

# Rancang Bangun Purwarupa Manipulator Lengan Robot Dengan Tiga Derajat Kebebasan

IDHAM HANIF AYEGA, TUA AGUSTINUS TAMBA, BAGUS MADE ARTHAYA

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Katolik Parahyangan, Indonesia  
Email: [ttamba@unpar.ac.id](mailto:ttamba@unpar.ac.id)

*Received* 31 Mei 2023 | *Revised* 26 Juni 2021 | *Accepted* 3 Juli 2023

## ABSTRAK

*Makalah ini melaporkan hasil penelitian terkait rancang bangun suatu purwarupa manipulator lengan robot dengan tiga derajat kebebasan. Proses perancangan dilakukan dalam tiga tahap yang mencakup pemodelan matematis kinematika maju dan balik pada robot, desain dan simulasi purwarupa robot menggunakan pemrograman MATLAB dan SOLIDWORKS terintegrasi, dan konstruksi perangkat keras robot menggunakan teknologi 3D printing. Proses simulasi dan eksperimen selanjutnya dilakukan untuk membandingkan kesesuaian operasional dan kinerja perangkat keras dan model simulasi komputer yang telah dirancang. Berdasarkan hasil simulasi dan eksperimen, disimpulkan bahwa desain perangkat keras robot memiliki tingkat kepresisian yang sangat baik dengan batas kesalahan maksimum untuk solusi kinematika maju yang dihasilkan adalah sebesar 2.745% serta batas kesalahan maksimum untuk solusi kinematika balik adalah sebesar 0.06%.*

**Kata kunci:** *lengan robot, kinematika, robotic toolbox, 3D printing*

## ABSTRACT

*The research reported in this paper was aimed at developing a prototype of a robotic arm/manipulator with three degrees of freedom. The prototype was developed in three main stages, namely forward and inverse kinematics modeling of the robot, simulation modeling of the prototype in MATLAB-SOLIDWORKS integrated environment, and finally the hardware development of the robot using 3D printing techniques. The operational performance of the constructed robotic hardware was then analyzed and compared with that of the developed simulation model. The experimental results of the robot performance evaluations suggested that the robot prototype has good operational precision performance in which the resulting maximum error for forward kinematics task is only about 2.745% whereas the resulting maximum error for inverse kinematics task is only about 0.06%.*

**Keywords:** *robotic arm, forward kinematics, robotic toolbox, 3D printing*

## 1. PENDAHULUAN

Lengan robot merupakan instrumen elektro-mekanik yang umumnya dapat diprogram untuk memiliki fungsi menyerupai lengan manusia (**Craig, 2022**). Permasalahan yang sering ditemukan pada perancangan lengan robot adalah penentuan model matematis baik untuk peninjauan/ analisis kinematika maupun dinamika yang kemudian akan digunakan sebagai basis perancangan pengontrol lengan robot pada tahapan berikutnya. Keberhasilan dari pengontrolan lengan robot ditentukan berdasarkan keakuratan serta kepresisian pergerakan lengan robot dari suatu konfigurasi/titik ke konfigurasi/titik lainnya.

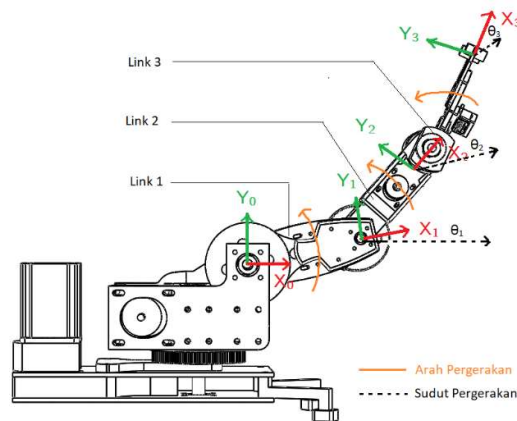
Manipulator lengan robot memiliki tiga komponen utama, yaitu *link*, sambungan (*joint*) dan *end effector* (**Craig, 2022**). Joint pada lengan robot adalah sambungan penghubung antar benda tegar (*link*) pada robot. Sementara itu, *link* merupakan benda tegar yang terhubung dengan *joint*. *End effector* adalah bagian paling ujung dari lengan robot. Lengan robot dapat digunakan untuk melakukan berbagai fungsi yang diantaranya memilih dan memindahkan (*pick and place*) objek tertentu hingga proses pengelasan (*welding*) (**Lynch, dkk, 2017**)(**Dzedzickis, dkk, 2021**). Dengan perkembangan teknologi yang pesat saat ini, lengan robot diprediksi akan semakin banyak digunakan untuk membantu pekerjaan manusia (**Dave, dkk, 2022**).

