

**PERANCANGAN MODEL KINEMATIKA MAJU ROBOT  
MANIPULATOR MENGGUNAKAN METODE  
*DENAVIT-HARTENBERG***

(Skripsi)

Oleh

**STEVEN HARYANTO**  
NPM. 1915031017



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2023**

## ABSTRAK

### PERANCANGAN MODEL KINEMATIKA MAJU ROBOT MANIPULATOR MENGGUNAKAN METODE *DENAVIT-HARTENBERG*

OLEH

STEVEN HARYANTO

Robot manipulator adalah jenis robot yang terdiri dari lengan yang berfungsi untuk memindahkan benda dari satu posisi ke posisi lain. Biasanya untuk memindahkan benda dengan cara konvensional yaitu menggunakan tenaga manusia. Perkembangan teknologi robotika di industri membuat pergerakan benda menggunakan sistem robot lengan. Pekerjaan manusia menjadi lebih mudah. Penelitian yang dilakukan mengarah pada robot manipulator dengan merancang model kinematika maju menggunakan metode *denavit-hartenberg*. Dalam pengembangan model robot, fokus diberikan pada aspek pergerakan dan penerapan metode *denavit-hartenberg* untuk merancang parameter yang mengarahkan gerakan lengan robot. Penelitian ini menggunakan arduino sebagai mikrokontroler lengan robot manipulator dan pengujian penelitian dilakukan dengan membandingkan posisi *end-effector* yang dilakukan dengan pengukuran dengan posisi *end-effector* dengan metode yang digunakan. *Input* dari robot manipulator ini adalah sudut yang sudah ditentukan dan hasil *output* berupa nilai posisi *end-effector* lengan robot manipulator yang menggunakan kinematika maju dengan metode *denavit-hartenberg*. Berdasarkan hasil penelitian tersebut, lengan robot manipulator 2 DOF (*Degree Of Freedom*) dapat berpindah tempat dari satu posisi ke posisi yang lain, dengan rata-rata error posisi x sebesar 1,6660%, rata-rata error posisi y sebesar 2,4940% dan rata-rata error posisi z sebesar 7,6560%.

Kata Kunci: Robot manipulator, kinematika maju, Denavit-Hartenberg, Model, *Degree of Freedom*.

## ABSTRACT

### DESIGNING FORWARD KINEMATIC MODEL OF ROBOT MANIPULATOR USING THE DENAVIT-HARTENBERG METHOD

BY

STEVEN HARYANTO

*Manipulator robot is a type of robot that consists of an arm that functions to move objects from one position to another. Usually, to move objects using conventional methods, namely using human power. The development of robotics technology has made the movement of objects into industry with robotic arm systems. By using a robot manipulator, human work becomes easier. The research carried out leads to a robot manipulator arm by designing an forward kinematics model using the Denavit-Hartenberg method. In developing the robot model, focus is given to the movement aspect and the application of the Denavit-Hartenberg method to design parameters that direct the arm's robot movement. This research uses an Arduino as a robot manipulator microcontroller and research testing is carried out by comparing the position of the end-effector which is carried out by measuring the position of the end-effector with the method used. The input of this robot manipulator is the angles that have been determined and the output results is in the form of the end-effector position value of the arm robot manipulator which uses forward kinematics with the Denavit-Hartenberg method. Based on the results of this research, a 2 DOF (Degree of Freedom) arm robot can move from one position to another. where the x position error is equal to 1,6660%, y position error is 2,4940% and z position error is 7,6560%.*

*Keywords: Manipulator robot, Forward kinematics, Denavit-Hartenberg, Model, Degree of Freedom.*

**PERANCANGAN MODEL KINEMATIKA MAJU ROBOT  
MANIPULATOR MAJU MENGGUNAKAN METODE  
*DENAVIT-HARTENBERG***

Oleh

**STEVEN HARYANTO**

(Skripsi)

Sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar  
**SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2023**

Judul Skripsi : **PERANCANGAN MODEL KINEMATIKA MAJU ROBOT MANIPULATOR MENGGUNAKAN METODE DENAVIT-HARTENBERG**

Nama Mahasiswa : **Steven Haryanto**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1915031017**

Jurusan : **Teknik Elektro**

Fakultas : **Teknik**



**Anisa Ulya Darajat, S.T., M.T.**

NIP. 199106102019032024

**Umi Murdika, S.T., M.T.**

NIP. 197202062005012002

**2. Mengetahui**

**Ketua Jurusan Teknik Elektro**

**Ketua Program Studi Teknik Elektro**

**Herlinawati, S.T., M.T.**

NIP. 197103141999032001

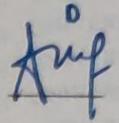
**Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T.**

NIP. 197404222000122001

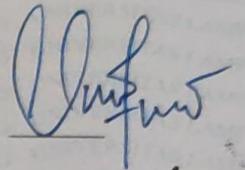
**MENGESAHKAN**

1. Tim Penguji

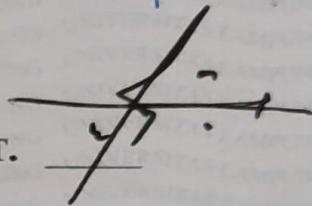
Ketua : **Anisa Ulya Darajat, S.T., M.T.**



Sekretaris : **Umi Murdika, S.T., M.T.**



Penguji Bukan Pembimbing : **Dr. Eng. Ageng Sadnowo Repelianto, S.T., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung



**Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.**  
NIP.19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: **29 November 2023**

## SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama Mahasiswa : Steven Haryanto  
Nomor Pokok Mahasiswa : 1915031017  
Program Studi : Teknik Elektro  
Jurusan : Teknik  
Fakultas : Teknik

Dengan ini menyatakan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul “Perancangan Model Kinematika Maju Robot Manipulator Menggunakan Metode *Denavit-Hartenberg*” adalah asli penelitian saya dan tidak plagiat kecuali pada bagian tertentu yang dirujuk dari sumbernya dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Demikian pernyataan ini saya buat dan apabila dikemudian hari ternyata pernyataan ini tidak benar, maka saya sanggup dituntut berdasarkan undang-undang dan peraturan yang berlaku.

Bandar Lampung, 07 Desember 2023  
Pembuat Pernyataan,



**Steven Haryanto**  
NPM. 1915031017

## RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Steven Haryanto lahir di Kota Bandar Lampung, Bandar Lampung, Lampung pada tanggal 05 Januari 2001, penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara yang merupakan anak dari pasangan Bapak Rudy Harijanto dan Ibu Listiawati.

Penulis mengawali pendidikan dasar di TK Litte Eagle pada tahun 2005 dan tamat pada tahun 2007, pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan ke SDS Rajawali dan tamat tahun 2013. pada tahun 2013 penulis melanjutkan pendidikan ke SMP Negeri 1 Pesawaran dan tamat tahun 2016 Pada tahun 2016 penulis melanjutkan pendidikan ke SMA Negeri 1 Gedong Tataan dan tamat tahun 2019. Pada tahun 2019 penulis melanjutkan Pendidikan Sarjana di Universitas Lampung sebagai mahasiswa Program Studi Teknik Elektro, Jurusan Teknik, Fakultas Teknik melalui jalur SNMPTN (Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri).

Selama menempuh perkuliahan penulis pernah mengikuti UKM (Unit Kegiatan Mahasiswa) Kristen sebagai anggota pada tahun 2019-2020 dan FKMK-FT (Forum Komunitas Mahasiswa Kristen Fakultas Teknik) sebagai anggota pada tahun 2019-2022. Pada tahun 2022 penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) dan Magang MBKM di Perusahaan Anak PLN yaitu Haleyora Power di Haleyora Power Sub Region 7 Lampung Area Tanjung Karang yang berlokasi di Segala Mider, Kecamatan Tanjung Karang Barat Betung, Kota Bandar Lampung.

## **MOTTO HIDUP**

“Kuatkanlah hatimu, jangan lemah semangatmu, karena ada upah bagi usahamu”

(2 Tawarikh 15 : 7)

“Hati yang gembira adalah obat yang manjur, tetapi semangat yang patah mengeringkan tulang.”

(Amsal 17 : 22)

## *PERSEMBAHAN*

Segenap ketulusan dan kerendahan hati kupersembahkan karya ini sebagai rasa syukur kepada Tuhan Allah yang murah berkat, dan ucapan terima kasihku kepada:

### **Kedua Orang tuaku Tercinta**

Bapak Rudy Harijanto dan Ibu Listiawati  
Sosok yang selalu ada membantu dan menyemangatiku dengan penuh kasih sayang. Orang tua yang selalu mendoakanku di setiap langkahku, yang membesarkanku dengan penuh kesabaran dan selalu menasehatiku, serta telah menjadi sosok orang tua yang selalu aku banggakan, terima kasih banyak pak, mak.

### **Kakak dan Adik Tersayang**

Stevanus dan Stevanie  
Kakak dan Adik sekaligus teman yang selalu memberikan dukungan dan semangat kepadaku untuk selalu semangat dan tidak menyerah dalam menyelesaikan studiku.

### **Almamater Tercinta Universitas Lampung**

Yang telah menerimaku sebagai mahasiswa untuk menimba ilmu, serta mempertemukanku dengan teman-teman yang selalu membantu dan mendoakanku.

## SANWACANA

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karunia, serta petunjuk-Nya sehingga penyusunan skripsi yang berjudul “Perancangan Model Kinematika Maju Menggunakan Metode *Denavit-Hartenberg*” dapat diselesaikan dengan baik. Penyusunan skripsi ini diselesaikan untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam menyelesaikan pendidikan pada Program Studi Teknik Elektro, Universitas Lampung. Perjalanan panjang telah penulis lalui dalam rangka menyelesaikan skripsi ini. Banyak hambatan yang dihadapi dalam penyusunannya namun penulis mendapatkan arahan, bantuan, serta dukungan dari berbagai pihak sehingga skripsi ini dapat terselesaikan. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., IPM., ASEAN Eng. selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Herlinawati, S.T.,M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
4. Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Lampung.
5. Dr. Eng. Diah Permata, S.T., M.T. selaku Pembimbing Akademik.
6. Anisa Ulya Darajat, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Utama atas kesediaanya meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, ilmu yang bermanfaat, dukungan moral, saran dan kritik dalam proses penyelesaian skripsi ini.
7. Umi Murdika, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Kedua atas kesediaanya untuk memberikan bimbingan, saran dan kritik yang sangat membangun dalam proses penyelesaian skripsi ini.
8. Dr.Eng. Ageng Sadnowo Repelianto, S.T., M.T. selaku Penguji Utama skripsi, terimakasih atas saran dan kritik yang membangun sehingga skripsi ini dapat diselesaikan.

9. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung atas pengajaran dan bimbingannya yang diberikan selama perkuliahan di kampus Universitas Lampung.
10. Serta yang paling utama dari segalanya yaitu kepada Bapak saya Rudy Harijanto, Ibu saya Listiawati, Kakak saya Stevanus Haryanto dan Adik saya Stevanie Claudia, keluarga tercinta yang selalu memberikan doa dan semangat dalam penyusunan skripsi ini.
11. Sahabat dan sekaligus teman seperjuangan skripsi tentang tema robot (Nur Zidan Haq) yang selalu menemani dari awal mulai skripsi sampai akhir dengan prinsip “GAS POKOKNYA GAS AJA”.
12. Pemilik NPM 1913054042, sebagai orang spesial dan penyemangat bagi penulis, yang ada dan hadir di awal perkuliahan penulis dan menami disaat penulis membuat skripsi sampai proses pengerjaan skripsi ini.
13. Sahabat Terbaik #SALAM DARI BINJAI (Zidan, Raffi, Dika, dan Faruk) dan Ridho yang menemani dari semester ke semester perkuliahan sampai akhir.
14. Teman-Teman Magang Haleyora Power Sub Region 7 Lampung (Dika, Rachel, Natasya, Hari, Josep, Mirza, Ronald, Ferry, Auliyana dan Putri) yang selalu mendukung saya.
15. Teman-Teman Teknik Elektro'19 sebagai rekan seperjuangan dari mahasiswa baru sampai sekarang.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna dikarenakan keterbatasan pengetahuan dan pengalaman yang dimiliki. Untuk itu, penulis mengharapkan adanya kritik dan saran yang membangun. Akhir kata semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat dan menambah ilmu pengetahuan bagi para pembaca.

