

**IMPLEMENTASI FITUR *TEACH AND PLAYBACK* PADA  
MANIPULATOR *ARM* BERBASIS MIKROKONTROLER  
STM32**

**Tugas Akhir**

Disusun sebagai salah satu syarat untuk  
menyelesaikan pendidikan Sarjana Terapan

Oleh

Ali Barqi Fairuz Rachmat

221341023



**PROGRAM STUDI TEKNOLOGI REKAYASA MEKATRONIKA  
JURUSAN TEKNIK OTOMASI MANUFAKTUR DAN MEKATRONIKA  
POLITEKNIK MANUFAKTUR BANDUNG**

**2025**

**LEMBAR PENGESAHAN**

Tugas Akhir yang berjudul:

**IMPLEMENTASI FITUR *TEACH AND PLAYBACK* PADA  
MANIPULATOR *ARM* BERBASIS MIKROKONTROLER  
STM32**

Oleh:

Ali Barqi Fairuz Rachmat

221341023

Telah direvisi, disetujui, dan disahkan sebagai Tugas Akhir penutup program  
pendidikan Sarjana Terapan  
Politeknik Manufaktur Bandung

Bandung, 01 Agustus 2025


Disetujui,

Pembimbing I,



**Sarosa Castrena A, S.Pd., M.T.**  
NIP. 198702252020121001

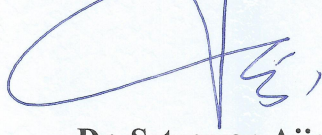
Pembimbing II,



**Nur Jamiludin Ramadhan, S.Tr., M.T.**  
NIP. 199402272020121005

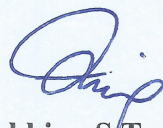
Disahkan,

Penguji I,



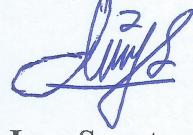
**Dr. Setyawan Aje  
Sukarno, S.ST., M.T.**  
NIP. 198004282008102001

Penguji II,



**Ismail Rokhim, S.T., M.T.**  
NIP. 197002161993031001

Penguji III,



**Danu Jaya Saputro, S.T.,  
M.Sc.**  
NIP. 199204092025061005

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Sebagai Civitas Akademika Politeknik Manufaktur Bandung, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Ali Barqi Fairuz Rachmat  
NIM : 221341023  
Jurusan : Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika  
Program Studi : Teknologi Rekayasa Mekatronika  
Jenjang Studi : Diploma 4  
Jenis Karya : Tugas Akhir  
Judul Karya : Implementasi Fitur *Teach and Playback* pada *Manipulator Arm* Berbasis Mikrokontroler STM32

Menyatakan bahwa:

1. Tugas akhir ini adalah hasil karya saya sendiri (orisinal) atas bimbingan para Pembimbing.
2. Dalam tugas akhir ini tidak terdapat keseluruhan atau sebagian tulisan orang lain yang saya ambil dengan cara menyalin atau meniru dalam bentuk rangkaian kalimat atau simbol yang menunjukkan gagasan atau pendapat atau pemikiran dari penulis lain, yang saya akui seolah-olah sebagai tulisan saya sendiri, dan/atau tidak terdapat bagian atau keseluruhan tulisan yang saya salin, tiru, atau yang saya ambil dari tulisan orang lain tanpa memberikan pengakuan penulis aslinya (referensi).
3. Bila kemudian terbukti bahwa saya melakukan tindakan yang bertentangan dengan hal tersebut di atas, baik disengaja atau tidak, saya bersedia menerima akibatnya sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Bandung  
Pada tanggal : 16-07-2025  
Yang Menyatakan,

(Ali Barqi Fairuz Rachmat)  
NIM 221341023

## PERNYATAAN HAK KEKAYAAN INTELEKTUAL (HKI)

Sebagai Civitas Akademika Politeknik Manufaktur Bandung, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ali Barqi Fairuz Rachmat  
NIM : 221340123  
Jurusan : Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika  
Program Studi : Teknologi Rekayasa Mekatronika  
Jenjang Studi : Diploma 4  
Jenis Karya : Tugas Akhir  
Judul Karya : Implementasi Fitur *Teach and Playback* pada *Manipulator Arm* Berbasis Mikrokontroler STM32

Menyatakan/menyetujui bahwa:

1. Segala bentuk Hak Kekayaan Intelektual terkait dengan tugas akhir tersebut menjadi milik Institusi Politeknik Manufaktur Bandung, yang selanjutnya pengelolaannya berada dibawah Jurusan dan Program Studi, dan diatur sesuai dengan ketentuan yang berlaku.
2. Memberikan kepada Politeknik Manufaktur Bandung Hak Bebas Royalti Noneklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right) atas hasil tugas akhir saya tersebut. beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini, maka Politeknik Manufaktur Bandung berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama-nama Dosen Pembimbing dan nama saya sebagai anggota penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Bandung  
Pada tanggal : 16-07-2025  
Yang Menyatakan,

(Ali Barqi Fairuz Rachmat)  
NIM 221341023

## MOTO PRIBADI

مَنْ أَزْدَادَ عِلْمًا وَلَمْ يَزِدْهُ هُدًى، لَمْ يَزِدْهُ مِنَ اللَّهِ إِلَّا بُعْدًا

"Barangsiapa bertambah ilmunya namun tidak bertambah hidayah (petunjuk) pada dirinya, maka ia tidak bertambah apapun dari Allah kecuali semakin jauh dari-Nya." – Imam Ghazali

Nasihat ini mengingatkan kita bahwa ilmu harus berjalan beriringan dengan adab dan kerendahan hati. Tujuan akhir dari belajar bukanlah sekadar menjadi pintar, tetapi menjadi manusia yang lebih baik dan lebih bijaksana.

## KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah yang hanya kepada-Nya kami memuji, memohon pertolongan, dan mohon keampunan. Kami berlindung kepadaNya dari kekejian diri dan kejahatan amalan kami. Barang siapa yang diberi petunjuk oleh Allah maka tidak ada yang dapat menyesatkan, dan barang siapa yang tersesat dari jalanNya maka tidak ada yang dapat memberinya petunjuk. Dan aku bersaksi bahwa tiada sembahyan yang berhak disembah melainkan Allah saja, yang tiada sekutu bagiNya. Dan aku bersaksi bahwa Muhammad adalah hambaNya dan RasulNya.

Atas petunjuk dan pertolongan-Nya, Alhamdulillah penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul: “Implementasi Fitur *Teach and Playback* pada *Manipulator Arm* Berbasis Mikrokontroler STM32”.

Tugas akhir dibuat dalam rangka memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan Sarjana Terapan pada Program Studi Teknologi Rekayasa Mekatronika di Politeknik Manufaktur Bandung.

Terselesaikannya tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan banyak pihak, sehingga pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati dan penuh rasa hormat penulis menghaturkan terima kasih yang sebesar-besarnya bagi semua pihak yang telah memberikan bantuan moril maupun materil baik langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan skripsi ini hingga selesai, terutama kepada yang saya hormati:

1. Teristimewa kepada Orang Tua penulis Ibu Purwanti dan Bapak Basuki Rachmat yang selalu mendoakan, memberikan motivasi dan pengorbanannya baik dari segi moril, materi kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Untuk adik saya Hassan dan Putri yang telah selalu mendukung saya dalam keadaan apapun, khususnya dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.
3. Direktur Politeknik Manufaktur Bandung, Bapak Darma Firmansyah U., S.ST., M.T.
4. Ketua Jurusan Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika, Bapak Ridwan, S.ST., M.Eng.
5. Ketua Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Mekatronika Bapak Adhitya Sumardi Sunarya, S.Si., M.Si.

6. Para Pembimbing tugas akhir Bapak Sarosa Castrena Abadi, S.Pd., M.T., dan Bapak Nur Jamiludin Ramadhan, S.Tr., M.T.
7. Para Penguji sidang tugas akhir Bapak Dr. Setyawan Ajie Sukarno, S.ST., M.T, Bapak Ismail Rokhim, S.T., M.T., dan Bapak Danu Jaya Saputro, S.T., M.Sc.
8. Panitia tugas akhir Ibu Fitria Suryatini, S.Pd., M.T., Ibu Hilda Khoirunnisa S.Tr.T., M.Sc.Eng., Bapak Muhammad Nursyam Rizal, S.Tr.T., M.Sc., dan Bapak Rizqi Aji Pratama, S.Pd., M.Pd.
9. Buat sahabat – sahabat saya kelas 4AEA-2 dan AE21 yang tanpa henti memberikan dukungan dan solusi dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Akhir kata penulis menyadari bahwa dalam penulisan tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Karena itu, penulis memohon saran dan kritik yang sifatnya membangun demi kesempurnaannya dan semoga bermanfaat bagi kita semua. Aamiiin Ya Robbal Alamin.