Dalam bidang pendidikan, lengan robot merupakan salah satu sistem yang paling banyak digunakan untuk mengilustrasikan berbagai teknik desain dan analisis robot mulai dari penentuan model, analisis karakteristik respons, dan implementasi pengontrol (**Dewi, 2020**)(**Qian, dkk, 2022**)(**Lobbezoo, dkk, 2023**). Penggunaan perangkat keras purwarupa lengan robot dalam kegiatan pembelajaran khususnya terkait topik kinematika, dinamika, dan teori kontrol dapat mengoptimalkan proses studi dan pengalaman mahasiswa (**Bai, 2021**)(**Manjula, 2018**)(**Baby, dkk, 2017**). Meskipun saat ini telah terdapat beragam jenis manipulator lengan robot, pemahaman mengenai sistematika proses perancangan dan konstruksi perangkat keras lengan robot terbilang masih terbatas (**Lee, 2020**)(**Long, dkk, 2020**). Beberapa penelitian sebelumnya cenderung difokuskan pada salah satu aspek tertentu, misalnya pemodelan kinematika (**Qian, dkk, 2022**) (**Bai, 2021**) atau desain pengontrol (**Dewi, 2020**) pada manipulator saja. Desain purwarupa atau alat peraga sistem lengan robot yang lebih sistematis dan terstruktur yang dapat digunakan untuk mendemonstrasikan tahapan penentuan model matematis, analisis respons, desain komponen, proses *assembly*, serta pengujian dan kontrol sistem lengan robot tentu sangat diperlukan untuk mendukung proses pembelajaran/penelitian robotika (**Zeng, dkk, 2022**).

Makalah ini melaporkan hasil studi dan penelitian terkait desain, konstruksi, dan analisis secara terstruktur suatu purwarupa manipulator lengan robot dengan tiga (3) derajat kebebasan. Sebagai kontribusi terhadap penelitian sebelumnya, makalah ini memaparkan tahapan yang lebih sistematis terkait desain dan perancangan purwarupa lengan robot yang mencakup tahapan pemodelan, desain dan konstruksi purwarupa lengan robot. Proses perancangan yang dipaparkan mencakup desain model matematis kinematika gerak lengan robot, desain simulator model kinematika (*forward* dan *inverse*) dengan mengintegrasikan perangkat lunak MATLAB/SIMULINK dan SOLIDWORKS (**Kundu, dkk, 2022**)(**Al Tahtawi, dkk, 2021**), konstruksi perangkat keras purwarupa lengan robot dengan menggunakan 3D printer, serta analisis dan validasi hasil purwarupa robot yang dibangun. Hasil percobaan terkait perbandingan pergerakan antara perangkat keras purwarupa lengan robot dan model simulasi lengan robot menunjukkan tingkat akurasi yang cukup baik di mana eror maksimum pada penentuan solusi permasalahan *forward kinematics* adalah 2.745% dan eror maksimum pada penentuan solusi permasalahan *inverse kinematics* adalah 0,06%.

## 2. METODOLOGI PERANCANGAN

Pemodelan awal manipulator lengan robot dilakukan untuk menggambarkan rancangan komponen utama yang terdiri dari *link*, *joint*, dan *end effector*. Gambar 1 menunjukkan rancangan komponen utama robot serta penentuan sistem koordinat lokal pada setiap *joint* sebagai dasar pemodelan kinematika pergerakannya. Pada gambar ini,  $x_0 - y_0 - z_0$  adalah kerangka koordinat inersial statis pada robot sebagai referensi global, dan  $x_i - y_i - z_i$  untuk  $i = 1, 2, 3$  adalah kerangka koordinat lokal untuk setiap *link* pada robot. Arah sumbu  $z_0$  dan  $z_i$  adalah keluar dari kertas dan tidak ditunjukkan secara eksplisit pada Gambar 1. Pemodelan di Gambar 1 dilakukan dengan analisis kinematika yang mencakup kinematika maju (*forward kinematics*, FK) dan kinematika balik (*inverse kinematics*, IK). Analisis FK pada dasarnya berkaitan dengan penentuan posisi dan orientasi *end effector* berdasarkan informasi nilai sudut *joint*  $\theta_i$  yang diberikan. Sebaliknya, analisis IK berkaitan dengan penentuan kombinasi nilai sudut  $\theta_i$  yang sesuai dengan informasi posisi dan orientasi *end effector* tertentu yang diinginkan (Corke, 2022)(Corke, 2017).