Bandar Lampung, 07 Desember 2023

Penulis



**Steven Haryanto**

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iii</b>
<b>SANWACANA .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xvii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	2
1.3 Manfaat Penelitian.....	3
1.4 Rumusan Masalah .....	3
1.5 Batasan Penelitian .....	3
1.6 Hipotesis.....	3
1.7 Sistematika Penulisan.....	4
<b>BAB II KAJIAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Penelitian Terkait.....	5
2.2 Robot Manipulator.....	6
2.2.1 <i>Link</i> Robot .....	7
2.2.2 <i>Joint</i> (Sendi).....	7
2.2.3 <i>End-Effector</i> .....	7
2.3 <i>Degree Of Freedom</i> (DOF) .....	7
2.4 Motor Servo.....	8
2.5 Model Kinematika.....	9
2.6 Arduino UNO .....	11

2.7	Arduino IDE .....	11
2.8	<i>Breadboard</i> .....	12
2.9	Metode <i>Denavit-Hartenberg</i> .....	13
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>		<b>21</b>
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian .....	21
3.2	Alat dan Bahan Penelitian .....	21
3.2	Metode Penelitian.....	21
3.3	Model Robot Manipulator .....	24
3.4	Perancangan Model Robot <i>Denavit-Hartenberg</i> .....	26
3.5	Diagram Sistem Alat .....	31
3.6	Pengujian Alat .....	32
3.7	Perancangan Pengambilan Data dan Analisa .....	32
3.7.1	Perancangan Pengujian Alat.....	33
3.7.2	Perancangan Selisih dan <i>Error</i> Posisi Robot Manipulator.....	33
<b>BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....</b>		<b>35</b>
4.1	Spesifikasi Robot Manipulator .....	35
4.2	Data Penelitian.....	36
4.3	<i>Wiring</i> Diagram Robot Manipulator .....	37
4.4	Pengujian Sudut Motor Servo .....	38
4.5	Hasil data pengujian penelitian .....	40
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>		<b>49</b>
5.1	Kesimpulan.....	49
5.2	Saran.....	49
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>50</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>		<b>51</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Robot Manipulator .....	6
Gambar 2.2 Motor Servo MG90S .....	8
Gambar 2.3 Pemodelan Kinematika .....	9
Gambar 2.4 <i>Forward Kinematics</i> 2 DOF.....	10
Gambar 2.5 <i>Inverse Kinematics</i> 2 DOF .....	10
Gambar 2.6 Arduino UNO .....	11
Gambar 2.7 Tampilan Arduino IDE .....	12
Gambar 2.8 <i>Breadboard</i> .....	12
Gambar 2.9 Kaidah tangan kanan .....	13
Gambar 2.10 Notasi <i>Denavit-Hartenberg</i> .....	18
Gambar 2.11 Pembuat model robot manipulator .....	20
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian .....	22
Gambar 3.2 Alur Sistem Perancangan Model Kinematika Robot .....	23
Gambar 3.3 Model Robot Manipulator .....	24
Gambar 3.4 Panjang <i>Link</i> 1 .....	25
Gambar 3.5 Panjang <i>Link</i> 2.....	25
Gambar 3.6 Sudut $\theta_1$ dan $\theta_2$ .....	25
Gambar 3.7 Langkah penyelesaian metode <i>Denavit-Hartenberg</i> .....	26
Gambar 3.8 (a)Skema planar robot (b)Planar robot manipulator dengan 2 DOF .	27
Gambar 3.9 <i>Link</i> 1 Robot Manipulator 2 DOF .....	28
Gambar 3.10 <i>Link</i> 2 Robot Manipulator 2 DOF .....	29
Gambar 3.11 Blok Diagram Sistem Alat Robot Manipulator.....	31
Gambar 4.1 Spesifikasi Robot Manipulator.....	35
Gambar 4.2 <i>Wiring</i> diagram robot manipulator .....	38
Gambar 4.3 Pengukuran Sudut Motor Servo Menggunakan Penggaris Busur ...	39

Gambar 4.4 Pengambilan data pengukuran posisi <i>end-effector</i> robot manipulator menggunakan penggaris .....	42
Gambar 4.5 Grafik <i>end-effector</i> x robot manipulator .....	45
Gambar 4.6 Grafik <i>end-effector</i> y robot manipulator .....	46
Gambar 4.7 Grafik data posisi <i>end-effector</i> z robot manipulator.....	47

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1 Penelitian terkait .....	5
Tabel 2.2 Parameter DH.....	20
Tabel 3.1 Alat dan bahan penelitian.....	21
Tabel 3.2 D-H Parameter untuk robot 2 DOF.....	28
Tabel 3.3 Pengujian alat.....	32
Tabel 4.1 Data panjang <i>link</i> robot manipulator.....	36
Tabel 4.2 Data parameter D-H robot 2 DOF.....	36
Tabel 4.3 Data sudut <i>joint</i> robot manipulator .....	37
Tabel 4.4 Data <i>wiring</i> motor servo Arduino UNO .....	38
Tabel 4.5 Data pengujian sudut motor servo .....	40
Tabel 4.6 Hasil data uji penelitian.....	43

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi saat ini sudah meningkatkan penciptaan manusia semakin banyak dalam membuat perangkat untuk meningkatkan kualitas hidup. Manusia mencoba lebih dan lebih menghasilkan alat bantu agar membuat pekerjaan orang lebih cepat dan lebih mudah. Misalnya, desain dan pembuatan robot yang terus berkembang untuk memenuhi permintaan manusia. Pada umumnya robot manipulator digunakan dalam dunia industri, misalnya industri otomotif, elektronik, dan komputer. Memindahkan dan menyimpan barang dari satu tempat ke tempat lain yang lain membutuhkan perangkat yang bekerja dengan cepat dan akurat. Padahal, masih banyak industri yang menggunakan tenaga manusia. Pada dasarnya, pekerja bisa memindahkan barang cepat dan tepat, tetapi juga memiliki kekurangan dalam hal energi dan konsentrasi kerja yang benar mempengaruhi efisiensi pekerjaan yang dilakukan [1].

Dalam dunia otomasi, fungsi utama robot yang terutama adalah pekerjaan memindahkan barang berat, menempatkan benda dan lainnya. Ketika seseorang diminta untuk melakukan tugas yang berulang, pekerjaan menjadi membosankan dan melelahkan, untuk meminimalkan hal-hal tersebut, manusia mengganti dengan daya tahan dan konsentrasi yang tinggi, terutama dalam tugas yang berulang sehingga memerlukan bantuan robot [2].

Dari latar belakang tersebut, maka muncul inovasi dan ide untuk membuat robot pemindah barang yaitu robot manipulator. Robot ini akan mengambil dan menyimpan barang dengan posisi yang ditentukan menggunakan aplikasi / *software*. Selain bekerja di gudang dan kawasan industri, robot ini juga dapat

digunakan sebagai pengantar makanan dan barang dagangan di restoran dan toko kebutuhan pokok [3].

Pada robot manipulator terdapat istilah *Degrees Of Freedom* atau DOF dalam robot manipulator merujuk pada jumlah gradien kebebasan atau kemampuan bergerak yang dimiliki oleh setiap sendi pada robot. Secara sederhana, DOF mencerminkan jumlah sumbu atau sendi yang dapat bergerak pada robot manipulator. Jumlah DOF pada suatu robot manipulator biasanya tergantung pada jumlahnya *joint* robot dan jenis aplikasi dari robot tersebut [4].

Dalam robot manipulator, terdapat *Forward kinematics* yaitu analisis kinematika dalam kombinasi beberapa motor penggerak untuk mendapatkan koordinat (x,y,z) pada posisi robot dengan diketahui setiap sudut pada *joint* robot dan panjang *link* robot. *Forward kinematics* digunakan pada persamaan kinematika robot untuk menentukan posisi robot pada ujung lengan robot (*Endpoint*) dengan menggunakan sudut-sudut setiap *joint* robot tersebut. Saat menghitung gerak robot, diperlukan panjang jarak setiap lengan, juga jarak antar motor. Kinematika Maju (*Forward Kinematics*) mengubah nilai posisi menjadi sinyal yang harus diumpankan ke motor selama gerakan robot. Penelitian ini menunjukkan bahwa kinematika maju robot dapat diselesaikan dengan menggunakan matriks, prosedur iteratif, dan geometris [4].

Berdasarkan permasalahan tersebut, Maka penelitian yang dilakukan adalah untuk mendapat pemodelan robot dan mengimplementasikan robot untuk menggerakkan bagian lengan robot dari posisi awal sampai posisi tujuan yang ditentukan oleh sudut robot. Pemodelan ini menggunakan metode *Denavit-Hartenberg* dengan menggunakan matriks *Denavit-Hartenberg*. Matriks ini menggabungkan translasi dan rotasi dalam matriks 4 x 4 dengan beberapa variabel yang berisi informasi tentang jarak motor dan sudut posisi motor [4].

## 1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yaitu merancang pemodelan matematis kinematika maju dari lengan robot manipulator 2-DOF dan menganalisa posisi *end-effector* dari pergerakan lengan robot manipulator 2-DOF dengan sudut joint yang sudah ditentukan.

### 1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah merancang pemodelan kinematika maju matematis lengan robot manipulator dan mengetahui posisi lengan robot manipulator robot dengan sudut yang sudah ditentukan.

### 1.4 Rumusan Masalah

Dalam industri, memindahkan dan menyimpan barang dari satu tempat ke tempat lain yang lain membutuhkan perangkat yang bekerja dengan cepat dan akurat. Padahal, masih banyak industri yang menggunakan tenaga manusia di saat ini dalam proses perpindahan barang dari satu tempat ke tempat yang lain. Diperlukan suatu alat untuk memindahkan barang yang tepat seperti robot tangan yang akurat dan tepat. Pemodelan kinematika cukup sulit dilakukan karena dilakukan pengetahuan terkait prinsip dan hukum fisika untuk memodelkan kinematika robot. Selain itu semakin banyak *Degrees of Freedom* (DOF) maka semakin kompleks pemodelannya sehingga dibutuhkan teknik pemodelan dalam kinematika robot.

### 1.5 Batasan Penelitian

Batasan masalah dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Derajat kebebasan pada penelitian adalah robot manipulator 2 DOF.
2. Hanya membahas kinematika robot dan tidak membahas dinamika robot.
3. Robot manipulator tidak menggunakan *gripper*.
4. Pengujian yang dilakukan tidak membahas robot manipulator ketika mengangkat beban.

### 1.6 Hipotesis

Penelitian yang digunakan merupakan robot manipulator jenis robot lengan yang menggunakan mikrokontroler yaitu Arduino UNO untuk mengontrol robot menggunakan kinematika maju dan mendapatkan *output* berupa hasil posisi robot ( $x,y,z$ ) menggunakan metode *Devanit-Hartenberg* dengan *input* nilai sudut setiap *joint* (sudut) dan panjang *link*.

## **1.7 Sistematika Penulisan**

Adapun sistematika penulisan pada proposal ini adalah sebagai berikut ;

### **BAB 1. PENDAHULUAN**

Pada bab 1 memaparkan tentang latar belakang, tujuan, rumusan masalah, batasan masalah, manfaat, dan sistematika penulisan penelitian.

### **BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab 2 menjelaskan tentang teori dari sumber buku, jurnal, serta penelitian terdahulu.

### **BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bab 3 menjelaskan waktu, tempat, alat dan bahan, metode penelitian dan perancangan untuk hasil penelitian.

