of the control process. The findings indicate that the developed system is suitable as a low-cost educational platform for learning basic robotic control concepts due to its simplicity, intuitiveness, and ease of implementation.*

Keywords: *Bluetooth control; ESP32; educational media; robotic arm; servo motor*

Abstrak. Perkembangan teknologi robotika dan sistem *embedded* meningkatkan kebutuhan akan media pembelajaran yang mampu menjelaskan konsep dasar sistem kontrol secara praktis dan mudah dipahami. Namun, perangkat robot industri umumnya memiliki biaya tinggi dan kompleksitas yang tidak sesuai untuk pembelajaran tingkat dasar. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengevaluasi lengan robot 4 derajat kebebasan (4-DOF) berbasis ESP32 sebagai media pembelajaran kontrol dasar. Metode penelitian meliputi perancangan sistem perangkat keras dan perangkat lunak, implementasi sistem kendali berbasis Bluetooth menggunakan antarmuka *gamepad* Android, serta pengujian eksperimen. Sistem menggunakan metode kontrol *incremental* dengan mekanisme *Degree of Freedom* untuk mengatur pergerakan aktuator secara bertahap. Pengujian dilakukan terhadap pemetaan fungsi kontrol, respons sistem, batas sudut, kestabilan startup, monitoring serial, dan konsistensi respons. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu menjalankan seluruh perintah dengan pemetaan input-output yang akurat dan respons yang stabil.

Sistem juga mampu menjaga pergerakan servo dalam batas sudut yang aman serta tidak mengalami gangguan saat proses startup. Selain itu, fitur monitoring serial memungkinkan visualisasi proses kendali secara *real-time*. Implikasi penelitian ini menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan layak digunakan sebagai media pembelajaran kontrol dasar robotika karena bersifat sederhana, intuitif, dan mudah diimplementasikan.

Kata kunci: ESP32; kontrol Bluetooth; lengan robot; media pembelajaran; servomotor

LATAR BELAKANG

Perkembangan teknologi robotika, sistem *embedded*, dan Internet of Things (IoT) telah mendorong pemanfaatan sistem otomatis dalam berbagai bidang, termasuk pendidikan teknik. Dalam konteks pembelajaran, dibutuhkan media yang mampu menjelaskan konsep dasar sistem kontrol secara praktis dan mudah dipahami. Namun, perangkat robot industri umumnya memiliki biaya tinggi dan kompleksitas yang besar, sehingga kurang sesuai digunakan pada tahap pembelajaran dasar (Ali et al., 2023). Oleh karena itu, diperlukan alternatif berupa sistem robotik yang lebih sederhana dan terjangkau.

Robot lengan (*robotic arm*) merupakan salah satu platform yang banyak digunakan dalam pembelajaran robotika karena mampu merepresentasikan konsep manipulasi, koordinasi *joint*, serta hubungan antara input kendali dan respons aktuator. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa robot arm berbiaya rendah tetap dapat digunakan untuk manipulasi objek ringan dengan mempertimbangkan keterbatasan mekanik dan aktuator (Ali et al., 2023). Konfigurasi 4 derajat kebebasan (4-DOF) dinilai cukup representatif karena mampu memberikan fleksibilitas gerakan tanpa meningkatkan kompleksitas sistem secara signifikan (Fauzan & Pramudita, 2024)

Dari sisi aktuator, servomotor banyak digunakan dalam sistem robotika karena mampu mengontrol posisi sudut secara langsung menggunakan sinyal PWM. Servomotor memungkinkan implementasi sistem kontrol yang sederhana namun efektif, sehingga sesuai untuk pembelajaran dasar yang tidak memerlukan sistem umpan balik kompleks (Autsou et al., 2024). Sementara itu, penggunaan mikrokontroler ESP32 memberikan keunggulan dalam integrasi sistem karena telah dilengkapi dengan komunikasi nirkabel seperti Bluetooth dan Wi-Fi, serta mendukung pengolahan data secara *real-time* pada sistem berbiaya rendah (Hercog et al., 2023; Yilmaz et al., 2025).

Dalam implementasinya, sistem kendali berbasis perangkat mobile menjadi pendekatan yang intuitif dan mudah digunakan. Kombinasi ESP32 dengan komunikasi Bluetooth dan aplikasi Android memungkinkan pengembangan sistem kendali nirkabel dengan protokol perintah sederhana dan respons yang cukup cepat, sehingga cocok untuk pengendalian robot secara manual (Gupta et al., 2025). Selain itu, penggunaan robot arm berbasis IoT sebagai media pembelajaran juga telah dikembangkan dalam penelitian sebelumnya, yang menunjukkan bahwa platform robot murah dapat membantu mahasiswa memahami konsep robotika secara langsung melalui pendekatan praktis (Benitez et al., 2020a).

