

**IMPLEMENTASI METODE FORWARD KINEMATIK SEBAGAI SISTEM  
KENDALI PERGERAKAN LINGKAR ROBOT uARM DENGAN GRIPPER  
LINEAR**

**PROJEK**

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Menyelesaikan Studi di  
Program Studi Teknik Komputer DIII



**Oleh :**

**Achmad Baidawi Alparisi**

**09030581923029**

**PROGRAM STUDI TEKNIK KOMPUTER**

**FAKULTAS ILMU KOMPUTER**

**UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

**JANUARI 2024**

**. HALAMAN PENGESAHAN**

**PROJEK**

**IMPLEMENTASI METODE FORWARD KINEMATIK SEBAGAI SISTEM  
KENDALI PERGERAKKAN Lengan ROBOT uARM DENGAN GRIPPER  
LINEAR**

**Sebagai salah satu syarat untuk penyelesaian studi di  
Program Studi Teknik komputer DIII**

**Oleh :**

**Achmad Baidawi Alparisi 09030581923029**

**Palembang, 29 Desember 2023**

**Pembimbing I,**

**Pembimbing II**



**Aditya P P Prasetyo, S.Kom., M.T.**  
**NIP. 198810202023211018**

**Kemahyanto Exaudi, S.Kom., M.T.**  
**NIP. 198405252023211018**

**Mengetahui,**

**Koordinator Program Studi Teknik Komputer**



**Huda Ubaya, M.T.**  
**NIP. 198106162012121003**

## HALAMAN PERSETUJUAN

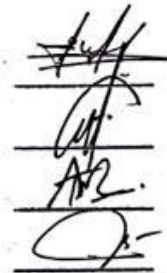
Telah diuji dan lulus pada :

Hari : Jumat

Tanggal : 29 Desember 2023

Tim Penguji :

1. Ketua : Sarmayanta Sembiring, M.T.
2. Penguji : Dr. Ahmad Zarkasi, M.T.
3. Pembimbing I : Aditya Putra Pradana P, S.Kom., M.T.
4. Pembimbing II : Kemahyanto Exaudi, S.Kom., M.T.



Mengetahui  
Koordinator Program Studi Teknik Komputer,



Huda Ubaya, M.T.  
NIP 198106162012121003

## HALAMAN PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Achmad Baidawi Alparisi  
NIM : 09030581923029  
Judul : IMPLEMENTASI METODE FORWARD  
KINEMATIK SEBAGAI SISTEM KENDALI  
PERGERAKKAN LENGAN ROBOT uARM  
DENGAN GRIPPER LINEAR

Hasil Pengecekan Software *iThenticate/Turnitin* : 16%

Menyatakan bahwa laporan tugas akhir saya merupakan hasil karya sendiri dan bukan hasil penjiplakan / plagiat. Apabila ditemukan penjiplakan / plagiat dalam laporan tugas akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya dengan ketentuan berlaku.

Demikian pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tidak dipaksakan.

Palembang, 29 Desember 2023



**Achmad Baidawi Alparisi**  
**NIM. 09030581923029**

## **HALAMAN PERSEMBAHAN**

### Motto

Orang-orang yang sukses telah belajar membuat diri mereka melakukan hal yang harus dikerjakan ketika hal itu memang harus dikerjakan, entah mereka menyukainya atau tidak.

Kupersembahkan untuk :

- Orang Tua
- Saudara
- Pasangan
- Teman
- Almamater perjuangan

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillahrabbi'l'amin. Puji dan syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT , yang telah memberikan berupa kesehatan , kesempatan kepada penulis sehingga mampu menyelesaikan Projek Tugas Akhir yang berjudul **“IMPLEMENTASI METODE FORWARD KINEMATIK SEBAGAI SISTEM KENDALI PERGERAKAN LENGAN ROBOT uARM DENGAN GRIPPER LINEAR”**.

Penulisan berharap tulisan ini dapat bermanfaat untuk banyak orang yang akan mengenal atau mengembangkan Lengan Robot pada Arduino Uno. Penyusunan laporan dan perancangan projek ini merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan di Fakultas Ilmu Komputer Universitas Sriwijaya untuk memperoleh gelar Ahli Madya Komputer.

Dalam penyelesaian projek ini penulis mendapatkan bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak rasa syukur dan terima kasih kepada yang terhormat :

1. Allah SWT, yang telah melimpahkan Berkah dan Rahmatnya. Sehingga penulis dapat menyelesaikan projek ini.
2. Kedua orang tua yang telah memberikan dukungan berupa Doa, Motivasi dan Materil, sehingga penulis dapat menyelesaikan projek Tugas Akhir ini.
3. Kedua saudara yang telah memberikan dukungan berupa semangat dan doa dalam menyelesaikan projek Tugas Akhir ini.
4. Pasangan saya Regi Ikhtiar Septyadini A.Md.Kes yang telah memberikan semangat dan doa dalam menyelesaikan projek Tugas Akhir ini
5. Bapak Aditya P P Prasetyo, S.Kom., M.T. selaku dosen pembimbing I pada projek ini yang telah membimbing dan memberikan materil untuk projek ini, sehingga penulis dapat menyelesaikan projek Tugas Akhir ini.
6. Bapak Kemahyanto Exaudi, S.Kom., M.T. selaku dosen pembimbing II pada projek ini yang telah membimbing dan memberikan arahan kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan projek Tugas Akhir ini.
7. Bapak Huda Ubaya, S.T., M.T. Selaku Koordinator Program Studi Teknik komputer.
8. Seluruh pimpinan di lingkungan Fakultas Ilmu Komputer Universitas Sriwijaya.

9. Seluruh dosen Program Studi Teknik Komputer, Fakultas Ilmu Komputer Universitas Sriwijaya.
10. Seluruh staff di Prodi Teknik Komputer, khususnya mbak Faula yang telah membantu dan memberikan arahan untuk menyelesaikan proses administrasi selama menyelesaikan Projek Tugas Akhir ini.
11. Keluarga Besar Fakultas Ilmu Komputer, bagian akademik, kemahasiswaan, tata usaha, perlengkapan, dan keuangan.
12. Serta semua orang memberikan dukungan dan semangat untuk penulis yang tidak dapat disebutkan satu persatu dalam penyelesaian projek Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa projek Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan dengan segala kekurangannya. Untuk itu penulis mengharapkan adanya kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan dari projek Tugas Akhir ini.

Akhir kata penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada semua pihak yang telah membantu penulis dalam proses penyelesaian serta penyusunan projek Tugas Akhir ini. Penulis juga berharap agar projek Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dan memberikan pengetahuan serta wawasan bagi semua pihak yang berkepentingan. Aamiinn.

Palembang, 29 Desember 2023



**Achmad Baidawi Alparisi**  
09030581923029

# IMPLEMENTASI METODE FORWARD KINEMATIK SEBAGAI SISTEM KENDALI PERGERAKAN LENGAN ROBOT uARM DENGAN GRIPPER LINEAR

Oleh :

**Achmad Baidawi Alparisi**

**09030581923029**

## Abstrak

Pada penelitian pada projek ini mengembangkan sebuah robot model U-Arm dengan tiga derajat kebebasan dengan menggunakan perhitungan *Forward Kinematic*. *Forward Kinematic* merupakan proses perhitungan matematis untuk mendapatkan besarnya sudut dari ketiga sendi pada lengan robot dari titik koordinat  $(x,y,z)$  *end-effector* yang telah diketahui dan panjang setiap *Link*. Pada lengan robot ini terdapat 4 *Link*, dengan panjang *Link1* = 8.2 cm, panjang *Link2* = 15 cm, panjang *Link3* = 16 cm dan panjang *Link4* = 18.4 cm. Pada ujung lengan robot terdapat modul pencengram untuk mencengram objek. Hasil pengujian gerak pada lengan robot yang menggunakan perhitungan *Forward Kinematic* ini menunjukkan rata-rata kesalahan koordinatnya sebesar 7.13%. Pada penelitian ini juga mengembangkan program untuk mengatur kecepatan dari motor servo menggunakan fungsi *For* dan *delay*.

**Kata Kunci** : Robot, Lengan Robot, *Forward Kinematic*, Motor Servo, DoF, *Gripper*, Koordinat, Sudut.



***Uarm Robot Arm Motion Control System With Gripper Linear  
Based On Forward Kinematic Method***

***By :***

**Achmad Baidawi Alparisi**

**09030581923029**

***Abstract***

*In research on this project developed a U-Arm model robot with three degrees of freedom using Inverse Kinematic calculations. Kinematic inverse is a mathematical calculation process to obtain the angles of the three joints on the robot arm from known (x,y,z) end-effector coordinates and the length of each link. In this robotic arm there are 4 links, with a length of Link1 = 8.2 cm, a length of Link2 = 15 cm, a length of Link3 = 16 cm and a length of Link4 = 18.4 cm. At the end of the robotic arm there is a gripping module for gripping objects. The results of testing the motion of the robot arm using the Inverse Kinematic calculation show that the average coordinate error is 7.13%. This research also develops a program to adjust the speed of the servo motor using the For and delay functions.*

***Keywords:*** Robot, Robotic Arm, Forward Kinematic, Servo Motor, DoF, Gripper, Coordinate, Angle.

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN .....</b>	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PERSETUJUAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>HALAMAN PERNYATAAN.....</b>	<b>iv</b>
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN .....</b>	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>vi</b>
<b>Abstrak.....</b>	<b>viii</b>
<b><i>Abstract</i>.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>x</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
2.1 Tujuan.....	2
2.2 Manfaat.....	3
2.3 Batasan Masalah.....	3
2.4 Metode Penelitian.....	3
2.4.1 Studi Literatur .....	3
2.4.2 Analisis Kebutuhan Sistem .....	3
2.4.3 Perancangan Sistem .....	4
2.4.4 Implementasi Sistem.....	4
2.4.5 Pengujian dan Analisis.....	4
2.4.6 Pengambilan Kesimpulan .....	4
2.5 Sistematika Penulisan.....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>6</b>
2.1 Penelitian Terdahulu.....	6
2.2 Sistem Kendali .....	7
2.3 <i>Forward Kinematic</i> .....	7
2.4 Robot .....	11
2.4.1 Robot Lengan (Robot Manipulator).....	11
2.5 Metode Penelitian.....	11
2.5.1 Arduino UNO R3.....	12

2.5.2	Motor Servo .....	13
2.5.3	<i>Push Button</i> .....	14
26	<i>Software</i> yang Digunakan .....	11
2.6.1	Arduino IDE.....	15
<b>BAB III PERANCANGAN SISTEM .....</b>		<b>17</b>
3.1	Rekayasa Kebutuhan .....	17
3.1.1	Kebutuhan Fungsional Sistem .....	17
3.1.2	Kebutuhan Perangkat Keras.....	17
3.4.1	Kebutuhan Perangkat Lunak .....	18
3.2	Perancangan Alat.....	18
3.3	Perancangan Perangkat Keras ( <i>Hardware</i> ).....	19
3.3.1	Perancangan Perangkat Keras Servo <i>Base</i> .....	19
3.3.2	Perancangan Perangkat Keras Servo <i>Shoulder</i> .....	20
3.3.3	Perancangan Perangkat Keras Servo <i>Elbow</i> .....	21
3.3.4	Perancangan Perangkat Keras Servo <i>Gripper</i> .....	22
3.3.5	Perancangan Perangkat Keras <i>Push Button</i> .....	22
3.3.6	Perancangan Perangkat Keras Servo <i>Step-Down</i> LM2596.....	23
3.3.7	Perancangan Keseluruhan <i>Hardware</i> .....	24
3.4.4	Perancangan Perangkat Lunak Kecepatan Servo Lengan Robot .....	28
3.4.5	Perancangan Keseluruhan Perangkat Lunak Arduino UNO .....	29
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>30</b>
4.1	Pengujian dan Analisis .....	30
4.2	Pengujian dan Analisis .....	30
4.3	Pengujian Motor Servo <i>Base, Shoulder</i> dan <i>Elbow</i> .....	32
4.3.1	Hasil dan Analisis Pengujian Motor Servo <i>Base</i> .....	32
4.3.2	Hasil dan Analisis Pengujian Motor Servo <i>Shoulder</i> .....	33
4.3.3	Hasil dan Analisis Pengujian Motor Servo <i>Elbow</i> .....	34
4.4	Pengujian Motor Servo <i>Gripper</i> .....	35
4.4.1	Hasil dan Analisis Pengujian Motor Servo <i>Elbow</i> .....	35
4.5	Pengujian Posisi Koordinat <i>End-effector</i> dan Sudut Lengan Robot Dengan Metode <i>Forward Kinematic</i> .....	37
4.5.1	Hasil dan Analisis Pengujian Posisi Ambil Dengan <i>Forward Kinematic</i> .....	41
4.5.2	Hasil dan Analisis Pengujian Posisi Kiri Dengan <i>Forward Kinematic</i> .....	45
4.6	Pengujian Posisi Koordinat <i>End-effector</i> Tanpa Metode <i>Forward Kinematic</i> ..	47

4.6.1	Hasil dan Analisis Pengujian Posisi Ambil Tanpa <i>Forward Kinematic</i> ...	47
4.6.2	Hasil dan Analisis Pengujian Posisi Ambil Tanpa <i>Forward Kinematic</i> ...	48
4.6.3	Hasil dan Analisis Pengujian Posisi Kiri Tanpa <i>Forward Kinematic</i> .....	48
4.7	Pengujian Kecepatan Lengan Robot.....	49
4.7.1	Hasil dan Analisis Pengujian Kecepatan Ke Posisi Ambil .....	50
4.7.2	Hasil dan Analisis Pengujian Kecepatan Ke Posisi Kanan .....	51
4.7.3	Hasil dan Analisis Pengujian Kecepatan Ke Posisi Kiri .....	52
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>		<b>54</b>
5.1	Kesimpulan.....	54
5.2	Saran.....	54

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Tampak Atas Lengan Robot, atau Bidang Koordinat (x,z).....	8
Gambar 2.2 Tampak Samping Lengan Robot, atau Bidang Koordinat (x,z).....	8
Gambar 2.3 Tampak Atas Lengan Robot, atau Bidang Koordinat (x,z). Kondisi <i>end-effector</i> di bawah $z_1$ .....	10
Gambar 2.4 Lengan Robot U-Arm .....	12
Gambar 2.5 Arduino UNO R3 .....	12
Gambar 2.6 Motor Servo MG995.....	13
Gambar 2.7 <i>Tactical Push Button</i> .....	14
Gambar 2.8 Modul <i>Step-Down</i> LM2596 .....	15
Gambar 2.9 Tampilan Arduino IDE .....	16
Gambar 3.1 Diagram Rangkaian Alat.....	19
Gambar 3.2 Skema Rangkaian Servo <i>Base</i> .....	20
Gambar 3.3 Skema Rangkaian Servo <i>Shoulder</i> .....	20
Gambar 3.4 Skema Rangkaian Servo <i>Elbow</i> .....	21
Gambar 3.5 Rangkaian Skema Servo <i>Gripper</i> .....	22
Gambar 3.6 Skema Rangkaian <i>Push Button</i> .....	23
Gambar 3.7 Skema Rangkaian <i>Step-Down</i> LM2596 .....	23
Gambar 3.8 Skema Rangkaian keseluruhan <i>Hardware</i> .....	24
Gambar 3.9 <i>Flowchart</i> Sistem kendali motor servo dengan <i>Forward Kinematic</i> .....	25
Gambar 3.10 <i>Flowchart</i> sistem kendali motor servo <i>Gripper</i> .....	26
Gambar 3.11 <i>Flowchart</i> program <i>push button</i> .....	27
Gambar 3.12 <i>Flowchart</i> program kecepatan lengan robot.....	28
Gambar 3.13 <i>Flowchart</i> keseluruhan program Arduino UNO.....	29
Gambar 4.1 Lengan Robot Tampak Depan.....	30
Gambar 4.2 Lengan Robot Tampak Belakang.....	31
<b>Gambar 4.3</b> Tampak Di dalam <i>Box</i> Kendali.....	31
Gambar 4.4 Proses Pengujian Motor Servo <i>Base</i> .....	32
<b>Gambar 4.5</b> Proses Pengujian Motor Servo <i>Shoulder</i> .....	33
<b>Gambar 4.6</b> Proses Pengujian Motor Servo <i>Elbow</i> .....	34
Gambar 4.7 Proses Pengujian Motor Servo <i>Shoulder</i> .....	36
Gambar 4.8 Pengukuran titik koordinat x,y .....	37
Gambar 4.9 Pengukuran titik z .....	38
<b>Gambar 4.10</b> Pengukuran sudut $\theta_1$ .....	38
Gambar 4.11 Pengukuran sudut $\theta_2$ .....	39
Gambar 4.12 Pengukuran sudut $\theta_3$ .....	39
Gambar 4.13 Tampak atas posisi ambil .....	41
Gambar 4.14 Tampak samping posisi ambil.....	41
Gambar 4.15 Tampak atas posisi kanan.....	43
Gambar 4.16 Tampak samping posisi kanan .....	43
Gambar 4.17 Tampak atas posisi kiri.....	45
Gambar 4.18 Tampak samping posisi kiri .....	45
Gambar 4.19 Grafik Kecepatan Posisi Ambil.....	50
Gambar 4.20 Grafik Kecepatan Posisi Kanan.....	51
<b>Gambar 4.21</b> Grafik Kecepatan Posisi Kiri .....	52

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Kebutuhan Perangkat Keras.....	17
Tabel 3.2 Kebutuhan Perangkat Lunak.....	18
Tabel 3.3 Konfigurasi Pin Servo <i>Base</i> .....	20
Tabel 3.4 Konfigurasi Pin Servo <i>Shoulder</i> .....	21
Tabel 3.5 Konfigurasi Pin Servo <i>Elbow</i> .....	21
Tabel 3.6 Konfigurasi Pin Servo <i>Gripper</i> .....	22
Tabel 3.7 Konfigurasi Pin <i>Push Button</i> .....	23
Tabel 3.8 Konfigurasi pin LM2596 .....	24
Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Motor Servo <i>Base</i> .....	33
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Motor Servo <i>Shoulder</i> .....	34
Tabel 4.3 Hasil Pengujian Motor Servo <i>Elbow</i> .....	35
Tabel 4.4 Hasil Pengujian Motor Servo <i>Gripper</i> .....	36
Tabel 4.5 Hasil pengujian koordinat x,y,z posisi ambil dengan <i>Forward Kinematic</i> .....	42
Tabel 4.6 Hasil pengujian sudut $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ posisi ambil.....	42
Tabel 4. 7 Hasil pengujian koordinat x,y,z Posisi Kanan dengan <i>Forwar Kinematic</i> .....	44
Tabel 4. 8 Hasil pengujian sudut $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ Posisi Kanan .....	44
Tabel 4.9 Hasil pengujian koordinat x,y,z Posisi Kiri dengan <i>Forward Kinematic</i> .....	46
Tabel 4.10 Hasil pengujian sudut $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ Posisi Kiri .....	46
Tabel 4.11 Hasil pengujian koordinat x,y,z Posisi Ambil tanpa <i>Forward Kinematic</i> .....	47
Tabel 4.12 Hasil pengujian koordinat x,y,z Posisi Kanan tanpa <i>Forward Kinematic</i> .....	48
Tabel 4.13 Hasil pengujian koordinat x,y,z Posisi Kiri tanpa <i>Forward Kinematic</i> .....	48
Tabel 4.14 Hasil pengujian kecepatan servo posisi ambil.....	50
Tabel 4.15 Hasil pengujian kecepatan servo posisi kanan .....	51
Tabel 4.16 Hasil pengujian kecepatan servo posisi kiri .....	52

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Robot merupakan alat mekanik yang dapat diprogram sesuai dengan kebutuhan dibidangnya, robot juga dapat melakukan suatu pekerjaan yang berulang-ulang dan dapat mempermudah pekerjaan manusia[1]. Robot dapat diterapkan di berbagai bidang salah satunya pada bidang industry. Pada bidang industri jenis robot yang umum digunakan adalah robot manipulator atau disebut juga lengan robot.