Bandung, 16 Juli 2025

Penulis

## ABSTRAK

Kebutuhan akan otomasi robotik yang intuitif dan terjangkau menjadi tantangan utama, terutama bagi pengguna non-ahli. Penelitian ini menjawab permasalahan tersebut dengan mengembangkan sebuah sistem manipulator *arm* 5-DOF yang dilengkapi fitur *teach-and-playback* yang fleksibel. Metode yang digunakan meliputi perancangan dan implementasi sistem terintegrasi yang terdiri dari prototipe mekanik berbasis cetak 3D, kontroler OpenCM 9.04, dan motor servo Dynamixel. Metode pengajaran ganda diimplementasikan, memungkinkan pengguna merekam gerakan baik secara fisik (*direct teaching*) maupun melalui Antarmuka Pengguna Grafis (GUI) yang dikembangkan dengan Python. Kinerja sistem kemudian dievaluasi secara kuantitatif melalui pengujian akurasi posisi dan konsistensi gerak (*repeatability*). Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh fitur fungsional berhasil diimplementasikan. Pengujian akurasi menghasilkan rata-rata *Euclidean Error* sebesar 30,86 mm, dengan deviasi terbesar konsisten terjadi pada sumbu Z akibat pengaruh gravitasi. Pengujian *repeatability* menunjukkan konsistensi yang sangat tinggi pada sumbu X dan Yaw, namun variabilitas yang lebih besar pada sumbu Y dan Z, yang menunjukkan bahwa performa sistem sangat bergantung pada pose lengan karena pengaruh gravitasi.

**Kata kunci:** manipulator *arm*, *teach-and-playback*, OpenCM 9.04, akurasi, *repeatability*.

## **ABSTRACT**

*The need for intuitive and affordable robotic automation presents a major challenge, especially for non-expert users. This research addresses this issue by developing a 5-DOF manipulator arm system equipped with a flexible teach-and-playback feature. The method includes the design and implementation of an integrated system comprising a 3D-printed mechanical prototype, an OpenCM 9.04 controller, and Dynamixel servo motors. A dual teaching method was implemented, allowing users to record movements either physically (direct teaching) or through a Python-based Graphical User Interface (GUI). The system's performance was then quantitatively evaluated through position accuracy and motion consistency (repeatability) tests. The results show that all functional features were successfully implemented. The accuracy test yielded an average Euclidean Error of 30.86 mm, with the largest deviation consistently occurring on the Z-axis due to gravitational effects. The repeatability test demonstrated very high consistency on the X and Yaw axes but greater variability on the Y and Z axes, indicating that the system's performance is highly dependent on the arm's pose due to gravitational effects.*

*Keywords: manipulator arm, teach-and-playback, OpenCM 9.04, accuracy, repeatability.*

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	i
PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
PERNYATAAN HAK KEKAYAAN INTELEKTUAL (HKI) .....	iii
MOTO PRIBADI .....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
ABSTRAK .....	vii
<i>ABSTRACT</i> .....	viii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR TABEL .....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xiv
DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN .....	xv
BAB I PENDAHULUAN .....	I-1
I.1    Latar Belakang .....	I-1
I.2    Rumusan Masalah .....	I-3
I.3    Batasan Masalah .....	I-3
I.4    Tujuan dan Manfaat .....	I-4
I.5    Sistematika Penulisan .....	I-5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	II-1
II.1    Tinjauan Teori .....	II-1
II.1.1    Manipulator <i>Arm</i> .....	II-1
II.1.2    Kinematika Robot .....	II-1
II.1.3    Sistem Teach and Playback .....	II-9
II.2    Tinjauan Alat .....	II-10
II.2.1    OpenCM 9.04 .....	II-10
II.2.2    Motor Servo DYNAMIXEL Seri AX .....	II-12
II.2.3    Visual Studio Code .....	II-15
II.2.4    PyQt6 .....	II-16
II.2.5    Arduino IDE .....	II-17
II.3    Studi Penelitian Terdahulu .....	II-18