Gambar 1. Rancangan Model Manipulator Lengan Robot

### 2.1 Pemodelan dan Analisis FK

Pemodelan dan analisis FK dilakukan berdasarkan aturan dan parameter *Denavit-Hartenberg* (DH) (Corke, 2022). Pada ilustrasi di Gambar 1, tabel parameter DH model robot ditunjukkan di Tabel 1 dengan parameter  $\alpha_i$ ,  $a_i$ ,  $\theta_i$  dan  $d_i$  masing-masing menyatakan *link twist*, *link length*, *joint angle*, dan *joint offset*. Kemudian, konstanta  $l_1=110 \text{ mm}$ ,  $l_2=85 \text{ mm}$ , dan  $l_3=60 \text{ mm}$  menyatakan panjang *link 1*, *link 2*, dan *link 3*.

Berdasarkan Tabel 1, maka matriks transformasi homogeneous yang menyatakan pose *link i* relatif terhadap *link (i-1)* untuk  $i = 1, 2, 3$  dapat ditentukan seperti pada Persamaan (1).

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & l_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & l_i \sin \theta_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Matriks transformasi homogeneous yang menyatakan pose *end effector* terhadap posisi *base* ditentukan dengan Persamaan (2) di mana  $x^* = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\sum_{i=1}^2 \theta_i) + l_3 \cos(\sum_{i=1}^3 \theta_i)$  dan  $y^* = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\sum_{i=1}^2 \theta_i) + l_3 \sin(\sum_{i=1}^3 \theta_i)$  adalah pose robot relatif terhadap *base*.

$${}^0_3T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T \begin{bmatrix} \cos(\sum_{i=1}^3 \theta_i) & -\sin(\sum_{i=1}^3 \theta_i) & 0 & x^* \\ \sin(\sum_{i=1}^3 \theta_i) & \cos(\sum_{i=1}^3 \theta_i) & 0 & y^* \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

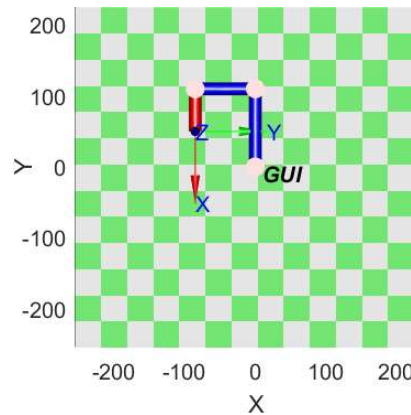
**Tabel 1. Parameter dan Tabel DH Model Robot di Gambar 1**

Link $i$	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$	$\theta_i$
$i=1$	0	$l_1$	0	$\theta_1$
$i=2$	0	$l_2$	0	$\theta_2$
$i=3$	0	$l_3$	0	$\theta_3$

Validasi parameter DH di Tabel 1 dan matriks transformasi homogeneous di Persamaan (2), simulasi FK dilakukan menggunakan *Robotics Toolbox* pada MATLAB (**Corke, 2022**)(**Corke, 2017**). Nilai parameter  $\theta_i = 90^\circ$  dipilih untuk  $i = 1,2,3$ . Berdasarkan Persamaan (2), matriks transformasi homogeneous model robot ditunjukkan pada Persamaan (3).

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -85 \\ -1 & 0 & 0 & 50 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

yang mengindikasikan posisi *end effector* adalah  $\theta_i = 85$  dan  $y = 50$ . Hasil simulasi pada *Robotics Toolbox* ditunjukkan di Gambar 2 dengan nilai matriks transformasi homogeneous yang sama dengan hasil pada Persamaan (3). Dapat disimpulkan bahwa model FK yang ditentukan sesuai dengan desain model robot yang dirancang.