Meskipun berbagai penelitian telah mengembangkan robot lengan dengan fitur yang lebih kompleks, sebagian besar masih berfokus pada otomatisasi dan integrasi sistem lanjutan. Sementara itu, kebutuhan pembelajaran dasar memerlukan sistem yang lebih sederhana, mudah diamati, dan mudah dioperasikan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengevaluasi lengan robot 4-DOF berbasis ESP32 dengan kendali manual berbasis Bluetooth melalui antarmuka *gamepad* Android. Sistem ini diharapkan dapat menjadi media pembelajaran kontrol dasar yang mampu

menjelaskan konsep pemetaan input-output, kendali aktuator, serta respons sistem secara intuitif dan *real-time*.

1. KAJIAN TEORITIS

1.1 Robot Lengan sebagai Media Pembelajaran

Robot lengan (*robotic arm*) merupakan salah satu sistem robotika yang banyak digunakan dalam industri maupun pendidikan karena kemampuannya dalam melakukan manipulasi objek secara terstruktur. Dalam konteks pendidikan, robot lengan sering digunakan sebagai media pembelajaran untuk memahami konsep dasar seperti koordinasi *joint*, kinematika sederhana, serta hubungan antara input kendali dan respons aktuator. Penggunaan robot arm berbiaya rendah memungkinkan mahasiswa untuk melakukan eksperimen secara langsung tanpa memerlukan perangkat industri yang kompleks dan mahal (Ali et al., 2023).

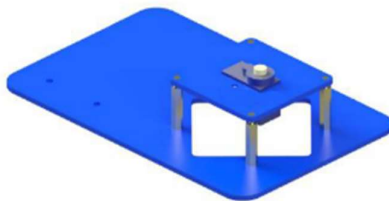
Selain itu, penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa platform robotik berbasis IoT dapat digunakan sebagai sarana pembelajaran yang efektif karena mendukung pendekatan *hands-on learning*, di mana pengguna dapat memahami sistem melalui interaksi langsung dengan perangkat (Benitez et al., 2020b). Oleh karena itu, robot lengan menjadi salah satu media yang representatif untuk menjelaskan konsep dasar sistem kontrol dalam pembelajaran teknik.

1.2 Konfigurasi Robot Lengan 4-DOF

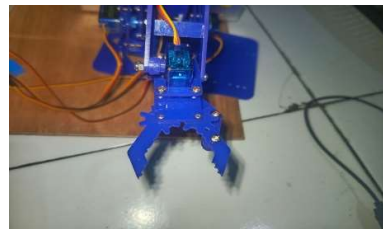
Derajat kebebasan (*Degree of Freedom/DOF*) pada robot lengan menunjukkan jumlah gerakan independen yang dapat dilakukan oleh sistem. Robot lengan dengan konfigurasi 4-DOF memiliki empat *joint* utama yang dapat dikendalikan secara terpisah, sehingga memungkinkan pergerakan dasar seperti rotasi basis, pengangkatan lengan, ekstensi, serta pengoperasian *gripper*. Konfigurasi ini dinilai cukup untuk merepresentasikan fungsi dasar manipulasi tanpa menambah kompleksitas sistem secara signifikan (Fauzan & Pramudita, 2024).

Penggunaan 4-DOF dalam pembelajaran memberikan keseimbangan antara kemampuan gerak dan kesederhanaan sistem, sehingga memudahkan pengguna dalam memahami konsep dasar robotika sebelum beralih ke sistem dengan derajat kebebasan yang lebih tinggi.

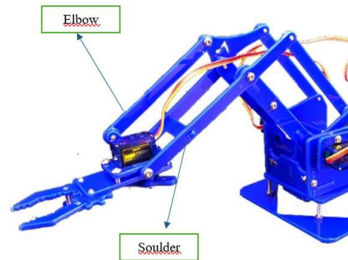
Pada penelitian ini, konfigurasi 4-DOF diimplementasikan melalui empat bagian utama, yaitu *base*, *shoulder*, *elbow*, dan *gripper*.



Gambar 1. Base



Gambar 2. Gripper



Gambar 3. shoulder dan elbow

Joint base berfungsi untuk melakukan rotasi horizontal sehingga menentukan arah pergerakan lengan robot. *Joint shoulder* berperan dalam mengangkat atau menurunkan lengan utama, sehingga mempengaruhi tinggi jangkauan robot. *Joint elbow* digunakan untuk mengatur ekstensi atau jangkauan lengan, memungkinkan robot mencapai posisi yang lebih jauh atau lebih dekat. Sementara itu, *gripper* berfungsi sebagai *end-effector* yang digunakan untuk mengambil dan melepaskan objek. Keempat bagian ini bekerja secara terkoordinasi untuk menghasilkan gerakan manipulasi dasar yang representatif dalam pembelajaran robotika.