Robot manipulator atau robot lengan merupakan rangkaian dari lengan mekanik yang terhubung oleh sendi (*link*), sendi pada lengan robot berfungsi sebagai sistem gerak pada robot, jumlah sendi dari lengan robot disebut juga dengan derajat kebebasan (*Degree of Freedom*)[2]. Robot manipulator pada dasarnya terdiri dari : Tangan Mekanik (*Mechanical Arm*) tersusun dari beberapa bagian (*Base, Shoulder, Elbow*), *End-effector* merupakan ujung dari lengan robot yang terdapat sistem mekanik pencengkram (*Gripper*), Penggerak (*Actuator*) merupakan sistem penggerak robot yang dapat berupa Motor Servo, Sensor berfungsi sebagai masukan umpan balik pada proses pengendalian lengan robot[3]. Secara umum lengan robot merupakan alat mekanik yang dapat melakukan pekerjaan secara presisi, cepat dan dapat melakukan tugas secara berulang-ulang. Salah satu masalah dalam pembuatan robot adalah menemukan persamaan kinematic dari robot lengan. *Kinematic* terdiri dari dua jenis, yaitu *Forward Kinematic* dan *Forward Kinematic*.

*Forward Kinematic* adalah analisis *Kinematic* untuk mendapatkan posisi koordinat (x,y,z), dengan memberikan masukkan berupa sudut dari sendi lengan robot. Sedangkan, *Forward Kinematic* adalah analisis *Kinematic* untuk mendapatkan sudut-sudut untuk setiap sendi lengan robot, dengan memberikan koordinat posisi (x,y,z) [4]. Pada pengembangan projek ini menggunakan metode *Forward Kinematic* sebagai metode untuk menganalisa pergerakan lengan robot.

Penerapan metode *Forward Kinematic* ini bertujuan untuk mendapatkan posisi akhir dari *end-effector gripper* dan mengetahui perpindahan sudut dari masing- masing sendi (*link*) dengan memberikan masukkan posisi koordinat (x,y,z).

Lengan robot ini kendalikan oleh mikrokontroler *Arduino UNO R3*. Mikrokontroler merupakan otak pengendalian dari suatu alat dengan memasukkan program untuk mengendalikan alat tersebut. *Arduino Uno R3* merupakan mikrokontroler berbasis ATmega328 yang memiliki 14 pin digital *Input/Output* yang 6 diantaranya pin PWM, memiliki 6 pin *input* analog, dan osilator 16MHZ. Program Arduino diunggah menggunakan kabel USB, untuk sumber tegangan ke *Arduino* dapat menggunakan kabel *jack 5,5 mm* ke *port jack* pada *Arduino* atau menggunakan sambungan USB yang terhubung ke komputer. Tegangan *input* Arduino 7-12 Volt[5]. Sendi lengan robot ini digerakkan menggunakan motor servo. Motor servo adalah perangkat listrik yang berputar sesuai sudut masukkan, terdapat 2 jenis servo : AC motor servo dan DC motor servo[6].

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan diatas, maka penulis mengusulkan projek dengan judul “**IMPLEMENTASI METODE FORWARD KINEMATIK SEBAGAI SISTEM KENDALI PERGERAKAN LENGAN ROBOT uARM DENGAN GRIPPER LINEAR**” dengan menggunakan metode *Forward Kinematic* untuk menentukan sudut lengan robot.

## **12 Rumusan Masalah**

Adapun perumusan masalah dari penggunaan lengan robot ini sebagai berikut:

- 1) Bagaimana cara menentukan sudut lengan robot dengan menggunakan metode *Forward Kinematik*?
- 2) Bagaimana sistem kendali gerak yang sesuai dengan lengan robot yang menghasilkan gerak yang stabil?

## **13 Tujuan**

Adapun tujuan dari Projek Tugas Akhir ini yakni :

- 1) Menerapkan metode *Forward Kinematik* untuk menentukan sudut lengan robot.
- 2) Menghasilkan gerak sistem kendali yang stabil untuk lengan robot.
- 3) Mengendalikan kecepatan motor servo terhadap perpindahan sudut lengan robot.



## **14 Manfaat**

Adapun manfaat dari Projek Tugas Akhir ini yakni :

- 1) Memahami cara penerapan metode *Forward* Kinematik pada lengan robot.
- 2) Memahami cara memprogram sistem gerak lengan robot.
- 3) Memahami cara menggerakkan lengan robot

## **15 Batasan Masalah**

Pengerjaan proyek ini dibatasi dalam ruang lingkup, sebagai berikut :

- 1) Mikrokontroler menggunakan *Arduino* UNO.
- 2) Lengan robot dibangun dengan menggunakan 3 derajat kebebasan (*Degree of Freedom*).
- 3) Alat ini hanya dapat mengangkat objek seberat 140gr.
- 4) Objek yang digunakan berbentuk kertas

## **16 Metode Penelitian**

Metode penelitian pada proyek ini terbagi beberapa tahap, yaitu mulai dari studi literatur, analisis kebutuhan

### **1.6.1 Studi Literatur**

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan informasi dengan mencari landasan teori dari buku, jurnal dan internet yang berhubungan dengan proyek yang dikerjakan.

### **1.6.2 Analisis Kebutuhan Sistem**

Pada tahap analisis kebutuhan sistem ini dilakukan analisis untuk mengetahui kebutuhan apa yang diperlukan dalam pengembangan proyek ini, baik pada kebutuhan perangkat keras (*Hardware*) maupun kebutuhan pada sistem Perangkat Lunak (*Software*).

### **1.6.3 Perancangan Sistem**

Pada tahap perancangan sistem ini adalah tahap untuk perancangan sistem pada alat yang akan dikembangkan, perancangan dilakukan pada Perangkat Keras (*Hardware*) dan pada Perangkat Lunak (*Software*).

### **1.6.4 Implementasi Sistem**

Pada tahap implementasi sistem ini adalah tahap untuk menerapkan sistem yang telah dibuat, sistem yang akan diterapkan ialah *Invers Kinematic* untuk menggerakkan lengan robot.

### **1.6.5 Pengujian dan Analisis**

Pada tahap pengujian dan analisis ini adalah tahap untuk mengetahui apakah sistem yang telah dibuat dan diterapkan dapat bekerja dengan baik sesuai perancangan awal, pengujian ini dilakukan pada motor servo lengan robot dengan metode *Forward Kinematic*.

### **1.6.6 Pengambilan Kesimpulan**

Pada tahap pengambilan kesimpulan ini adalah tahap untuk menarik kesimpulan dari hasil data yang telah didapatkan untuk mendapatkan inti dari pembahasan proyek ini.

## **17 Sistematika Penulisan**

Pada penulisan sistematika laporan proyek ini, terdiri dari lima BAB yang disusun sebagai berikut:

### **BAB I PENDAHULUAN**

BAB ini berisi penjelasan tentang pembahasan topic penelitian, latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, batasan masalah, metode penulisan dan sistematika penulisan.

### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

BAB ini berisi referensi pendukung untuk proyek seperti penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan topic proyek, landasan teori dari komponen-komponen perangkat keras dan perangkat lunak yang digunakan pada penelitian proyek, serta istilah-istilah yang berkaitan dengan proyek ini.

### **BAB III PERANCANGAN SISTEM**

BAB ini menjelaskan tentang kebutuhan yang diperlukan untuk mengembangkan sistem dari alat yang akan dikembangkan, meliputi perancangan perangkat keras (*Hardware*) yang membahas tentang bagaimana merangkai setiap komponen menjadi satu kesatuan, dan perancangan perangkat lunak (*Software*) yang membahas *Flowchart* dari program yang dibuat untuk mengontrol sistem kerja alat menggunakan metode *Forward Kinematic*.

#### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

BAB ini membahas hasil dari pengimplementasian sistem yang telah dibuat, pengujian dari lengan robot, berupa sudut putar dari lengan robot tersebut menggunakan metode *Forward Kinematic*.

#### **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

BAB ini berisi kesimpulan yang ditarik dari hasil pengujian pada proyek ini, serta saran dari penulis untuk penelitian dan pengembangan selanjutnya.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **21 Penelitian Terdahulu**

Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang melatar belakangi dalam merumuskan masalah, serta penelitian yang terkait dengan sistem kendali lengan robot dengan menggunakan beberapa metode. Adapun beberapa diantaranya adalah penelitian berikut:

Indar Sugiarto (2008), yang berjudul “Pemodelan dan Simulasi Dinamika Lengan Robot 3-DOF Menggunakan Perangkat Lunak Open Source”. Penelitian ini membahas tentang metode alternatif untuk menganalisa sebuah lengan robot 3-DoF dengan menggunakan perangkat lunak *open source* yang disebut ODE (*open dynamic engine*). Pada penelitian ini menggunakan robot *Movemaster EX RV-M1* dari *mitsubishi*[7].

Bryan Novega Whildan Bimantaka, dkk (2014), yang berjudul “Purwarupa Robot Lengan Pemilah Objek Berdasarkan Label Tulisan Secara Realtime”. Pada penelitian ini membahas tentang sistem kendali lengan robot 4-DoF dengan *webcam* sebagai sensornya, sistem yang diimplementasikan pada lengan robot ini adalah *Forward Kinematic*, untuk pengolahan citra menggunakan pustaka *OpenCV*. Robot lengan ini akan mencari objek berupa bola, kubus atau kaleng yang tampak dalam jangkauannya[8].

Uray Ristian, dkk (2013), yang berjudul “VISUALISASI DAN PENGENDALIAN GERAK ROBOT LENGAN 4 DOF MENGGUNAKAN VISUAL BASIC”. Pada penelitian ini membahas tentang pengendalian robot 4-DoF dengan menggunakan perangkat lunak berbasis visualisasi *Visual Basic*. Pergerakan robot lengan akan sesuai dengan gerak robot aslinya. Pada penelitian ini, lengan robot diimplementasikan dengan metode *Forward Kinematic* untuk menentukan *end-effector*-nya[9].

Rofiq Cahyo Prayogo, dkk (2018), yang berjudul “PERANCANGAN ROBOT BERKAKI 4 (QUADRUPED) DENGAN STABILIZATION ALGORITHM PADA UNEVEN FLOOR MENGGUNAKAN 6-DOF IMU

BERBASIS *FORWARD KINEMATIC*”. Pada penelitian ini membahas tentang pengimplementasian *Forward Kinematic* pada robot berkaki 4 (*quadruped*) dengan jumlah sendi 6-DoF. Penelitian ini dilakukan perancangan dan pembuatan algoritma stabilisasi pada *uneven floor* dengan sensor 6 DoF IMU MPU 6050[10].

## 22 Sistem Kendali

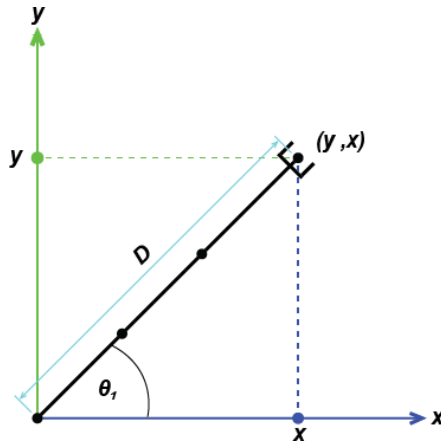
Sistem Kendali adalah kumpulan dari beberapa komponen yang dihubungkan bersama untuk mencapai suatu tujuan tertentu, yaitu pengendalian atau pengelolaan suatu sistem. Sistem kendali dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu sistem kontrol loop terbuka dan sistem kontrol loop tertutup. Pada penelitian ini, sistem kendali digunakan untuk melakukan pengontrolan terhadap panel surya berdasarkan rotasi matahari, sehingga akan memperoleh hasil maksimal dalam penyerapan energinya[11].

## 23 *Forward Kinematic*

Untuk menentukan posisi akurat *end-effector* dari lengan robot ke posisi tertentu, maka diperlukan sebuah metode *Forward Kinematic* untuk menunjang pergerakan lengan robot. *Forward Kinematic* adalah analisis *Kinematic* untuk mendapatkan sudut-sudut untuk setiap sendi lengan robot, dengan memberikan koordinat posisi (x,y,z). Hasil keluaran dari metode *Invers Kinematic* berupa sudut yang disalurkan ke sendi (*link*) pada lengan robot[10].

Sebagai contoh, dalam robot bahu-siku-telapak tangan (manipulator), invers kinematik dapat digunakan untuk mencari gerakan yang diperlukan oleh masing-masing joint agar tangan robot dapat mencapai titik tujuan yang ditentukan. *Forward kinematik* juga dapat digunakan untuk mencari gerakan yang diperlukan oleh sekumpulan joint dalam robot beroda agar dapat mengikuti jalur yang ditentukan.

Untuk perhitungan matematis dari *Forward Kinematic* lengan robot dimulai dengan melihat posisi lengan robot tampak dari atas yaitu pada sumbu (z,x). Pada posisi tampak atas ini menunjukkan panjang bentangan lurus lengan dari sumbu sampai ke *end-effector*, untuk sudut putar dari lengan robot disimbolkan dengan ( $\theta_1$ ), untuk mencari sudut putar ini, maka harus ditentukan koordinat x dan z-nya, dan akan mendapatkan panjang bentangan dari lengan. Untuk memperjelas pembahasan ditunjukkan pada **Gambar 2.1** berikut.



**Gambar 2.1** Tampak Atas Lengan Robot, atau Bidang Koordinat (x,z).

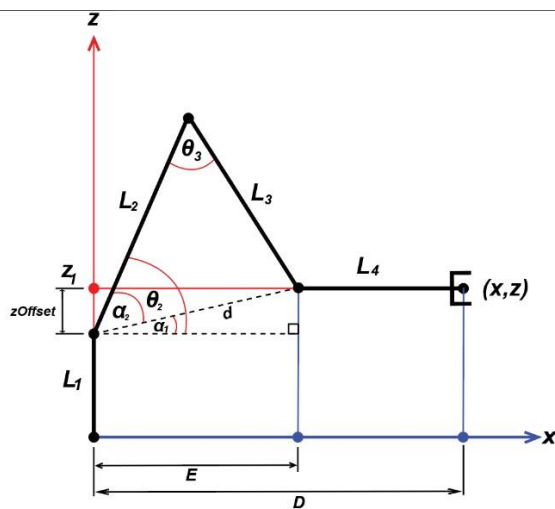
Untuk mendapatkan panjang bentangan ( $D$ ) dan besar sudut ( $\theta_1$ ), maka dapat dilakukan dengan menggunakan rumus perhitungan berikut:

$$D = \sqrt{(x)^2 + (y)^2} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dengan menggunakan fungsi inverse, maka ( $\theta_1$ ) dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left( \frac{y}{x} \right) \dots\dots\dots (2.2)$$

Setelah sudut putar ( $\theta_1$ ) didapat, kemudian melakukan perhitungan sudut putar ( $\theta_2$ ), ( $\theta_3$ ) dengan memposisikan lengan robot tampak dari samping seperti ditunjukkan oleh **Gambar 2.2** berikut.



**Gambar 2.2** Tampak Samping Lengan Robot, atau Bidang Koordinat (x,z).

Pada posisi tampak samping ini, ditunjukkan sumbu z dan sumbu x, yang menampilkan sumbu-z dan sumbu horizontalnya adalah bidang permukaan, atau bidang (x, z). Koordinat target *end-effector* secara vertikal yaitu koordinat pada sumbu-z disebut z1 dan koordinat target pada sumbu horizontalnya (bidang koordinat (x, z)) adalah besarnya panjang bentangan (D), maka perhitungan *Inverse Kinematic* dengan geometri untuk menemukan besar sudut putar ( $\theta_2$ ) dan ( $\theta_3$ ) dengan menggunakan perhitungan seperti berikut:

$$E = D - L_4 \dots\dots\dots (2.3)$$

Dari **Gambar 2.2** membentuk bidang segi tiga siku-siku dengan sisi (d, E dan zOffset), dimana zOffset adalah selisih jarak antara koordinat sumbu-z *end-effector* dengan posisi sumbu gerak ke dua ( $L_1$ ).

$$zOffset = z_1 - L_1 \dots\dots\dots (2.4)$$

Dengan menggunakan aturan pythagoras dan aturan cosinus d dan  $\alpha_1$  dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$d = \sqrt{(E)^2 + (zOffset)^2} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$\frac{E}{d} = \cos(\alpha_1) \dots\dots\dots (2.6)$$

Dengan menggunakan fungsi inverse untuk mencari  $\alpha_1$ , maka persamaannya menjadi seperti berikut:

$$\alpha_1 = \cos^{-1} \left( \frac{E}{d} \right) \dots\dots\dots (2.7)$$

Dari **Gambar 2.2** membentuk bidang segi tiga siku-siku dengan sisi ( $L_2$ ,  $L_3$  dan d), dimana dengan menggunakan aturan cosinus  $\alpha_2$  dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$(L_3)^2 = (L_2)^2 + (d)^2 - 2 \times L_2 \times d \times \cos(\alpha_2) \dots\dots\dots (2.8)$$

Dengan menggunakan fungsi Inverse untuk mencari  $\alpha_2$ , maka persamaan menjadi seperti berikut:

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \left( \frac{(L_2)^2 + (d)^2 - (L_3)^2}{2 \times L_2 \times d} \right) \dots\dots\dots (2.9)$$

Selanjutnya, untuk mendapatkan besar sudut ( $\theta_2$ ) dengan menjumlahkan  $\alpha_1$  dan  $\alpha_2$ , yaitu sebagai berikut:

$$\theta_2 = \alpha_1 + \alpha_2 \dots \dots \dots (2.10)$$

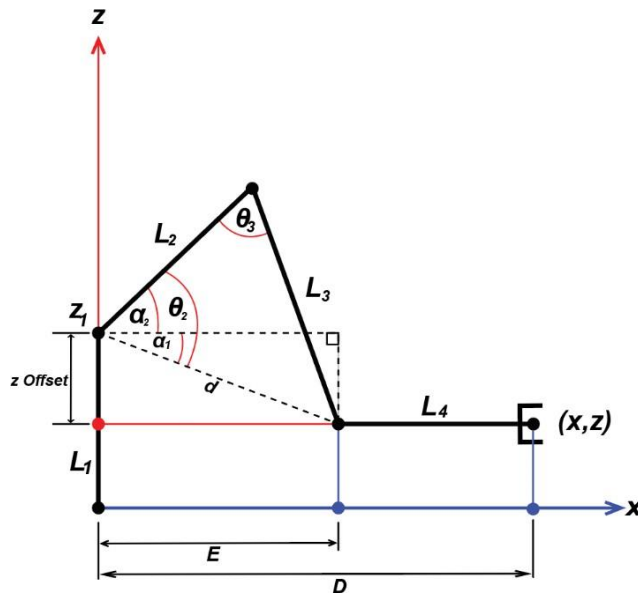
Dari **Gambar 2.2** membentuk bidang segi tiga dengan sisi ( $L_2$ ,  $L_3$  dan  $d$ ), dimana dengan menggunakan aturan cosinus dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$(d)^2 = (L_2)^2 + (L_3)^2 - 2 \times L_2 \times L_3 \times \cos(\theta_3) \dots \dots \dots (2.11)$$

Dengan menggunakan fungsi Inverse untuk mencari  $\theta_3$ , maka persamaan menjadi seperti berikut:

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left( \frac{(L_2)^2 + (L_3)^2 - (d)^2}{2 \times L_2 \times L_3} \right) \dots \dots \dots (2.12)$$

Untuk beberapa kasus jika ketinggian *end-effector* (posisi  $z_1$ ) lebih rendah dari posisi sendi 2, perhitungan  $\theta_2$  memerlukan persamaan atau metode perhitungan yang berbeda. Ditunjukkan pada **Gambar 2.3** berikut.