**Gambar 2. Hasil simulasi untuk  $\theta_i$  dengan  $i = 1, 2, 3$**

## 2.2 Pemodelan dan Analisis IK

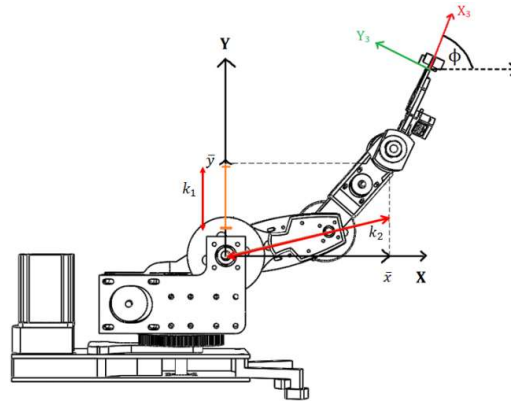
Solusi permasalahan IK ditentukan menggunakan geometri model robot seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Berdasarkan gambar ini, sudut orientasi  $\phi$  antara *end effector* lengan robot terhadap koordinat *base* adalah:  $\phi = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$ . Maka dapat dituliskan:

$$x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\sum_{i=1}^2 \theta_i) + l_3 \cos \phi = \bar{x} + l_3 \cos \phi \quad (4a)$$

$$y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\sum_{i=1}^2 \theta_i) + l_3 \sin \phi = \bar{y} + l_3 \sin \phi \quad (4b)$$

di mana variabel  $\bar{x}$  dan  $\bar{y}$  diilustrasikan seperti di Gambar 3.

Ayega, dkk

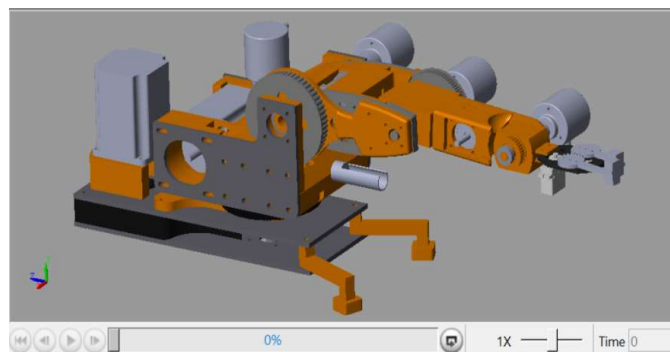


**Gambar 3. Geometri robot untuk penentuan solusi IK**

### 2.3 Simulasi Desain Model Berbasis MATLAB-SOLIDWORKS

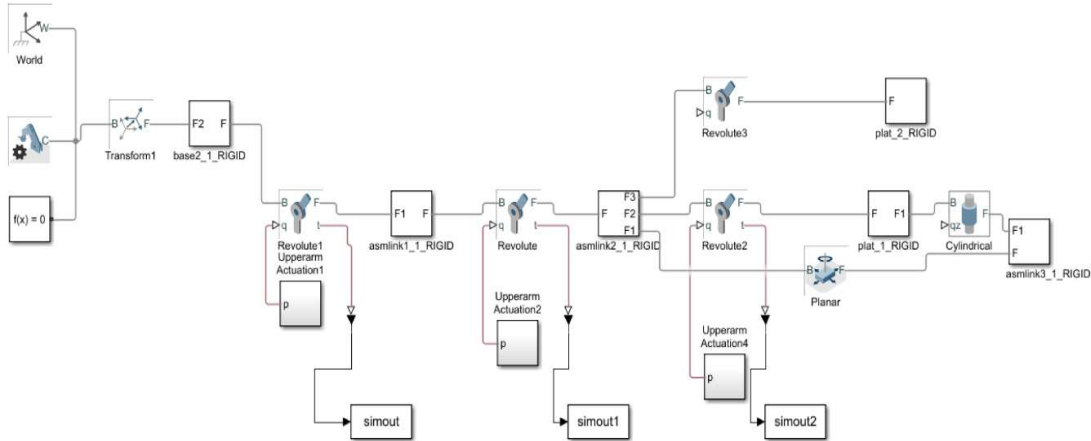
Berdasarkan model kinematika yang dibangun pada MATLAB, selanjutnya dirancang simulator desain purwarupa lengan robot pada SOLIDWORKS untuk memperoleh gambaran nyata purwarupa yang akan dibangun. Secara khusus, rancangan purwarupa robot pada SOLIDWORKS ini sangat penting karena setiap komponen penyusun robot yang dikembangkan dicetak langsung berdasarkan desain komponen tiga dimensi (3D) pada SOLIDWORKS. Dalam hal ini, desain simulator harus dibangun dengan mengintegrasikan model 3D pada SOLIDWORKS dengan model kinematika yang telah dirancang pada MATLAB (Kundu, dkk, 2022)(Al Tahtawi, dkk, 2021). Proses integrasi dilakukan menggunakan fitur SIMSCAPE pada MATLAB yang memungkinkan rancangan model pada SOLIDWORKS untuk diakses melalui SIMULINK. Dalam hal ini, setiap perintah (*command*) dan data pada MATLAB dan SOLIDWORKS dapat saling dipertukarkan. Rancangan model perangkat keras robot pada SOLIDWORKS ditunjukkan di Gambar 4 sedangkan diagram blok model SIMULINK/SIMSCAPE antara MATLAB dan SOLIDWORKS ditunjukkan di Gambar 5.