1.3 Mikrokontroler ESP32 dalam Sistem Robotika

ESP32 merupakan mikrokontroler berbasis *System on Chip (SoC)* yang banyak digunakan dalam pengembangan sistem *embedded* dan IoT. ESP32 memiliki keunggulan berupa prosesor *dual-core*, kemampuan komunikasi Wi-Fi dan Bluetooth terintegrasi, serta dukungan untuk pengolahan data secara *real-time*. Hal ini menjadikan ESP32 sebagai platform yang sesuai untuk pengembangan sistem robotika berbiaya rendah dengan kemampuan komunikasi nirkabel (Hercog et al., 2023; Yilmaz et al., 2025).



Gambar 4. ESP32

Dalam sistem robotika, ESP32 berfungsi sebagai pusat kendali yang menerima input dari pengguna, memproses data, dan mengirimkan sinyal kendali ke aktuator. Kemampuan komunikasi Bluetooth memungkinkan implementasi sistem kendali jarak dekat yang fleksibel dan mudah digunakan, terutama dalam aplikasi berbasis perangkat mobile.

1.4 Servomotor dan Kontrol PWM



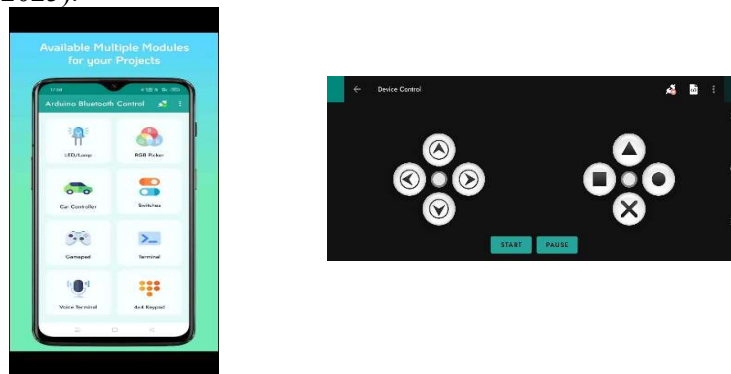
Gambar 5. Servo motor

Servomotor merupakan aktuator yang umum digunakan dalam sistem robotika karena mampu mengontrol posisi sudut secara presisi. Servomotor bekerja dengan menggunakan sinyal Pulse Width Modulation (PWM), di mana lebar pulsa menentukan sudut posisi yang diinginkan. Sistem ini memungkinkan pengendalian posisi secara langsung tanpa memerlukan algoritma kontrol yang kompleks (Autsou et al., 2024).

Dalam aplikasi pembelajaran, penggunaan servomotor memberikan keuntungan karena mudah diimplementasikan dan memungkinkan pengguna untuk memahami konsep dasar aktuasi dan kontrol posisi. Selain itu, pembatasan sudut pada servomotor dapat digunakan untuk memperkenalkan konsep batas sistem dan keamanan dalam kendali aktuator.

1.5 Sistem Kendali Berbasis Bluetooth dan Antarmuka Android

Penggunaan komunikasi Bluetooth dalam sistem robotika memungkinkan pengendalian perangkat secara nirkabel dengan jarak tertentu. ESP32 mendukung komunikasi Bluetooth Classic yang dapat digunakan untuk mengirimkan data dalam bentuk karakter sederhana. Pendekatan ini memungkinkan implementasi sistem kendali yang ringan dan responsif (Gupta et al., 2025).



Gambar 6. Aplikasi Arduino Bluetooth Controller

Dalam penelitian ini, sistem kendali diimplementasikan menggunakan aplikasi Android dengan antarmuka *gamepad*. Setiap tombol pada aplikasi dikonversi menjadi karakter tertentu yang diproses oleh mikrokontroler untuk mengendalikan aktuator. Pendekatan ini mempermudah pengguna dalam mengontrol robot secara intuitif tanpa memerlukan pemrograman yang kompleks.

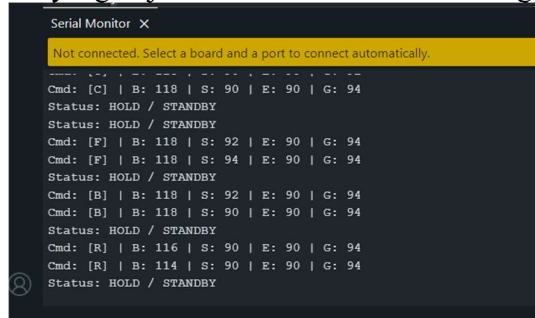
1.6 Konsep Kontrol Incremental dan Degree of Freedom

Kontrol *incremental* merupakan metode pengendalian di mana perubahan posisi aktuator dilakukan secara bertahap berdasarkan input yang diberikan. Dalam sistem ini, setiap perintah akan menambah atau mengurangi nilai sudut dalam jumlah tertentu. Metode ini memungkinkan pengguna untuk mengamati perubahan posisi secara langsung dan bertahap.