### **BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada bab 4 menjelaskan dan menganalisa hasil penelitian dari implementasi kinematika maju lengan robot manipulator pemindah barang berbasis arduino.

### **BAB 5. PENUTUP**

Pada bab 5 memaparkan kesimpulan dan saran penilitan yang didasarkan pada hasil data dan pembahasan.

## BAB II

### KAJIAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Terkait

Adapun pada tabel berikut ini merupakan beberapa refensi penelitian terdahulu pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Penelitian terkait

No.	Judul	Nama Penulis	Hasil
1	Prototype Manipulator Robot Berbasis Arduino Dengan Menggunakan Algoritma Kinematics	Salmon, Bartolomius Harpad	<ul style="list-style-type: none"><li>- Hasil penelitian ini pengontrolan menggunakan aplikasi dan bisa di ketahui nilai sudut-sudutnya</li><li>- Penelitian ini menggunakan metode <i>forward</i> dan <i>inverse kinematics</i> dan menggunakan aplikasi.</li></ul>
2	Modeling of 2-DOF Robot Arm and Control	Okubanjo, A. A. , Oyetola, O. K., Osifeko, M. O., Olaluwoye, O. O. and Alao, P. O.	<ul style="list-style-type: none"><li>- Pemodelan dan Simulasi Robot Manipulator 2 DOF menggunakan <i>Forward Kinematics</i> dan <i>Invers kinematics menggunakan metode Euler</i></li><li>- Mencari model dan mengontrol robot manipulator 2 Dof memiliki <i>responsibility</i> yang baik</li></ul>
3	Implementasi Robot Kinematika Robot Manipulator Pemindah Barang Dua Sendi (2 DOF) dengan Metode Kinematika Maju Untuk Menentukan Koordinat dalam Pemindahan Sebuah Object	Alamsyah Syahiidutama, Setya Ardhi, Judi Prajetno Sugiono, Hari Sutiksno	<ul style="list-style-type: none"><li>- Menentukan koordinat dalam pemindahan sebuah <i>object/</i> barang.</li><li>- Berapa lama waktu yang di perlukan untuk memindahkan barang.</li><li>- Kinematika Maju Untuk Menentukan Posisi Koordinat dalam Pemindahan Object</li></ul>
4	Implementasi Robot Manipulator Pemindah Barang 3 DOF Menggunakan Metode Inverse Kinematics	Rimsa Oktama, Rizal Maulana, Gembong Edhi Setyawan	<ul style="list-style-type: none"><li>- Penelitian ini menggunakan metode <i>inverse kinematics</i>.</li><li>- Hasil penelitian ini yaitu mendapatkan memindahkan posisi satu ke posisi lainnya dengan <i>error</i> sudut sebesar 0,67%</li></ul>

No.	Judul	Nama Penulis	Hasil
5	Penerapan Metode Denavit-Hartenberg Pada Perhitungan Inverse Kinematics Gerakan Lengan Robot	Agus Budi Dharmawan, Lina	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Penelitian ini menggunakan metode <i>Denavit-Hartenberg Inverse Kinematics</i></li> <li>- Robot yang di gunakan memiliki derajat kebebasan 3 DOF</li> <li>- Hasil Penelitian ini adalah menghasilkan sudut-sudut untuk menggerakkan lengan robot</li> </ul>

Berdasarkan dari penelitian yang terkait maka dalam melakukan penelitian implementasi lengan robot manipulator dalam perpindahan posisi lengan robot dari tempat ke tempat lain dengan sudut motor servo robot yang sudah ditentukan. Pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perpindahan lengan robot manipulator sesuai dengan titik perpindahan yang telah ditentukan, kemudian ditentukan sudut sudut robot manipulator ketika lengan robot manipulator berpindah dan berapa lama waktu yang diperlukan pada saat perpindahan tersebut.

## 2.2 Robot Manipulator

Robot manipulator adalah alat yang berbentuk robot yang menggunakan motor servo dengan bentuk seperti lengan untuk memudahkan pekerjaan manusia di bidang industri. Robot ini memiliki beberapa bagian yang dikendalikan oleh sistem pengontrol otomatis. Robot manipulator berfungsi untuk membantu manusia dalam dunia industri yaitu untuk proses memindahkan atau memindahkan barang dari suatu tempat ke tempat lain dengan mudah memindahkannya tanpa memerlukan alat berat untuk memindahkannya [5].



Gambar 2.1 Robot Manipulator

### 2.2.1 *Link Robot*

*Link* pada robot adalah bagian yang menghubungkan dua atau lebih sendi (*joint*) pada robot manipulator. Fungsi *link* sangat penting pada robot karena membentuk kerangka utama dan menghubungkan sendi dan *end-effector* robot (posisi x,y dan z). *Link* dibuat sedemikian rupa sehingga mencapai persyaratan teknis seperti kekuatan, kekakuan, dan bobot agar robot dapat bergerak dengan lancar, akurat, dan efisien sesuai dengan tugas yang diberikan [2].

### 2.2.2 *Joint (Sendi)*

Pada pengontrol robot terdapat suatu sambungan yang dihubungkan dengan pengontrol untuk melakukan gerakan rotasi atau penggerak. Umumnya jenis sambungan yang digunakan pada manipulator adalah sambungan terobosan. Sendi putar sering digunakan untuk pinggang, bahu dan siku, pergerakan sendi putar akan menciptakan satu derajat kebebasan.

### 2.2.3 *End-Effector*

End effector pada robot merupakan komponen akhir dari manipulator yang berada di ujung terakhir *link* robot manipulator dan bertugas melaksanakan tugas tertentu, bisa berupa gripper untuk menangkap, peralatan pengelasan, alat pemotong, sensor, atau titik posisi (posisi x, y dan z). Desainnya disesuaikan dengan kebutuhan dan aplikasi khusus robot yang bersangkutan.

## 2.3 *Degree Of Freedom (DOF)*

*Degrees of Freedom* atau DOF dalam robot manipulator merujuk pada jumlah gradien kebebasan atau kemampuan bergerak yang dimiliki oleh setiap sendi pada robot. Secara sederhana, DOF mencerminkan jumlah sumbu atau sendi yang dapat bergerak pada robot manipulator. Jumlah DOF pada suatu robot manipulator biasanya tergantung pada jumlahnya *joint* robot dan jenis aplikasi dari robot tersebut. Umumnya, DOF pada robot manipulator digunakan untuk menggambarkan besaran derajat kebebasan pada setiap sendi yang dimiliki oleh

robot, yakni besaran pergerakan translasi (bergerak maju-mundur dan kanan-kiri) dan rotasi (memutar, berbelok dan lainnya) yang dilakukan oleh setiap sendi robot. Semakin banyak DOF yang dimiliki oleh suatu robot manipulator, semakin kompleks pula pergerakan yang dapat dilakukan oleh robot dalam menjalankan tugasnya. Oleh karena itu, DOF seringkali dicantumkan sebagai salah satu kriteria untuk memilih dan mendesain robot manipulator yang tepat untuk kebutuhan aplikasi yang dimiliki, sehingga semakin banyak DOF semakin kompleks pemodelan kinematikanya [3].

#### 2.4 Motor Servo

Motor servo adalah motor DC sistem umpan balik loop tertutup. Motor ini terdiri dari motor DC, rangkaian roda gigi, potensiometer dan rangkaian kontrol. Potensiometer digunakan untuk menentukan batas sudut rotasi.

Berikut spesifikasi dari motor servo MG90S:

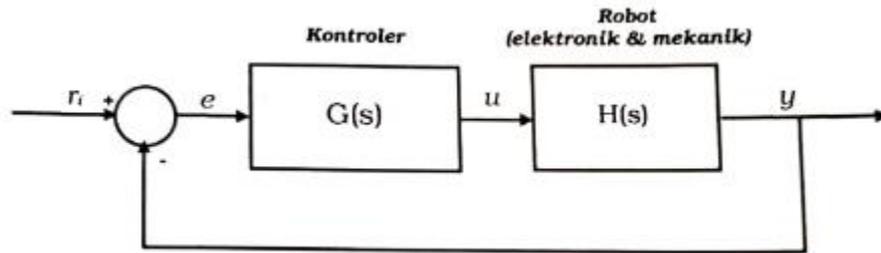
- Berat = 13.4 gram
- Dimensi = 22.5 x 12 x 35.5 *milimeter approxy*
- Torsi = 1.8 kgf. cm (4.8V). 2.2 kgf. cm (6 V)
- Kecepatan Operasi = 0.1s 60 derajat (4.8 V), 0.08 60 derajat (6 V)
- Tegangan Operasi = 4.8 volt – 6.0 volt
- Maksimal Putaran = 0 sampai 180 derajat



Gambar 2.2 Motor Servo MG90S

## 2.5 Model Kinematika

Analisis kinematik berkaitan dengan gerak robot tanpa mempertimbangkan efek inersia/yang terjadi pada saat robot melakukan gerakan. Sistem robot biasanya mencakup sistem kontrol, elektronik, dan mekanik robot. Dalam bentuk skema, diwakili oleh Gambar 2.4.



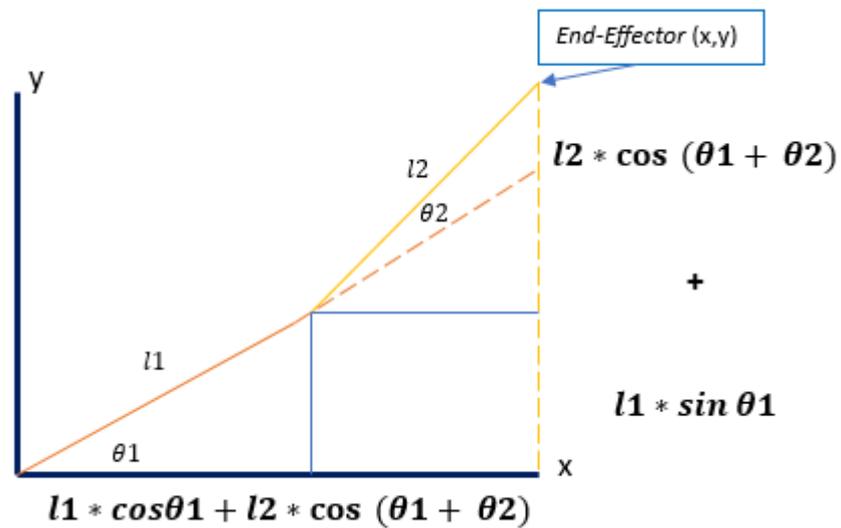
Gambar 2.3 Pemodelan Kinematika

$G(s)$   $G(s)$  adalah persamaan matematika pengontrol, dan  $H(s)$  adalah persamaan sistem fisik robot, termasuk aktuator dan sistem elektronik. Komponen  $r_i$  merupakan acuan masukan yang dalam penerapannya dapat menjadi acuan posisi, kecepatan, dan percepatan. Komponen  $e$  adalah error dan komponen  $u$  adalah keluaran pengontrol. Keluaran  $y$  merupakan fungsi gerak robot yang selalu sama dengan tumpuan (perpindahan) yang ditentukan pada masukan  $r_i$  [5].

Model kinematika terdapat 2 jenis yaitu kinematika maju dan kinematika mundur (balik). Kinematika maju (*Forward kinematics*) merupakan proses menghitung orientasi dan posisi dari posisi akhir robot (*end-effector*) berdasarkan sudut motor servo robot (*joint*), sedangkan kinematika mundur (*inverse kinematics*) sebaliknya diberikan posisi *end-effector*, dimana yang akan dicari nilai sudut setiap *joint* dalam mencapai posisi *end-effector* tersebut [1].

### 2.6.1 Forward Kinematics

*Forward kinematics* merupakan proses menghitung orientasi dan posisi dari *end-effector* (posisi akhir robot) berdasarkan sudut *joint* robot [7].



