

LAPORAN TUGAS AKHIR

RANCANG BANGUN *ARM* ROBOT 5 DOF BERBASIS STM32F411CEU6
MENGUNAKAN METODE *INVERSE KINEMATICS* PADA ROBOT *ARM*
MOBILE CHILLI PICKER (CHIMI-BOT)

Diajukan oleh:
Pandu Kukuh Kurniawan
40040322650054

TELAH DISETUJUI DAN DITERIMA DENGAN BAIK OLEH

Dosen Pembimbing,



Megarini Hersaputri, S.T., M.T.

NIP. 198902142020122012

Tanggal, 28 September 2026

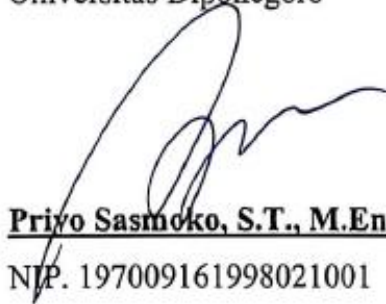
Mengetahui,

Ketua

Program Studi S.Tr. Teknologi Rekayasa Otomasi

Departemen Teknologi Industri Sekolah Vokasi

Universitas Diponegoro



Priyo Sasnoko, S.T., M.Eng.

NIP. 197009161998021001

Tanggal, 28 September 2026

HALAMAN PENGESAHAN

RANCANG BANGUN *ARM* ROBOT 5 DOF BERBASIS STM32F411CEU6
MENGUNAKAN METODE *INVERSE KINEMATICS* PADA ROBOT *ARM*
MOBILE CHILLI PICKER (CHIMI-BOT)

Disusun oleh:

Pandu Kukuh Kurniawan

40040322650054

Telah diujikan dan dinyatakan lulus oleh Tim Penguji pada tanggal
25 September 2026

Pembimbing,



Megarini Hersaputri, S.T., M.T.

NIP. 198902142020122012

Tim Penguji,

Penguji 1,



Rofiq Cahya Prayogo S. T., M. T.

NIP. 199505292024061001

Penguji 2,



Ahmad Ridlo Hanitudin Tahler S.Si., M.Si.

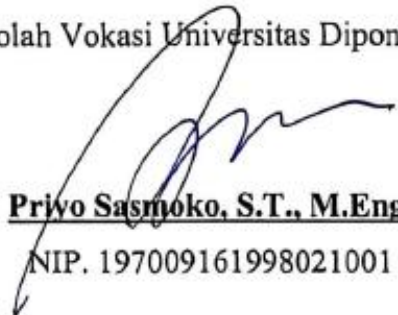
NIP. 199504152022041001

Mengetahui,

Ketua Program Studi S.Tr. Teknologi Rekayasa Otomasi

Departemen Teknologi Industri

Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro



Priyo Sasmoko, S.T., M.Eng.

NIP. 197009161998021001

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Pandu Kukuh Kurniawan
NIM : 40040322650054
Program Studi : Teknologi Rekayasa Otomasi
Judul Tugas Akhir : RANCANG BANGUN *ARM* ROBOT 5 DOF BERBASIS
STM32F411CEU6 MENGGUNAKAN METODE
INVERSE KINEMATICS PADA ROBOT *ARM MOBILE*
CHILLI PICKER (CHIMI-BOT)

Dengan ini menyatakan bahwa dalam tugas akhir ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh derajat keahlian di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dirujuk dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiarasi dalam tugas akhir ini, saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Semarang, 25 September 2026

Yang membuat pernyataan



Pandu Kukuh Kurniawan

NIM. 40040322650054

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “RANCANG BANGUN *ARM* ROBOT 5 DOF BERBASIS STM32F411CEU6 MENGGUNAKAN METODE *INVERSE KINEMATICS* PADA ROBOT *ARM MOBILE CHILLI PICKER* (CHIMI-BOT)”. Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat menyelesaikan pendidikan pada Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Otomasi. Dalam proses pelaksanaan dan penyusunan Tugas Akhir ini, penulis memperoleh bantuan, bimbingan, dukungan, dan motivasi dari berbagai pihak:

1. Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan kesehatan, kekuatan, dan kemudahan selama proses perancangan, pengujian, dan penyusunan Tugas Akhir.
2. Kedua orang tua dan keluarga yang senantiasa memberikan doa, dukungan, motivasi, dan semangat selama penyelesaian Tugas Akhir.
3. Priyo Sasmoko, S.T., M.Eng., selaku Ketua Program Studi D-IV Teknologi Rekayasa Otomasi.
4. Megarini Hersaputri, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, dan masukan selama proses perancangan, pengujian, dan penyusunan laporan.
5. Rekan satu tim pengembangan Robot Arm Mobile Chilli Picker, rekan-rekan Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Otomasi angkatan 2022 (SATNAYAKA), serta seluruh pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan selama pelaksanaan Tugas Akhir.
6. Rekan-rekan Diponegoro Wolfpack, yang memberikan hiburan dikala penulis merasa lelah.

Penulis menyadari bahwa laporan Tugas Akhir ini masih memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun diharapkan sebagai bahan perbaikan dan pengembangan penelitian selanjutnya. Penulis

berharap laporan ini dapat memberikan manfaat dan menjadi referensi bagi pengembangan lengan robot, penerapan *inverse kinematics*, serta otomasi pada bidang pertanian.

Semarang, 25 September 2026

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'P' followed by several loops and a final vertical stroke.

Pandu Kuku Kurniawan
NIM. 40040322650054

DAFTAR ISI

LAPORAN TUGAS AKHIR.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR	xii
SINGKATAN DAN SIMBOL.....	xiv
INTISARI.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
1.5 Batasan Masalah.....	4
1.6 Sistematika Laporan Tugas Akhir.....	4
BAB II DASAR TEORI.....	6
2.1. Tinjauan Pustaka	6
2.2. Lengan Robot.....	8
2.2.1. Batang (<i>Link</i>).....	8
2.2.2. Sendi (<i>Joint</i>).....	8
2.2.3. <i>End-Effector</i>	9
2.3. <i>Degree of Freedom (DOF)</i> dan <i>Inverse Kinematics</i>	9
2.3.1. Sistem Koordinat dan Penentuan Sudut <i>Joint Base</i>	9
2.3.2. <i>Inverse Kinematics</i> Geometris <i>Shoulder</i> dan <i>Elbow</i>	11
2.3.3. Orientasi <i>Wrist</i> pada Model Ideal	13
2.4. STM32F411CEU6	14

3.2.1. Model 3D Sistem Robot <i>Arm Mobile Chilli Picker</i> (CHIMI-BOT) ...	41
3.2.2. Konfigurasi Lengan Robot 5 DOF	42
3.2.3. Parameter Geometris Lengan Robot	42
3.2.4. Perhitungan Kebutuhan Torsi <i>Joint</i>	43
3.2.5. Penentuan Rasio Transmisi dan Pemilihan Aktuator	45
3.3. Perancangan Elektrikal dan Kebutuhan Daya	47
3.3.1. Konfigurasi Sistem Elektrikal	47
3.3.2. Konfigurasi Pin dan Periferal STM32F411CEU6	47
3.3.3. Perhitungan Kebutuhan Daya Komponen	49
3.3.4. Perhitungan Total Daya dan Pemilihan Catu Daya	51
3.3.5. PCB Sistem Kendali	52
3.4. Perancangan Perangkat Lunak dan Sistem Kendali	53
3.4.1. Struktur dan Alur Program STM32F411CEU6	53
3.4.2. Komunikasi UART Jetson-STM32	54
3.4.3 Penerapan <i>Inverse Kinematics</i> Berdasarkan Geometri dan Kalibrasi Lengan Robot	55
3.4.4. Ruang Kerja dan Batas Sudut <i>Joint</i> pada Perangkat Lunak	60
3.4.5. Konversi Sudut <i>Joint</i> menjadi STEP/DIR/ENABLE	61
3.4.6. Implementasi PWM Servo DS3225	62
3.5. Perancangan Antarmuka TFT 2,8 Inch	64
BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS	65
4.1. Pengujian Sistem <i>Homing</i>	65
4.2. Pengujian Ketepatan Sudut Aktuator	67
4.2.1. Pengujian Motor <i>Stepper</i> NEMA 23	67
4.2.2. Pengujian Servo DS3225	69
4.3. Pengujian Penerapan <i>Inverse Kinematics</i> pada Lengan Robot	70
4.3.1. Penentuan Koordinat Target Pengujian	71
4.3.2. Pengujian Ketercapaian dan Akurasi Posisi <i>End-Effector</i>	71
4.3.3. Pengujian <i>Repeatability</i> Posisi <i>End-Effector</i>	73
4.3.4. Analisis Penerapan <i>Inverse Kinematics</i>	74