BAB III METODOLOGI PENYELESAIAN MASALAH.....	III-1
III.1 Metodologi Penelitian .....	III-1
III.2 <i>Requirement List</i> .....	III-3
III.3 <i>System Design</i> .....	III-4
III.3.1 Overall Function.....	III-4
III.3.2 Gambaran Umum Sistem .....	III-5
III.4 <i>Domain Specific Design</i> .....	III-6
III.4.1 Perancangan Subsistem Mekanik.....	III-7
III.4.2 Perancangan Subsistem Elektrik .....	III-9
III.4.3 Perancangan Subsistem Informatik.....	III-12
III.4.4 Perancangan Antarmuka .....	III-17
III.5 <i>System Integration</i> .....	III-20
III.6 <i>Lab-Scale Prototype</i> .....	III-21
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	IV-1
IV.1 Implementasi Prototype Sistem.....	IV-1
IV.1.1 Implementasi <i>Hardware</i> .....	IV-1
IV.1.2 Implementasi <i>Software</i> .....	IV-2
IV.1.3 Proses Implementasi dan Integrasi Sistem.....	IV-2
IV.2 Pengujian Fungsi Sistem .....	IV-9
IV.2.1 Uji Fitur <i>Teach</i> Melalui Antarmuka (GUI).....	IV-9
IV.2.2 Uji Fitur <i>Teach</i> Secara Langsung ( <i>Direct Teaching</i> ).....	IV-12
IV.2.3 Uji Fungsi <i>Playback</i> .....	IV-15
IV.2.4 Uji Visualisasi Robot pada GUI (2D, 3D, Grafik).....	IV-17
IV.3 Pengujian Akurasi dan Kinerja .....	IV-19
IV.3.1 Uji Akurasi Posisi .....	IV-19
IV.3.2 Uji Konsistensi Playback ( <i>Repeatability</i> ) .....	IV-24
BAB V PENUTUPAN .....	V-1
V.1 Kesimpulan .....	V-1
V.2 Saran.....	V-2
DAFTAR PUSTAKA .....	xviii
LAMPIRAN.....	xxii

## DAFTAR TABEL

Tabel II. 1 Fungsi pin OpenCM 9.04 [26] .....	II-11
Tabel II. 2 Spesifikasi Open CM 9.04 [26].....	II-12
Tabel II. 3 Spesifikasi motor servo DYNAMIXEL AX-12A [27] .....	II-13
Tabel II. 4 Spesifikasi Motor Servo DYNAMIXEL AX-18A [28] .....	II-14
Tabel II. 5 Penelitian terdahulu .....	II-18
Tabel IV. 1 Hasil Pengujian <i>Teaching</i> GUI.....	IV-9
Tabel IV. 2 Hasil Pengujian <i>Direct Teaching</i> .....	IV-12
Tabel IV. 3 Data Hasil Pengujian Proses <i>Playback</i> .....	IV-16
Tabel IV. 4 Hasil pengujian visualisasi robot pada GUI .....	IV-17
Tabel IV. 5 Tabel hasil pengujian akurasi posisi target <i>end-effector</i> dengan posisi aktual fisik.....	IV-21
Tabel IV. 6 Tabel hasil pengujian akurasi posisi aktual dari encoder dengan posisi aktual fisik.....	IV-23
Tabel IV. 7 Hasil pengujian <i>repeatability</i> di titik A .....	IV-25
Tabel IV. 8 Hasil analisis pengujian <i>repeatability</i> di titik A .....	IV-25
Tabel IV. 9 Pengujian <i>repeatability</i> di titik B.....	IV-27
Tabel IV. 10 Hasil analisis pengujian <i>repeatability</i> di titik B .....	IV-28

## DAFTAR GAMBAR

Gambar II. 1 Manipulator <i>arm</i> 3 dof [24].....	II-1
Gambar II. 2 Representasi FK dan IK [25].....	II-2
Gambar II. 3 Analisis <i>forward kinematics</i> .....	II-2
Gambar II. 4 Visualisasi representasi orientasi target <i>end-effector</i> .....	II-8
Gambar II. 5 OpenCM 9.04 [26].....	II-11
Gambar II. 6 Motor Servo DYNAMIXEL AX-12A [27].....	II-13
Gambar II. 7 Motor servo DYNAMIXEL AX-18A [28].....	II-14
Gambar II. 8 Visual Studio Code [30] .....	II-16
Gambar II. 9 Qt Designer [28] .....	II-16
Gambar II. 10 Arduino IDE [31].....	II-17
Gambar III. 1 V-Model VDI 2206 [33] .....	III-1
Gambar III. 2 Alur pengerjaan tugas akhir .....	III-2
Gambar III. 3 <i>Overall function</i> berdasarkan model V .....	III-4
Gambar III. 4 Gambaran umum sistem secara garis besar.....	III-5
Gambar III. 5 Gambaran umum sistem secara detail.....	III-5
Gambar III. 6 Perencanaan desain sistem .....	III-7
Gambar III. 7 Visualisasi hasil pemetaan ruang kerja .....	III-8
Gambar III. 8 Skema <i>wiring</i> komunikasi sistem.....	III-9
Gambar III. 9 Diagram elektrik.....	III-11
Gambar III. 10 Diagram alir proses <i>teaching</i> .....	III-14
Gambar III. 11 Diagram alir proses <i>playback</i> .....	III-16
Gambar III. 12 Rancangan tampilan GUI.....	III-17
Gambar IV. 1 Implementasi <i>hardware</i> .....	IV-1
Gambar IV. 2 Implementasi GUI.....	IV-2
Gambar IV. 3 Proses <i>Teaching</i> GUI Aksi ke-1 .....	IV-10
Gambar IV. 4 Proses <i>Teaching</i> GUI Aksi ke-2 .....	IV-10
Gambar IV. 5 Proses <i>Teaching</i> GUI Aksi ke-3 .....	IV-11
Gambar IV. 6 Proses <i>Teaching</i> GUI Aksi ke-4 .....	IV-11
Gambar IV. 7 Proses <i>Teaching</i> GUI Aksi ke-5 .....	IV-12
Gambar IV. 8 Proses <i>Direct Teaching</i> Aksi ke-1 .....	IV-13
Gambar IV. 9 Proses <i>Direct Teaching</i> Aksi ke-2 .....	IV-13