**Gambar 2.3** Tampak Atas Lengan Robot, atau Bidang Koordinat (x,z). Kondisi *end-effector* di bawah  $z_1$

Pada **Gambar 2.3** menunjukkan skenario gerak saat posisi sumbu-z *end-effector* di bawah posisi sendi 2 maka ada selisih jarak pada sumbu-z antara *end-*



*effector* dengan posisi sendi 2. Selisih jarak ini disimbolkan dengan  $z_{Offset}$ .

Sehingga perhitungan untuk  $\theta_2$  adalah sebagai berikut:

$$\theta_2 = \alpha_2 - \alpha_1 \dots \dots \dots (2.13)$$

Untuk menghitung  $\alpha_1$  masih menggunakan prinsip aturan pythagoras dan aturan cosinus pada segitiga siku-siku yang sama seperti pada persamaan (7) sebelumnya. Perhitungan  $\alpha_2$  menggunakan prinsip cosinus yang sama seperti pada persamaan (9) sebelumnya.

Pada model Lengan Robot U-Arm ini, untuk sudut putar ( $\theta_4$ ) diabaikan karena ( $L_4$ ) selalu lurus vertikal dan sudut tidak berubah.

## 24 Robot

Robot adalah sebuah alat mekanik yang dapat melakukan tugas fisik secara berulang-ulang dengan kontrol secara otomatis maupun dengan pengawasan manusia. Robot dapat melakukan pekerjaan sesuai program yang telah dibuat. Robot berasal dari kata “robota” yang dalam bahasa Ceko berarti budak, pekerja, atau kuli. Pertama kali kata “robota” diperkenalkan oleh Karel Caper dalam sebuah pentas sandiwara pada tahun 1921 yang berjudul RUR (Rossum’s Universal Robots) pentas ini mengisahkan mesin yang menyerupai manusia yang dapat bekerja tanpa lelah yang kemudian memberontak dan menguasai manusia[5].

### 2.4.1 Robot Lengan (Robot Manipulator)

Robot manipulator atau robot lengan merupakan rangkaian dari lengan mekanik yang terhubung oleh sendi (*link*), sendi pada lengan robot berfungsi sebagai sistem gerak pada robot, jumlah sendi dari lengan robot disebut juga dengan derajat kebebasan (*Degree of Freedom*)[2]. Robot manipulator pada dasarnya terdiri dari : Tangan Mekanik (*Mechanical Arm*) tersusun dari beberapa bagian (*Base, Shoulder, Elbow*), *End-effector* merupakan ujung dari lengan robot yang terdapat sistem mekanik pencengkram (*Gripper*), Penggerak (*Actuator*) merupakan sistem penggerak robot yang dapat berupa Motor Servo, Sensor berfungsi sebagai masukan umpan balik pada proses pengendalian lengan robot[3]. Secara umum lengan robot merupakan alat mekanik yang dapat melakukan pekerjaan secara presisi, cepat dan dapat melakukan tugas secara berulang-ulang.



**Gambar 2.4** Lengan Robot U-Arm

## **25 Hardware yang digunakan**

### **2.5.1 Arduino UNO R3**

Arduino UNO R3 merupakan board mikrokontroler yang berbasis Atmega328. Arduino UNO memiliki 14 pin *input* dan *output* digital dimana diantaranya terdapat 6 pin PWM, serta terdapat 6 pin *output* analog, 16 MHz osilator kristal, koneksi USB, jack power, ICSP header, dan tombol reset[12]. ATmega328 pada Arduino Uno hadir dengan sebuah bootloader yang memungkinkan kita untuk mengupload kode baru ke ATmega328 tanpa menggunakan pemrogram *hardware* eksternal[13].



**Gambar 2.5** Arduino UNO R3

### 2.5.2 Motor Servo

Motor servo adalah jenis motor yang digunakan sebagai penggerak pada sistem servo (servosystem) seperti pada penggerak pada kontrol posisi lengan robot. Motor servo secara struktur mesin listrik ada 2 macam : dc servo motor dan ac servo motor. DC Servo motor mempunyai konstruksi yang sama dengan konstruksi motor dc. Dalam motor dc konvensional sikat dan cincin belah merupakan suatu kerugian. Karena ada gesekan antara sikat dan cincin maka akan terjadi rugi gesek, timbulnya percikan api dan terkikisnya sikat arang maupun cincin. Maka mulai dipikirkan Motor dc tanpa sikat atau disebut *Brushless DC Motor*. *Brushless DC Motor* dapat diwujudkan dengan menggunakan prinsip kerja motor induksi 3 fasa (tanpa sikat dan cincin). Dengan menambahkan komponen permanent magnet, electronic inverter (yang menimbulkan medan putar) dan position control (umumnya menggunakan sensor efek Hall), maka akan didapatkan motor dc brushless. Jadi disini rangkaian inverter dan kontrol posisi berfungsi sebagai pengganti komutator mekanik (sikat & cincin belah) dalam membalik medan. Motor dc brushless ini mempunyai karakteristik yang mendekati dc motor konvensional. Untuk mengerti cara kerja Motor Servo DC Magnet Permanen haruslah dimengerti bagaimana prinsip kerja Motor DC Magnet Permanen, Motor DC tanpa sikat dan medan putar[6].



**Gambar 2.6** Motor Servo MG995

### 2.5.3 *Push Button*

*Push button switch* (saklar tombol tekan) adalah perangkat / saklar sederhana yang berfungsi untuk menghubungkan atau memutuskan aliran arus listrik dengan sistem kerja tekan unlock (tidak mengunci). Sistem kerja unlock disini berarti saklar akan bekerja sebagai *device* penghubung atau pemutus aliran arus listrik saat tombol ditekan, dan saat tombol tidak ditekan (dilepas), maka saklar akan kembali pada kondisi normal. Sebagai *device* penghubung atau pemutus, *push button switch* hanya memiliki 2 kondisi, yaitu *On* dan *Off* (1 dan 0). Istilah *On* dan *Off* ini menjadi sangat penting karena semua perangkat listrik yang memerlukan sumber energi listrik pasti membutuhkan kondisi *On* dan *Off*[14].



**Gambar 2.7** *Tactical Push Button*

### 2.5.4 *Step-Down LM2596*

*Step-Down LM2596* adalah modul *step-down* DC ke DC yang berbasis IC LM2596, berfungsi untuk menurunkan tegangan yang tinggi ke tegangan yang rendah. Modul ini dapat menurunkan tegangan *input* 4-40V ke 1.3-37V DC dengan arus maksimum 2A[15].

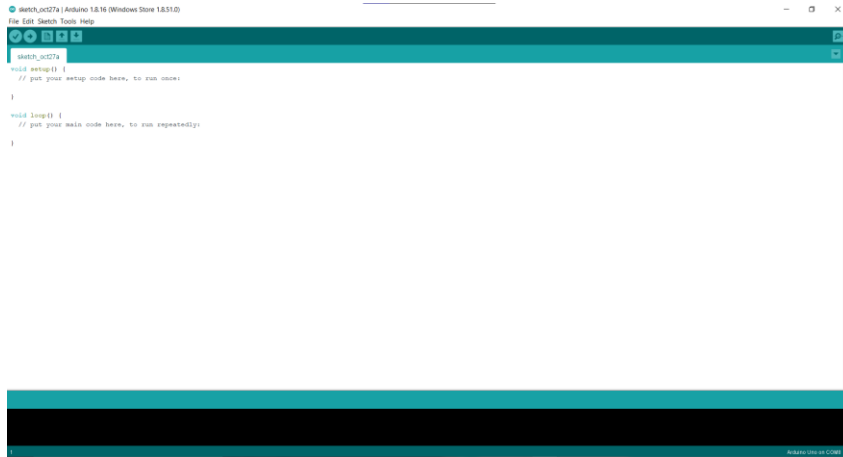


**Gambar 2.8** Modul *Step-Down* LM2596

## **2.6 Software yang digunakan**

### **2.6.1 Arduino IDE**

IDE (*Integrated Development Environment*) merupakan lingkungan terintegrasi yang digunakan untuk melakukan pengembangan. Disebut sebagai lingkungan karena melalui *software* inilah arduino dilakukan pemrograman untuk melakukan fungsifungsi yang dibenamkan melalui sintaks pemrograman. *Arduino* menggunakan bahasa pemrograman sendiri yang menyerupai bahasa C. Bahasa pemrograman *arduino* (*Sketch*) sudah dilakukan perubahan untuk memudahkan pemula dalam melakukan pemrograman dari bahasa aslinya. Sebelum dijual ke pasaran, IC mikrokontroler arduino telah ditanamkan suatu program bernama *Bootlader* yang berfungsi sebagai penengah antara *compiler arduino* dengan mikrokontroler. Arduino IDE dibuat dari bahasa pemrograman JAVA. *Arduino* IDE juga dilengkapi dengan *library* C/C++ yang biasa disebut *Wiring* yang membuat operasi *input* dan *output* menjadi lebih mudah. *Arduino* IDE ini dikembangkan dari *software Processing* yang dirombak menjadi *Arduino* IDE khusus untuk pemrograman dengan arduino[16].



**Gambar 2.9** Tampilan Arduino IDE

## BAB III

### PERANCANGAN SISTEM

#### 3.1 Rekayasa Kebutuhan

Agar alat dapat berfungsi sesuai dengan tujuan yang diinginkan, diperlukan beberapa syarat untuk merancang sistem perangkat lunak kendali lengan robot dengan metode *Forward Kinematic*. Syarat-syarat tersebut melibatkan kebutuhan fungsional perangkat lunak, kebutuhan perangkat keras, dan kebutuhan perangkat lunak.

##### 3.1.1 Kebutuhan Fungsional Sistem

Persyaratan fungsional sistem merujuk pada kebutuhan yang harus ada dalam sistem untuk memenuhi tujuan aslinya dan memberikan pelayanan yang sesuai kepada pengguna. Kebutuhan fungsional ini harus terpenuhi agar sistem dapat beroperasi secara efektif, khususnya dalam mengendalikan lengan robot menggunakan motor servo. Fungsi ini mengharuskan sistem mampu mengontrol motor servo sesuai dengan input  $x, y, z$  menggunakan metode *Forward Kinematic*.

##### 3.1.2 Kebutuhan Perangkat Keras

Kebutuhan perangkat keras pada sistem ini terdiri sebagai berikut beserta penjelasannya pada **Tabel 3.1** di bawah ini.

**Tabel 3.1** Kebutuhan Perangkat Keras

Kebutuhan Perangkat Keras	Fungsi
Arduino UNO	Mengonversi data $x, y, z$ menjadi <i>output</i> dalam bentuk sudut menggunakan metode <i>Forward Kinematic</i> .
Motor Servo MG995	Mengendalikan pergerakan lengan robot sesuai dengan sudut keluaran yang berasal dari Arduino UNO.
Motor Servo MG90S	Menggerakkan <i>gripper linear</i> lengan robot.
<i>Push Button</i>	Untuk memberikan masukan pergerakan lengan robot.

Laptop

Melakukan pemrograman pada Arduino dengan menggunakan software Arduino IDE.

### 3.4.1 Kebutuhan Perangkat Lunak

Kebutuhan perangkat lunak pada sistem ini terdiri sebagai berikut beserta penjelasannya pada **Tabel 3.2** dibawah ini.

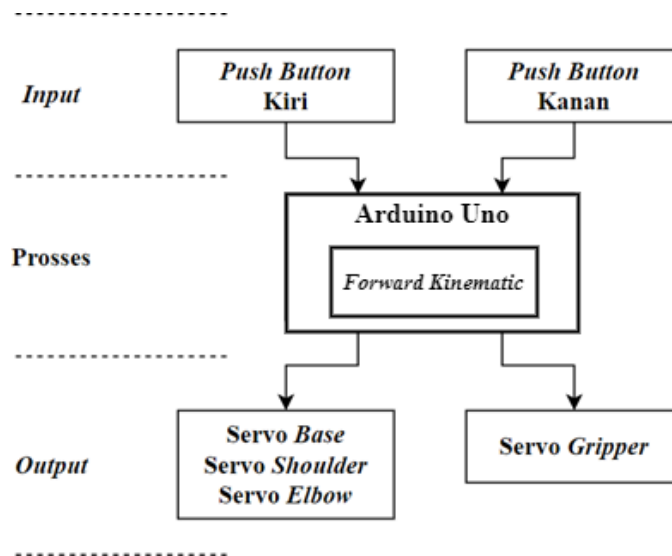
**Tabel 3.2** Kebutuhan Perangkat Lunak

<b>Kebutuhan Perangkat Lunak</b>	<b>Fungsi</b>
Arduino IDE	Sebagai perangkat lunak untuk pembuatan dan pengisian program ke dalam papan Arduino UNO.
<i>Forward Kinematic</i>	Sebagai metode untuk menentukan posisi <i>end-effector</i> dari lengan robot.
<i>Library &lt;Servo.h&gt;</i>	Untuk mengendalikan motor servo.

## 32 Perancangan Alat

Sistem yang dikonstruksi adalah suatu sistem yang mampu mengontrol pergerakan lengan robot untuk memindahkan kaleng dari posisi tengah ke posisi kiri dan dari posisi tengah ke posisi kanan dengan menggunakan tombol pendorong (*push button*) menggunakan metode *Forward Kinematic*. Selanjutnya, hasil keluaran yang dihasilkan memungkinkan pemindahan kaleng sesuai dengan tombol pendorong yang ditekan. Diagram alur keseluruhan sistem dapat ditemukan dalam **Gambar 3.1.**





**Gambar 3.1** Diagram Rangkaian Alat

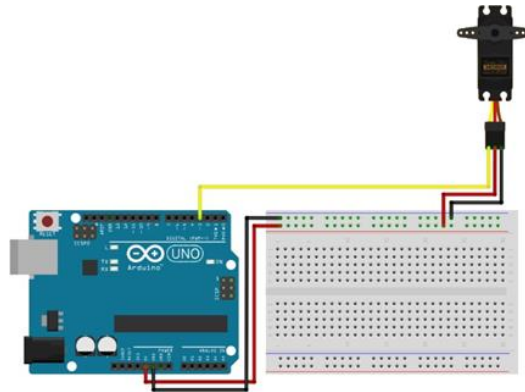
Dari diagram alur pada **Gambar 3.1** di atas, terlihat bahwa alat ini melibatkan tiga tahapan proses, yakni *Input*, Proses (*Forward Kinematic*), dan *Output*. Pada tahap *Input*, terdapat dua tombol kondisi untuk mengontrol posisi lengan robot, yaitu tombol kanan dan tombol kiri. Kedua tombol tersebut berfungsi untuk menentukan posisi lengan robot, apakah akan ke kanan atau ke kiri. Selanjutnya, pada tahap proses, *input* dari tombol akan diolah oleh Arduino Uno menggunakan metode *Forward Kinematic* untuk mengubah data masukan  $x$ ,  $y$ ,  $z$  menjadi *output* berupa sudut sesuai dengan input tombol pada tahap *Input*. Pada tahap *Output*, hasil dari proses *Forward Kinematic* di Arduino UNO akan menghasilkan sudut yang diperlukan untuk menggerakkan motor servo pada lengan robot. Jika tombol kanan ditekan, sudut yang dihasilkan akan menggerakkan lengan robot ke kanan, dan gripper akan menggenggam kaleng. Selanjutnya, lengan robot akan memindahkan kaleng ke posisi awal. Sebaliknya, jika tombol kiri ditekan, sudut yang dihasilkan akan menggerakkan lengan robot ke kiri, *gripper* akan menggenggam kaleng, dan lengan robot akan memindahkan kaleng ke posisi awal lengan robot.

### 33 Perancangan Perangkat Keras (*Hardware*)

Pengembangan perangkat keras dalam proyek ini dilakukan secara berurutan, mulai dari empat motor servo hingga dua tombol pendorong, hingga membentuk keseluruhan rangkaian alat.

#### 3.3.1 Perancangan Perangkat Keras Servo Base

**Gambar 3.2** berikut menampilkan skema rangkaian dasar motor servo (*base*) pada lengan robot, yang digunakan untuk menggerakkan lengan robot ke arah kanan dan kiri dengan memanfaatkan pustaka Servo.h. Rentang pergerakan motor servo ini mencakup sudut putar sebesar 180 derajat.



**Gambar 3.2** Skema Rangkaian Servo *Base*

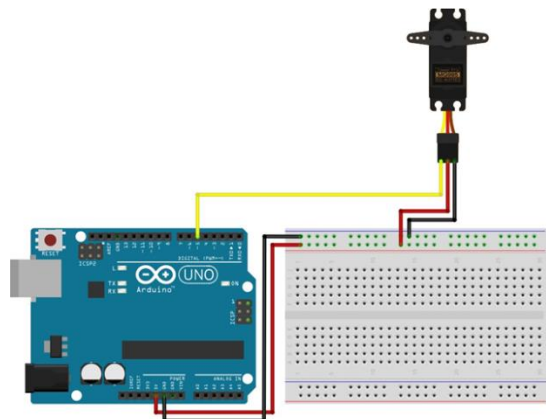
Adapun konfigurasi pin dari rangkaian diatas ditunjukkan pada **Tabel 3.3**.

**Tabel 3.3** Konfigurasi Pin Servo *Base*

Arduino UNO	Servo MG995
Pin ~3	OUT
5V	VCC
GND	GND

### 3.3.2 Perancangan Perangkat Keras Servo *Shoulder*

**Gambar 3.3** menggambarkan skema rangkaian dasar motor servo pada lengan bawah (*shoulder*) lengan robot. Rangkaian ini berfungsi untuk menggerakkan lengan robot ke depan dan ke belakang dengan memanfaatkan pustaka *Servo.h*.



**Gambar 3.3** Skema Rangkaian Servo *Shoulder*

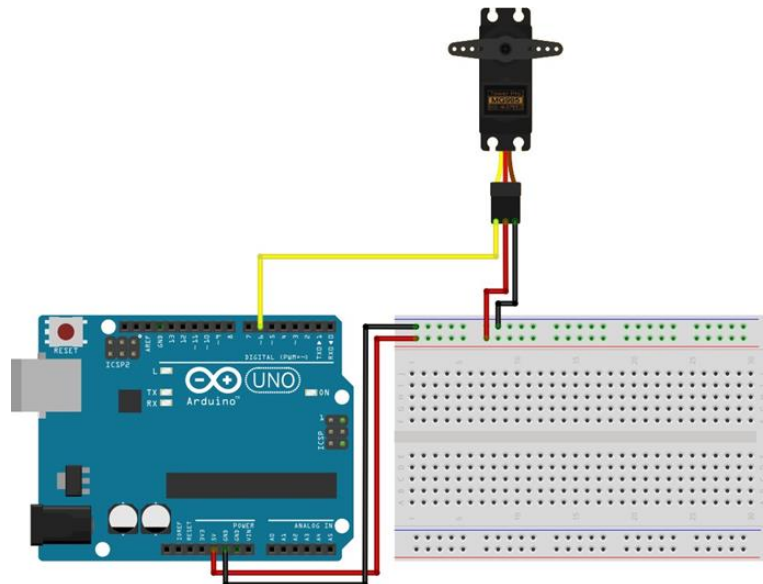
Adapun konfigurasi pin dari rangkaian diatas ditunjukkan pada **Tabel 3.4**.

**Tabel 3.4** Konfigurasi Pin Servo *Shoulder*

Arduino UNO	Servo MG995
Pin ~5	OUT
5V	VCC
GND	GND

### 3.3.3 Perancangan Perangkat Keras Servo *Elbow*

Ini adalah **Gambar 3.4** yang menggambarkan susunan skematik dari motor servo untuk mengontrol pergerakan naik-turun pada lengan robot. Pada gambar tersebut, digunakan *library* Servo.h untuk mengatur gerakan motor servo pada siku lengan atas robot.