Gambar 2.4 *Forward Kinematics* 2 DOF

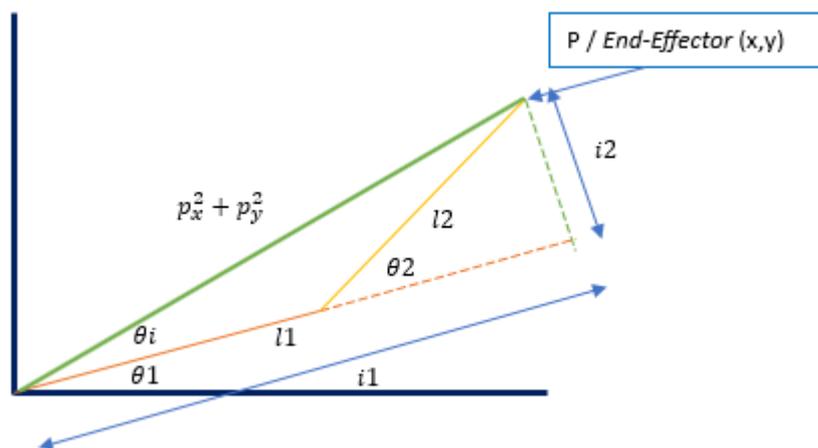
Dari Gambar 2.4 didapat rumus untuk mencari posisi dari *end-effector*  $(x,y)$  sebagai berikut:

$$x = l1 \cos \theta1 + l2 \cos(\theta1 + \theta2)$$

$$y = l1 \sin \theta1 + l2 \sin(\theta1 + \theta2)$$

### 2.6.2 *Invers Kinematics*

*Invers kinematics* merupakan proses menghitung sudut pada *joint* robot berdasarkan posisi akhir robot (*end-effector*)  $x$  dan  $y$  [7] [8].



Gambar 2.5 *Inverse Kinematics* 2 DOF

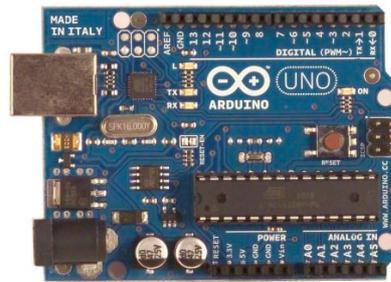
Dari Gambar 2.4 didapat rumus untuk mencari sudut ( $\Theta_1$  dan  $\Theta_2$ ) sebagai berikut:

$$\Theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{py}{px}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{i_2}{i_1}\right)$$

$$\Theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{\sin\theta_2}{\cos\theta_2}\right)$$

## 2.6 Arduino UNO

Arduino Uno merupakan *board* mikrokontroler *open source* berbasis mikrokontroler Microchip ATmega328P yang dikembangkan oleh Arduino.cc dan pertama kali dirilis pada tahun 2010. Papan ini memiliki sejumlah besar pin *input* dan *output digital* dan *analog* yang dapat dihubungkan ke berbagai ekspansi dan sirkuit lainnya [2].

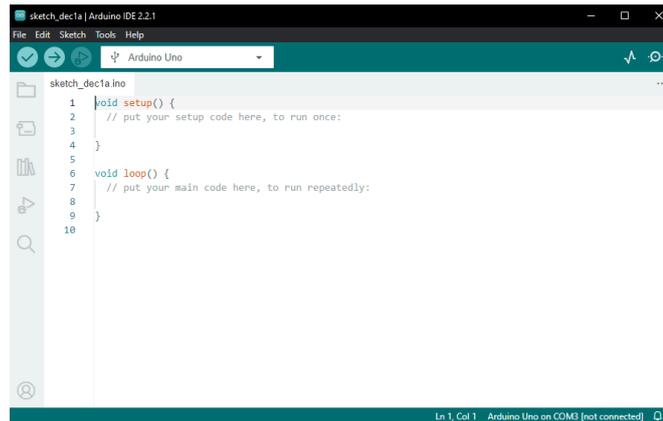


Gambar 2.6 Arduino UNO [8]

## 2.7 Arduino IDE

Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) adalah perangkat lunak yang digunakan untuk pemrograman pada Arduino. Arduino IDE digunakan untuk mengedit, membuat, mengunggah ke papan tertentu dan *listing* beberapa program. Arduino IDE dibuat dari bahasa pemrograman JAVA, dilengkapi dengan pustaka C/C++ (koneksi kabel) yang memudahkan pengoperasian *input/output*. [2].

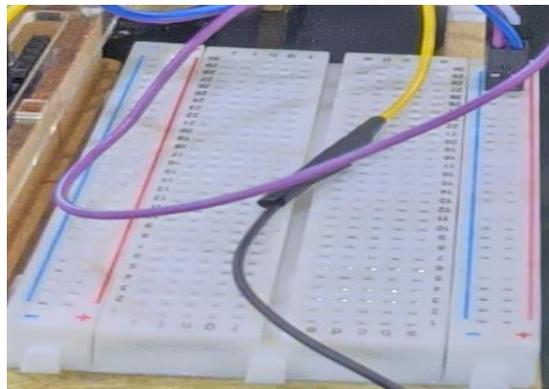
Arduino IDE merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk membuat sketsa pemrograman, atau dengan kata lain Arduino IDE merupakan pendukung pemrograman pada board yang ingin diprogram. Gambar 2.9 merupakan tampilan awal dari software Arduino IDE..



Gambar 2.7 Tampilan Arduino IDE [7]

## 2.8 Breadboard

*Breadboard* adalah jenis papan seperti papan roti yang umumnya digunakan untuk merancang model awal dari susunan perangkat elektronik. Nama lain *breadboard* ini adalah papan proyek atau bahkan papan prototipe (*prototype board*). Kelebihan alat ini yaitu aliran listrik dapat merata di antar komponen tanpa perlu soldering atau perakitan ulang [8].



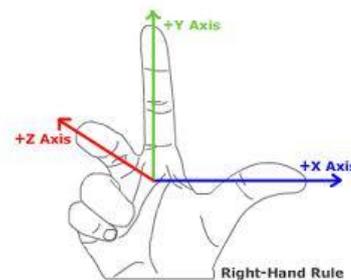
Gambar 2.8 Breadboard

## 2.9 Metode Denavit-Hartenberg

Metode penelitian ini yang digunakan adalah *Denavit-Hartenberg*. Metode *Denavit-Hartenberg* merupakan metode yang menggabungkan proses perhitungan matriks translasi dan matriks rotasi dengan matriks yang berisi nilai sudut rotasi dan jarak manipulator robot atau lengan robot. Dalam beberapa aplikasi, metode *Denavit-Hartenberg* biasanya digunakan untuk menghitung kinematika maju untuk menghitung posisi akhir robot, atau dalam kinematika balik untuk menghitung sudut setiap motor (sambungan) [4].

Hasil akhir gerak robot dibandingkan dengan pengukuran manual yang dilakukan manusia untuk menghitung tingkat keakuratan perhitungan dan gerak. Notasi Denavit dan Hartenberg memberikan cara standar untuk menulis persamaan gerak lengan robot. Hal ini sangat berguna untuk manipulator serial, di mana matriks digunakan untuk mewakili posisi relatif dan orientasi suatu objek ke objek lainnya [7].

Setiap sendi mewakili derajat kebebasan (DOF). Untuk menggambarkan hubungan translasi dan rotasi antara mata rantai yang berdekatan, menggunakan konsep Denavit dan Hartenberg dalam metode matriks yang secara sistematis membangun sistem koordinat untuk setiap mata rantai. Cari transformasi dari ujung alat ke dasar pengontrol, identifikasi kerangka pengikat, dan dapatkan teknik sistematis yang dapat menggambarkan kinematika robot derajat kebebasan dengan cara yang unik. Matriks *Denavit-Hartenberg* adalah matriks khusus dari transformasi matriks homogen [4]. Metode *denavit-hartenberg* menggunakan aturan kaidah tangan kanan untuk mengetahui koordinat kartesius pada lengan robot. Kaidah tangan kanan dalam hubungan mengingat sumbu tiga dimensi dalam koordinat kartesian pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Kaidah tangan kanan [7].

Metode *Denavit-Hartenberg* (D-H) menggunakan matriks homogen dalam metode ini bertujuan untuk menyederhanakan dan mengatur hubungan antara berbagai komponen *link* dan sendi (joint) dalam manipulator robot dalam satu kerangka kerja yang terstruktur dengan baik. Terdapat beberapa alasan mengapa matriks homogen digunakan dalam metode *Denavit-Hartenberg*, di antaranya:

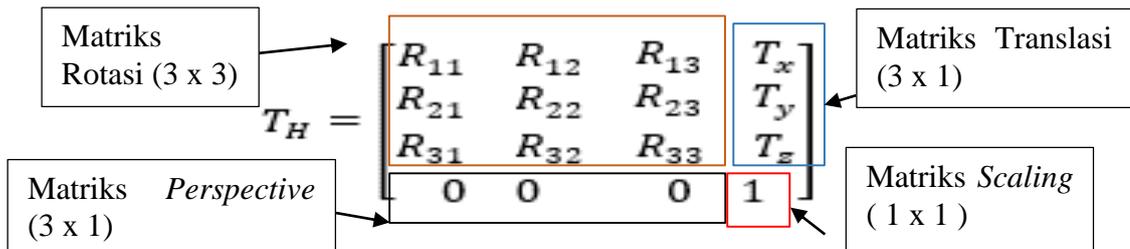
1. **Konsistensi Kerangka Kerja:** Matriks homogen memungkinkan untuk dengan konsisten mendefinisikan kerangka kerja untuk setiap link dalam manipulator robot. Setiap *link* memiliki kerangka kerja lokalnya, dan matriks homogen membantu dalam menggambarkan transformasi antara kerangka kerja yang berdekatan dengan parameter yang konsisten.
2. **Representasi Transformasi:** Matriks homogen memberikan representasi matematis yang jelas untuk transformasi dari satu *link* ke *link* berikutnya. Ini melibatkan translasi dan rotasi, yang merupakan elemen penting dalam kinematika manipulator robot.
3. **Penggabungan Transformasi:** Matriks homogen memudahkan penggabungan transformasi dari satu *link* ke *link* berikutnya dengan melakukan perkalian matriks. Hal ini mempermudah perhitungan kinematika dari satu link ke link lain dalam manipulator robot.
4. **Penyesuaian Parameter:** Metode Denavit-Hartenberg memungkinkan penentuan parameter Denavit-Hartenberg yang sesuai untuk setiap link dan sendi dalam manipulator robot. Parameter ini mencakup panjang link, sudut sendi, dan parameter lain yang diperlukan untuk menjelaskan kinematika manipulator.

Dengan memanfaatkan matriks homogen dan parameter Denavit-Hartenberg, metode ini membantu menyederhanakan analisis kinematika manipulator robot, sehingga membuatnya lebih mudah untuk dipahami dan dihitung. Inilah sebabnya mengapa matriks homogen digunakan dalam metode Denavit-Hartenberg. Elemen matriks homogen terdiri dari dibawah ini.

$$\left[ \begin{array}{c|c} 1. \text{Rotation matrix } (3 \times 3) & 2. \text{Position vector } (3 \times 1) \\ \hline 3. \text{Perspective transform } (1 \times 3) & 4. \text{Scaling factor } (1 \times 1) \end{array} \right] [10]$$

dengan :

1. Matrik 3x3 adalah matrik rotasi
2. Matrik 3x1 adalah matriks posisi vector (matriks translasi)
3. Matrik 1x3 adalah matriks *Perspective Transform* yang berisi (0,0,0)
4. Matrik 1x1 adalah matriks *Scaling* yang berisi nilai 1.