Gambar IV. 10 Proses <i>Direct Teaching</i> Aksi ke-3 .....	IV-14
Gambar IV. 11 Proses <i>Direct Teaching</i> Aksi ke-4 .....	IV-14
Gambar IV. 12 Proses <i>Direct Teaching</i> Aksi ke-5 .....	IV-15
Gambar IV. 13 Proses Pengujian <i>Playback</i> .....	IV-16
Gambar IV. 14 Proses pengukuran secara langsung.....	IV-20
Gambar IV. 15 Grafik nilai error di setiap sumbu untuk seluruh percobaan...	IV-22
Gambar IV. 16 Grafik nilai <i>Euclidian Error</i> di setiap percobaan.....	IV-22
Gambar IV. 17 Grafik nilai error di setiap sumbu untuk seluruh percobaan...	IV-23
Gambar IV. 18 Grafik nilai <i>Euclidian Error</i> di setiap percobaan.....	IV-24
Gambar IV. 19 Histogram distribusi posisi sumbu X .....	IV-26
Gambar IV. 20 Histogram distribusi posisi sumbu Y .....	IV-26
Gambar IV. 21 Histogram distribusi posisi sumbu Z .....	IV-26
Gambar IV. 22 Histogram distribusi orientasi <i>roll</i> .....	IV-26
Gambar IV. 23 Grafik distribusi orientasi <i>yaw</i> .....	IV-26
Gambar IV. 24 Histogram distribusi posisi sumbu X.....	IV-28
Gambar IV. 25 Histogram distribusi posisi sumbu Y .....	IV-28
Gambar IV. 26 Histogram distribusi posisi sumbu Z .....	IV-28
Gambar IV. 27 Histogram distribusi orientasi <i>roll</i> .....	IV-28
Gambar IV. 28 Histogram distribusi orientasi <i>yaw</i> .....	IV-29

## DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1**    *Requirement List*
- Lampiran 2**    Desain Mekanik Robot

## DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

- STM32 : Keluarga mikrokontroler 32-bit yang dikembangkan oleh STMicroelectronics, digunakan sebagai kontroler utama dalam penelitian ini.
- DOF : *Degree of Freedom* atau Derajat Kebebasan, menunjukkan jumlah sumbu gerakan independen yang dimiliki oleh manipulator.
- GUI : *Graphical User Interface* atau Antarmuka Pengguna Grafis, merupakan antarmuka visual yang memungkinkan interaksi antara pengguna dan sistem.
- IK : *Inverse Kinematics*, proses menghitung sudut sendi yang diperlukan untuk mencapai posisi dan orientasi *end-effector* yang diinginkan.
- FK : *Forward Kinematics*, proses menghitung posisi dan orientasi *end-effector* berdasarkan sudut sendi yang diketahui.
- USB : *Universal Serial Bus*, protokol komunikasi serial yang digunakan untuk menghubungkan GUI di komputer dengan kontroler OpenCM 9.04.
- TTL : *Transistor-Transistor Logic*, jenis protokol komunikasi serial yang digunakan antara kontroler OpenCM 9.04 dan motor servo Dynamixel.
- PLA+ : *Polylactic Acid+*, jenis material filamen yang digunakan untuk fabrikasi mekanik manipulator melalui teknologi pencetakan 3D.
- CAD : *Computer-Aided Design*, perangkat lunak yang digunakan untuk merancang model 3D dari komponen mekanik manipulator.
- IDE : *Integrated Development Environment* atau Lingkungan Pengembangan Terpadu, platform perangkat lunak untuk memprogram mikrokontroler, seperti Arduino IDE.
- RMSE : *Root Mean Square Error*, metrik statistik yang digunakan untuk mengukur rata-rata besarnya kesalahan antara nilai target dan nilai aktual.