**Gambar 3.4** Skema Rangkaian Servo *Elbow*

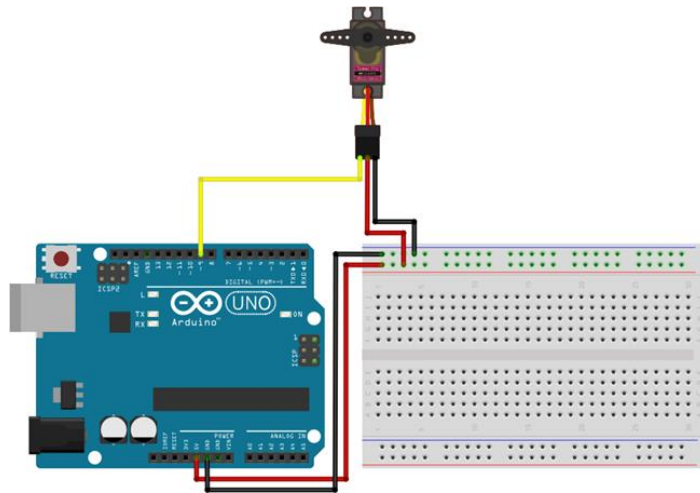
Adapun konfigurasi pin dari rangkaian diatas ditunjukkan pada **Tabel 3.5**.

**Tabel 3.5** Konfigurasi Pin Servo *Elbow*

Arduino UNO	Servo MG995
Pin ~6	OUT
5V	VCC
GND	GND

### 3.3.4 Perancangan Perangkat Keras *Servo Gripper*

Ini adalah **Gambar 3.5** yang menggambarkan susunan skematik dari motor servo pencengkram pada lengan robot. Tujuannya adalah untuk menggenggam kaleng dengan menggunakan *library Servo.h*. Sudut putar dari servo pencengkram adalah 180 derajat. Saat dalam kondisi mencengkram, servo akan berputar sebesar 110 derajat, dan ketika dalam kondisi terbuka, servo akan kembali ke posisi 0 derajat.



**Gambar 3.5** Rangkaian Skema *Servo Gripper*

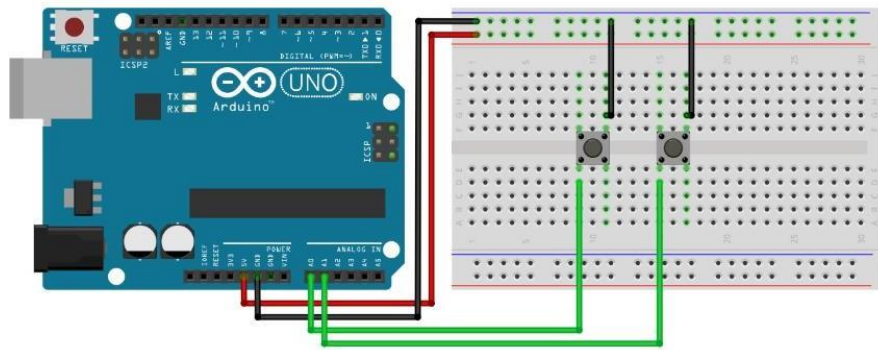
Adapun konfigurasi pin dari rangkaian diatas ditunjukkan pada **Tabel 3.6**.

**Tabel 3.6** Konfigurasi Pin *Servo Gripper*

Arduino UNO	Servo MG90S
Pin ~9	OUT
5V	VCC
GND	GND

### 3.3.5 Perancangan Perangkat Keras *Push Button*

Ini adalah **Gambar 3.6** yang menggambarkan susunan skematik dari rangkaian tombol tekan pada lengan robot untuk memberikan input pada Arduino UNO.



**Gambar 3.6** Skema Rangkaian *Push Button*

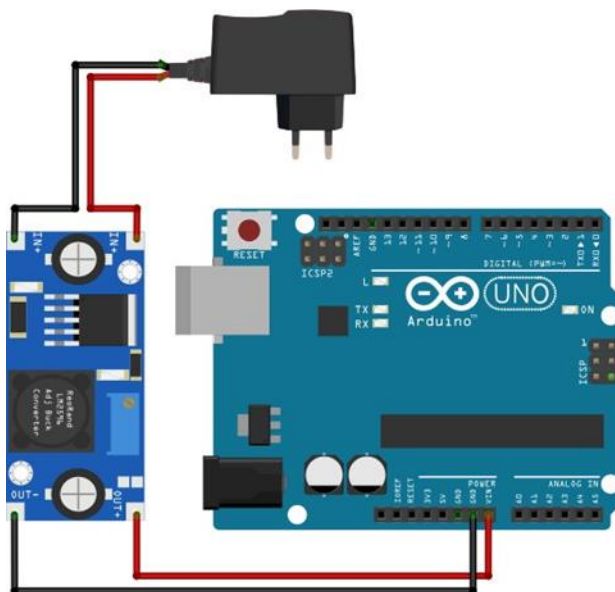
Adapun konfigurasi pin dari rangkaian diatas ditunjukkan pada **Tabel 3.7**.

**Tabel 3.7** Konfigurasi Pin *Push Button*

<u>Arduino UNO</u>	<u>Push button kiri</u>	<u>Push button kanan</u>
A0	OUT	-
A1	-	OUT
5V	VCC	VCC
GND	GND	GND

### 3.3.6 Perancangan Perangkat Keras Servo *Step-Down LM2596*

Ini adalah **Gambar 3.7** yang menggambarkan susunan skematik dari rangkaian penurun tegangan *Step-Down LM2596* pada lengan robot. Fungsinya adalah menurunkan tegangan yang masuk ke Arduino UNO.



**Gambar 3.7** Skema Rangkaian *Step-Down LM2596*

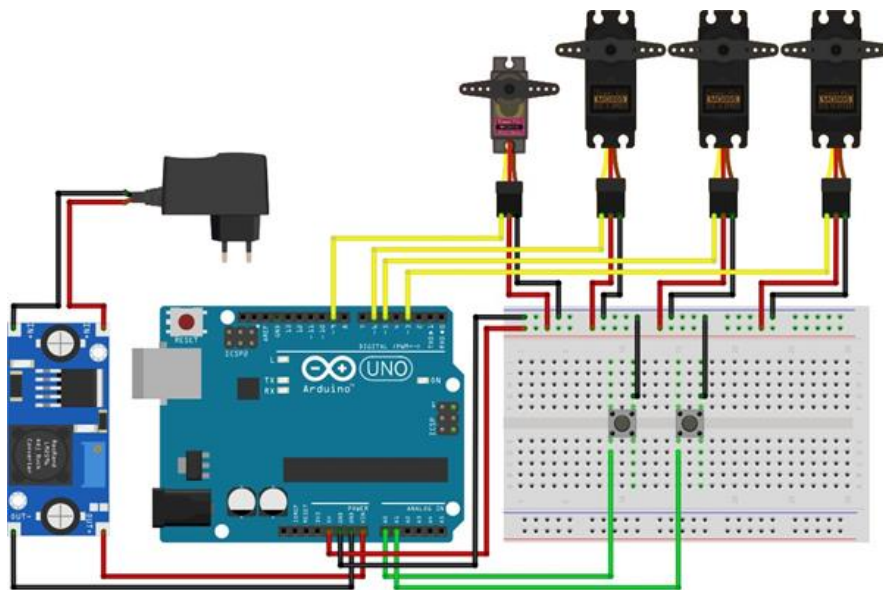
Adapun konfigurasi pin dari rangkaian diatas ditunjukkan pada **Tabel 3.8**.

**Tabel 3.8** Konfigurasi pin LM2596

Arduino UNO	LM2596	Catu Daya
Vin	OUT+	-
GND	OUT-	-
-	IN+	VCC
-	IN-	GND

### 3.3.7 Perancangan Keseluruhan *Hardware*

Pada **Gambar 3.8**, terdapat skema keseluruhan dari perancangan perangkat keras yang terdiri dari beberapa komponen beserta fungsinya. Servo *Base* bertanggung jawab untuk menggerakkan lengan robot secara *horizontal* ke kiri dan ke kanan, servo *shoulder* bertugas untuk menggerakkan lengan robot maju dan mundur, servo *elbow* mengendalikan pergerakan lengan robot naik dan turun, dan servo *gripper* mengontrol cengkraman untuk menangkap kaleng. Semua komponen ini diatur oleh *mikrokontroler* Arduino UNO dengan menggunakan perhitungan *Forward Kinematic*.



**Gambar 3.8** Skema Rangkaian keseluruhan *Hardware*

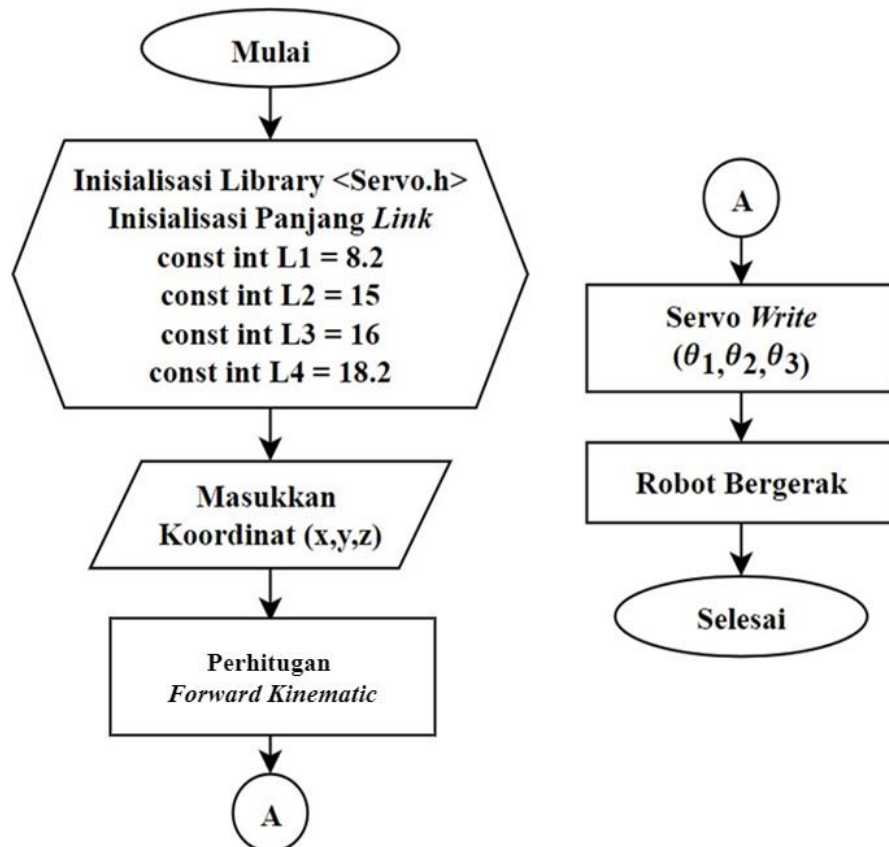
Jika tombol tekan ini dipencet, program akan mengirimkan input berupa koordinat tujuan *end-effector* ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Selanjutnya, pada program perhitungan *Forward Kinematik*, nilai-nilai tersebut akan diolah, menghasilkan *output* berupa sudut untuk ketiga sendi. Sudut ini kemudian digunakan untuk mengendalikan pergerakan lengan robot.

### 3.4 Perancangan Perangkat Lunak (*Software*)

Dalam pengembangan perangkat lunak (*Software*) pada proyek ini, program dibuat dengan menerapkan metode *Forward Kinematik* untuk menentukan posisi ujung *gripper* atau *end-effector*. Proses penerapan metode *Forward Kinematik* ke dalam program Arduino melibatkan perhitungan matematika untuk mengubah *input* koordinat menjadi *output* sudut. Setelah perhitungan dan rumus matematika ditemukan, langkah selanjutnya adalah mentranslasikan mereka ke dalam kode program Arduino UNO. Setelahnya, Arduino mengirimkan sinyal sudut kepada motor servo pada lengan robot.

#### 3.4.1 Perancangan Perangkat Lunak Sistem Kendali Motor *Servo Base*, *Shoulder* dan *Elbow* dengan Perhitungan *Forward Kinematic*

Software untuk mengendalikan motor servo dirancang dengan memanfaatkan *library* *Servo.h* untuk mengatur derajat keluaran motor servo. Derajat keluaran ini dihasilkan dari perhitungan *Forward Kinematik* pada ketiga sendi robot, dengan input berupa sudut ( $x, y, z$ ), atau posisi ujung dari *end-effector* lengan robot. *Flowchart* dari program sistem kontrol motor servo dapat dilihat pada **Gambar 3.9**.

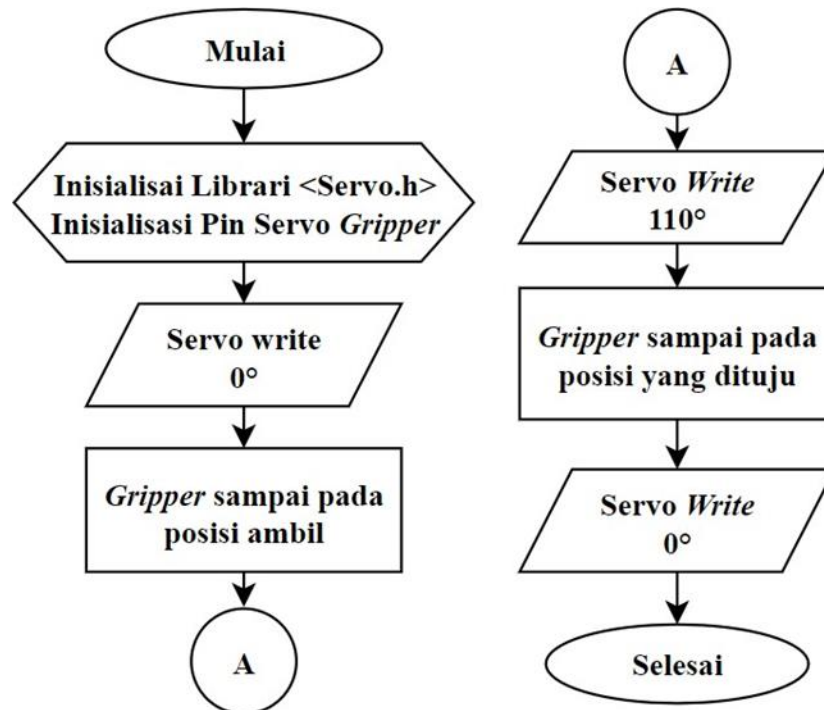


**Gambar 3.9** *Flowchart* Sistem kendali motor servo dengan *Forward Kinematic*

Program dimulai dengan menginisialisasi *library* servo, melakukan inisialisasi *variabel* dan pin motor servo pada papan Arduino UNO, dan menetapkan panjang setiap *link* lengan robot pada *variabel const* int. Selanjutnya, program memasukkan koordinat tujuan *end-effector* (x, y, z) untuk dihitung menggunakan metode *Forward Kinematik*. Setelah proses *Forward Kinematc* selesai, program akan memperoleh nilai sudut  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ . Kemudian, nilai-nilai sudut ini dialirkan ke masing-masing sendi robot untuk menggerakkan lengan robot sesuai dengan koordinat (x, y, z) yang di-input.

### 3.4.2 Perancangan Perangkat Lunak Sistem Kendali Motor Servo Gripper Lengan Robot

Software untuk mengendalikan motor servo dirancang menggunakan *library* Servo.h untuk mengontrol derajat keluaran motor servo. *Flowchart* dari program sistem kendali motor servo dapat dilihat pada **Gambar 3.10**.



**Gambar 3.10** Flowchart sistem kendali motor servo Gripper

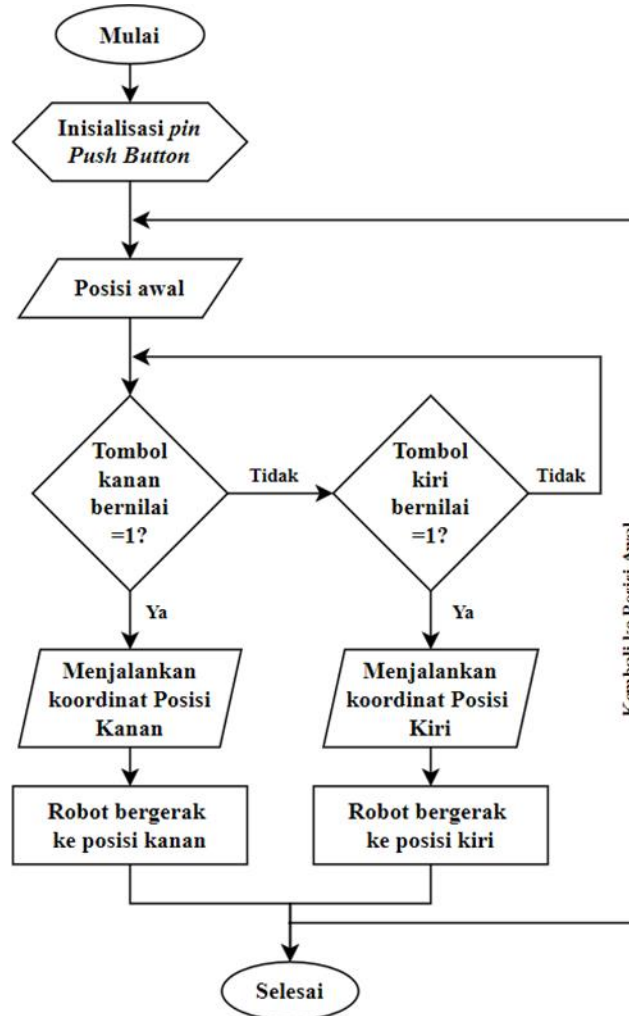
Program pengendalian *gripper* dimulai dengan menginisialisasi *library* servo, melakukan inisialisasi pin motor servo pada papan Arduino UNO, dan menetapkan nilai awal 0 pada *Gripper*, menunjukkan bahwa *gripper* berada dalam kondisi terbuka. Selanjutnya, ketika *gripper* atau *end-effector* mencapai posisi pengambilan, servo akan diatur ke posisi 150 derajat, menandakan bahwa *gripper* sedang dalam kondisi menutup atau mencapit kaleng. Setelah mencapai posisi yang



diinginkan, servo akan membuka cengkeraman gripper terhadap kaleng.

### 3.4.3 Perancangan Perangkat Lunak *Push Button*

Perancangan perangkat lunak tombol tekan dilakukan untuk memberikan koordinat (x, y, z) untuk posisi kanan dan kiri. *Flowchart* dari program tombol tekan dapat dilihat pada **Gambar 3.11**.



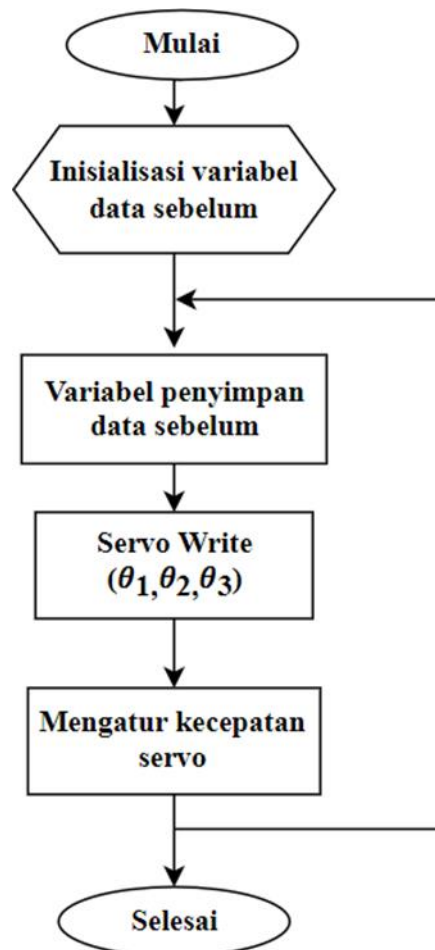
**Gambar 3.11** *Flowchart* program *push button*

Perancangan dimulai dengan menginisialisasi pin *Push Button* pada papan Arduino UNO dan mengatur posisi awal lengan robot. Jika tombol kanan ditekan (bernilai 1), program akan melanjutkan dengan menetapkan koordinat (x, y, z) untuk *end-effector* pada posisi kanan (40.5, 9.5, 15), dan robot akan bergerak menuju koordinat posisi kanan. Jika tombol kanan tidak ditekan (bernilai 1), program akan beralih untuk membaca tombol kiri. Jika tombol kiri ditekan (bernilai 1), program akan mengatur koordinat (x, y, z) untuk *end-effector* pada posisi kiri (9.5, 40.5, 15), dan robot akan bergerak ke koordinat posisi kiri. Jika tombol kiri tidak ditekan (bernilai 1), program akan kembali membaca tombol kanan. Setelah lengan robot

mencapai koordinat posisi yang diinginkan, program akan mengembalikan robot ke posisi awal.