Selain itu, mekanisme *Degree of Freedom* digunakan untuk mempertahankan gerakan selama tombol ditekan dan menghentikan gerakan saat tombol dilepas. Pendekatan ini memberikan kontrol yang lebih intuitif dan mudah dipahami, sehingga sesuai untuk digunakan dalam pembelajaran sistem kontrol dasar.

1.7 Monitoring Serial sebagai Media Visualisasi Sistem

Serial monitoring merupakan salah satu metode untuk menampilkan informasi internal sistem secara *real-time*. Dalam sistem berbasis mikrokontroler, data seperti perintah yang diterima dan nilai variabel dapat ditampilkan melalui Serial Monitor. Hal ini memungkinkan pengguna untuk memahami proses yang terjadi di dalam sistem secara langsung.



Gambar 7. Serial monitor pada Arduino IDE

Penggunaan monitoring serial dalam pembelajaran memberikan nilai tambah karena membantu pengguna dalam memahami hubungan antara input, pemrosesan data, dan output sistem. Dengan demikian, sistem tidak hanya berfungsi sebagai alat manipulasi, tetapi juga sebagai media visualisasi proses kendali yang mendukung pemahaman konsep dasar robotika.

METODE PENELITIAN

1.8 Jenis Penelitian

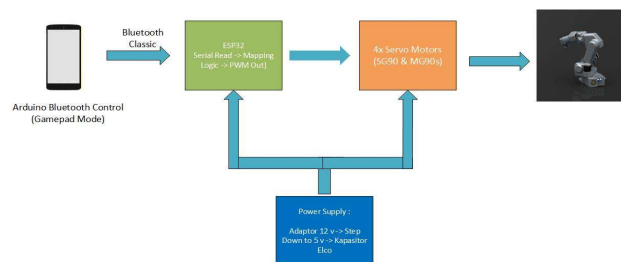
Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen yang berfokus pada rancang bangun dan evaluasi sistem. Pendekatan yang digunakan meliputi perancangan perangkat keras (*hardware*), pengembangan perangkat lunak (*software*), serta pengujian kinerja sistem untuk menilai kelayakan lengan robot sebagai media pembelajaran kontrol dasar.

1.9 Perancangan Sistem

Sistem yang dikembangkan terdiri dari tiga bagian utama, yaitu perangkat keras, perangkat lunak, dan sistem kendali.

1.9.1 Perancangan Perangkat Keras

Arsitektur perangkat keras pada sistem ini dirancang dengan mikrokontroler ESP32 NodeMCU sebagai pusat kendali yang terhubung dengan aktuator berupa empat servomotor (*base, shoulder, elbow, dan gripper*). Sistem juga dilengkapi dengan sumber catu daya, modul konversi tegangan, serta media distribusi rangkaian menggunakan papan *perfboard*.



Gambar 8. Perancangan perangkat keras

PERANCANGAN DAN EVALUASI LENGAN ROBOT 4-DOF BERBASIS ESP32 DENGAN KENDALI MANUAL MENGGUNAKAN APLIKASI BLUETOOTH ANDROID

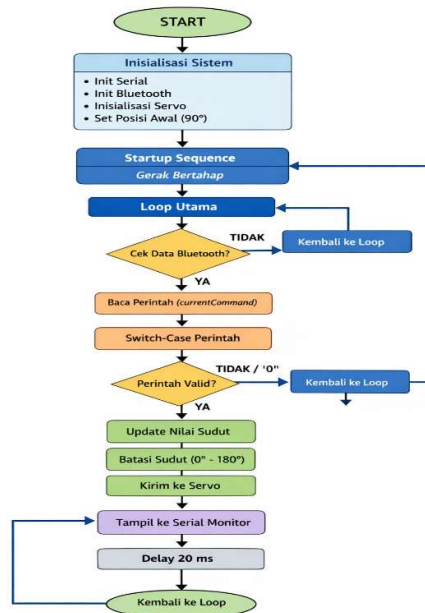
Arsitektur perangkat keras pada sistem ini dirancang dengan mikrokontroler ESP32 NodeMCU sebagai pusat kendali yang terhubung dengan aktuator berupa empat servomotor (*base, shoulder, elbow, dan gripper*). Sistem juga dilengkapi dengan sumber catu daya, modul konversi tegangan, serta media distribusi rangkaian menggunakan papan *perfboard*.