- VDI : *Verein Deutscher Ingenieure*, Asosiasi Insinyur Jerman yang panduannya (VDI 2206) digunakan sebagai kerangka kerja metodologi penelitian.
- PSU : *Power Supply Unit* atau Unit Catu Daya, perangkat yang menyuplai daya listrik ke seluruh sistem robot.
- JSON : *JavaScript Object Notation*, format file yang digunakan untuk menyimpan dan memuat data aksi (gerakan) yang telah direkam.
- TP : *Teach Pendant*, Perangkat genggam untuk mengontrol dan memprogram robot secara manual, merekam titik, dan membuat program gerakan.
- TCP : *Tool Center Point*, Titik referensi pada alat (*tool*) yang terpasang di ujung robot.
- ° : Simbol yang merepresentasikan satuan derajat, digunakan untuk mengukur sudut rotasi pada setiap sendi (*joint*).
- $\theta$  (theta) : Simbol Yunani yang digunakan untuk merepresentasikan sudut sendi (misalnya  $\theta_1, \theta_2$ ) dan sudut Euler Pitch (rotasi pada sumbu Y).
- $\psi$  (psi) : Simbol Yunani yang digunakan untuk merepresentasikan sudut Euler Yaw (rotasi pada sumbu Z).
- $\varphi$  (phi) : Simbol Yunani yang digunakan untuk merepresentasikan sudut Euler Roll (rotasi pada sumbu X).
- $\sigma$  (sigma) : Simbol Yunani yang digunakan untuk merepresentasikan standar deviasi, sebuah ukuran statistik untuk sebaran data dalam pengujian *repeatability*.
- $\Theta$  (theta) : Sudut *joint* (sendi) robot, menyatakan posisi rotasi masing-masing sendi.
- ${}^nH_m$  : Notasi untuk Matriks Transformasi Homogen yang mendeskripsikan posisi dan orientasi dari kerangka koordinat  $m$  relatif terhadap kerangka koordinat  $n$  (contoh:  ${}^0H_6$ ).
- R : Simbol yang digunakan untuk merepresentasikan matriks rotasi (contoh:  $R_x(\theta_2)$ ).

- T : Simbol yang digunakan untuk merepresentasikan matriks translasi atau pergeseran posisi (contoh:  $T_z(97,4)$ ).
- MCU : Microcontroller Unit, chip kecil yang berfungsi sebagai komputer mini dalam satu paket

# BAB I

## PENDAHULUAN

### I.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi robotika yang pesat telah mendorong pemanfaatan lengan manipulator secara luas untuk berbagai jenis pekerjaan seperti pengelasan (*welding*), penanganan material (*material handling*), dan perakitan (*assembly*) [1]. Pemanfaatannya juga telah meluas di berbagai sektor industri, seperti manufaktur, otomotif, logistik perakitan [2], dirgantara, perkapalan [3], pertanian [4], hingga platform edukasi [5]. Fenomena ini menuntut adanya metode interaksi dan pemrograman yang lebih intuitif agar dapat diakses oleh kalangan pengguna yang lebih luas, tidak terbatas pada seorang ahli robotika [6], namun tantangan yang muncul adalah bagaimana mengimplementasikan sebuah sistem kontrol yang memungkinkan pengguna untuk "mengajarkan" gerakan secara langsung dan mudah pada sebuah prototipe lengan manipulator. Permasalahan ini menjadi signifikan karena realisasi fitur *teach-and-playback* yang mencakup metode perekaman gerak secara fisik (*direct teaching*) dan melalui antarmuka grafis (GUI), tidak hanya menuntut keberhasilan integrasi perangkat keras seperti lengan manipulator 5 DOF dengan kontroler OpenCM 9.04, tetapi juga memerlukan jaminan keandalan. Tanpa adanya evaluasi yang sistematis terhadap performa dan reliabilitas sistem, yang mencakup aspek akurasi posisi, konsistensi gerak (*repeatability*) [4], maka fitur kemudahan yang ditawarkan akan kehilangan nilai fungsionalnya. Oleh karena itu, penelitian untuk merealisasikan dan mengukur kinerja sistem *teach-and-playback* pada prototipe ini menjadi penting untuk menyediakan sebuah landasan pengembangan sistem robot yang tidak hanya mudah digunakan, tetapi juga terverifikasi keandalannya untuk aplikasi yang memerlukan kepresisian.