### 3.4.4 Perancangan Perangkat Lunak Kecepatan Servo Lengan Robot

Perancangan perangkat lunak untuk mengontrol kecepatan servo bertujuan untuk mengatur kecepatan perpindahan sudut dari satu posisi ke posisi lainnya. Program ini menggunakan fungsi *for* ( $pos1 = \text{nilai sebelumnya}; pos1 \geq \text{nilai sekarang}; pos1 -= 1$ ) jika nilai sebelumnya lebih besar dari nilai sekarang, dan fungsi *for* ( $pos1 = \text{nilai sebelumnya}; pos1 \geq \text{nilai sekarang}; pos1 += 1$ ) jika nilai sebelumnya lebih kecil dari nilai sekarang. *Flowchart* atau alur kerjanya dapat dilihat pada **Gambar 3.12** di bawah ini.

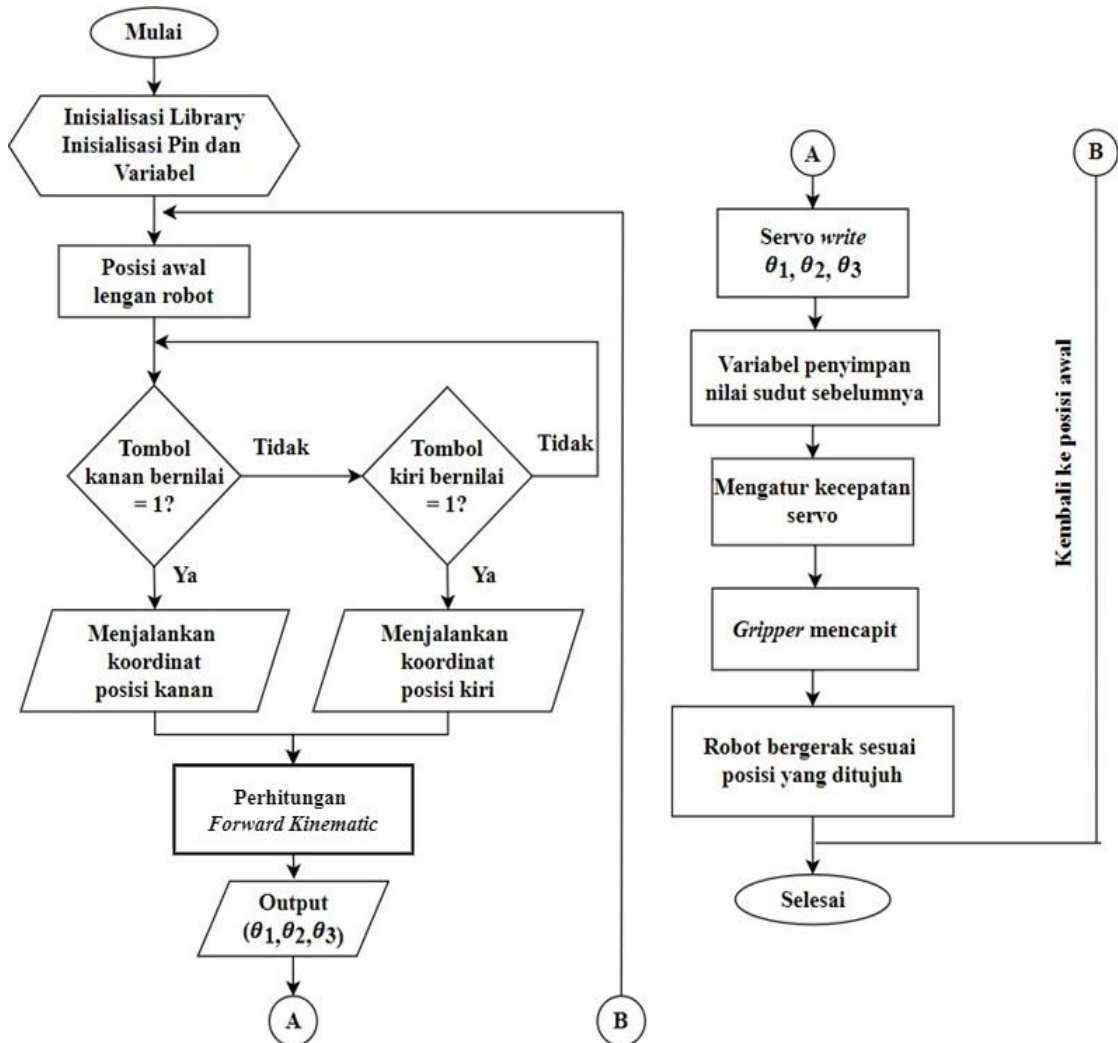


**Gambar 3.12** *Flowchart* program kecepatan lengan robot

Perancangan dimulai dengan menginisialisasi *variabel* untuk menyimpan nilai sudut sebelumnya. Setelahnya, servo bergerak dengan kecepatan yang telah diatur oleh program pengatur kecepatan. Setelah proses pergerakan selesai, program kembali ke langkah penyimpanan nilai sudut sebelumnya.

### 3.4.5 Perancangan Keseluruhan Perangkat Lunak Arduino UNO

Perancangan perangkat lunak secara keseluruhan merupakan hasil kombinasi dari beberapa tahap perancangan perangkat lunak, yang melibatkan proses inisialisasi, pembacaan *Push Button*, perhitungan *Forward Kinematic* untuk mendapatkan sudut, dan pengendalian servo *Base*, *Shoulder*, *Elbow*, serta *Gripper*. *Flowchart* lengkap dari perancangan perangkat lunak ini dapat dilihat pada **Gambar 3.13**.



**Gambar 3.13** *Flowchart* keseluruhan program Arduino UNO

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

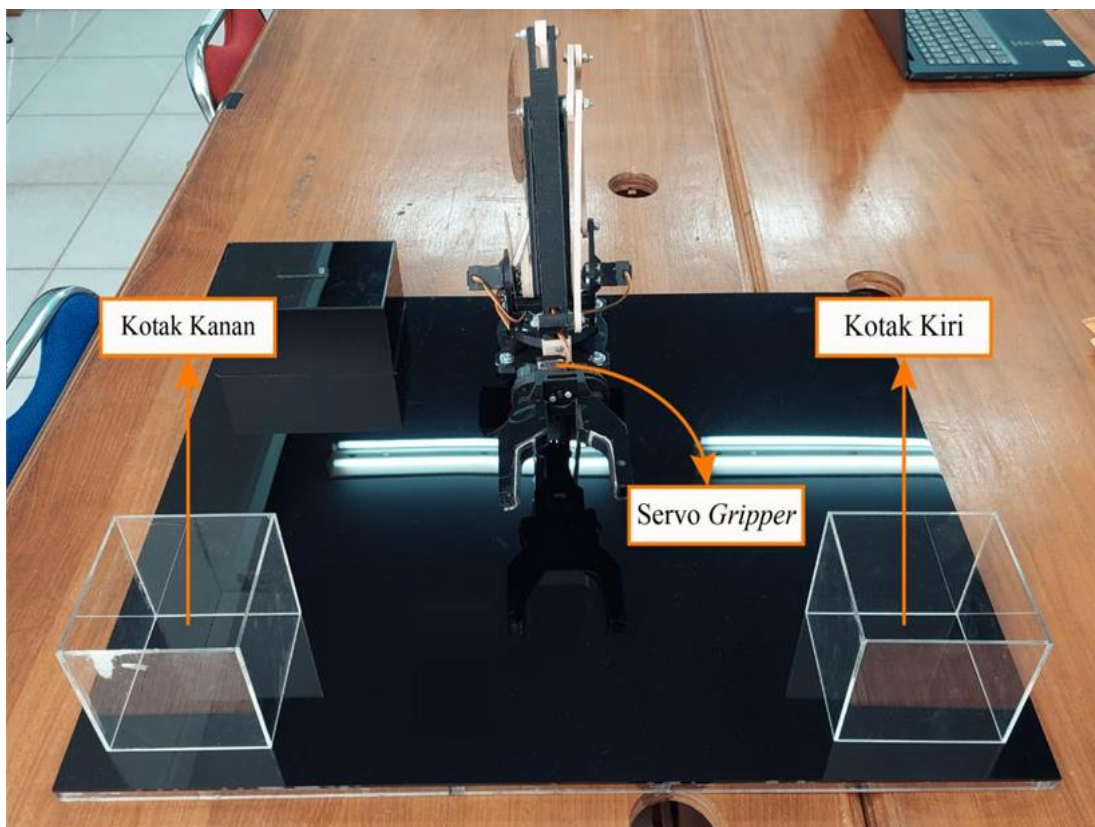
### 41 Pengujian dan Analisis

Data pengujian alat untuk proyek ini dikumpulkan di laboratorium Perangkat Keras Komputer dan Teknologi Komponen, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Sriwijaya.

Proyek ini melibatkan beberapa pengujian, antara lain pengujian motor *Servo Base*, pengujian motor *Servo Shoulder*, pengujian motor *Servo Elbow*, pengujian motor *Servo Gripper*, pengujian lengan robot tanpa menggunakan metode *Forward Kinematic*, dan pengujian lengan robot dengan menggunakan metode *Forward Kinematic*.

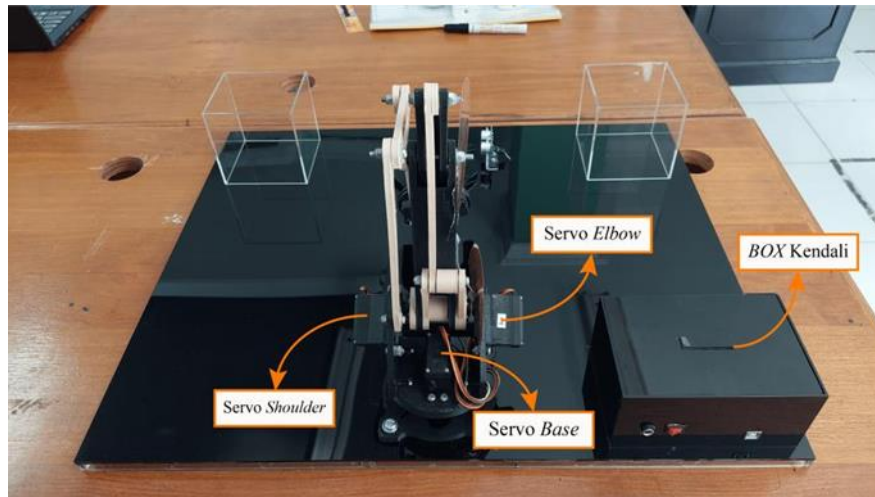
### 42 Pengujian dan Analisis

Hasil pemasangan perangkat keras dari sudut depan terdiri dari Kotak Kanan, Kotak Kiri, Servo gripper yang bertindak sebagai penggerak gripper, dan Gripper sebagai sistem mekanik penjepit pada lengan robot, seperti yang terlihat pada **Gambar 4.1** di bawah ini.



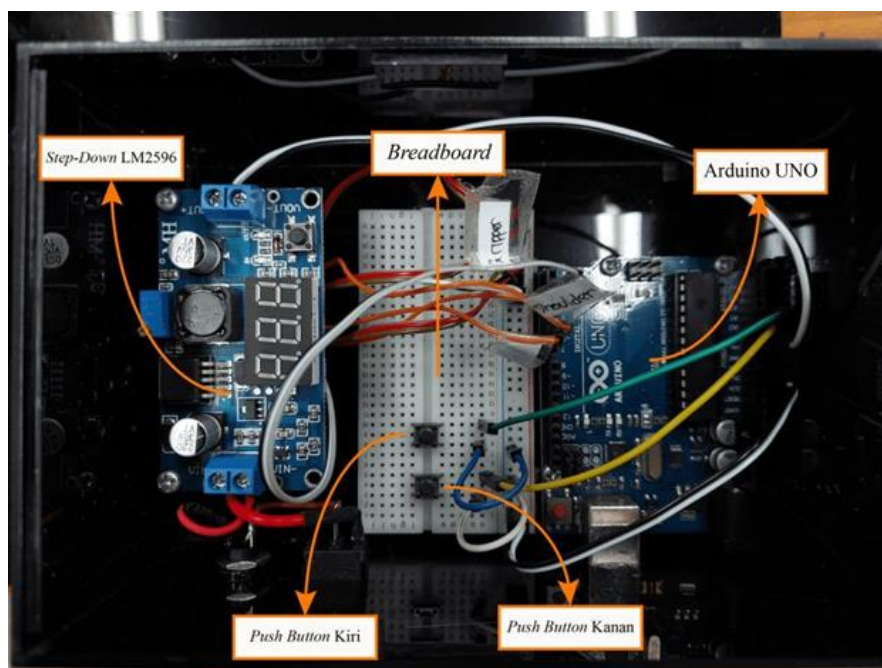
**Gambar 4.1** Lengan Robot Tampak Depan

Pada hasil pemasangan perangkat keras dari sisi belakang, terdapat Motor servo *Base* sebagai penggerak kiri dan kanan, Motor servo *Shoulder* sebagai penggerak maju dan mundur, Motor servo *Elbow* sebagai penggerak naik dan turun, serta *Box Kendali*, sebagaimana yang ditampilkan dalam **Gambar 4.2** di bawah ini.



**Gambar 4.2** Lengan Robot Tampak Belakang

Adapun komponen yang terdapat di dalam *Box Kendali* untuk mendukung gerakan lengan robot meliputi Arduino UNO sebagai mikrokontroler, *Step-Down* LM2596 untuk menurunkan tegangan ke Arduino UNO, *Push Button* Kanan dan *Push Button* Kiri sebagai input, juga *BreadBoard* dan Kabel Jumper, sebagaimana tergambar pada **Gambar 4.3** di bawah ini.



**Gambar 4.3** Tampak Di dalam *Box Kendali*

### 43 Pengujian Motor Servo *Base, Shoulder* dan *Elbow*

Pengujian motor servo dimaksudkan untuk memvalidasi presisi pengendalian motor servo dengan membandingkan nilai derajat yang dimasukkan melalui serial monitor pada Arduino IDE dengan pergerakan yang terjadi pada motor servo yang telah diukur menggunakan penggaris busur 180°.

Untuk menghitung persentase *error* pada nilai *Input* dan *Output* pada motor Servo maka ditentukan menggunakan persamaan berikut.

$$error\% = \frac{Nilai\ Input - Nilai\ Output}{Nilai\ Output} \times 100 \dots\dots\dots(4.1)$$

Adapun perhitungan rata-rata persentase kesalahan yang diperoleh dari hasil pengukuran motor Servo dihitung menggunakan rumus berikut.

$$Rata - rata\ error\% = \frac{Jumlah\ hasil\ \%error}{Banyak\ sampel\ percobaan} \dots\dots\dots(4.2)$$

#### 4.3.1 Hasil dan Analisis Pengujian Motor Servo *Base*

Proses pengambilan data pada motor servo *Base* yang tergambar pada **Gambar 4.4** adalah sebagai berikut.



**Gambar 4.4** Proses Pengujian Motor Servo *Base*

Data hasil pengujian untuk motor servo *Base* terdapat pada **Tabel 4.1** yang memperlihatkan perbandingan antara nilai derajat *Input* dan *Output* yang terukur dengan menggunakan penggaris busur.

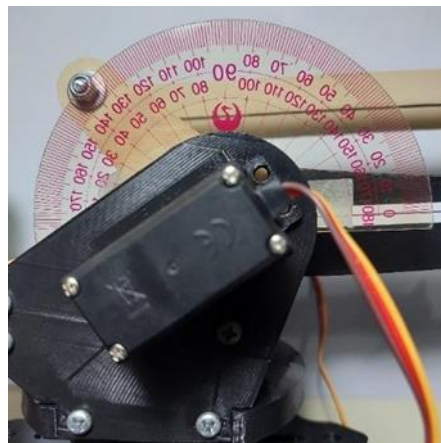
**Tabel 4. 1** Hasil Pengujian Motor Servo *Base*

No.	Derajat Motor Servo <i>Base</i>		Selisih <sup>o</sup>	Error %
	Input <sup>o</sup>	Output <sup>o</sup>		
1	0	0	0	0
2	5	6	1	16.66
3	10	11	1	9.09
4	15	15	0	0
5	20	21	1	4.76
6	25	25	0	0
7	30	30	0	0
8	35	34	1	2.94
9	40	39	1	2.56
10	45	44	1	2.27
11	50	51	1	1.96
12	55	56	1	1.78
13	60	60	0	0
14	65	65	0	0
15	70	70	0	0
16	75	76	1	1.31
17	80	81	1	1.23
18	85	85	0	0
19	90	91	1	1.09
<b>Rata-rata Error (%)</b>				<b>2.40</b>

Dari tabel hasil pengujian tersebut terlihat bahwa rata-rata kesalahan pada motor servo base relatif kecil, yaitu sebesar 2,40% jika dibandingkan dengan nilai Output.

#### 4.3.2 Hasil dan Analisis Pengujian Motor Servo *Shoulder*

Proses pengambilan data pada motor servo *Shoulder* yang digambarkan pada **Gambar 4.5** adalah sebagai berikut.



**Gambar 4.5** Proses Pengujian Motor Servo *Shoulder*

Data dari pengujian motor servo *Shoulder* terdapat pada **Tabel 4.2** yang menggambarkan perbandingan nilai *Input* dan *Output* derajat yang diukur dengan menggunakan penggaris busur.

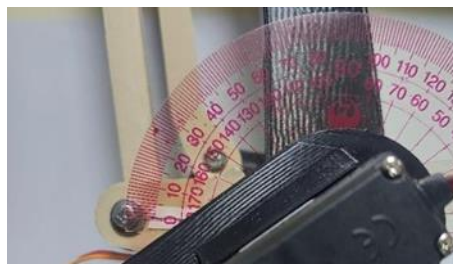
**Tabel 4.2** Hasil Pengujian Motor Servo *Shoulder*

No.	Derajat Motor Servo <i>Shoulder</i>		Selisih <sup>o</sup>	Error %
	<i>Input</i> °	<i>Output</i> °		
1	0	0	0	0
2	10	9	1	11.11
3	20	19	1	5.26
4	30	29	1	3.44
5	40	39	1	2.56
6	50	49	1	2.04
7	60	60	0	0
8	70	70	0	0
9	80	79	1	1.26
10	90	89	1	1.12
11	100	100	0	0
12	110	110	0	0
13	120	119	1	0.84
14	130	130	0	0
15	140	140	0	0
16	150	150	0	0
17	160	159	1	0.62
18	170	175	5	2.85
19	180	175	5	2.85
<b>Rata-rata Error (%)</b>				<b>1.78</b>

Tabel hasil pengujian tersebut menunjukkan bahwa rata-rata kesalahan pada motor servo *Shoulder* sangat kecil, yakni sebesar 1,78% jika dibandingkan dengan nilai *Output*.

### 4.3.3 Hasil dan Analisis Pengujian Motor Servo *Elbow*

Proses pengambilan data pada motor servo *Elbow* yang tergambar pada **Gambar 4.6** adalah sebagai berikut.



**Gambar 4.6** Proses Pengujian Motor Servo *Elbow*



Data dari hasil pengujian motor servo *Elbow* terdapat pada **Tabel 4.3** yang menggambarkan perbandingan nilai *Input* dan *Output* derajat yang diukur dengan menggunakan penggaris busur.