Setelah diperoleh integrasi model MATLAB-SOLIDWORKS, selanjutnya dilakukan simulasi untuk menguji karakteristik nilai torsi yang dibutuhkan pada desain purwarupa robot untuk menghasilkan nilai sudut tertentu yang diinginkan pada setiap *joint* robot. Pada proses simulasi ini, nilai sudut *joint* yang diinginkan merupakan *input* pada MATLAB sedangkan nilai torsi yang dibutuhkan adalah *output* pada SOLIDWORKS. Pada proses simulasi, sudut rotasi pada *link* 1 diputar terlebih dahulu hingga mencapai nilai  $\theta_1 = 90^\circ$  pada detik ke-60, kemudian sudut pada *link* 2 diputar hingga mencapai nilai  $\theta_2 = 45^\circ$  pada detik ke-120, dan akhirnya sudut pada *link* 3 diputar untuk mencapai nilai  $\theta_3 = 45^\circ$  pada detik ke-200. Contoh nilai torsi yang dibutuhkan oleh *link* 1 untuk mencapai rotasi ditunjukkan pada Gambar 6.

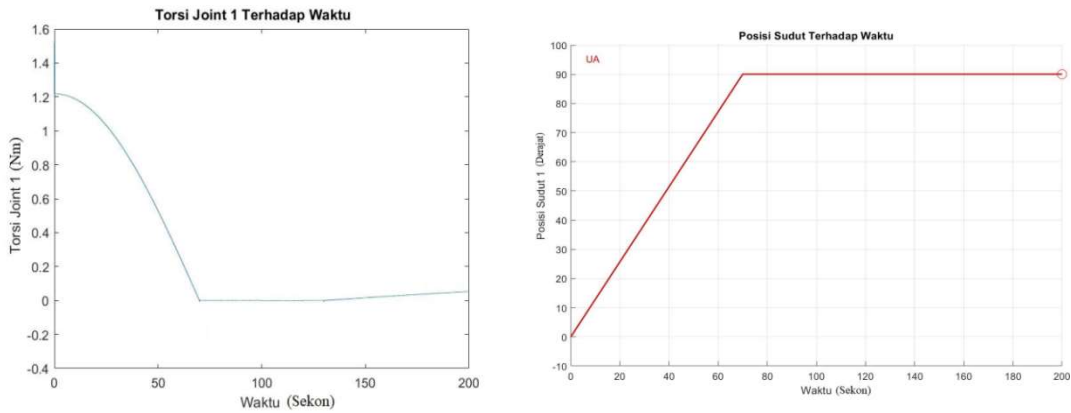


**Gambar 4. Desain perangkat keras purwarupa robot pada SOLIDWORKS**

## Rancang Bangun Purwarupa Manipulator Lengan Robot Dengan Tiga Derajat Kebebasan



**Gambar 5. Diagram blok simulator pada MATLAB SIMSCAPE**

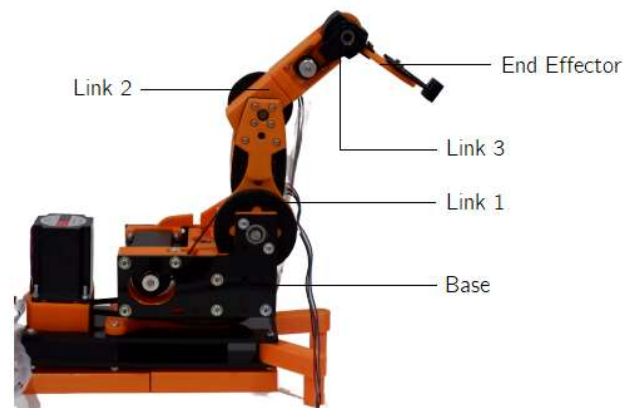


**Gambar 6. Karakteristik torsi motor (kiri) dan nilai sudut (kanan) pada *link 1***

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Hasil Rancangan Perangkat Keras

Gambar 7 menunjukkan hasil rancangan perangkat keras purwarupa manipulator lengan robot dengan komponen mekanik dan elektrik utama sebagaimana ditunjukkan di Tabel 2. Perangkat keras purwarupa robot dibangun melalui penggabungan beberapa struktur utama yang terdiri dari struktur *base*, struktur *link 1-3*, dan struktur *end effector* (Covaciu, 2019).