4.4. Pengujian Sistem Pemetikan Terintegrasi.....	76
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	80
5.1 Kesimpulan	80
5.2 Saran.....	81
DAFTAR PUSTAKA	83

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Tinjauan Pustaka	6
Tabel 2. 2 Spesifikasi STM32F411CEU6.....	15
Tabel 2. 3 Spesifikasi NVIDIA Jetson Orin Nano Super Developer Kit 8 GB [14]	18
Tabel 2. 4 Contoh spesifikasi motor <i>stepper</i> NEMA 23 G-Penny [28]	19
Tabel 2. 5 Karakteristik umum <i>driver</i> TB6600 [34]	21
Tabel 2. 6 Spesifikasi Motor Servo DS3225 [23]	23
Tabel 2. 7 Spesifikasi Sensor Hall A3144 [24].....	26
Tabel 2. 8 Karakteristik umum <i>timing belt</i> HTD5M [25]	27
Tabel 2. 9 Parameter umum <i>timing pulley</i> HTD5M.	28
Tabel 2. 10 Karakteristik IC XL4016 [26].....	32
Tabel 2. 11 Spesifikasi pengendali ILI9341 dan XPT2046 [17], [27].....	33
Tabel 3. 1 Fungsi komponen utama subsistem lengan robot	37
Tabel 3. 2 Parameter fisik dan panjang efektif model kinematik	43
Tabel 3. 3 Parameter fisik dan massa ekuivalen setiap bagian lengan.....	44
Tabel 3. 4 Konfigurasi dan evaluasi awal transmisi <i>timing belt–pulley</i>	46
Tabel 3. 5 Konfigurasi pin dan periferal STM32F411CEU6.....	48
Tabel 3. 6 Perhitungan kebutuhan daya subsistem lengan robot	50
Tabel 3. 7 Ringkasan penentuan kapasitas catu daya	52
Tabel 3. 8 <i>Software joint limit</i>	61
Tabel 3. 9 Hasil perancangan resolusi motor <i>stepper</i>	62
Tabel 3. 10 Pemetaan PWM servo DS3225	63
Tabel 4. 1 Hasil pengujian sistem <i>homing</i>	65
Tabel 4. 2 Ringkasan selisih dan error hasil <i>homing</i>	66
Tabel 4. 3 Hasil pengujian ketepatan sudut motor <i>stepper</i>	67
Tabel 4. 4 Ringkasan selisih sudut motor <i>stepper</i>	68
Tabel 4. 5 Hasil pengujian sudut servo DS3225	69
Tabel 4. 6 Ringkasan selisih sudut servo DS3225	70