Kajian terhadap penelitian terdahulu menunjukkan bahwa metode interaksi konvensional menggunakan *teaching pendant* (TP) menjadi salah satu hambatan utama dalam operasional robot. Menurut [7], secara spesifik menyoroti bahwa antarmuka TP cenderung kompleks dan tidak intuitif bagi pengguna pemula. Sebagai respons, penelitian telah berfokus pada pengembangan sistem yang lebih

efektif, di mana dua pendekatan utama yang menonjol adalah kontrol berbasis Antarmuka Pengguna Grafis (GUI) dan pengajaran langsung (*direct teaching*). Metode *direct teaching*, atau *hand-guiding*, diakui sebagai solusi intuitif untuk memprogram robot tanpa TP [8], [9]. Di sisi lain, kelayakan platform perangkat keras, metode manufaktur, dan komputasi untuk sistem semacam ini juga telah terbukti. Penggunaan teknologi cetak 3D (*3D printing*) untuk fabrikasi struktur lengan robot telah menjadi pendekatan yang umum untuk menciptakan purwarupa berbiaya rendah yang dapat dikustomisasi. Hal ini telah dibuktikan dalam berbagai penelitian, yang berhasil mengimplementasikan dan memvalidasi desain lengan robot fungsional berbasis cetak 3D [10], [11], [12]. Selanjutnya, penelitian yang lain berhasil menggunakan mikrokontroler OpenCM 9.04 untuk mengendalikan servo Dynamixel [13], sementara riset lain menunjukkan tingkat *error* yang rendah pada lengan robot berbasis Dynamixel AX-12A [14], [15]. Untuk mencapai kontrol presisi, terutama pada mode kartesian, penyelesaian *inverse kinematics* menjadi krusial. Menurut [16], dalam penelitiannya untuk lengan 5-DOF, menyimpulkan bahwa penyelesaian analitik bisa menjadi sangat rumit, sehingga penggunaan metode numerik iteratif menjadi pendekatan yang lebih praktis. Pendekatan komputasi ini diperkuat oleh penelitian Stoeffler (2018) dan Torres & Farahikia (2024), yang secara spesifik menggunakan *solver* numerik seperti `scipy.optimize.fsolve` untuk menemukan solusi dari sistem persamaan secara iteratif [17], [18]. Sementara itu, dari sisi perangkat lunak, Tagai dkk. (2025) menyatakan bahwa *framework* PyQt merupakan pilihan efektif untuk membangun GUI yang andal [19]. Kombinasi dari metode interaksi yang telah terbukti, platform perangkat keras yang teruji, dan pendekatan komputasi yang valid inilah yang menjadi dasar bagi pengembangan sistem manipulator yang lebih kompleks dan intuitif.

Menanggapi celah integrasi yang telah diuraikan, penelitian ini mengajukan kebaruan (*novelty*) yang berpusat pada realisasi sistem yang terintegrasi secara utuh. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang cenderung berfokus pada salah satu metode, kebaruan utama terletak pada penyatuan fitur *direct teaching* dan kontrol berbasis Antarmuka Pengguna Grafis (GUI) dalam satu platform yang terpadu. Sistem ini diimplementasikan pada sebuah prototipe lengan robot 5-DOF

dengan desain mekanik orisinal yang difabrikasi secara mandiri, serta dikendalikan melalui GUI yang dikembangkan secara spesifik untuk menggabungkan kedua mode interaksi tersebut. Relevansi penelitian ini terhadap masalah yang diangkat diwujudkan melalui implementasi nyata dan pembuktian keandalan sistem secara kuantitatif. Dengan kata lain, kontribusi penelitian tidak hanya berhenti pada perancangan, tetapi juga pada validasi performa sistem dalam menjalankan tugas *teach-and-playback*. Dampak yang diharapkan adalah tersedianya sebuah model platform robotik yang utuh dan fleksibel, yang secara praktis dapat menurunkan hambatan adopsi teknologi robotika bagi pengguna non-ahli serta memberikan studi kasus implementasi yang komprehensif bagi pengembangan di masa depan.

## **I.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana implementasi fitur *teach-and-playback* yang mencakup metode perekaman gerak secara langsung (*direct teaching*) dan melalui antarmuka grafis (GUI) dapat direalisasikan pada prototipe manipulator *arm* 5 DOF yang dilengkapi *gripper*, berbasis kontroler OpenCM 9.04?
2. Bagaimana *performance* dan *reliability* prototipe manipulator *arm* yang dihasilkan, apabila ditinjau dari aspek akurasi posisi dan konsistensi gerak (*repeatability*)?