**Tabel 4.3** Hasil Pengujian Motor Servo *Elbow*

No.	Derajat Motor Servo <i>Shoulder</i>		Selisih <sup>o</sup>	Error %
	<i>Input</i> <sup>o</sup>	<i>Output</i> <sup>o</sup>		
1	0	0	0	0
2	10	10	0	0
3	20	19	1	5.26
4	30	29	1	3.44
5	40	39	1	2.56
6	50	50	0	0
7	60	59	1	1.69
8	70	69	1	1.50
9	80	78	2	2.56
10	90	82	8	9.75
<b>Rata-rata Error (%)</b>				<b>2.67</b>

Rata-rata kesalahan yang terlihat pada tabel hasil pengujian untuk motor servo *Elbow* adalah sebesar 2,67% jika dibandingkan dengan nilai *Output*.

#### 44 Pengujian Motor Servo *Gripper*

Pengujian motor servo *Gripper* bertujuan untuk menentukan bukaan pada capit lengan robot yang sesuai dengan sudut yang dimasukkan melalui serial monitor di Arduino IDE. Pengukuran bukaan capit lengan robot ini dilakukan dengan menggunakan penggaris berukuran 20 cm.

Untuk menghitung perbedaan lebar capit sebelum dan setelah penentuan, digunakan persamaan berikut.

$$\text{Selisih Lebar} = \text{Lebar capit sebelumnya} - \text{Lebar capit sesudahnya} \dots (4.3)$$

Untuk mengetahui rata-rata selisih lebar capit, digunakan persamaan berikut.

$$\text{Rata - rata selisih Lebar capit (mm)} = \frac{\text{Jumlah hasil selisih}}{\text{Banyak sampel selisih}} \dots (4.4)$$

##### 4.4.1 Hasil dan Analisis Pengujian Motor Servo *Elbow*

Proses pengambilan data pada motor servo *Gripper* yang tergambar pada **Gambar 4.7** adalah sebagai berikut.



**Gambar 4.7** Proses Pengujian Motor Servo *Shoulder*

Data dari pengujian motor servo *Gripper* terdapat pada **Tabel 4.4** yang menggambarkan *Output* lebar capit sehubungan dengan nilai *Input* pada motor servo serta perbedaan lebar capit, yang diukur dengan menggunakan penggaris.

**Tabel 4.4** Hasil Pengujian Motor Servo *Gripper*

<b>No.</b>	<b>Input sudut<sup>o</sup></b>	<b>Output (cm)</b>	<b>Selisih (mm)</b>
1	0	6.6	0
2	10	6.5	1
3	20	6.3	2
4	30	6	3
5	40	5.9	1
6	50	5.8	1
7	60	5.6	2
8	70	5.5	1
9	80	5.3	2
10	90	5.1	2
11	100	4.7	4
12	110	4.6	1
13	120	5.2	6
<b>Rata-rata selisih lebar capit (mm)</b>			<b>2.6</b>

Tabel hasil pengujian tersebut menunjukkan bahwa rata-rata perbedaan lebar capit pada motor servo *Gripper* terbuka secara bertahap, yakni sekitar 2,6 mm per setiap perubahan 10° pada motor servo.

#### 45 Pengujian Posisi Koordinat *End-effector* dan Sudut Lengan Robot Dengan Metode *Forward Kinematic*

Pengujian titik koordinat dari *end-effector* ini dilakukan dengan tujuan untuk menilai kesalahan pada titik koordinat x, y, z dengan membandingkan nilai titik koordinat yang diinputkan dalam program dengan hasil titik koordinat yang diperoleh langsung dari perangkat. Selain itu, pengujian juga bertujuan untuk mengevaluasi kesalahan sudut  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  yang dihasilkan dari perhitungan *Forward Kinematic*, dengan membandingkan sudut yang dihitung dalam program dengan pengukuran langsung pada perangkat.

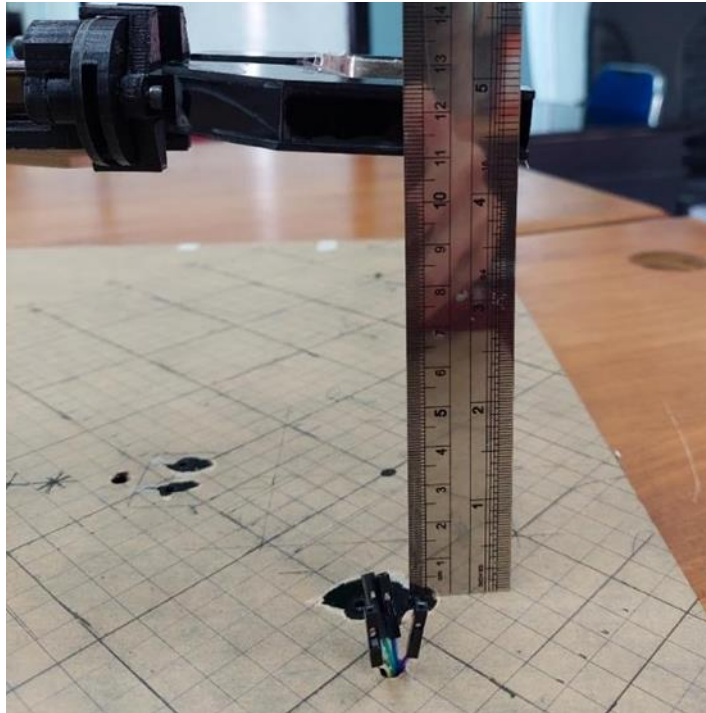
Pada pengujian ini, terdapat tiga posisi berbeda untuk *end-effector* yang diuji, yaitu dari posisi awal ke posisi pengambilan, dari posisi pengambilan ke posisi kiri, dan dari posisi pengambilan ke posisi kanan. Setiap posisi diuji sebanyak 10 kali secara berulang.

Untuk mengukur titik koordinat x dan y, digunakan tanda-tanda atau penanda pada meja lengan robot dalam ukuran centimeter. Garis berwarna hijau menandai koordinat y, sementara garis berwarna biru menandai koordinat x, seperti yang terlihat pada **Gambar 4.8** di bawah ini.



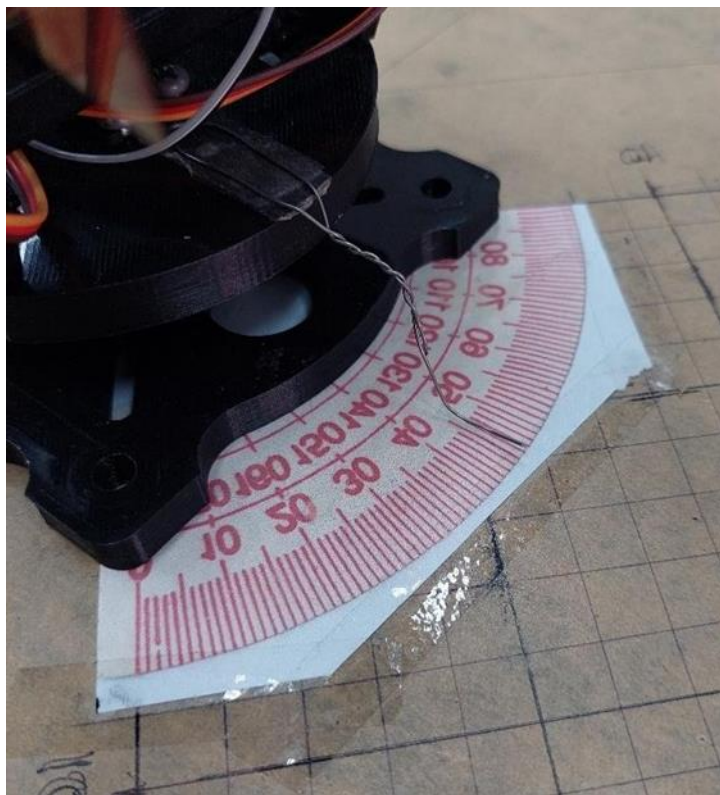
**Gambar 4.8** Pengukuran titik koordinat x,y

Untuk mengukur koordinat z, digunakan penggaris panjang dengan panjang 30 cm, sebagaimana tergambar pada **Gambar 4.9**.



**Gambar 4.9** Pengukuran titik z

Untuk mengukur sudut  $\theta_1$ , digunakan penggaris busur dengan skala sudut  $90^\circ$ , sebagaimana tergambar pada **Gambar 4.10** di bawah ini.



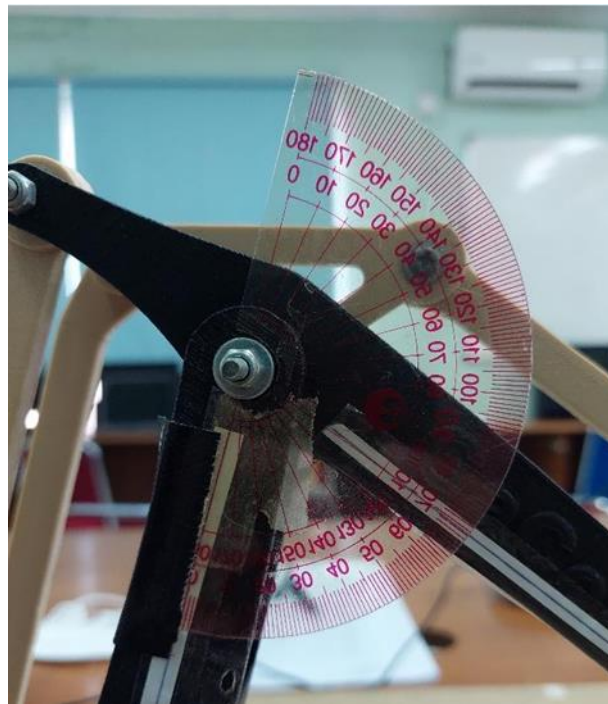
**Gambar 4.10** Pengukuran sudut  $\theta_1$

Untuk mengukur sudut  $\theta_2$ , digunakan penggaris busur dengan skala sudut  $180^\circ$ , sebagaimana tergambar pada **Gambar 4.11** di bawah ini.



**Gambar 4.11** Pengukuran sudut  $\theta_2$

Selanjutnya, untuk pengukuran sudut  $\theta_3$  dengan menggunakan penggaris busur  $180^\circ$  seperti **Gambar 4.12** di bawah.



**Gambar 4.12** Pengukuran sudut  $\theta_3$

Untuk mendapatkan persentase *error* antara nilai *input* dan *output* koordinat  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , serta persentase kesalahan antara nilai sudut dari perhitungan *Forward Kinematic* dengan nilai sudut pada lengan robot, digunakan rumus berikut.

*Forward Kinematic* dengan nilai sudut pada lengan robot menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$error\% = \frac{\text{Nilai Input } (x,y,z) - \text{Nilai Output } (x,y,z)}{\text{Nilai Output } (x,y,z)} \times 100 \dots \dots \dots (4.5)$$

Sedangkan, untuk menghitung nilai rata-rata persentase *error* setiap data menggunakan persamaan seperti berikut.

$$\text{Rata - rata error\%} = \frac{\text{Jumlah dari hasil \%error}}{\text{Banyak sampel percobaan}} \dots \dots \dots (4.6)$$

Rata-rata *error* tersebut untuk mengetahui seberapa presisi lengan robot setelah dicoba sepuluh kali secara berulang.

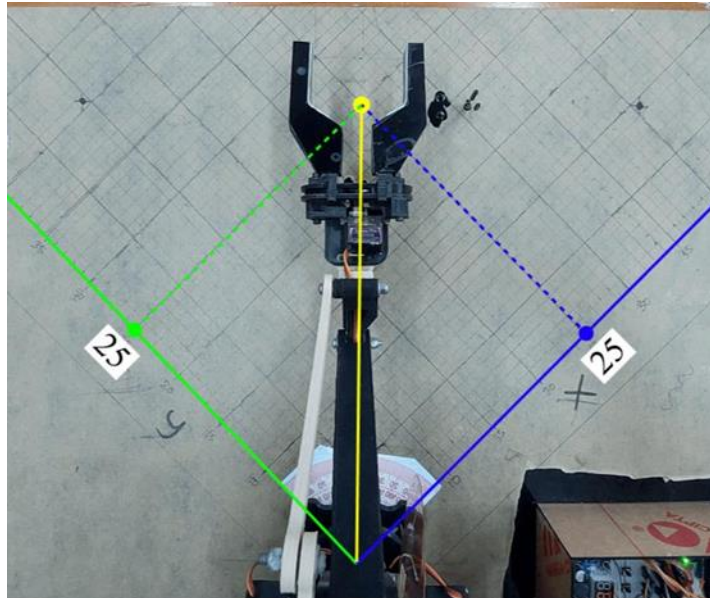
Berikut rumus *Forward Kinematic* dalam bentuk kode program Arduino.

```
void ForwardKinematik(int x, int y, int z)
{
float x1 = x; float
y1 = y; int B = z;
D = sqrt(sq(x)+sq(y)); E =
D-L4;
Theta1 = atan(y1/x1)/PI*180;
//Servo Shoulder
yOffset = B-L1;
d = sqrt(sq(E)+sq(yOffset)); Alpha1
= acos(E/d)/PI*180;
Alpha2 = acos((sq(L2)+sq(d)-sq(L3))/(2*L2*d))/PI*180;
if(B>L1)
{
Theta2 = Alpha1+Alpha2;
}
else
{
Theta2 = Alpha2-Alpha1;
}
//Servo Elbow
Theta3 = acos((sq(L2)-sq(L3)-sq(d))/(2*L2*L3))/PI*180;
}
```

Bagian latar belakang dengan tulisan berwarna kuning berisi rumus program untuk menghitung Theta 1, yang digunakan untuk menggerakkan servo *Base*. Bagian latar belakang dengan tulisan berwarna biru muda berisi rumus program untuk menghitung Theta 2, yang digunakan untuk menggerakkan servo *Shoulder*. Sedangkan, bagian latar belakang dengan tulisan berwarna hijau berisi rumus program untuk menghitung Theta 3, yang digunakan untuk menggerakkan servo *Elbow*.

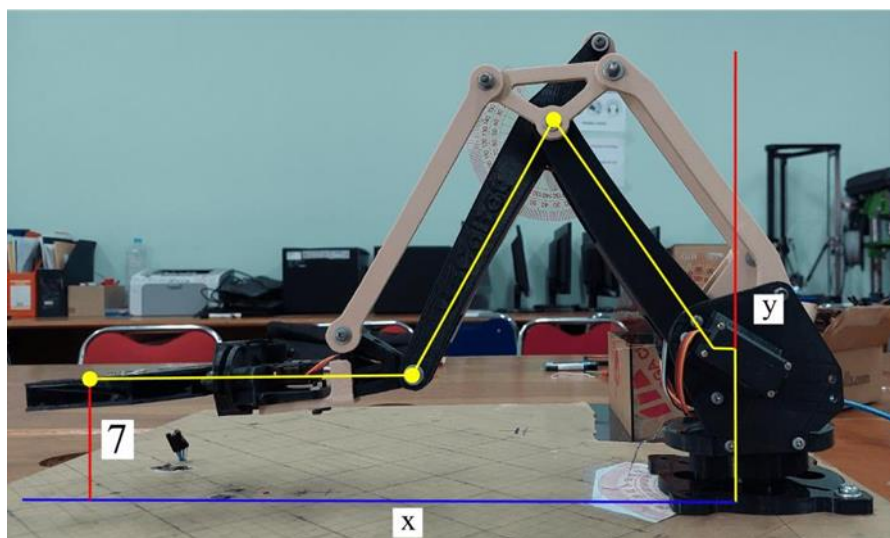
#### 4.5.1 Hasil dan Analisis Pengujian Posisi Ambil Dengan *Forward Kinematic*

Berikut adalah tampilan dari sudut atas atau titik  $x, y$  pada posisi pengambilan, dengan nilai  $x, y$  sebesar  $(25,25)$ . Pada **Gambar 4.13** di bawah ini, garis hijau menunjukkan koordinat  $y$ , garis biru menunjukkan koordinat  $x$ , dan garis kuning menggambarkan panjang rentang dari *base* ke *end-effector*.



**Gambar 4.13** Tampak atas posisi ambil

Sementara itu, untuk sudut samping atau titik  $x, z$   $(25,7)$  dari posisi pengambilan, pada **Gambar 4.14** di bawah ini, garis merah mengindikasikan koordinat  $z$ , garis biru menunjukkan koordinat  $x$ , dan garis kuning menggambarkan rentang lengan robot dari *base* ke *end-effector*.



**Gambar 4.14** Tampak samping posisi ambil

Wujud pengujian kesalahan nilai koordinat x, y, z dari posisi awal ke posisi pengambilan dengan menggunakan *Forward Kinematik*, pada pengujian ini dilakukan sebanyak 10 kali secara berulang, dan hasilnya tertera pada **Tabel 4.5** di bawah ini.

**Tabel 4.5** Hasil pengujian koordinat x,y,z posisi ambil dengan *Forward Kinematic*

No.	Nilai x,y,z posisi ambil						Error (%)		
	Input			Output			x	y	z
	x	y	z	x	y	z			
1.	25	25	7	25.4	24.4	6.4	1.57	2.45	9.37
2.	25	25	7	25.4	24.4	6.4	1.57	2.45	9.37
3.	25	25	7	25.3	24.3	6.4	1.18	2.46	9.37
4.	25	25	7	25.4	24.3	6.4	1.57	2.88	9.37
5.	25	25	7	25.4	24.3	6.4	1.57	2.88	9.37
6.	25	25	7	25.3	24.4	6.4	1.18	2.45	9.37
7.	25	25	7	25.35	24.4	6.5	1.38	2.04	7.69
8.	25	25	7	25.3	24.5	6.4	1.18	2.44	9.37
9.	25	25	7	25.4	24.4	6.4	1.57	2.45	9.37
10.	25	25	7	25.4	24.3	6.4	1.57	2.46	9.37
<b>Rata-rata Error (%)</b>							<b>1.43</b>	<b>2.49</b>	<b>8.26</b>

Dalam hasil yang tercantum pada **Tabel 4.5** di atas, untuk nilai x, terlihat bahwa rata-rata kesalahan kecil, yaitu sebesar **1.43%** di atas nilai *input*. Untuk nilai y, rata-rata kesalahan menunjukkan nilai kecil, yaitu sebesar **2.49%** di bawah nilai *input*. Sedangkan, untuk nilai z, rata-rata kesalahan menunjukkan nilai yang cukup besar, yaitu sebesar **8.26%** di bawah nilai *input*. Selanjutnya, hasil pengujian kesalahan sudut  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  dari posisi awal ke posisi pengambilan dapat ditemukan pada **Tabel 4.6** di bawah ini.