Tabel 4. 7 Koordinat target pengujian <i>inverse kinematics</i>	71
Tabel 4. 8 Data pengujian ketercapaian dan akurasi posisi <i>end-effector</i>	72
Tabel 4. 9 Rentang hasil pengulangan posisi <i>end-effector</i>	74
Tabel 4. 10 Hasil validasi fungsional sistem pemetikan terintegrasi	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Proyeksi koordinat target pada bidang horizontal untuk menentukan sudut <i>joint base</i> diolah berdasarkan [31]	10
Gambar 2. 2 Diagram geometris dua- <i>link</i> pada bidang radial-vertikal untuk menentukan sudut <i>shoulder</i> dan <i>elbow</i> diolah berdasarkan [31]	13
Gambar 2. 3 Gambar (a) Hubungan sudut <i>wrist pitch</i> dan Gambar (b) <i>wrist yaw</i> terhadap orientasi <i>tool</i> pada model ideal diolah berdasarkan [31].....	14
Gambar 2. 4 Diagram <i>pinout</i> papan STM32F411CEU6 Black Pill [32]	15
Gambar 2. 5 Antarmuka STM32CubeMX untuk konfigurasi STM32F411CEU6 16	
Gambar 2. 6 Lingkungan pengembangan <i>firmware</i> pada STM32CubeIDE.....	16
Gambar 2. 7 Modul WeAct MiniDebugger STLink V2.1 [33].	17
Gambar 2. 8 NVIDIA Jetson Orin Nano Super Developer Kit [14].	18
Gambar 2. 9 Contoh motor <i>stepper</i> NEMA 23 varian 57HS8230A4D8 [39].	19
Gambar 2. 10 Modul <i>driver</i> motor <i>stepper</i> TB6600 [34].	20
Gambar 2. 11 Motor servo DS3225 dengan servo horn 25T [35].	23
Gambar 2. 12 Sensor Hall A3144 dalam kemasan TO-92 [36].	26
Gambar 2. 13 Modul <i>buck converter</i> berbasis XL4016 [37].	32
Gambar 2. 14 Modul TFT 2,8inch berbasis ILI9341 dan XPT2046 [38].	33
Gambar 3. 1 Diagram blok keseluruhan sistem Robot <i>Arm Mobile Chilli Picker</i> (CHIMI-BOT)	35
Gambar 3. 2 Diagram blok subsistem lengan robot 5 DOF berbasis STM32F411CEU6	36
Gambar 3. 3 Diagram alir sistem keseluruhan lengan robot 5 DOF	38
Gambar 3. 4 Diagram alir sistem <i>homing joint base</i> , <i>shoulder</i> , dan <i>elbow</i>	39
Gambar 3. 5 Diagram alir gerakan pemetikan terintegrasi	40
Gambar 3. 6 Model tiga dimensi sistem Robot <i>Arm Mobile Chilli Picker</i> (CHIMI-BOT)	41
Gambar 3. 7 Konfigurasi mekanik dan susunan <i>joint</i> lengan robot 5 DOF	42

Gambar 3. 8 Konfigurasi transmisi <i>timing belt</i> dan <i>pulley</i> pada <i>joint</i> lengan robot	46
Gambar 3. 9 PCB sistem kendali lengan robot	53
Gambar 3. 10 Tampilan antarmuka TFT 2,8 inch pada sistem lengan robot.....	64

SINGKATAN DAN SIMBOL

Singkatan	Definisi
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
AI	<i>Artificial Intelligence</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DIR	<i>Direction</i>
DOF	<i>Degree of Freedom</i>
DSP	<i>Digital Signal Processing</i>
EN/ENA	<i>Enable</i>
FPU	<i>Floating Point Unit</i>
GPIO	<i>General-Purpose Input/Output</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
HTD	<i>High Torque Drive</i>
I/O	<i>Input/Output</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IK	<i>Inverse Kinematics</i>
LPDDR	<i>Low-Power Double Data Rate</i>
MCU	<i>Microcontroller Unit</i>
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
NVMe	<i>Non-Volatile Memory Express</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RC	<i>Radio Control</i>
RPM	<i>Revolutions per Minute</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
STEP/PUL	Sinyal pulsa langkah motor <i>stepper</i>

Singkatan	Definisi
SWCLK	<i>Serial Wire Clock</i>
SWD	<i>Serial Wire Debug</i>
SWDIO	<i>Serial Wire Debug Data Input/Output</i>
TFT	<i>Thin-Film Transistor</i>
TOPS	<i>Trillion Operations Per Second</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
USART	<i>Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