## **I.3 Batasan Masalah**

Untuk menjaga agar penelitian tetap fokus dan mendalam, maka ruang lingkup permasalahan dibatasi pada aspek-aspek berikut:

1. Struktur dan Material Mekanik: Perancangan dan fabrikasi mekanik manipulator *arm* menggunakan teknologi pencetakan 3D (*3D printing*) dengan material PLA+. Penelitian ini tidak melakukan analisis kekuatan material atau optimasi desain struktur secara mendalam.
2. Konfigurasi dan Aktuator: Penelitian berfokus pada manipulator *arm* dengan konfigurasi 5 Derajat Kebebasan (*Degree of Freedom/DOF*) yang dilengkapi dengan sebuah *gripper*. Aktuator yang digunakan adalah 7 buah motor servo

cerdas (*smart servo*) Dynamixel tipe AX, dengan batasan rentang gerak setiap *joint* adalah  $0^\circ$  hingga  $300^\circ$ .

3. Lingkup Analisis Gerak: Analisis gerak terbatas pada kinematika (posisi dan orientasi *end-effector*) dan tidak mencakup analisis dinamika (gaya, torsi, atau percepatan yang memengaruhi gerak).
4. Lingkup Pengujian Sistem: Pengujian sistem tidak mencakup pengujian kapasitas beban maksimum (*payload*) yang dapat diangkat oleh manipulator. Pengujian performa difokuskan pada akurasi posisi dan konsistensi gerak (*repeatability*).
5. Platform Perangkat Keras Kendali: Sistem kendali utama menggunakan papan kontroler OpenCM 9.04.
6. Protokol Komunikasi:
  - a. Komunikasi antara Antarmuka Pengguna Grafis (GUI) di komputer dengan kontroler OpenCM 9.04 menggunakan jalur USB Serial.
  - b. Komunikasi antara kontroler OpenCM 9.04 dengan seluruh motor servo Dynamixel Seri AX menggunakan protokol TTL *Half-Duplex* secara *daisy-chain*.
7. Platform Perangkat Lunak: Antarmuka Pengguna Grafis (GUI) untuk interaksi dan visualisasi dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman Python dengan *framework* PyQt6.
8. Lingkungan Pengujian: Seluruh proses pengujian dan pengambilan data dilakukan dalam lingkungan laboratorium yang terkontrol, bukan di lingkungan industri atau lapangan yang tidak terprediksi.

#### **I.4 Tujuan dan Manfaat**

Sejalan dengan rumusan masalah di atas, tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mewujudkan sebuah prototipe manipulator *arm* 5-DOF yang fungsional, dengan sistem yang terintegrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak untuk mendukung fitur *teach-and-playback*.
2. Mengembangkan dan mengimplementasikan sistem kontrol yang fleksibel, di mana pengguna dapat merekam gerakan menggunakan metode *direct teaching* maupun melalui GUI.

3. Mengevaluasi dan menganalisis *performace* prototipe secara kuantitatif untuk mendapatkan data empiris mengenai tingkat akurasi posisi dan konsistensi gerak (*repeatability*) sistem.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Menghasilkan sebuah platform pengembangan robotik yang bersifat sumber terbuka (*open-source*), berbiaya rendah, dan intuitif, yang dapat dimanfaatkan sebagai alat bantu pembelajaran dan eksperimen dalam lingkup pendidikan maupun riset.
2. Memberikan kontribusi akademis berupa studi kasus implementasi yang komprehensif serta data evaluasi kuantitatif mengenai performa sistem kontrol gabungan (*direct teaching* dan GUI) pada manipulator *arm* 5-DOF.
3. Menjadi referensi teknis yang terperinci bagi peneliti atau mahasiswa di masa depan yang hendak mengembangkan sistem robotik serupa, khususnya pada aspek perancangan mekanik, integrasi perangkat lunak, dan metodologi pengujian.

## **I.5 Sistematika Penulisan**

Sistematika proposal Tugas Akhir ini dibahas dengan penjabaran sebagai berikut.

BAB I PENDAHULUAN, berisi uraian mengenai latar belakang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA, berisi gambaran umum tentang landasan teori untuk menjelaskan beberapa istilah dan ilmu terkait serta melihat hasil pencapaian penelitian terdahulu dengan kajian yang sama.

BAB III METODOLOGI PENYELESAIAN MASALAH, berisi langkah-langkah penyelesaian tugas akhir berupa gambaran umum sistem serta perancangan sistem.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN, berisi pemaparan hasil pengujian yang dilakukan pada beberapa domain dan sistem, dengan memperhatikan tuntutan yang harus dicapai.

BAB V PENUTUP, berisi kesimpulan yang diperoleh dari pengerjaan tugas akhir yang telah dilakukan dan saran untuk penelitian lebih lanjut.