Transformasi matrik homogen dapat diuraikan seperti Persamaan (2.1):

$$T_H = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)[10]$$

dengan elemen matriks homogen;

- $R_{11}, R_{12}, R_{13}, R_{21}, R_{22}, R_{23}, R_{31}, R_{32}$  dan  $R_{33}$ : Matriks rotasi yang digunakan untuk melakukan rotasi vektor dalam ruang *euclidean* (ruang 3 dimensi) (matriks rotasi)
- $T_x, T_y$  dan  $T_z$  : Matriks Translasi untuk posisi sumbu x, y dan z (matriks translasi)
- $[ 1 ]$  : Matriks Skala yang menggambarkan perubahan panjang *link* robot.
- $[ 0 0 0 ]$  : Matriks perspektif yang menggambarkan pergeseran titik pandang *link* robot dalam koordinat 3 dimensi, karena tidak ada pergeseran titik pandang maka nilainya 0.

Dalam metode DH ini terdapat 4 parameter yang digunakan pada transformasi matrik untuk menentukan hubungan antar matrik, matriks yang

didapat ini adalah matriks *Denavit-Hartenberg* (D-H Matrix). Kemudian, akan menghasilkan matriks *Denavit-Hartenberg* (D-H):  ${}^{i-1}A_i = \text{Rot}(z_i, \theta_i)$ ,  $\text{Trans}(0,0, d_i)$ ,  $\text{Trans}(a_i, 0,0)$ ,  $\text{Rot}(x_i, \alpha_i)$  [4].

- Matriks  $\text{Rot}(z_i, \theta_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ , matriks  $\text{Rot}(z_{i-1}, \theta_{i-1})$  terbentuk

dari matriks dasar rotasi pada sumbu z  $\text{Rot}(z) 3 \times 3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ , karena

matriks *denavit-hartenberg* menggunakan matriks 4x4 sehingga menghasilkan

$$\text{matriks } \text{Rot}(z_i, \theta_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

- Matriks  $\text{Trans}(0,0, d_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ , matriks terbentuk dari matriks dasar

translasi pada sumbu z  $\text{Rot}(z) 3 \times 3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_i \end{bmatrix}$ , karena matriks *denavit-hartenberg*

menggunakan matriks 4x4 maka matriks sehingga menghasilkan matriks

$$\text{Trans}(0,0, d_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

- Matriks  $\text{Trans}(a_i, 0,0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ , Matriks terbentuk dari matriks dasar

translasi pada sumbu x  $\text{Trans}(x) 3 \times 3 = \begin{bmatrix} a_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ , karena matriks *denavit-hartenberg*

menggunakan matriks 4x4 sehingga menghasilkan matriks

$$\text{Trans}(a_i, 0,0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

- Matriks  $\text{Rot}(xi, \mathbf{a}i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha i & -\sin \alpha i & 0 \\ 0 & \sin \alpha i & \cos \alpha i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ . terbentuk dari matriks dasar rotasi

pada sumbu x  $\text{Rot}(x) 3 \times 3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta i & -\sin \theta i \\ 0 & \sin \theta i & \cos \theta i \end{bmatrix}$ , karena matriks *denavit-hartenberg*

menggunakan matriks  $4 \times 4$  sehingga menghasilkan matriks

$$\text{Rot}(xi, \mathbf{a}i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha i & -\sin \alpha i & 0 \\ 0 & \sin \alpha i & \cos \alpha i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Kemudian, 4 matriks tersebut dikalikan matriks per-matriks untuk mendapatkan matriks denavit-hartenberg yang digunakan untuk merancang pemodelan robot manipulator

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta i & -\sin \theta i & 0 & 0 \\ \sin \theta i & \cos \theta i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & di \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & ai \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha i & -\sin \alpha i & 0 \\ 0 & \sin \alpha i & \cos \alpha i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Langkah pertama, kalikan matriks  $\text{Rot}(zi, \theta i)$  dengan matriks  $\text{Trans}(0,0, di)$  terlihat dibawah ini.

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta i & -\sin \theta i & 0 & 0 \\ \sin \theta i & \cos \theta i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & di \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} (\cos \theta i) + (0) + (0) + (0) & (0) + (-\sin \theta i) + (0) + (0) & (0) + (0) + (0) + (0) & (0) + (0) + (0) + (0) \\ (\sin \theta i) + (0) + (0) + (0) & (0) + (\cos \theta i) + (0) + (0) & (0) + (0) + (0) + (0) & (0) + (0) + (0) + (0) \\ (0) + (0) + (0) + (0) & (0) + (0) + (0) + (0) & (0) + (0) + (1) + (0) & (0) + (0) + (di) + (0) \\ (0) + (0) + (0) + (0) & (0) + (0) + (0) + (0) & (0) + (0) + (0) + (0) & (0) + (0) + (0) + (1) \end{bmatrix}$$

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta i & -\sin \theta i & 0 & 0 \\ \sin \theta i & \cos \theta i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & di \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Langkah kedua, kalikan hasil matriks  $\text{Rot}(zi - 1, \theta i)$  dan  $\text{Trans}(0,0, di)$  dengan matriks  $\text{Trans}(0,0, ai)$ .

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta i & -\sin \theta i & 0 & 0 \\ \sin \theta i & \cos \theta i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & di \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & ai \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} (\cos \theta_i) + (0) + (0) + (0) & (0) + (-\sin \theta_i) + (0) + (0) & (0) + (0) + (0) + (0) & (a_i \times \cos \theta_i) + (0) + (0) + (0) \\ (\sin \theta_i) + (0) + (0) + (0) & (0) + (\cos \theta_i) + (0) + (0) & (0) + (0) + (0) + (0) & (a_i \times \sin \theta_i) + (0) + (0) + (0) \\ (0) + (0) + (0) + (0) & (0) + (0) + (0) + (0) & (0) + (0) + (1) + (0) & (0) + (0) + (0) + (d_i) \\ (0) + (0) + (0) + (0) & (0) + (0) + (0) + (0) & (0) + (0) + (0) + (0) & (0) + (0) + (0) + (1) \end{bmatrix}$$

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & a_i \sin \theta_i \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Langkah ketiga, kalikan hasil matriks Rot  $(z_i, \theta_i)$ , Trans  $(0,0,d_i)$  dan Trans  $(0,0,d_i)$  dengan matriks Rot  $(x_i, \alpha_i)$  pada dibawah ini.

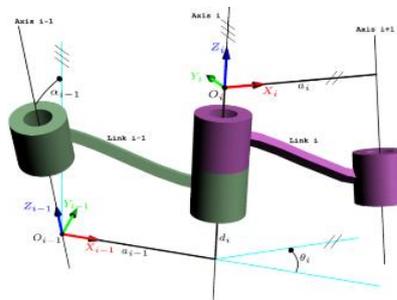
$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & a_i \sin \theta_i \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} (\cos \theta_i) + (0) + (0) + (0) & (0) + (-\sin \theta_i \times \cos \alpha_i) + (0) + (0) & (0) + (0) + (-\sin \theta_i \times (-\sin \alpha_i)) + (0) & (a_i \times \cos \theta_i) + (0) + (0) + (0) \\ (\sin \theta_i) + (0) + (0) + (0) & (0) + (\cos \theta_i \times \cos \alpha_i) + (0) + (0) & (0) + (0) + (\cos \theta_i \times (-\sin \alpha_i)) + (0) & (a_i \times \sin \theta_i) + (0) + (0) + (0) \\ (0) + (0) + (0) + (0) & (0) + (0) + (\sin \alpha_i) + (0) & (0) + (0) + (\cos \alpha_i) + (0) & (0) + (0) + (0) + (d_i) \\ (0) + (0) + (0) + (0) & (0) + (0) + (0) + (0) & (0) + (0) + (0) + (0) & (0) + (0) + (0) + (1) \end{bmatrix}$$

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Setelah 4 matriks tersebut dikalikan matriks maka didapatkan matriks denavit-hartenberg yang digunakan untuk merancang pemodelan robot manipulator.

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$



Gambar 2.10 Notasi Denavit-Hartenberg

Keterangan indikator parameter DH pada Gambar 2.10.

$\theta_i$  : sudut sumbu di  $x_{i-1}$  ke  $x_i$  pada pergeseran sumbu  $z_i$  (sudut *link* robot)

$d_i$  : jarak dari  $x_{i-1}$  ke  $x_i$ , diukur sepanjang  $z_i$  (tinggi *link* robot)

$a_i$  : jarak dari  $z_{i-1}$ , ke  $z_i$ , diukur sepanjang  $x_i$  (panjang *link* robot)

$\alpha_i$  : sudut dari  $z_{i-1}$ , ke  $z_i$  perpindahan sudut terhadap sumbu  $x_i$  (putaran *link* robot)

Dalam model penyelesaian untuk robot yang akan dibuat dengan metode *Forward Denavit-Hartenberg* membutuhkan parameter  $\theta_i$ ,  $a_i$ ,  $d_i$  dan  $\alpha_i$  dari rancangan lengan robot. Dari tabel parameter DH dapat diperoleh matriks setiap sendi (*joint*)  ${}^{i-1}A_i$  dengan menggunakan matriks *Denavit-Hartenberg* [8].

Notasi ini menggambarkan parameter hubungan antara satu sendi/lengan dengan sendi/lengan lainnya. Notasi Denavit-Hartenberg digunakan untuk memodelkan lengan robot tipe robot artikulasi. Notasi ini menggambarkan parameter hubungan antara suatu sambungan atau lengan dengan sambungan atau lengan lainnya dan terdiri dari empat parameter ( $a_i$ ,  $\alpha_i$ ,  $d_i$ ,  $\theta_i$ ). Notasi ini ditulis dalam sistem koordinat x, y, z..

Dalam metode *denavit-hartenberg*, Jumlah DOF yang terdapat pada robot mempengaruhi nilai matriks, bentuk model robot manipulator dan nilai parameter DH untuk pemodelannya, seperti jika pada robot terdapat 2-DOF maka nilai matriksnya terdiri dari 2 matriks DH yaitu;

$${}^0T_2 = {}^0A_1 \times {}^1A_2$$

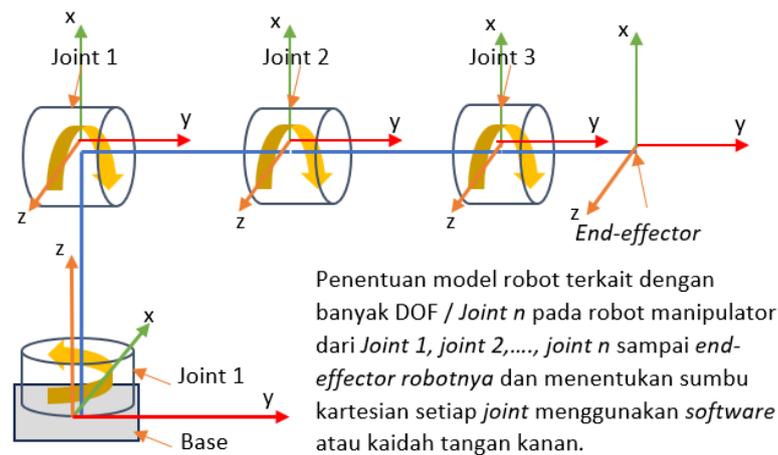
jika pada robot terdapat 3-DOF maka matriks DH yaitu;

$${}^0T_3 = {}^0A_1 \times {}^1A_2 \times {}^2A_3$$

dan seterusnya sampai

$${}^0T_n = {}^0A_1 \times {}^1A_2 \times \dots \times {}^{n-1}A_n$$

dengan nilai  $n$  adalah jumlah DOF pada robot lengan manipulator. Dalam penelitian ini menggunakan lengan robot 2-DOF. Untuk bentuk model robot terlihat pada Gambar 2.11. Untuk nilai tabel parameter DH nya jika ingin menambahkan DOF terdapat pada Tabel 2.2.



Gambar 2.11 Pembuat model robot manipulator

Dan untuk tabel dan parameter DH-nya jika menambahkan DOF pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Parameter DH

$i$ (link)	$\alpha_i$ (Putaran $link_i$ )	$a_i$ (Panjang link)	$d_i$ (jarak dari $x_{i-1}$ ke $x_i$ , diukur sepanjang $z_i$ )	$\theta_i$ (Sudut link)
1	$90^\circ$	0	$l_1$	$\theta_1$
2	0	$l_2$	0	$\theta_2$
.....	.....	.....	.....	.....
n	....	....	.....	....