Simbol	Definisi	Satuan
X, Y, Z	koordinat target <i>end-effector</i>	mm
q_1	sudut <i>joint base</i>	°
q_2	sudut <i>joint shoulder</i>	°
q_3	sudut <i>joint elbow</i>	°
q_4	sudut <i>wrist pitch</i>	°
q_5	sudut <i>wrist yaw</i>	°
r	jarak radial target terhadap sumbu <i>base</i>	mm
r_w	komponen radial <i>wrist center</i>	mm
z_w	komponen vertikal <i>wrist center</i> terhadap <i>shoulder</i>	mm
Δr_{tool}	proyeksi geometri <i>tool</i> pada arah radial	mm
Δz_{tool}	proyeksi geometri <i>tool</i> pada arah vertikal	mm
H_s	tinggi sumbu <i>shoulder</i> terhadap referensi <i>base</i>	mm
d	jarak <i>shoulder</i> ke <i>wrist center</i>	mm
D	variabel bantu aturan cosinus	-
L_1, L_2	panjang efektif <i>link</i> utama pada model dua- <i>link</i>	mm
φ_d	orientasi <i>pitch</i> target <i>end-effector</i>	°
ψ_d	orientasi <i>yaw</i> target <i>end-effector</i>	°

Simbol	Definisi	Satuan
θ_s	sudut langkah dasar motor <i>stepper</i>	°/step
$\Delta\theta_m$	resolusi sudut poros motor per pulsa	°/pulse
M	faktor <i>microstepping</i>	-
N_p	jumlah pulsa STEP/PUL	<i>pulse</i>
N_s	jumlah <i>full-step</i> per putaran	step/rev
N_{rev}	jumlah pulsa per satu putaran motor	<i>pulse/rev</i>
n_m	kecepatan putar motor	rpm
f_p	frekuensi pulsa STEP	Hz
T_{PWM}	periode sinyal PWM	s
f_{PWM}	frekuensi PWM	Hz
D_{PWM}	<i>duty cycle</i> PWM	%
t_p	lebar pulsa servo	μs
i	rasio reduksi transmisi	-
Z_{driver}, Z_{driven}	jumlah gigi pulley <i>driver</i> dan <i>driven</i>	gigi
r_p	rasio sudut output terhadap sudut motor	-
η	efisiensi mekanik transmisi	-
τ	torsi	N·m
F_g	gaya berat	N
m	massa	kg
g	percepatan gravitasi	m/s ²
$l \perp$	jarak tegak lurus gaya terhadap sumbu <i>joint</i>	m
P	daya listrik	W
V	tegangan	V
I	arus	A

INTISARI

RANCANG BANGUN *ARM* ROBOT 5 DOF BERBASIS STM32F411CEU6 MENGUNAKAN METODE *INVERSE KINEMATICS* PADA ROBOT *ARM* *MOBILE CHILLI PICKER* (CHIMI-BOT)

Pandu Kukuh Kurniawan

Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Otomasi, Sekolah Vokasi,
Universitas Diponegoro

Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan lengan robot 5 DOF berbasis STM32F411CEU6 menggunakan metode *inverse kinematics* pada Robot *Arm Mobile Chilli Picker* (CHIMI-BOT). Sistem menggunakan motor stepper NEMA 23, servo DS3225, sensor Hall A3144 untuk *homing*, serta NVIDIA Jetson Orin Nano sebagai penghasil koordinat target. Koordinat target dikirim melalui UART, diproses menggunakan *inverse kinematics*, divalidasi terhadap *workspace* dan batas *joint*, kemudian dikonversi menjadi perintah aktuator. Pengujian *homing* menunjukkan seluruh lima pengulangan berhasil kembali ke posisi referensi. Pengujian *inverse kinematics* pada empat posisi dengan total 20 percobaan seluruhnya berhasil mencapai target, dengan selisih posisi 4,58–10,77 mm dan error 0,76–1,13%. Pengujian *repeatability* menunjukkan rentang perubahan posisi maksimum 3 mm. Pada pengujian sistem terintegrasi, delapan dari sembilan target berhasil dicapai dan tujuh objek berhasil dijepit, sehingga tingkat keberhasilan keseluruhan sebesar 77,78%. Hasil menunjukkan bahwa sistem mampu menerjemahkan koordinat target menjadi gerakan lengan dan menjalankan proses penjepitan secara terintegrasi.