Salah satu permasalahan utama dalam sistem robot berbasis servomotor adalah terjadinya penurunan tegangan (*voltage droop*) akibat lonjakan arus sesaat (*inrush current*) ketika beberapa servo bergerak secara bersamaan. Kondisi ini dapat menyebabkan mikrokontroler mengalami reset (*brownout*) dan mengganggu kestabilan sistem. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, digunakan sistem distribusi daya dengan pendekatan *dual voltage rail*. Sumber daya utama berasal dari adaptor 12V 2A yang kemudian diturunkan menjadi 5V menggunakan modul *step-down buck converter* (LM2596 atau sejenis). Penggunaan buck converter dipilih karena memiliki efisiensi tinggi dan mampu menyediakan arus yang cukup untuk kebutuhan servo dan mikrokontroler tanpa menghasilkan panas berlebih.

Selain itu, pada jalur catu daya servo ditambahkan kapasitor elektrolit sebesar 4700 μF yang berfungsi sebagai penyimpan muatan sementara (*charge reservoir*). Kapasitor ini membantu menstabilkan tegangan dengan menyuplai arus tambahan saat terjadi lonjakan beban secara tiba-tiba, sehingga dapat mengurangi risiko penurunan tegangan yang menyebabkan gangguan pada sistem.

Dengan kombinasi penggunaan buck converter dan kapasitor elektrolit, sistem catu daya menjadi lebih stabil, sehingga mampu menjaga kinerja mikrokontroler dan aktuator tetap optimal selama operasi.

1.9.2 Perancangan Perangkat Lunak



Gambar 9. Perancangan perangkat lunak

Alur kerja perangkat lunak dimulai dengan proses inialisasi sistem yang meliputi pengaturan komunikasi serial, koneksi Bluetooth, serta inialisasi aktuator servo dengan posisi awal tertentu. Setelah itu, sistem menjalankan *loop* utama yang secara terus-menerus memeriksa data yang diterima melalui Bluetooth.

Jika terdapat input, sistem membaca karakter perintah dan memprosesnya menggunakan struktur kontrol *switch-case* untuk menentukan jenis gerakan yang dilakukan. Nilai sudut servo kemudian diperbarui secara bertahap menggunakan metode kontrol *incremental* dan dibatasi dalam rentang tertentu menggunakan fungsi pembatas (*constrain*).

Selanjutnya, nilai sudut dikirimkan ke aktuator servo, dan informasi sistem ditampilkan melalui Serial Monitor. Jika tidak ada input atau perintah bernilai nol, sistem berada dalam kondisi *hold* atau *standby*. Proses ini berlangsung secara berulang dengan interval waktu tertentu untuk menjaga kestabilan sistem.

1.10 Metode Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem lengan robot sebagai media pembelajaran kontrol dasar. Metode pengujian disusun berdasarkan karakteristik sistem kendali yang diimplementasikan, meliputi pemetaan input, respons kendali, kestabilan sistem, serta kemampuan visualisasi proses kendali. Adapun pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Uji Pemetaan Fungsi Kontrol
Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap input karakter yang dikirim dari aplikasi Bluetooth Controller sesuai dengan *joint* dan arah gerakan yang dihasilkan. Parameter yang diamati meliputi kesesuaian antara tombol yang ditekan, *joint* yang bergerak, arah gerakan, serta kondisi *standby* saat tidak ada input.
2. Uji Respons Kendali (*Degree of Freedom*)
Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi respons sistem terhadap metode kontrol *incremental* dengan mekanisme *Degree of Freedom*. Parameter yang diamati meliputi kemampuan sistem dalam merespons input selama tombol ditekan, menghentikan gerakan saat tombol dilepas, serta konsistensi perubahan sudut secara bertahap sesuai nilai *step angle*.
3. Uji Batas Sudut (*Constraint*)
Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem mampu membatasi nilai sudut aktuator pada rentang yang telah ditentukan, yaitu 0° hingga 180° . Parameter yang diamati meliputi kemampuan sistem dalam mempertahankan nilai sudut pada batas minimum dan maksimum, serta kestabilan sistem saat perintah diberikan secara terus-menerus pada kondisi batas.
4. Uji *Startup sequence*
Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi kestabilan sistem saat proses inialisasi awal. Pengujian dilakukan pada dua kondisi, yaitu tanpa perubahan posisi aktuator sebelum sistem dimatikan dan setelah aktuator digerakkan dari posisi awalnya. Parameter yang diamati meliputi urutan pergerakan servo, keberadaan gerakan mendadak, serta kondisi sistem apakah mengalami reset atau tidak.
5. Uji Monitoring Serial

**PERANCANGAN DAN EVALUASI LENGAN ROBOT 4-DOF BERBASIS ESP32 DENGAN
KENDALI MANUAL MENGGUNAKAN APLIKASI BLUETOOTH ANDROID**

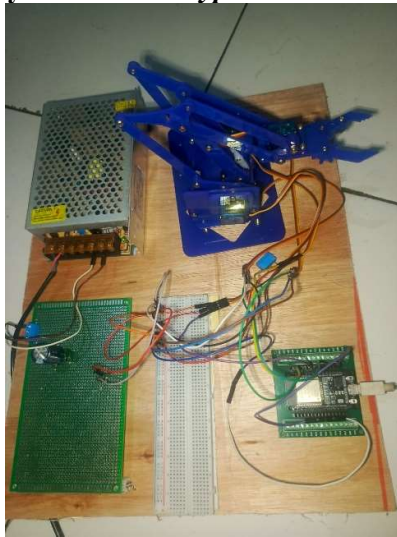
Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam menampilkan informasi internal secara *real-time* melalui Serial Monitor. Parameter yang diamati meliputi kesesuaian perintah yang diterima, perubahan nilai sudut setiap *joint*, serta status sistem (aktif atau *standby*).