Nilai parameter yang baru untuk menentukannya yaitu berdasarkan hasil model robot yang ada pada Gambar 2.11. untuk menghitung hasil matriks tranformnya jika DOF-nya di tambah, maka menggunakan persamaan (2.2) jika DOF-nya banyak tetapi nilai matriksnya berbeda.

$${}^0_i T = {}^0_1 A \times {}^1_2 A \times \dots \times {}^{i-1}_i A = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \dots \times \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Setiap *link* robot diukur dengan alat ukur dengan jangka sorong dan penggaris. Setiap nilai dimasukkan ke dalam matriks Denavit-Hertenberg. Posisi yang ingin dicari ada di setiap *link* (matriks) yang berisi variabel koordinat. Hubungan banyaknya DOF dengan metode ini adalah pada saat penambahan DOF robot atau pengurangan DOF robot, Metode DH ini yang akan menentukan nilai rotasi robot dan nilai posisi robotnya.

## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Tempat penelitian ini dilakukan di Laboratorium Teknik Kendali Teknik Elektro Universitas Lampung yang dilakukan selama bulan Mei 2023 sampai bulan September 2023.

#### 3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Pada Tabel 3.1 merupakan alat serta bahan yang dipakai pada penelitian ini.

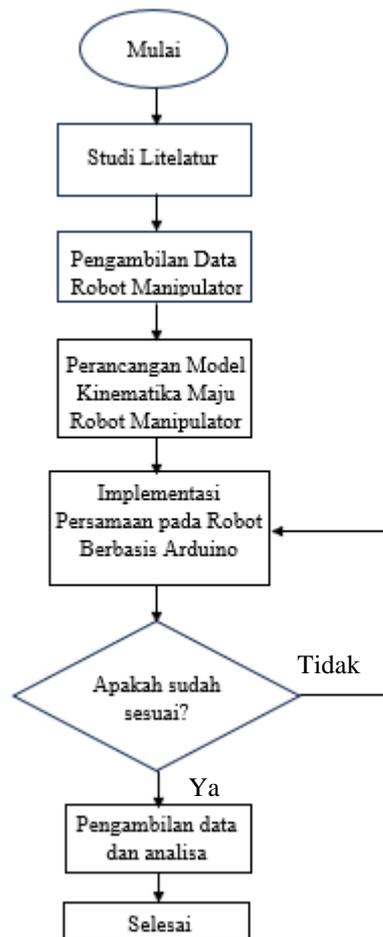
Tabel 3.1 Alat dan bahan penelitian

No	Alat	Jumlah	Fungsi
1	Laptop	1	Pemrograman robot manipulator
2	Motor Servo MG90S	2	Penggerak robot manipulator
3	<i>Breadboard</i> Arduino	1	Penghubung motor servo dan Arduino UNO
4	Arduino UNO	1	Mikrokontroler robot manipulator
5	Kabel Penghubung	6	Penghubung motor servo dan Arduino UNO
6	<i>Power Supply</i> 5V	1	Sumber daya Arduino UNO dan motor servo
7	Papan	1	Alas robot manipulator
8	Penggaris	2	Pengukur panjang robot manipulator
9	Penggaris Busur	1	Pengukur sudut motor servo
10	<i>Software</i> Arduino IDE	-	Perangkat lunak pemrograman robot manipulator

#### 3.2 Metode Penelitian

Penelitian ini yang dibutuhkan adalah sudut pergerakan lengan robot manipulator sesuai dengan program yang sudah ditentukan oleh *software* sehingga

menghasilkan pemodelan yang sesuai. Pada Gambar 3.1 langkah-langkah penelitiannya.



Gambar 3.1 Langkah-langkah Penelitian

Pada Gambar 3.1, menyelesaikan permasalahan tersebut diperlukan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Studi literatur.

Pada tahap ini peneliti mempelajari robot manipulator dengan menggunakan aplikasi. Literatur tersebut berasal dari beberapa sumber, seperti buku, jurnal ilmiah, dan penelitian.

2. Pengambilan data robot

Pada tahap ini melakukan pengambilan data robot yaitu pengambilan data panjang *link-link* robot dan sudut robot.

3. Pembuatan Model Matematika Dari Kinematika Robot

Pada tahap ini peneliti melakukan pembuatan model kinematika robot dengan menggunakan metode yang digunakan yaitu metode *Denavit-Hartenberg*.

#### 4. Implementasi Persamaan Pada Robot Manipulator Berbasis Arduino

Pada tahap ini melakukan implementasi robot yang sudah diprogram menggunakan arduino IDE dan melakukan pengambilan data menggunakan persamaan metode *Denavit-Hartenberg*.

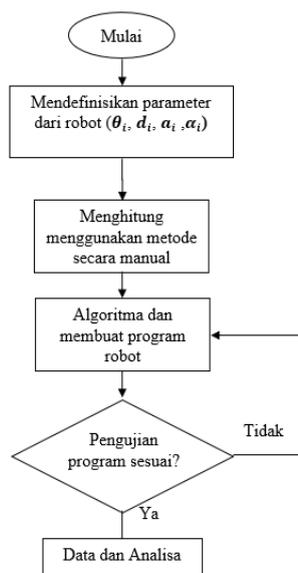
#### 5. Pengambilan dan pengolahan data.

Tahap ini pengambilan dan pengolahan data dilakukan dengan melakukan pengambilan data dari input panjang *link robot*, sudut motor servo dan board arduino. Kemudian mengambil data- data robot berupa panjang *link* robot dan mengukur sudut robot lalu membandingkan data robot untuk posisi robot dengan pengukuran langsung untuk posisi dan menggunakan metode untuk posisi.

#### 6. Pembuatan laporan.

Pada tahap ini peneliti menyajikan hasil dari penelitian dalam bentuk laporan akhir. Hasil penelitian ini adalah perancangan pemodelan robot manipulator dan penerapan robot manipulator perpindahan ke tempat yang di tentukan.

Penyelesaian penelitian ini ada beberapa tahapan, untuk melancarkan dalam pelaksanaannya diperlukan diagram alur penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 3.2.

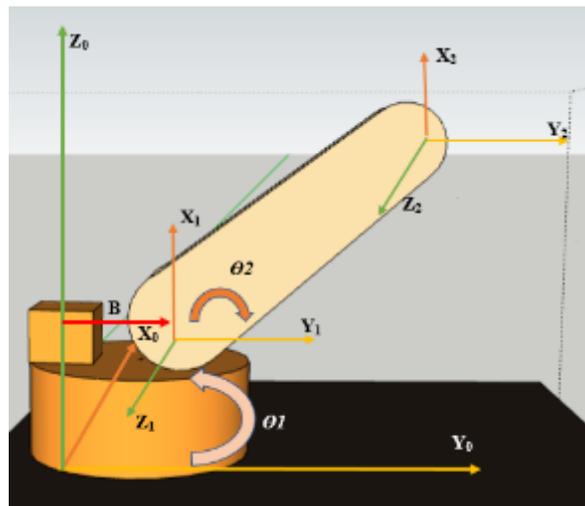


Gambar 3.2 Alur Sistem Perancangan Model Kinematika Robot

Langkah pertama yang dilakukan perancangan model kinematika yaitu mendefinisikan atau menentukan parameter robot. Langkah kedua yaitu menghitung menggunakan metode secara manual setelah mendapatkan parameter robot. Langkah ketiga yaitu membuat program robot menggunakan software Arduino IDE. Langkah keempat yaitu melakukan pengujian program robot, Jika robot sesuai programnya maka lengan robot tersebut akan bergerak, jika belum sesuai maka dilakukan pemeriksaan kembali program robot sebelum di *upload* kembali. Langkah terakhir yaitu mendata hasil yang didapat dan melakukan analisa hasilnya.

### 3.3 Model Robot Manipulator

Pada Gambar 3.3 merupakan model dari robot manipulator tersebut dan indikator lengan robot manipulator.



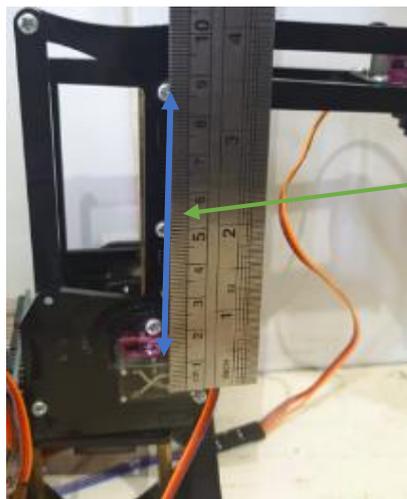
Gambar 3.3 Model Robot Manipulator

Robot manipulator pada Gambar 3.3 diketahui memiliki panjang *link*  $l_1$  dan  $l_2$  dan memiliki 2 sudut  $\theta_1$  dan  $\theta_2$ .



**Panjang *Link 1*  
= 6,5 cm**

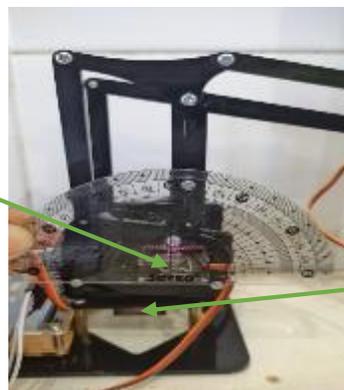
Gambar 3.4 Panjang *Link 1*



**Panjang *Link 2*  
= 8,6 cm**

Gambar 3.5 Panjang *Link 2*

**Maks sudut  $\theta_2$ =  
90°, Min sudut  
 $\theta_1 = 0^\circ$**

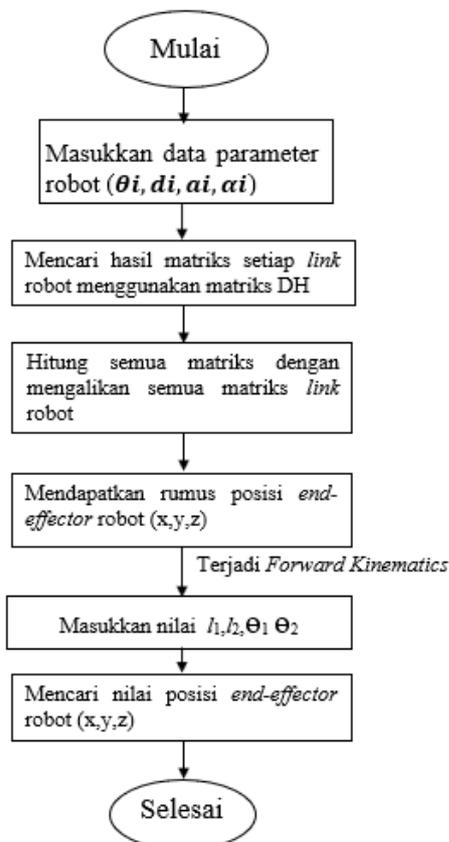


**Maks sudut  $\theta_1$ =  
180°, Min sudut  
 $\theta_1 = 0^\circ$**

Gambar 3.6 Sudut  $\theta_1$  dan  $\theta_2$

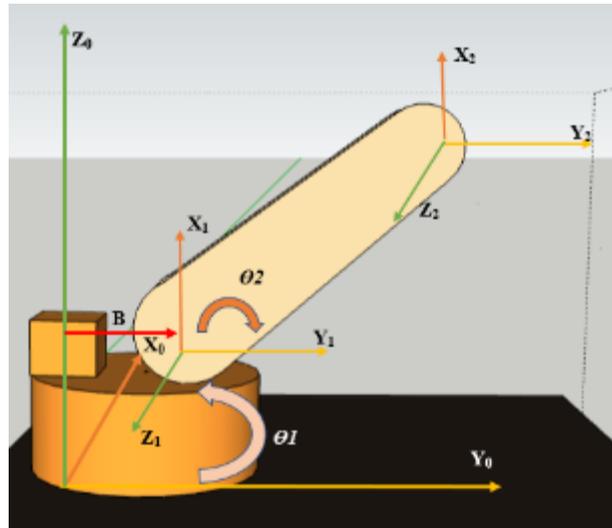
### 3.4 Perancangan Model Robot *Denavit-Hartenberg*

Langkah-langkah perancangan model robot menggunakan metode *Denavit-Hartenberg*. Langkah pertama adalah memasukan data robot yang diketahui. Langkah kedua yaitu menggunakan rumus matriks *Denavit-Hartenberg* (2.1) untuk menentukan hasil matriks. Langkah ketiga yaitu membuat skema robot dan mencari parameter *Denavit-Hartenberg* robot. Langkah keempat yaitu menghitung hasil matriks pada setiap link robot yang di ketahui menggunakan rumus matriks *Denavit-Hartenberg* (2.2). Langkah kelima yaitu menentukan rumus posisi robot (x,y,z) menggunakan hasil perhitungan matriks yang sudah dihitung dengan matriks homogen dan terjadi *forward kinematic* dan mencari posisi x, y dan z pada robot dengan masukan nilai  $l_1, l_2, \theta_1$  dan  $\theta_2$  pada rumus posisi *end-effector* yang sudah didapat dengan input pada program berupa nilai  $\theta_1$  dan  $\theta_2$  sehingga menghasilkan nilai posisi *end-effector* (x,y,z) robot sehingga mendapatkan pemodelan untuk robot tersebut. Langkah penyelesaian dilihat pada Gambar 3.7.