Kata Kunci: Lengan robot; *Inverse kinematics*; STM32F411CEU6; Pemetikan cabai merah.

ABSTRACT

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A 5-DOF ROBOT ARM BASED ON STM32F411CEU6 USING INVERSE KINEMATICS ON THE MOBILE CHILLI PICKER ROBOT (CHIMI-BOT)

Pandu Kukuh Kurniawan

Automation Engineering Technology Study Program, Vocational School,
Diponegoro University

This study designs and implements a 5-DOF robotic arm based on the STM32F411CEU6 using an inverse kinematics method for the Robot Arm Mobile Chilli Picker (CHIMI-BOT). The system uses NEMA 23 stepper motors, DS3225 servos, Hall A3144 sensors for homing, and an NVIDIA Jetson Orin Nano to generate target coordinates. The target coordinates are transmitted through UART, processed using inverse kinematics, validated against the workspace and joint limits, and converted into actuator commands. Homing tests showed that all five repetitions successfully returned to the reference position. Inverse-kinematics tests at four positions with a total of 20 trials successfully reached all targets, with position deviations of 4.58–10.77 mm and errors of 0.76–1.13%. Repeatability testing showed a maximum positional variation of 3 mm. In the integrated system test, eight of nine targets were successfully reached and seven objects were successfully gripped, resulting in an overall success rate of 77.78%. The results show that the system can translate target coordinates into robotic-arm motion and perform the gripping process in an integrated manner.

Keywords: Robotic arm; Inverse kinematics; STM32F411CEU6; Red chili harvesting.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Cabai merah (*Capsicum annuum L.*) merupakan salah satu komoditas hortikultura strategis dengan skala produksi dan kebutuhan nasional yang tinggi. Data Outlook Cabai Tahun 2024 dari Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian menunjukkan bahwa produksi cabai Indonesia mencapai sekitar 3,02 juta ton pada tahun 2022 dan 3,06 juta ton pada tahun 2023. Produksi tersebut diproyeksikan meningkat menjadi sekitar 3,11 juta ton pada tahun 2024 dan 3,52 juta ton pada tahun 2028, sementara kebutuhan konsumsi nasional juga diproyeksikan terus meningkat. Besarnya volume produksi dan keberlanjutan kebutuhan tersebut menunjukkan bahwa cabai merupakan komoditas yang relevan untuk penerapan teknologi otomasi pada tahap pemanenan [1].

Selain memiliki nilai penting dari sisi produksi dan kebutuhan nasional, cabai dipilih karena karakteristik proses panennya memberikan permasalahan teknis yang sesuai dengan fokus penelitian robot manipulator. Buah harus dipilih berdasarkan kondisi kematangan, posisinya tersebar di antara batang dan daun, serta proses pemetikan memerlukan ketelitian agar buah maupun tanaman tidak mengalami kerusakan. Pemanenan secara manual bersifat repetitif dan membutuhkan waktu serta konsistensi kerja, sehingga diperlukan sistem yang mampu menerima posisi target dan mengarahkan *end-effector* secara presisi. Studi kelayakan pemanenan *chile pepper* menunjukkan bahwa proses tersebut dapat diotomasi menggunakan manipulator serial 5 DOF, kamera *depth, forward kinematics, inverse kinematics*, serta *end-effector* pemotong [2].