6. Uji Konsistensi Respons

Pengujian ini dilakukan untuk menilai kestabilan sistem dalam merespons perintah yang diberikan secara berulang. Pengujian dilakukan dengan memberikan input yang sama dalam durasi tertentu secara berulang, kemudian diamati apakah sistem memberikan respons yang konsisten pada setiap percobaan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Perakitan dan Penyusunan *Prototype*



Gambar 10. Hasil perakitan *prototype*

Gambar 10 adalah gambar *prototype* yang telah berhasil dibuat dan dijalankan. Pada sistem lengan robot 4-DOF ini menggunakan 4 buah motor servo, yaitu servo MG90S untuk bagian *base*, dan menggunakan servo SG90 untuk bagian *shoulder, elbow* dan *gripper*.

B. Hasil Uji Pemetaan Fungsi Kontrol

Pengujian pemetaan fungsi kontrol dilakukan untuk memastikan bahwa setiap input karakter yang dikirim dari aplikasi Bluetooth Controller sesuai dengan *joint* dan arah gerakan yang dihasilkan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh perintah berhasil dipetakan dengan baik ke masing-masing aktuator.

Tabel 1. Hasil Uji Pemetaan Fungsi Kontrol

Input	Joint	Perubahan Sudut	Hasil
F	Shoulder	+2°	Sesuai
B	Shoulder	-2°	Sesuai
L	Base	+2°	Sesuai
R	Base	-2°	Sesuai
T	Elbow	+2°	Sesuai
X	Elbow	-2°	Sesuai

C	<i>Gripper</i>	+2°	Sesuai
S	<i>Gripper</i>	-2°	Sesuai
0	-	0° (Hold)	Sesuai

Hasil ini menunjukkan bahwa sistem mampu merepresentasikan hubungan antara input dan output secara jelas, sehingga sesuai digunakan sebagai media pembelajaran kendali robot berbasis karakter perintah.

C. Hasil Uji Respons Kendali (*Degree of Freedom*)

Pengujian ini menunjukkan bahwa sistem mampu merespons input secara kontinu selama tombol ditekan dan berhenti saat tombol dilepas. Perubahan sudut terjadi secara bertahap sesuai dengan nilai *step angle* yang ditentukan pada program.

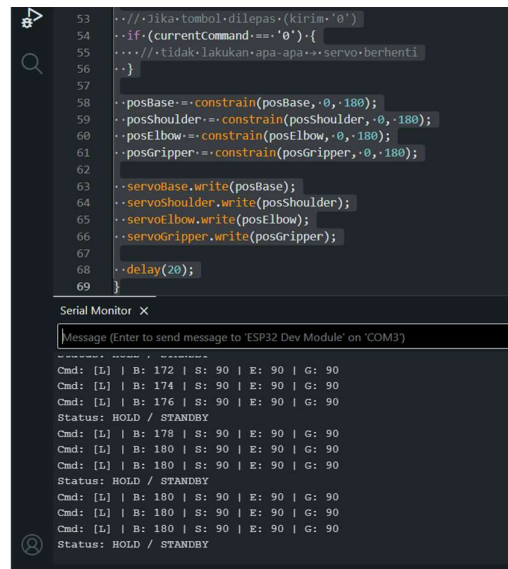
Tabel 2. Hasil Uji *Degree of Freedom*

No	Skenario	Hasil
1	Tekan F	Shoulder bergerak bertahap
2	Tekan B	Shoulder bergerak turun
3	Tekan L	<i>Base</i> bergerak
4	Tekan C	<i>Gripper</i> menutup
5	Lepas tombol	Gerakan berhenti

Berdasarkan hasil tersebut, metode kontrol *incremental* dan *Degree of Freedom* terbukti mampu memberikan kontrol yang intuitif, sehingga memudahkan pengguna dalam memahami hubungan antara input dan perubahan posisi aktuator.

D. Hasil Uji Batas Sudut (*Constraint*)

Pengujian batas sudut dilakukan untuk memastikan bahwa nilai sudut servo tidak melebihi rentang yang ditentukan. Hasil menunjukkan bahwa seluruh *joint* tetap berada dalam batas 0°–180° meskipun diberikan perintah secara terus-menerus.