**Tabel 4.6** Hasil pengujian sudut  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  posisi ambil

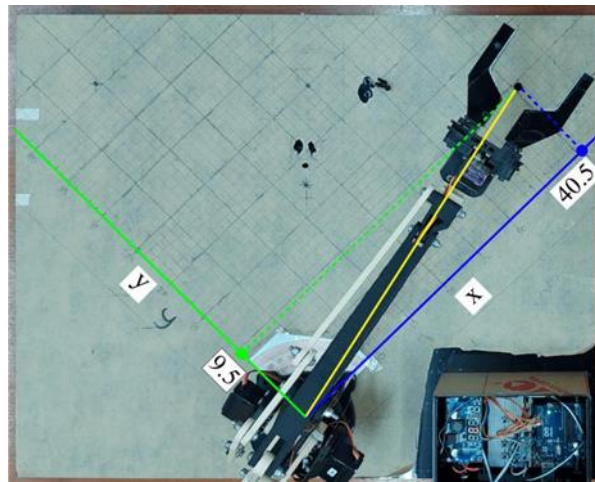
No.	Nilai $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ posisi ambil						Error (%)		
	Perhitungan <sup>o</sup>			Output <sup>o</sup>			$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$
	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$			
1.	45	56	66	43.5	57	65	3.44	1.75	1.53
2.	45	56	66	43.5	58	65	3.44	3.44	1.53
3.	45	56	66	44	58	65	2.27	3.44	1.53
4.	45	56	66	44	57	65	2.27	1.75	1.53
5.	45	56	66	44	58	65	2.27	3.44	1.53
6.	45	56	66	43.5	56	66	3.44	0	0
7.	45	56	66	43.5	57	65	3.44	1.75	1.53
8.	45	56	66	44	56	66	2.27	0	0
9.	45	56	66	44	57	66	2.27	1.75	0
10.	45	56	66	45.5	56	66	3.29	0	0
<b>Rata-rata Error (%)</b>							<b>2.84</b>	<b>1.73</b>	<b>0.91</b>



Dari data yang tercatat pada **Tabel 4.6** di atas,  $\theta_1$  menunjukkan rata-rata kesalahan sekitar **2.84%** di bawah hasil perhitungan, sedangkan untuk  $\theta_2$  menunjukkan rata-rata kesalahan sekitar **1.73%** di atas hasil perhitungan. Sementara itu,  $\theta_3$  menunjukkan rata-rata kesalahan sekitar **0.91%** di bawah hasil perhitungan.

#### 4.5.1 Hasil dan Analisis Pengujian Posisi Kanan Dengan *Forward Kinematic*

Berikut adalah tampilan dari sudut atas atau titik x, y pada posisi pengambilan, dengan nilai x, y sebesar (9.5, 40.5). Pada **Gambar 4.15** di bawah ini, garis hijau menunjukkan koordinat y, garis biru menunjukkan koordinat x, dan garis kuning menggambarkan panjang rentang dari *base* ke *end-effector*.



**Gambar 4. 15** Tampak atas posisi kanan

Sementara itu, untuk sudut samping atau titik x, z (40.5, 15) dari posisi pengambilan, pada **Gambar 4.16** di bawah ini, garis merah mengindikasikan koordinat z, garis biru menunjukkan koordinat x, dan garis kuning menggambarkan rentang lengan robot dari *base* ke *end-effector*.



**Gambar 4. 16** Tampak samping posisi kanan

Wujud hasil pengujian kesalahan nilai koordinat x, y, z dari posisi awal ke posisi kanan dengan penerapan *Forward Kinematik*, pada pengujian ini dijalankan sebanyak 10 kali secara berulang, dan detailnya dapat ditemui pada **Tabel 4.7** di bawah ini.

**Tabel 4.7** Hasil pengujian koordinat x,y,z Posisi Kanan dengan *Forwar Kinematic*

No.	Nilai x,y,z posisi kanan						Error (%)		
	Input			Output			x	y	z
	x	y	z	x	y	z			
1.	40.5	9.5	15	41.4	8.4	14.4	2.17	13.09	4.16
2.	40.5	9.5	15	41.5	8.35	14.4	2.40	13.77	4.16
3.	40.5	9.5	15	41.55	8.2	14.3	2.52	15.85	4.89
4.	40.5	9.5	15	41.6	8.1	14.3	2.64	17.28	4.89
5.	40.5	9.5	15	42	8.1	14.3	3.57	17.28	4.89
6.	40.5	9.5	15	42	8.1	14.3	3.57	17.28	4.89
7.	40.5	9.5	15	42	8	14.3	3.57	18.75	4.89
8.	40.5	9.5	15	41.9	8.35	14.4	3.34	13.77	4.16
9.	40.5	9.5	15	41.9	8.1	14.3	3.34	17.39	4.89
10.	40.5	9.5	15	41.9	8.05	14.3	3.34	18.01	4.89
<b>Rata-rata Error (%)</b>							<b>3.04</b>	<b>16.24</b>	<b>4.71</b>

Dari data yang tercatat pada **Tabel 4.7** di atas, untuk nilai x menunjukkan rata-rata kesalahan sebesar **3.04%** di atas nilai input, sementara untuk nilai y menunjukkan rata-rata kesalahan yang cukup besar, yaitu sekitar **16.24%** di bawah nilai *input*. Selain itu, nilai z menunjukkan rata-rata kesalahan yang cukup besar, yaitu sekitar **4.71%** di bawah nilai *input*. Selanjutnya, hasil pengujian kesalahan sudut  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  dari posisi tengah ke posisi kanan dapat ditemukan pada **Tabel 4.8** di bawah ini.

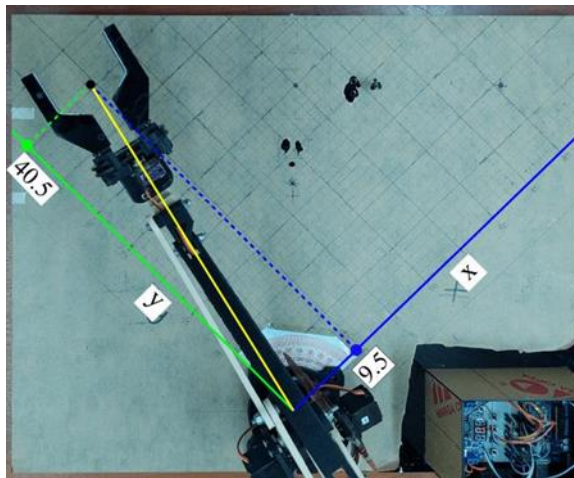
**Tabel 4.8** Hasil pengujian sudut  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  Posisi Kanan

No.	Nilai $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ posisi kanan						Error (%)		
	Perhitungan <sup>o</sup>			Output <sup>o</sup>			$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$
	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$			
1.	13	57	102	13	57	104	0	0	1.92
2.	13	57	102	13	57	105	0	0	2.85
3.	13	57	102	13	58	105	0	1.72	2.85
4.	13	57	102	12.5	57	106	4	0	3.77
5.	13	57	102	12	58	105	8.33	1.72	2.85
6.	13	57	102	12	58	105	8.33	1.72	2.85
7.	13	57	102	12	58	106	8.33	1.72	3.77
8.	13	57	102	12	58	105	8.33	1.72	2.85
9.	13	57	102	12	58	105	8.33	1.72	2.85
10.	13	57	102	12.5	58	105	4	1.72	2.85
<b>Rata-rata Error (%)</b>							<b>4.96</b>	<b>1.20</b>	<b>2.94</b>

Dari informasi yang tercatat pada **Tabel 4.8** di atas,  $\theta_1$  menunjukkan rata-rata kesalahan sekitar **4.96%** di bawah hasil perhitungan, sementara  $\theta_2$  menunjukkan rata-rata kesalahan sekitar **1.20%** di atas hasil perhitungan. Terakhir,  $\theta_3$  menunjukkan rata-rata kesalahan sekitar **2.94%** di atas hasil perhitungan.

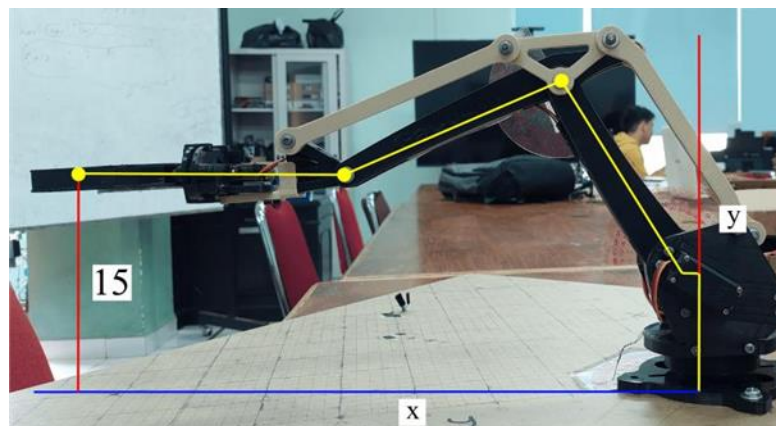
#### 4.5.2 Hasil dan Analisis Pengujian Posisi Kiri Dengan *Forward Kinematic*

Berikut adalah tampilan dari sudut atas atau titik x, y pada posisi pengambilan, dengan nilai x, y sebesar (40.5, 9.5). Pada **Gambar 4.17** di bawah ini, garis hijau menunjukkan koordinat y, garis biru menunjukkan koordinat x, dan garis kuning menggambarkan panjang rentang dari *base* ke *end-effector*.



**Gambar 4.17** Tampak atas posisi kiri

Sementara itu, untuk sudut samping atau titik x, z (40.5, 15) dari posisi pengambilan, pada **Gambar 4.18** di bawah ini, garis merah mengindikasikan koordinat z, garis biru menunjukkan koordinat x, dan garis kuning menggambarkan rentang lengan robot dari *base* ke *end-effector*.



**Gambar 4.18** Tampak samping posisi kiri

Hasil pengujian nilai *error* koordinat x,y,z pada posisi awal ke posisi kiri dapat dilihat pada **Tabel 4.9** di bawah.

**Tabel 4.9** Hasil pengujian koordinat x,y,z Posisi Kiri dengan *Forward Kinematic*

No.	Nilai x,y,z posisi kiri						Error (%)		
	Input			Output			x	y	z
	x	y	z	x	y	z			
1.	9.5	40.5	15	11.6	40.9	14.6	18.10	0.97	2.73
2.	9.5	40.5	15	12	40.7	14.6	20.83	0.49	2.73
3.	9.5	40.5	15	12.9	40.5	14.6	26.35	0.74	2.73
4.	9.5	40.5	15	12.9	40.5	14.6	26.35	0	2.73
5.	9.5	40.5	15	12.9	40.5	14.6	26.35	0	2.73
6.	9.5	40.5	15	12.9	40.5	14.6	26.35	0	2.73
7.	9.5	40.5	15	12.9	40.5	14.6	26.35	0	2.73
8.	9.5	40.5	15	13	40.5	14.6	26.92	0	2.73
9.	9.5	40.5	15	13	40.4	14.6	26.92	0.24	2.73
10.	9.5	40.5	15	12.9	40.4	14.6	26.35	0.24	2.73
<b>Rata-rata Error (%)</b>							<b>25.08</b>	<b>0.26</b>	<b>2.73</b>

Dari data yang tercatat pada **Tabel 4.9** di atas, untuk nilai x menunjukkan rata-rata kesalahan yang besar, yaitu sekitar **25.08%** di bawah nilai *input*, sedangkan untuk nilai y menunjukkan rata-rata kesalahan yang sangat kecil, hanya sekitar **0.26%** di bawah nilai *input*. Sementara itu, nilai z menunjukkan rata-rata kesalahan yang relatif kecil dan stabil, yaitu sekitar **2.73%** di bawah nilai *input* dalam 10 percobaan. Selanjutnya, hasil pengujian kesalahan sudut  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  dari posisi tengah ke posisi kiri dapat ditemukan pada **Tabel 4.10** di bawah ini.

**Tabel 4.10** Hasil pengujian sudut  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  Posisi Kiri

No.	Nilai $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ posisi kiri						Error (%)		
	Perhitungan <sup>o</sup>			Output <sup>o</sup>			$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$
	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$			
1.	77	57	102	75	58	105	2.66	1.72	2.85
2.	77	57	102	74	58	105	4.05	1.72	2.85
3.	77	57	102	73	58	105	5.47	1.72	2.85
4.	77	57	102	73	58	105	5.47	1.72	2.85
5.	77	57	102	73	58	105	5.47	1.72	2.85
6.	77	57	102	73	58	105	5.47	1.72	2.85
7.	77	57	102	73	58	105	5.47	1.72	2.85
8.	77	57	102	73	58	105	5.47	1.72	2.85
9.	77	57	102	73	58	105	5.47	1.72	2.85
10.	77	57	102	73	58	105	5.47	1.72	2.85
<b>Rata-rata Error (%)</b>							<b>5.04</b>	<b>1.72</b>	<b>2.75</b>

Dari hasil yang tercatat pada **Tabel 4.10** di atas,  $\theta_1$  menunjukkan rata-rata kesalahan sekitar **5.04%** di bawah hasil perhitungan, sementara  $\theta_2$  menunjukkan rata-rata kesalahan sekitar **1.72%** di atas hasil perhitungan. Terakhir,  $\theta_3$  menunjukkan rata-rata kesalahan sekitar **2.75%** di atas hasil perhitungan.

#### **46 Pengujian Posisi Koordinat *End-effector* Tanpa Metode *Forward Kinematic***

Pengujian tanpa menggunakan metode *Forward Kinematik* dari koordinat *end-effector* pada lengan robot dilakukan dengan maksud untuk mengidentifikasi kesalahan (*error*) pada nilai  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Pengujian melibatkan tiga posisi, yakni posisi pengambilan, posisi kanan, dan posisi kiri. Nilai sudut untuk setiap posisi dimasukkan secara manual ke program Arduino UNO. Setiap posisi diuji sebanyak lima kali secara berulang.

##### **4.6.1 Hasil dan Analisis Pengujian Posisi Ambil Tanpa *Forward Kinematic***

Pada saat berada pada posisi pengambilan, nilai sudut yang dimasukkan untuk mencapai *end-effector* adalah  $\theta_1 = 46^\circ$ ,  $\theta_2 = 56^\circ$ , dan  $\theta_3 = 63^\circ$ . Hasil dari pengujian, yang mencakup nilai kesalahan koordinat  $x$ ,  $y$ ,  $z$  dari posisi awal ke posisi pengambilan tanpa menggunakan *Forward Kinematik*, dapat ditemukan pada **Tabel 4.11** di bawah ini.

**Tabel 4.11** Hasil pengujian koordinat  $x,y,z$  Posisi Ambil tanpa *Forward Kinematic*

No.	Nilai $x,y,z$ posisi ambil								
	Tujuan <i>end-effector</i>			Hasil pengukuran			<i>Error</i> (%)		
	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$
1.	25	25	7	25	25	7	0	0	0
2.	25	25	7	25.1	24.9	6.9	0.39	0.40	1.44
3.	25	25	7	25.2	24.8	6.9	0.79	0.80	1.44
4.	25	25	7	25	25	7	0	0	0
5.	25	25	7	24.9	25	6.9	0.40	0	1.44
<b>Rata-rata <i>Error</i> (%)</b>							<b>0.31</b>	<b>0.24</b>	<b>0.86</b>

Dari data yang tercatat pada **Tabel 4.11** di atas, untuk nilai  $x$  menunjukkan rata-rata kesalahan yang kecil, yaitu sekitar **0.31%** di atas koordinat tujuan. Sementara itu, untuk nilai  $y$  menunjukkan rata-rata kesalahan yang kecil, sekitar **0.24%** di bawah koordinat tujuan. Selain itu, nilai  $z$  menunjukkan rata-rata kesalahan yang kecil, yaitu sekitar **0.86%** di bawah koordinat tujuan.

#### 4.6.2 Hasil dan Analisis Pengujian Posisi Ambil Tanpa *Forward Kinematic*

Pada saat berada pada posisi pengambilan, nilai sudut yang dimasukkan untuk mencapai *end-effector* adalah  $\theta_1 = 15^\circ$ ,  $\theta_2 = 57^\circ$ , dan  $\theta_3 = 104^\circ$ . Informasi mengenai hasil pengujian kesalahan nilai koordinat x, y, z dari posisi awal ke posisi pengambilan tanpa menggunakan *Forward Kinematik* dapat ditemukan pada **Tabel 4.12** di bawah ini.

**Tabel 4.12** Hasil pengujian koordinat x,y,z Posisi Kanan tanpa *Forward Kinematic*

No.	Nilai x,y,z posisi kanan								
	Tujuan <i>end-effector</i>			Hasil pengukuran			Error (%)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1.	40.5	9.5	15	40.2	9.4	15	0.74	1.06	0
2.	40.5	9.5	15	40.1	9.8	14.9	0.99	3.06	0.67
3.	40.5	9.5	15	40.2	9.5	14.9	0.74	0	0.67
4.	40.5	9.5	15	40	9.9	14.9	1.25	4.04	0.67
5.	40.5	9.5	15	40.2	9.5	14.9	0.74	0	0.67
<b>Rata-rata Error (%)</b>							<b>0.95</b>	<b>1.63</b>	<b>0.53</b>

Dari data yang tercatat pada **Tabel 4.12** di atas, untuk nilai x menunjukkan rata-rata kesalahan yang kecil, yaitu sekitar **0.95%** di bawah koordinat tujuan. Sementara itu, untuk nilai y menunjukkan rata-rata kesalahan yang kecil, sekitar **1.63%** di atas koordinat tujuan. Selain itu, nilai z menunjukkan rata-rata kesalahan yang kecil, yaitu sekitar **0.53%** di bawah koordinat tujuan.

#### 4.6.3 Hasil dan Analisis Pengujian Posisi Kiri Tanpa *Forward Kinematic*

Ketika berada dalam posisi pengambilan, nilai sudut yang dimasukkan untuk mencapai *end-effector* adalah  $\theta_1 = 79^\circ$ ,  $\theta_2 = 56^\circ$ , dan  $\theta_3 = 102^\circ$ . Informasi mengenai hasil pengujian kesalahan nilai koordinat x, y, z dari posisi awal ke posisi pengambilan tanpa menggunakan *Forward Kinematik* dapat ditemukan pada **Tabel 4.13** di bawah ini.

**Tabel 4.13** Hasil pengujian koordinat x,y,z Posisi Kiri tanpa *Forward Kinematic*

No.	Nilai x,y,z posisi kiri								
	Tujuan <i>end-effector</i>			Hasil pengukuran			Error (%)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1.	9.5	40.5	15	9.6	40	14.9	1.04	1.25	0.67
2.	9.5	40.5	15	9.5	39.9	15	0	1.51	0
3.	9.5	40.5	15	9.3	39.9	15.3	2.15	1.51	1.96
4.	9.5	40.5	15	9.8	39.6	15.1	3.06	2.27	1.96

5.	9.5	40.5	15	9.6	39.9	15	1.04	1.51	0
<b>Rata-rata Error (%)</b>							<b>1.45</b>	<b>1.61</b>	<b>0.91</b>

Dalam hasil yang tertera pada **Tabel 4.13**, terlihat bahwa untuk koordinat x, rata-rata kesalahan adalah sebesar 1.45% di atas target koordinat, sementara untuk koordinat y, rata-rata kesalahan adalah sebesar 1.61% di bawah target koordinat. Selain itu, untuk koordinat z, rata-rata kesalahan adalah sebesar 0.91% di atas target koordinat.

Dari hasil pengujian lengan robot tanpa menggunakan perhitungan *Forward Kinematic*, terlihat bahwa *error* pada titik koordinat *end-effector*-nya lebih kecil dibandingkan dengan lengan robot yang menggunakan perhitungan *Forward Kinematic*. Hal ini disebabkan karena pada pergerakan lengan robot tanpa menggunakan *Forward Kinematic*, pengaturan sudut dapat dilakukan secara manual sesuai dengan titik koordinat yang dituju, sehingga memungkinkan untuk mengabaikan kesalahan pada ketiga motor servo. Sementara itu, pada pergerakan sudut lengan robot dengan *Forward Kinematic*, tidak memungkinkan untuk mengatur secara manual, sehingga tidak dapat mengabaikan kesalahan pada ketiga motor servo.

Namun, kelemahan dari lengan robot tanpa perhitungan *Forward Kinematic* adalah bahwa untuk mencapai titik yang diinginkan, diperlukan pencarian sudut yang tepat secara manual. Sebaliknya, saat menggunakan perhitungan *Forward Kinematic*, mencapai titik koordinat yang diinginkan hanya memerlukan penginputan koordinat x, y, z dari titik tersebut tanpa perlu melakukan pencarian sudut secara manual.

Maka, penggunaan perhitungan *Forward Kinematic* membuat pergerakan lengan robot menjadi lebih efektif meskipun mengakibatkan adanya kesalahan yang lebih besar daripada pergerakan tanpa menggunakan *Forward Kinematic*.