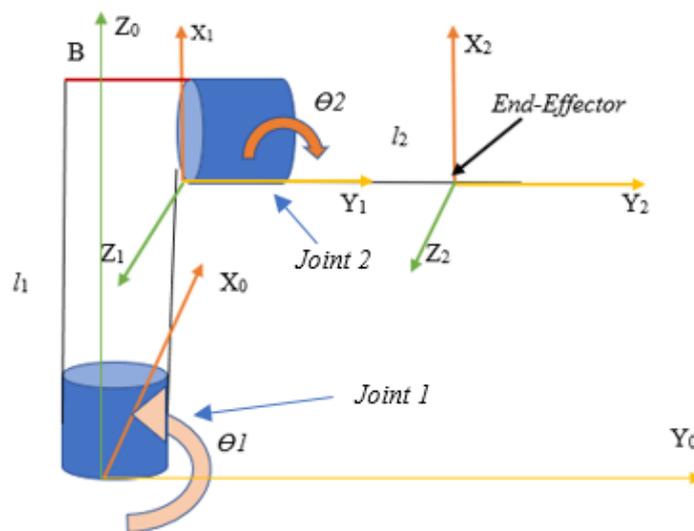


Gambar 3.7 Tahapan Penyelesaian metode *Denavit-Hartenberg*

Kemudian, dari Gambar 3.8 maka dapat dilakukan perancangan model robot dengan mengetahui nilai matriks setiap *link* robot manipulator menggunakan perhitungan matriks *denavit-hartenberg*. diberikan robot yang dihitung hanya 2 DOF terlihat Gambar 3.8.



(a)



(b)

Gambar 3.8 (a)Skema planar robot (b)Planar robot manipulator dengan 2 DOF

Pada Gambar 3.8 untuk menghitung menggunakan metode *Denavit-Hartenberg*, masukan parameter *Denavit-Hartenberg* pada Tabel 3.2.

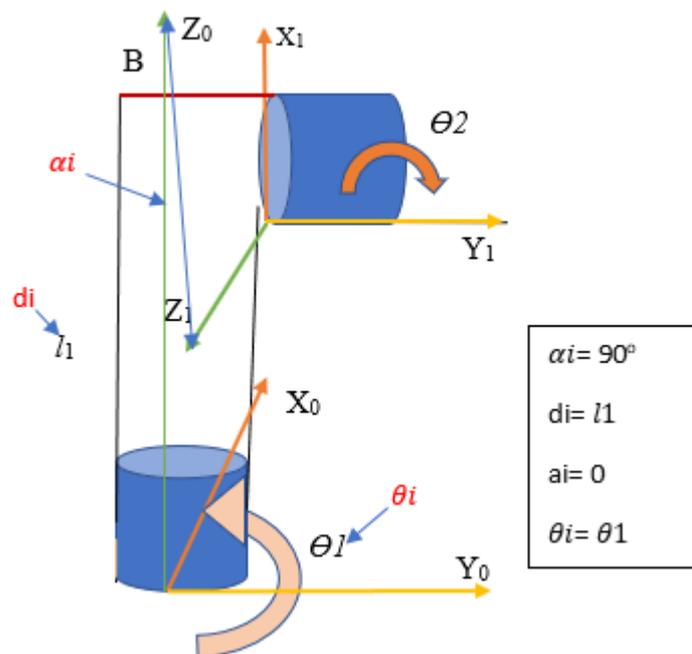
Tabel 3.2 D-H Parameter untuk robot 2 DOF

$i$ (link)	$\alpha_i$ (Putaran link $_i$ )	$a_i$ (Panjang link)	$d_i$ (Tinggi robot)	$\theta_i$ (Sudut link)
1	$90^\circ$	0	$l_1$	$\theta_1$
2	0	$l_2$	0	$\theta_2$

Kemudian setelah menentukan D-H parameter pada Gambar 3.8 (b), selanjutnya menghitung hasil matriks setiap link (i) menggunakan matriks transform, dengan persamaan (2.2) ;

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- untuk  $i = 1$



Gambar 3.9 Link 1 Robot Manipulator 2 DOF

Pada *link* 1 robot manipulator pada Gambar 3.9 kemudian, mencari nilai matriks pada *link* 1 dengan menggunakan persamaan (2.2) sebagai dengan nilai parameter pada Tabel 3.2 pada data  $i$  (*link*) = 1 sebagai berikut ;

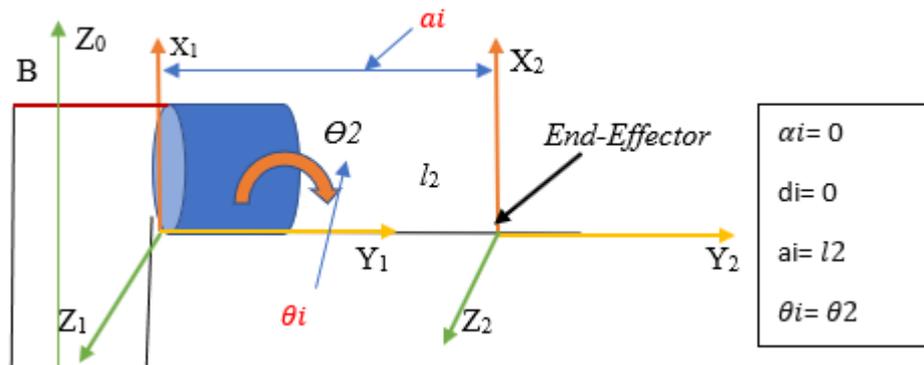
$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\cos(90) \sin \theta_1 & \sin(90) \sin \theta_1 & (0) \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos(90) \cos \theta_1 & -\sin(90) \cos \theta_1 & (0) \sin \theta_1 \\ 0 & \sin(90) & \cos(90) & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -0(\sin \theta_1) & 1(\sin \theta_1) & (0) \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & 0(\cos \theta_1) & -1(\cos \theta_1) & (0) \sin \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

- Untuk link (i) = 2



Gambar 3.10 Link 2 Robot Manipulator 2 DOF

Pada link 2 robot manipulator pada Gambar 3.10 kemudian, mencari nilai matriks pada link 2 dengan menggunakan persamaan (2.2) sebagai dengan nilai parameter pada Tabel 3.2 pada data i (link) = 2 sebagai berikut;

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta 2 & -\cos(0) \sin \theta 2 & \sin(0) \sin \theta 2 & l2 \cos \theta 2 \\ \sin \theta 2 & \cos(0) \cos \theta 2 & -\sin(0) \cos \theta 2 & l2 \sin \theta 2 \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta 2 & -1(\sin \theta 2) & 0(\sin \theta 2) & l2 \cos \theta 2 \\ \sin \theta 2 & 1(\cos \theta 2) & 0(\cos \theta 2) & l2 \sin \theta 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta 2 & -\sin \theta 2 & 0 & l2 \cos \theta 2 \\ \sin \theta 2 & \cos \theta 2 & 0 & l2 \sin \theta 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Setelah menemukan nilai matriks transformasi disetiap link, kemudian menghitung kinematik *transform*-nya dengan mengalikan hasil matriks pada link 1 persamaan (3.4) dan link 2 persamaan (3.8) sebagai berikut;

$${}^0T_2 = {}^0A_1 \times {}^1A_2$$

$${}^0T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta 1 & 0 & \sin \theta 1 & 0 \\ \sin \theta 1 & 0 & -\cos \theta 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta 2 & -\sin \theta 2 & 0 & l2 \cos \theta 2 \\ \sin \theta 2 & \cos \theta 2 & 0 & l2 \sin \theta 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} (\cos \theta 1 \times \cos \theta 2) + (0) + (0) + (0) & (\cos \theta 1 \times (-\sin \theta 2)) + (0) + (0) + (0) & (0) + (0) + (\sin \theta 1) + (0) & (\cos \theta 1 \times (l2 \cos \theta 2)) + (0) + (0) \\ (\sin \theta 1 \times \cos \theta 2) + (0) + (0) + (0) & (-\sin \theta 1 \times \sin \theta 2) + (0) + (0) + (0) & (0) + (0) + (-\cos \theta 1) + (0) & (\sin \theta 1 \times l2 \cos \theta 2) + (0) + (0) + (0) \\ (0) + (\sin \theta 2) + (0) + (0) & (0) + (\cos \theta 2) + (0) + (0) & (0) + (0) + (0) + (0) & (0) + (l2 \sin \theta 2) + (0) + (l1) \\ (0) + (0) + (0) + (0) & (0) + (0) + (0) + (0) & (0) + (0) + (0) + (0) & (0) + (0) + (0) + (1) \end{bmatrix}$$

$${}^0T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta 1 \cos \theta 2 & -\cos \theta 1 \sin \theta 2 & \sin \theta 1 & l2 \cos \theta 1 \cos \theta 2 \\ \sin \theta 1 \cos \theta 2 & -\sin \theta 1 \sin \theta 2 & -\cos \theta 1 & l2 \sin \theta 1 \cos \theta 2 \\ \sin \theta 2 & \cos \theta 2 & 1 & l1 + l2 \sin \theta 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Karena, matriks *Denavit-Hartenbreg* (2.2) sama dengan matriks Homogen (2.1) maka,

$${}^0T_2 = T_H$$

$$T_H = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & Tx \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & Ty \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & Tz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^0T = \begin{bmatrix} \cos \theta 1 \cos \theta 2 & -\cos \theta 1 \sin \theta 2 & \sin \theta 1 & l2 \cos \theta 1 \cos \theta 2 \\ \sin \theta 1 \cos \theta 2 & -\sin \theta 1 \sin \theta 2 & -\cos \theta 1 & l2 \sin \theta 1 \cos \theta 2 \\ \sin \theta 2 & \cos \theta 2 & 1 & l1 + l2 \sin \theta 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Pada persamaan (3.10) untuk posisi  $x, y$  dan  $z$  pada robot manipulator karena matriks homogen  ${}^0A = T_H$

maka dapat diambil rumus pada matriks yang paling kanan.

$$T_x = l_2 \cos\theta_1 \cos\theta_2 \quad (3.11)$$

$$T_y = l_2 \sin\theta_1 \cos\theta_2 \quad (3.12)$$

$$T_z = l_1 + l_2 \sin\theta_2 \quad (3.13)$$

Karena pada saat mendapatkan nilai posisi menggunakan persamaan (3.11, 3.12 dan 3.13) kurang efektif yang disebabkan ada panjang antara link 1 dan link 2 pada B yang akan berpengaruh dalam pemodelan kinematikanya pada Gambar 4.2 (b) yang panjangnya diketahui 1,7 cm yang akan berpengaruh pada nilai posisi  $x, y$  dan  $z$ , maka dirancang rumus posisi robot ( $x, y, z$ ) pada persamaan 3.14, 3.15 dan 3.16 [3].