Gambar 11. Tampilan serial monitor uji batas sudut

PERANCANGAN DAN EVALUASI LENGAN ROBOT 4-DOF BERBASIS ESP32 DENGAN KENDALI MANUAL MENGGUNAKAN APLIKASI BLUETOOTH ANDROID

Tabel 3. Hasil Uji Constraint

Joint	Kondisi	Hasil
Base	Tekan terus	Tidak melebihi batas
Shoulder	Tekan terus	Tidak melebihi batas
Elbow	Tekan terus	Tidak melebihi batas
Gripper	Tekan terus	Tidak melebihi batas

Hal ini menunjukkan bahwa fungsi pembatas sudut pada program berjalan dengan baik dan mampu menjaga keamanan sistem dari gerakan berlebih.

E. Hasil Uji Startup sequence

Pengujian *startup sequence* dilakukan untuk mengevaluasi kestabilan sistem saat dinyalakan. Pengujian dilakukan pada dua kondisi, yaitu tanpa perubahan posisi sebelumnya dan setelah posisi servo diubah.

Tabel 4. Hasil Uji Startup

Percobaan	Kondisi sebelum dimatikan	Saat dinyalakan kembali	ESP32 reset	Sistem siap
1	Servo tidak digerakkan	Servo tetap diam	Tidak	Ya
2	Servo tidak digerakkan	Servo tetap diam	Tidak	Ya
3	Base digerakkan ke posisi lain	Base kembali ke posisi awal	Tidak	Ya
4	Shoulder dan elbow digerakkan	Shoulder dan elbow kembali bertahap	Tidak	Ya
5	Semua joint digerakkan	Semua joint kembali bertahap	Tidak	Ya



Gambar 12. Tampilan serial monitor saat reset

Pengujian startup dilakukan pada dua kondisi, yaitu tanpa perubahan posisi aktuator sebelum sistem dimatikan dan setelah aktuator digerakkan dari posisi awalnya. Pada kondisi pertama, servo cenderung tidak menunjukkan gerakan saat sistem dinyalakan

kembali karena posisi fisik aktuator masih sesuai dengan sudut inialisasi program. Pada kondisi kedua, servo kembali menuju posisi awal 90° secara bertahap sesuai urutan inialisasi. Dengan demikian, *startup sequence* tetap berjalan pada setiap proses penyalaan, namun gerakan fisik servo bergantung pada kesesuaian antara posisi awal aktuator dan sudut target inialisasi.

F. Hasil Uji Monitoring Serial

Pengujian ini menunjukkan bahwa sistem mampu menampilkan informasi perintah dan nilai sudut secara *real-time* melalui Serial Monitor.

Tabel 5. Hasil Monitoring Serial

Skenario	Output Serial	Hasil
Tekan F	Cmd:[F]	Sesuai
Tekan L	Cmd:[L]	Sesuai
Tekan C	Cmd:[C]	Sesuai
Lepas	HOLD	Sesuai

Fitur ini memberikan nilai tambahan sebagai media pembelajaran karena memungkinkan pengguna memahami proses internal sistem secara langsung.

G. Hasil Uji Konsistensi Respons

Pengujian dilakukan dengan memberikan input yang sama secara berulang. Hasil menunjukkan bahwa sistem memberikan respons yang konsisten pada setiap percobaan.

Tabel 6. Hasil Uji Konsistensi

Joint	Percobaan	Konsistensi
Base	10 kali	Konsisten
Shoulder	10 kali	Konsisten
Elbow	10 kali	Cukup konsisten
Gripper	10 kali	Konsisten

Hal ini menunjukkan bahwa sistem memiliki kestabilan yang cukup baik untuk digunakan sebagai media pembelajaran.

H. Pembahasan

Berdasarkan seluruh hasil pengujian, sistem lengan robot 4-DOF berbasis ESP32 berhasil menjalankan fungsi kendali sesuai dengan yang dirancang. Sistem menunjukkan performa yang stabil, responsif, serta mampu merepresentasikan konsep dasar kontrol seperti pemetaan input-output, pembatasan sudut, dan kontrol *incremental*.

Selain itu, fitur monitoring serial memberikan nilai tambah dalam proses pembelajaran karena memungkinkan pengguna memahami hubungan antara perintah, pemrosesan data, dan respons sistem secara *real-time*. Hal ini menjadikan sistem tidak hanya sebagai alat manipulasi, tetapi juga sebagai media edukasi yang efektif. Meskipun demikian, sistem masih memiliki keterbatasan, terutama pada penggunaan kontrol *open-loop* tanpa umpan balik posisi yang dapat mempengaruhi tingkat akurasi gerakan. Selain itu, performa mekanik juga dipengaruhi oleh keterbatasan torsi servomotor dan desain struktur.

Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan telah memenuhi tujuan penelitian sebagai media pembelajaran kontrol dasar yang sederhana, intuitif, dan mudah diimplementasikan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian sistem, dapat disimpulkan bahwa:

1. Sistem lengan robot 4-DOF berbasis ESP32 dengan kendali Bluetooth berhasil diimplementasikan dan mampu menjalankan seluruh fungsi kendali sesuai perintah dari aplikasi Android.
2. Pemetaan input karakter terhadap pergerakan *joint* robot berjalan dengan baik, sehingga sistem mampu merepresentasikan hubungan input-output secara jelas.
3. Metode kontrol *incremental* dengan mekanisme *Degree of Freedom* mampu menghasilkan pergerakan aktuator yang bertahap, stabil, dan mudah dikendalikan oleh pengguna.
4. Fungsi pembatas sudut (*constraint*) berhasil menjaga pergerakan servo dalam rentang aman (0° – 180°), sehingga meningkatkan keamanan sistem.
5. Sistem menunjukkan kestabilan yang baik saat startup melalui inisialisasi servo secara bertahap, serta tidak mengalami gangguan seperti reset selama pengujian.
6. Fitur monitoring serial mampu menampilkan informasi perintah dan posisi aktuator secara *real-time*, sehingga membantu pengguna dalam memahami proses kendali sistem.
7. Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan layak digunakan sebagai media pembelajaran kontrol dasar robotika karena bersifat sederhana, intuitif, dan mampu memberikan visualisasi hubungan antara input, proses, dan output sistem.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran untuk pengembangan selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Penambahan sensor umpan balik posisi (*feedback*) untuk meningkatkan akurasi gerakan dan memungkinkan implementasi sistem kontrol tertutup (*closed-loop control*).
2. Pengembangan antarmuka pengguna yang lebih interaktif, seperti integrasi dengan visualisasi grafis atau sistem pengenalan gestur, untuk meningkatkan pengalaman pengguna.
3. Peningkatan desain mekanik dan pemilihan aktuator dengan torsi yang lebih besar agar sistem mampu menangani beban yang lebih berat.
4. Pengembangan sistem berbasis Internet of Things (IoT) untuk memungkinkan kontrol jarak jauh dan monitoring secara online.
5. Penambahan modul pembelajaran tambahan, seperti visualisasi data atau logging sistem, untuk meningkatkan nilai edukatif sebagai media pembelajaran.

DAFTAR REFERENSI

- Ali, M., Khan, S., & Ahmad, R. (2023). Design and development of a low-cost 5-DOF robotic arm for lightweight material handling and sorting applications. *Journal of Robotics and Automation*, 12(3), 145–156.
- Autsou, K., Mensah, P., & Boateng, E. (2024). Principles and methods of servomotor control: Comparative analysis and applications. *International Journal of Engineering Research*, 15(2), 88–97.
- Benitez, V. H., Symonds, R., & Elguezabal, D. E. (2020). Design of an affordable IoT open-source robot arm for online teaching of robotics courses during the pandemic contingency. *HardwareX*, 8, e00160. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2020.e00160>

- Carlos-Mancilla, M., López-Mellado, E., & Siller, H. R. (2020). An affordable IoT open-source robot arm for online teaching of robotics. *HardwareX*, 8, e00160.
- Fauzan, M., & Pramudita, R. (2024). Controlling a 4 *Degree of Freedom* (4-DOF) robot arm with hand gestures using computer vision technology for manufacturing processes. *Journal of Intelligent Systems*, 9(1), 34–42.
- Gupta, A., Mamodiya, M., & Al-Gburi, A. J. (2025). Speech recognition-based wireless control system for mobile robotics: Design, implementation, and analysis. *International Journal of Robotics Research*, 18(1), 22–35.
- Hercog, D., Lerher, T., Truntič, M., & Težak, O. (2023). Design and implementation of ESP32-based IoT devices. *Sensors*, 23(15), 6738. <https://doi.org/10.3390/s23156738>
- Yilmaz, O., Akay, M., & Kaysi, A. (2025). Design and implementation of a low-cost IoT-based robotic arm for product feeding and sorting in manufacturing lines. *Journal of Manufacturing Systems*, 17(2), 101–110.
- PlatROB. (2026). An open-source, modular, and low-cost hardware platform for educational robotics and AI. *HardwareX*, 10, e00234.
- Lee, J., Kim, S., & Park, H. (2022). Development of educational robotic arm kit for engineering learning. *IEEE Access*, 10, 12345–12355.
- Zhang, Y., Liu, X., & Chen, H. (2023). Bluetooth-based control system for robotic applications using microcontrollers. *International Journal of Embedded Systems*, 14(2), 67–75.
- Rahman, M., Hossain, M., & Islam, S. (2021). Low-cost robotic arm design and control for educational purposes. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 18(4), 1–10.