Pengembangan robot pemanen cabai juga menghadapi kendala berupa oklusi daun, ketidaksejajaran lengan terhadap tanaman, dan keterbatasan jangkauan pemetikan. Han et al. mengembangkan perangkat pemanen cabai untuk lahan berbukit yang memanfaatkan rekonstruksi *point cloud* 3D, mekanisme perataan, serta *end-effector* potong-jepit untuk memperbaiki kemampuan sistem

mencapai target pemetikan [3]. Lengan robot merupakan bagian penting pada sistem pemanen otomatis karena bertugas membawa *end-effector* menuju posisi buah yang telah terdeteksi. Ketepatan posisi ujung lengan dipengaruhi oleh geometri *link*, konfigurasi *joint*, metode kinematika, resolusi aktuator, dan kestabilan lintasan. Pada pemanenan capsicum, Paul dan Machavaram mengembangkan manipulator 6 DOF yang menggunakan motor *stepper* NEMA 17/NEMA 23, servo pada *end-effector*, *inverse kinematics*, serta evaluasi *workspace*, sehingga menunjukkan keterkaitan langsung antara rancangan kinematik, aktuator, dan kemampuan mencapai target [4].

Selain perancangan manipulator, kualitas koordinat target dari subsistem visi menentukan ketepatan perintah gerak yang diteruskan ke lengan. Ge et al. menunjukkan bahwa deteksi buah, transformasi koordinat, pemrosesan *point cloud*, dan klasifikasi area aman dapat digunakan untuk melokalisasi target serta lingkungan kerja robot pemanen secara tiga dimensi [5]. Pada tugas akhir ini, informasi target tiga dimensi digunakan sebagai masukan bagi pengendali lengan agar posisi *end-effector* dapat diarahkan ke buah yang akan dipetik.

Ketelitian lokalisasi titik petik juga berpengaruh pada keberhasilan pendekatan *end-effector* terhadap objek. Yu et al. menunjukkan bahwa estimasi pose buah dan lokalisasi titik petik secara *real-time* dapat meningkatkan ketelitian penentuan target pada robot pemanen stroberi [6]. Berdasarkan kebutuhan tersebut, sistem pada tugas akhir ini menggunakan NVIDIA Jetson Orin Nano Super 8 GB untuk menghasilkan koordinat target X, Y, dan Z, kemudian mengirimkannya melalui UART ke STM32F411CEU6 yang menjalankan validasi target, *inverse kinematics*, pemeriksaan *workspace* dan *joint* limit, serta pembangkitan perintah gerak aktuator.

Berdasarkan kebutuhan tersebut, Tugas Akhir ini merancang dan membangun lengan robot 5 DOF berbasis STM32F411CEU6 menggunakan metode *inverse kinematics* sebagai subsistem manipulator pada Robot *Arm Mobile Chilli Picker* (CHIMI-BOT). Perancangan difokuskan pada integrasi mekanik, aktuator, sistem *homing*, komunikasi Jetson-STM32, implementasi *inverse*

kinematics, serta pengujian akurasi dan keterulangan posisi *end-effector* agar hubungan antara koordinat target dan gerakan lengan dapat dievaluasi secara terukur.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, permasalahan dalam Tugas Akhir ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang dan mengimplementasikan lengan robot 5 DOF berbasis STM32F411CEU6 untuk mencapai koordinat target pemetikan cabai merah?
2. Bagaimana menerapkan metode *inverse kinematics* untuk menentukan gerak *joint* lengan robot berdasarkan koordinat target?
3. Bagaimana kinerja lengan robot berdasarkan akurasi posisi dan keterulangan gerak *end-effector*?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, tujuan pelaksanaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan mengimplementasikan lengan robot 5 DOF berbasis STM32F411CEU6 untuk mencapai koordinat target pemetikan cabai merah.
2. Menerapkan metode *inverse kinematics* untuk menentukan gerak *joint* lengan robot berdasarkan koordinat target.
3. Mengevaluasi kinerja lengan robot berdasarkan akurasi posisi dan keterulangan gerak *end-effector*.

1.4 Manfaat

Adapun manfaat yang diharapkan dari pelaksanaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menghasilkan prototipe lengan robot 5 DOF berbasis STM32F411CEU6 sebagai bagian dari pengembangan Robot *Arm Mobile Chilli Picker* (CHIMI-BOT).
2. Menjadi referensi penerapan metode *inverse kinematics* dan kendali berbasis STM32 pada lengan robot untuk otomasi pertanian.