#### **4.7 Pengujian Kecepatan Lengan Robot**

Pengujian kecepatan lengan robot ini dilakukan dengan tujuan untuk menentukan waktu yang dibutuhkan oleh lengan robot untuk mencapai berbagai posisi dari *end-effector*. Pengujian ini juga dimaksudkan untuk menentukan kecepatan yang ideal bagi lengan robot. Dalam pengujian ini, terdapat tiga posisi yang diuji, yaitu dari posisi awal ke posisi ambil, dari posisi awal ke posisi kanan, dan dari posisi awal ke posisi kiri.

#### 4.7.1 Hasil dan Analisis Pengujian Kecepatan Ke Posisi Ambil

Hasil pengujian kecepatan lengan robot ke posisi ambil dapat dilihat pada **Tabel 4.14** berikut.

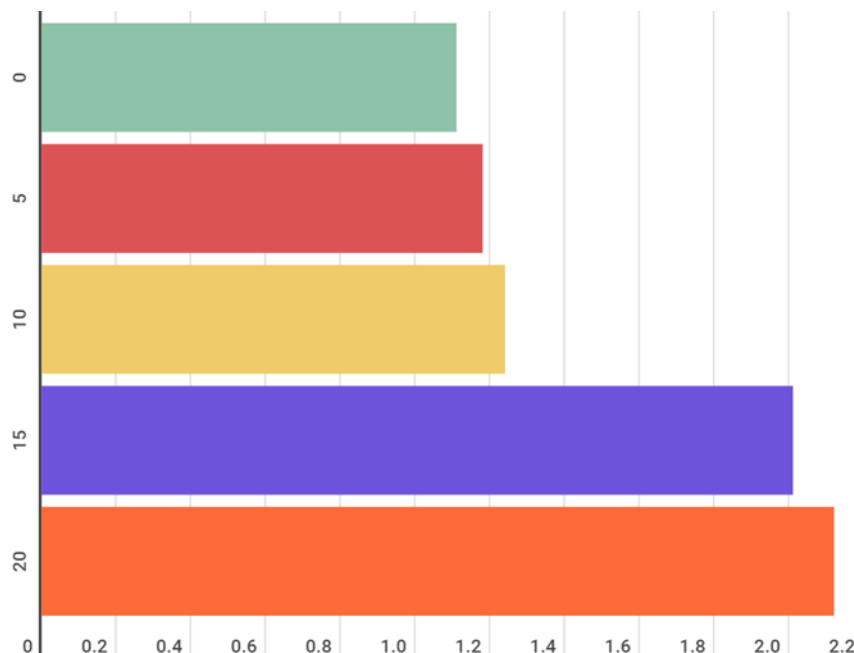
**Tabel 4.14** Hasil pengujian kecepatan servo posisi ambil

<b>Kecepatan Posisi Awal ke Posisi Ambil (25, 25, 7)</b>			
<b>No.</b>	<b>Input Delay</b>	<b>Waktu (detik)</b>	<b>Selisih</b>
1.	0	1.11	0
2.	5	1.18	0.07
3.	10	1.24	0.06
4.	15	2.01	0.07
5.	20	2.12	0.11
<b>Rata-rata selisih(detik)</b>			<b>0,06</b>

Dalam **Tabel 4.14**, terlihat adanya selisih waktu pengujian ke posisi ambil sebesar 0.06 detik.

Selisih kecepatan lengan robot tidak terlalu signifikan pada rentang input delay 0 hingga 10, di mana kecepatannya tetap sangat cepat. Namun, terdapat perubahan yang signifikan pada kecepatan saat input mencapai 15 dan 20.

Untuk perbandingan visual yang lebih jelas, dapat dilihat pada diagram batang yang tergambar pada **Gambar 4.19**.



**Gambar 4.19** Grafik Kecepatan Posisi Ambil

Pada **Gambar 4.19** di atas, terlihat adanya perbedaan kecepatan yang signifikan antara *input delay* 10 dan 15.



#### 4.7.2 Hasil dan Analisis Pengujian Kecepatan Ke Posisi Kanan

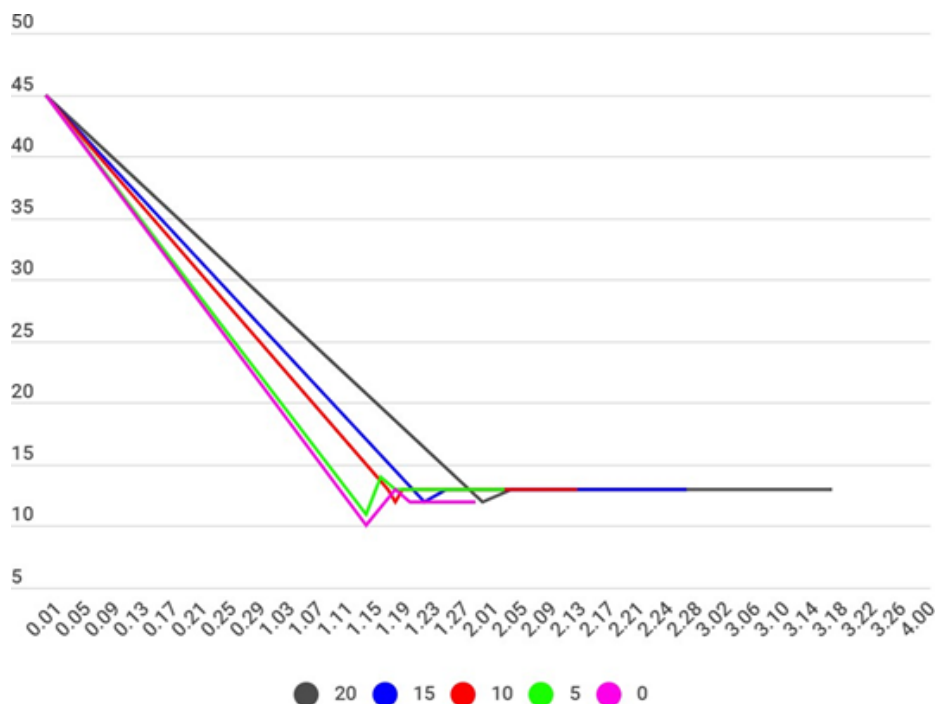
Hasil pengujian kecepatan lengan robot menuju posisi pengambilan terdapat dalam **Tabel 4.15** di bawah.

**Tabel 4.15** Hasil pengujian kecepatan servo posisi kanan

<b>Kecepatan Posisi Awal ke Posisi Kanan</b>			
No.	<i>Input Delay</i>	Waktu (detik)	Selisih
1.	0	1.29	0
2.	5	2.03	0.04
3.	10	2.13	0.10
4.	15	2.27	0.14
5.	20	3.17	0.20
<b>Rata-rata selisih</b>			<b>0.09</b>

Hasil dari **Tabel 4.15** yang tertera menunjukkan adanya selisih waktu sebesar 0.09 detik pada pengujian pergerakan ke posisi kanan.

Ketika melakukan pergerakan ke posisi kanan dengan input nilai 0, terjadi ketidakstabilan gerakan pada lengan robot. Hal ini disebabkan oleh kecepatan pergerakan yang terlalu tinggi, sehingga menyebabkan gerakan melebihi sudut yang seharusnya dicapai (lebih dari sudut  $13^\circ$ ). Pergerakan berlebihan ini tergambar dalam grafik garis pada **Gambar 4.20** di bawah ini.



**Gambar 4.20** Grafik Kecepatan Posisi Kanan

Grafik pada **Gambar 4.20** menunjukkan bahwa semakin besar *input delay*, gerakan lengan robot menjadi lebih lambat yang berdampak pada stabilitas gerakan.

Namun, ketika *input delay* melebihi 20, pergerakan lengan robot menjadi tidak efektif karena kecepatan gerakannya sangat terbatas.

#### 4.7.3 Hasil dan Analisis Pengujian Kecepatan Ke Posisi Kiri

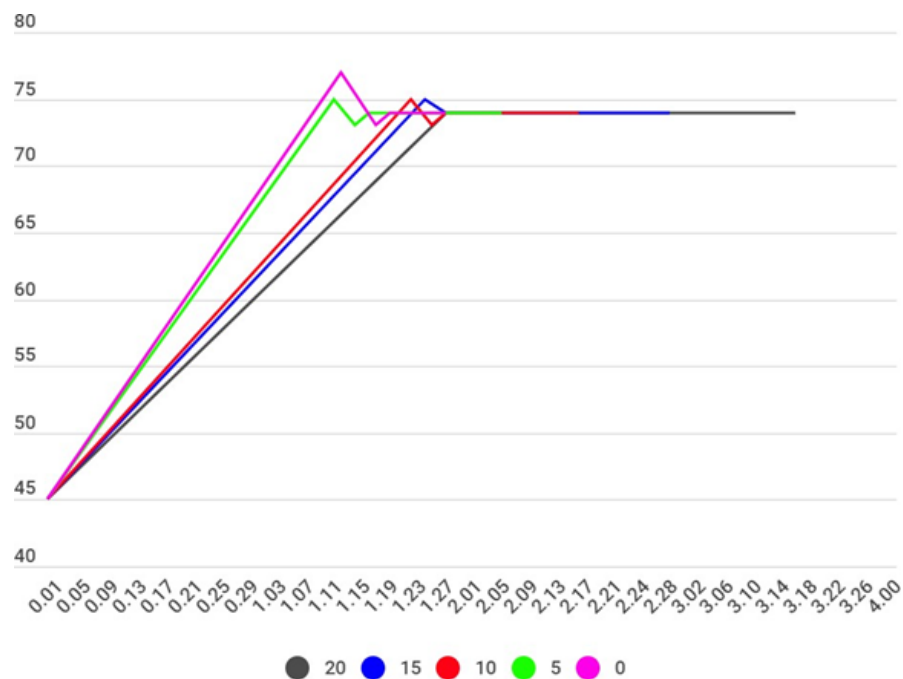
Data hasil pengujian kecepatan pergerakan lengan robot menuju posisi pengambilan tertera dalam **Tabel 4.16** di bawah ini.

**Tabel 4.16 Hasil pengujian kecepatan servo posisi kiri**

<b>Kecepatan Posisi Awal ke Posisi Kiri</b>			
<b>No.</b>	<b>Input Delay</b>	<b>Waktu (detik)</b>	<b>Selisih</b>
1.	0	1.27	0
2.	5	2.05	0.08
3.	10	2.16	0.11
4.	15	2.28	0.12
5.	20	3.16	0.18
<b>Rata-rata selisih</b>			<b>0.09</b>

Hasil dari **Tabel 4.16** yang disajikan menunjukkan adanya selisih waktu sebesar 0.9 detik pada pengujian pergerakan ke posisi kanan.

Ketika melakukan pergerakan ke posisi kanan dengan input nilai 0, lengan robot mengalami ketidakstabilan gerakan yang disebabkan oleh kecepatan pergerakan yang terlalu tinggi. Hal ini menyebabkan gerakan lengan robot melebihi sudut yang seharusnya (lebih dari sudut  $13^\circ$ ). Pergerakan berlebihan ini tercermin dalam grafik garis pada **Gambar 4.21** yang ditampilkan.



**Gambar 4.21** Grafik Kecepatan Posisi Kiri

Grafik pada **Gambar 4.21** menunjukkan bahwa semakin besar *input delay*, gerakan lengan robot menjadi lebih lambat, yang pada gilirannya menghasilkan stabilitas gerakan. Namun, ketika *input delay* melampaui 20, pergerakan lengan robot menjadi tidak efektif karena kecepatan gerakan menjadi sangat lambat.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Setelah tahapan perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, penerapan metode *Forward Kinematic* dalam program untuk lengan robot, dan evaluasi hasil pengujian alat, berikut adalah beberapa simpulan yang bisa diambil:

1. Penerapan metode *Forward Kinematic* pada lengan robot ini berhasil dengan baik. Dalam perhitungan *Forward Kinematic*, untuk Posisi Ambil diperoleh sudut-sudut sebagai berikut:  $\theta_1 = 45^\circ$ ,  $\theta_2 = 56^\circ$ , dan  $\theta_3 = 66^\circ$ . Untuk Posisi Kanan, sudut-sudut yang dihasilkan adalah:  $\theta_1 = 77^\circ$ ,  $\theta_2 = 57^\circ$ , dan  $\theta_3 = 102^\circ$ . Sedangkan untuk Posisi Kiri, sudut-sudut yang dihasilkan adalah:  $\theta_1 = 77^\circ$ ,  $\theta_2 = 57^\circ$ , dan  $\theta_3 = 102^\circ$ .
2. Pergerakan lengan robot dalam proyek ini menghasilkan gerakan yang stabil, yang dapat diamati dari hasil pengujian pada tiga posisi koordinat *end-effector* (x, y, z). Rata-rata kesalahan dari ketiga posisi yang digabungkan adalah sebesar: *error x* = 9,86%, *error y* = 6,33%, dan *error z* = 5,23%.
3. Pengendalian kecepatan motor servo terhadap perpindahan sudut lengan robot dalam proyek ini paling efektif dan menghasilkan gerakan yang stabil dengan penggunaan nilai delay sebesar 20 ms.

#### 5.2 Saran

Terdapat beberapa rekomendasi setelah melakukan perancangan dan pengujian pada sistem yang telah dibangun:

1. Pemilihan motor servo dengan kemampuan presisi putaran sudut yang lebih tinggi diharapkan dapat meningkatkan akurasi pergerakan lengan robot.
2. Perbaikan dalam desain dan material konstruksi lengan robot bertujuan untuk meningkatkan presisi dan kekokohan struktur guna mengurangi tingkat kesalahan (*error*).
3. Penerapan sistem mekanisme cangkang (*gripper*) yang lebih fleksibel diharapkan dapat mengakomodasi berbagai ukuran dengan lebih baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Derisma, F. F. S. S. B. R. D. (2015). PENERAPAN *FORWARD KINEMATICA* UNTUK PERGERAKAN KAKI ROBOT BIPED. *Prosiding Semnastek, PROSIDING SEMNASTEK 2015*.  
<https://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek/article/view/532/498>
- [2] Abdullah, A. (2017). Sistem Penyeleksi Warna Dan Berat Barang Menggunakan Pergerakan Lengan Robot Empat DOF (Degree Of Freedom). *J-SAKTI (Jurnal Sains Komputer Dan Informatika), Vol 1, No 1 (2017): EDISI MARET, 59–70*.  
<http://tunasbangsa.ac.id/ejurnal/index.php/jsakti/article/view/29/26>
- [3] Prahasto, A. R. M. M. T. (2013). Optimasi *Gripper* Dua Lengan dengan Menggunakan Metode Genetic Algorithm pada Simulator Arm Robot 5 DOF (Degree of Freedom). *JURNAL TEKNIK MESIN, Vol 1, No 2 (2013): VOLUME 1, NOMOR 2, APRIL 2013, 9–16*.  
<https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm/article/view/5559/5360>
- [4] Yantidewi, F. R. I. I. S. M. (2020). Penerapan Metode *Forward Kinematic* Pada Kontrol Gerak Robot Lengan Tiga Derajat Bebas. *Inovasi Fisika Indonesia, Vol 9 No 2 (2020), 64–71*.  
<https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/inovasi-fisika-indonesia/article/view/34638/30796>
- [5] . M. D. (2016). Rancang Bangun Pengendalian Robot Lengan 4 DOF dengan GUI (Graphical User Interface) Berbasis Arduino Uno. *Jurnal Teknik Elektro Universitas Tanjungpura, Vol 1, No 1 (2016): Jurnal Mahasiswa Teknik Elektro UNTAN*.  
<http://jurnal.untan.ac.id/index.php/jteuntan/article/view/14580/12964>
- [6] Augusta S. Julius; A. Ananda, Stephanus, B. S. S. (2002). STUDI PENGGUNAAN PERMANEN MAGNET SERVO MOTOR TEGANGAN 460 V DC 1850 RPM PADA MESIN POTONG KARTON.

*Jurnal Teknik Elektro, Vol 2, No 2 (2002): SEPTEMBER 2002.*

<http://jurnalelektro.petra.ac.id/index.php/elk/article/view/15860>

- [7] Sugiarto, I. (2008). Pemodelan dan Simulasi Dinamika Lengan Robot 3-DOF Menggunakan Perangkat Lunak Open Source. *Jurnal Teknik Elektro, Vol 8, No 2 (2008): SEPTEMBER 2008, 57–63.* <http://jurnalelektro.petra.ac.id/index.php/elk/article/view/17815/17840>
- [8] Bimantaka, A. H. B. N. W. (2014). Purwarupa Robot Lengan Pemilah Objek Berdasarkan Label Tulisan Secara Realtime. *IJEIS (Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems), Vol 4, No 2 (2014): October, 135–146.* <https://journal.ugm.ac.id/ijeis/article/view/7112/5560>
- [9] Ferry Hadary Uray Ristian, Y. B. (2013). VISUALISASI DAN PENGENDALIAN GERAK ROBOT LENGAN 4 DOF MENGGUNAKAN VISUAL BASIC. *Coding Jurnal Komputer Dan Aplikasi, Vol 1, No 1 (2013): Jurnal Coding Sistem Komputer.* <http://jurnal.untan.ac.id/index.php/jcskommipa/article/view/2286/75676580328>
- [10] Prayogo Aris; Sumardi, Sumardi, R. C. T. (2018). PERANCANGAN ROBOT BERKAKI 4 (QUADRUPED) DENGAN STABILIZATION ALGORITHM PADA UNEVEN FLOOR MENGGUNAKAN 6-DOF IMU BERBASIS *INVERS KINEMATIC*. *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro, TRANSIENT, VOL. 7, NO. 2, JUNI 2018, 543–551.* <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/transient/article/view/23362/21342>
- [11] Prasetyo, M. N. E. C. S. M. B. I. A. A. B. (2020). Sistem Kendali Rotasi Matahari Pada Panel Surya Berbasis Arduino UNO. *Jurnal Teknik Dan Sistem Komputer, Vol 1, No 2 (2020): Jurnal Teknik dan Sistem Komputer, 40–45.* <http://jim.teknokrat.ac.id/index.php/jtikom/article/view/14/171>
- [12] Prasetyawan, T. S. R. G. A. S. P. (2020). Sistem Keamanan Pada Ruang Pribadi Menggunakan Mikrokontroler Arduino dan SMS Gateway. *Jurnal*

*Teknik Dan Sistem Komputer, Vol 1, No 2 (2020): Jurnal Teknik dan Sistem Komputer,* 46–52.  
<http://jim.teknokrat.ac.id/index.php/jtikom/article/view/15/168>

- [13] Muhammad Ichwan[1], Milda Gustiana Husada[2], M. I. A. R. (2013). *PEMBANGUNAN PROTOTYPE SISTEM PENGENDALIAN PERALATAN LISTRIK PADA PLATFORM ANDROID. 4, 25.*  
<http://lib.itenas.ac.id/kti/wp-content/uploads/2013/10/Jurnal-No1Vol4-2.pdf>
- [14] Riski, M. D. (n.d.). RANCANG ALAT LAMPU OTOMATIS DI CARGO COMPARTMENT PESAWAT BERBASIS ARDUINO MENGGUNAKAN PUSH BUTTON SWITCH SEBAGAI PEMBELAJARAN DI POLITEKNIK PENERBANGAN SURABAYA. *Prosiding SNITP (Seminar Nasional Inovasi Teknologi Penerbangan).*
- [15] Cadika Annum Harahap, M. I. M. (n.d.). *Rancang Bangun Robot Pemantau Ruang Menggunakan Jaringan Nirkabel.* <http://ejurnal.seminar-id.com/index.php/bees/article/view/224>
- [16] PRABOWO, F. N. (2019). *RANCANG BANGUN PINTU GERBANG OTOMATIS BERBASIS INTERNET OF THINGS VIA ANDROID [INSTITUT TEKNOLOGI TELKOM PURWOKERTO].*  
<http://repository.ittelkom-pwt.ac.id/id/eprint/5946>