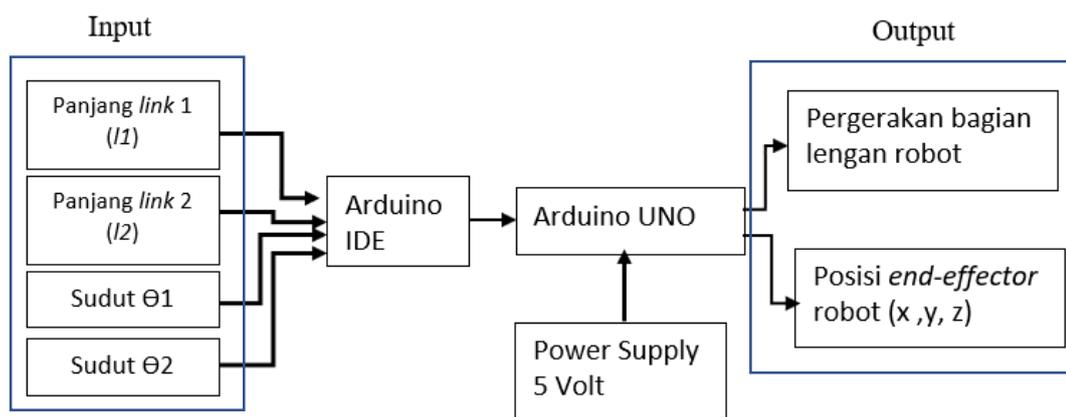
$$T_x = 1,7 + (l_2 \cos\theta_1 \cos\theta_2) \quad (3.14)$$

$$T_y = 1,7 + (l_2 \sin\theta_1 \cos\theta_2) \quad (3.15)$$

$$T_z = 1,7 + (l_1 + l_2 \sin\theta_2) \quad (3.16)$$

### 3.5 Diagram Sistem Alat

Pada Gambar 3.11 berikut ini merupakan diagram sistem cara kerja robot manipulator atau robot lengan.



Gambar 3.11 Diagram Sistem Alat Robot Manipulator

Pada Gambar 3.11 merupakan diagram kerja sistem alat, terdapat 4 *input* yaitu panjang  $l_1$ , panjang  $l_2$ , sudut  $\theta_1$  dan sudut  $\theta_2$  yang akan dimasukkan ke dalam program algoritma pada Arduino IDE. Selanjutnya Arduino IDE dihubungkan ke-

Arduino UNO untuk meng-*upload* algoritma pemrograman dan akan menghasilkan *output* pergerakan motor servo pada robot manipulator dan mendapatkan posisi *end-effector* robot manipulator (x, y dan z).

### 3.6 Pengujian Alat

Tahap pengujian alat dilakukan bertahap yang meliputi pada tabel berikut ini ;

Tabel 3.3 Pengujian alat

Nama Pengujian	Fungsi	Pengujian	Indikasi Keberhasilan
Arduino UNO	Sebagai Mikrokontroler	Uji program di software arduino IDE dan mengupload program	Program ter- <i>upload</i> dan menjalankan sesuai dengan program
Motor Servo	Penggerak robot	Uji Motor servo dihubungkan pada motor servo pada arduino uno dan di program menggunakan Arduino IDE dan di atur sudutnya antara sudut $0^{\circ}$ sampai $90^{\circ}$	Motor servo bergerak sesuai pada program pada Arduino IDE

### 3.7 Perancangan Pengambilan Data dan Analisa

Dalam perancangan ini dilakukan pengujian dan pengambilan Data. Tahap pengujian alat ada 2 bagian yaitu pengujian *hardware* (perangkat keras) dan pengambilan data-data robot yaitu panjang *link* robot dan sudut dan analisa menggunakan metode.

### 3.7.1 Perancangan Pengujian Alat

Pengujian ini bertujuan untuk mencoba semua komponen dapat bekerja dengan optimal. Pengujian dilakukan dengan menghubungkan setiap robot manipulator yang sudah terhubung Arduino kemudian dihubungkan pada *port usb* laptop sampai terdeteksi dan terhubung di aplikasi *Arduino IDE*.

#### 1. Pengujian Pergerakan Bagian Lengan Robot Manipulator

Jika program pada robot manipulator sudah dibuat di aplikasi *Arduino IDE*, kemudian menghubungkannya pada *board arduino* pada robot manipulator, kemudian meng-*upload* algoritma robot manipulator lalu melakukan percobaan pergerakan bagian lengan robot dan dilihat hasil pergerakannya sesuai dengan aplikasi atau tidaknya penempatan posisi robot manipulator tersebut.

#### 2. Mencari posisi robot manipulator

Jika robot manipulator sudah bisa digerakan, kemudian mencari posisi akhir robot manipulator tersebut dengan diketahui sudut yang diukur manual dan panjang setiap *link* robot tersebut dan mencari menggunakan metode *Denavit-Hartenberg*. Kemudian jika robot berpindah dicari posisi akhir yang lainnya.

### 3.7.2 Perancangan Selisih dan *Error* Posisi Robot Manipulator

Pada tahap pengujian selisih dan *error* robot ini adalah membandingkan hasil posisi *end-effector* robot manipulator dengan menggunakan metode pengukuran dan menggunakan metode DH dan mencari hasil *error* antara pengukuran dan metode DH. Berikut persamaan untuk mencari *error* posisi *end-effector* robot;

Persamaan untuk nilai selisih posisi;

$$\text{Selisih x} = |\Delta x| = |x_p - x_m| \quad (3.17)$$

$$\text{Selisih y} = |\Delta y| = |y_p - y_m| \quad (3.18)$$

$$\text{Selisih z} = |\Delta z| = |z_p - z_m| \quad (3.19)$$

Persamaan *error* untuk hasil posisi *end-effector* robot;

$$error\ x\ (\%) = \left| \frac{\overline{Selsih\ x}}{\Sigma Data\ x} \right| \times 100 \quad (3.20)$$

Persamaan *error* untuk hasil posisi y;

$$error\ y\ (\%) = \left| \frac{\overline{Selsih\ y}}{\Sigma Data\ y} \right| \times 100 \quad (3.21)$$

Persamaan *error* untuk hasil posisi z;

$$error\ z\ (\%) = \left| \frac{\overline{Selsih\ z}}{\Sigma Data\ z} \right| \times 100 \quad (3.32)$$

dengan :

$x_p$  : nilai x pengukuran

$x_m$  : nilai x metode

$y_p$  : nilai y pengukuran

$y_m$  : nilai y metode

$z_p$  : nilai z pengukuran

$z_m$  : nilai z metode

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Pada penelitian yang telah dilakukan, maka pada penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut;

1. Perancangan pemodelan matematis yang didapatkan pada robot manipulator 2-DOF *Denavit-Hartenberg* untuk mencari nilai setiap parameter robot manipulator untuk merancang model matematis untuk mencari nilai posisi *end-effector* pada pemodelan matematis kinematik maju untuk posisi  $x = T_x = 1,7 + (l_2 \cos\theta_1 \cos\theta_2)$ , untuk posisi  $y = T_y = l_2 \sin\theta_1 \cos\theta_2$  dan untuk posisi  $z = T_z = 1,7 + (l_1 + l_2 \sin\theta_2)$ .
2. Hasil pengujian yang sudah dilakukan pada robot lengan manipulator 2 DOF dengan metode *Denavit-Hartenberg* memiliki rata-rata *error* posisi *end-effector* dalam persen yaitu untuk posisi x sebesar  $\bar{x} = 1,6660\%$ , untuk rata-rata *error* y sebesar  $\bar{y} = 2,4940\%$  dan rata-rata *error* z sebesar  $\bar{z} = 7,6560\%$ .

#### 5.2 Saran

Saran dalam penelitian ini yang mungkin akan dilakukan kedepannya dan diharapkan untuk memperhatikan beberapa aspek seperti:

1. Menambahkan komponen berupa *gripper* sebagai pengangkat beban atau menambahkan DOF sehingga menghasilkan persamaan kinematika maju yang baru.
2. Mempergunakan bantuan kamera atau sensor yang bisa mengukur nilai posisi *end-effector* robot manipulator secara otomatis.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. And B. Harpad, "Prototype Lengan Robot Berbasis Arduino Dengan Menggunakan Algoritma Kinematics," *Jurnal Ilmiah Matrik*, Vol. 22, No. 2, Pp. 208-214, 2020.
- [2] A. R. Rahmadewi and I. A. Bangsa, "Arm Robot Pemindah Barang (Atwor) Menggunakan Motor Servo Mg995 Sebagai Penggerak Arm Berbasis Arduino," *Jurnal Electro Luceat*, vol. 6, no. 2, 2020.
- [3] A. Uchrowi and S. , "Pemodelan dan Simulasi Robot Lengan 3 DOF Menggunakan V-REP," *AVITEC*, vol. 1, no. 1, pp. 87-97, 2019.
- [4] A. B. Dharmawan and L. , "Penerapan Metode Denavit-Hartenberg Pada Perhitungan Inverse Kinematics Gerakan Lengan Robot," *Jurnal Muara Sains, Teknologi, Kedokteran, dan Ilmu Kesehatan*, vol. 1, no. 1, pp. 287-292, 2017.
- [5] A. Syahiidutama, S. Ardhi, J. P. Sugiono and H. Sutiksno, "Implementasi Kinematika Robot Lengan Pemindah Barang Dua Sendi (2 DOF) dengan Metode Kinematika Maju Untuk Menentukan Koordinat dalam Pemindahan Sebuah Object," *Journal Of Information System, Graphics, Hospitality And Technology*, pp. 35-42, 2020.
- [6] E. Pitowarno, *Robotika Desain, Kontrol, Dan Kecerdasan*, Yogyakarta: Penerbit ANDI, 2006.
- [7] A. Yulianto and E. Ramadan, "Sistem Kendali Robot Pemindah Barang Dengan Umpan Balik Visual," *Jurnal Ilmiah Mikrotek*, vol. 1, no. 2, pp. 1-8, 2014.
- [8] F. Nadziroh, F. Syafira and S. Nooriansyah, "Alat Deteksi Intensitas Cahaya Berbasis Arduino Sebagai Penanda Pergantian Waktu Siang-Malam Bagi Tunanetra," *Indonesian Journal of Intellectual Publication*, vol. 1, no. 3, pp. 142-149, 2021.
- [9] M. F. W. Satriatama and L. Halim, "Perancangan Awal dan Simulasi Lengan Robot 3 Derajat Kebebasan Berbasis Arduino yang Dikontrol dengan Aplikasi," *Jurnal Teknik Mesin Dan Mekatronika*, vol. 7, no. 2, pp. 118-130, 2022.
- [10] K. S. Fu, R. C. Gonzales and C. G. Lee, *Robotics : Control, Sensing, Vision and Intelligence*, United States: McGraw-Hill Book Company, 1987.
- [11] A. Okubanjo, O. Martins, O. Oluwadamilola and O. Olaluwoye, "Modelin of 2-DOF robot Arm and Control," *Futo Jurnal Series (FUTOJNLS)*, vol. 3, no. 2, pp. 80-92, 2017.
- [12] T. A. Sambas and D. S. Rahayu, "Rancang Bangun Robot Arm 2 DOF Berbasis Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)," *Al Jazari Journal of Mechanical Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 41-45, 2018.