1.5 Batasan Masalah

Agar pembahasan dalam Tugas Akhir ini lebih terarah dan sesuai dengan sistem yang dikembangkan, batasan masalah ditetapkan sebagai berikut:

1. Perancangan difokuskan pada lengan robot 5 DOF yang terdiri atas *base*, *shoulder*, *elbow*, *wrist pitch*, dan *wrist yaw*, serta *gripper* sebagai *end-effector*.
2. *Input* gerak berupa koordinat X, Y, dan Z dari NVIDIA Jetson Orin Nano Super, sedangkan proses pengolahan citra tidak dibahas secara mendalam.
3. Sistem kendali lengan menggunakan STM32F411CEU6 dengan motor *stepper* NEMA 23 dan *driver* TB6600 pada *base*, *shoulder*, dan *elbow* serta servo DS3225 pada *wrist* dan *gripper*.
4. Posisi awal *joint stepper* ditentukan melalui proses *homing* menggunakan sensor Hall A3144 dan tidak menggunakan *encoder* absolut.
5. Pengujian dilakukan pada prototipe dalam lingkungan terkontrol dan difokuskan pada fungsi gerak, akurasi posisi, serta keterulangan gerak *end-effector*; sistem penggerak robot mobile tidak dibahas.
6. Pengujian akurasi dan keterulangan posisi *end-effector* dilakukan pada empat koordinat target dengan lima pengulangan pada setiap posisi, sehingga hasil evaluasi berlaku pada kondisi dan area kerja yang diuji.
7. Keberhasilan penjepitan dan pemetikan dinilai melalui pengamatan fisik karena *gripper* tidak dilengkapi sensor umpan balik.
8. Jarak *joint* ditetapkan dari pengukuran dari software solidwork, sehingga ketepatan titik *joint* antar *joint* aktual bisa saja sedikit berbeda.
9. Mekanik ujung *end-effector* hanya berupa cutter yang mana belum sempurna untuk proses pemotongan cabai.

1.6 Sistematika Laporan Tugas Akhir

Sistematika penulisan laporan Tugas Akhir ini disusun untuk memberikan gambaran umum mengenai alur pembahasan, ruang lingkup, serta tahapan perancangan dan pengujian sehingga memudahkan pembaca dalam memahami isi laporan secara keseluruhan. Laporan Tugas Akhir ini disusun dalam beberapa bab yang saling berkaitan.

BAB I PENDAHULUAN,

Berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, batasan masalah, dan sistematika laporan Tugas Akhir.

BAB II DASAR TEORI,

Menguraikan penelitian terdahulu dan teori yang mendukung perancangan lengan robot 5 DOF. Pembahasan mencakup lengan robot, *degree of freedom*, *inverse kinematics*, STM32F411CEU6, komunikasi UART, NVIDIA Jetson Orin Nano Super, motor *stepper* dan *driver* TB6600, servo DS3225, sensor Hall A3144, sistem *homing*, transmisi *timing belt-pulley*, perhitungan torsi, catu daya, serta antarmuka TFT.

BAB III METODE,

Menjelaskan proses perancangan dan pembangunan lengan robot. Pembahasan meliputi diagram blok, aliran data dan kendali, perancangan mekanik, parameter geometris, kebutuhan torsi, transmisi, perancangan elektrik, perangkat lunak, penerapan geometri lengan pada *inverse kinematics*, serta antarmuka sistem.

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS,

Menyajikan hasil implementasi dan pengujian sistem. Pengujian mencakup sistem *homing*, ketepatan sudut aktuator, penerapan *inverse kinematics*, akurasi dan *repeatability* posisi *end-effector*, serta pengujian sistem pemetikan secara terintegrasi.

BAB V PENUTUP,

Berisi kesimpulan yang disusun berdasarkan hasil pengujian dan analisis untuk menjawab rumusan masalah serta tujuan Tugas Akhir, disertai saran untuk pengembangan sistem selanjutnya.