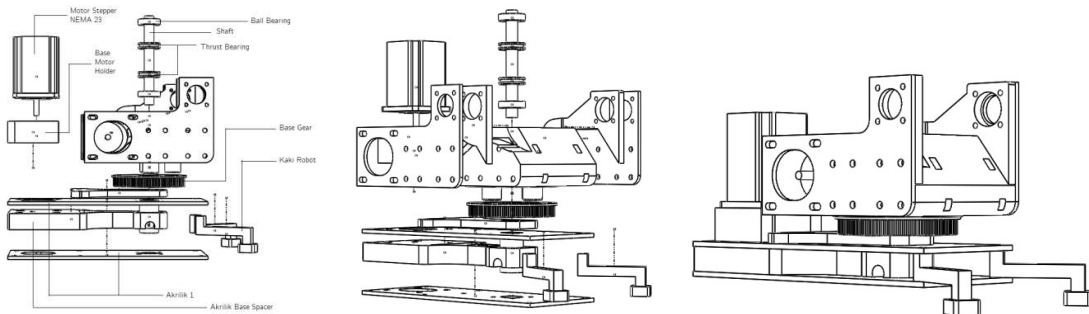
**Gambar 7. Rancangan perangkat keras purwarupa lengan robot**

### 3.1.1 Rancangan Struktur *Base*

Komponen struktur base merupakan tumpuan utama bagi purwarupa lengan robot yang dirancang menggunakan kombinasi material *polylactic acid* (PLA) dan acrylic (**Landers, dkk, 2020**). Penggerak joint pada base terdiri dari tiga komponen utama, yaitu *timing belt*, *timing pulley*, dan *gear* (**Rahul, dkk, 2020**). Struktur *base* pada dasarnya dirancang sebagai sebuah *joint* tipe *revolute*, namun pada penelitian ini tidak difungsikan dan hanya bersifat statis/diam. *Revolute joint* pada *base* dibangun dengan aktuator berupa motor stepper NEMA 23 yang mampu menghasilkan torsi maksimal sebesar 1,8 Nm. Gambar 8 menunjukkan hasil rancang bangun komponen *base* dengan detail komponen utama serta fungsi yang ditunjukkan pada Tabel 3.

**Tabel 2. Komponen mekanikal-elektrikal robot**

Komponen mekanikal-elektrikal	Keterangan
Mikrokontroler AM 2560	Pemrograman robot
Motor driver (TB 6560/6600)	Penggerak aktuator
Motor stepper NEMA 23/17/11	Aktuator pada <i>joint</i> robot
Catu daya 12 volt, 5 Ampere	Sumber daya listrik
<i>Breadboard</i> dan kabel jumper	Rangkaian elektronik robot
<i>Link</i> dan <i>joint</i> lengan robot	Komponen gerak pada robot
Komponen pencapit ( <i>gripper</i> )	Komponen <i>end effector</i> robot
Struktur <i>base</i> kerangka inersial	Rangka statis penyangga robot
<i>Timing belt</i> , <i>timing pulley</i> , <i>gear</i>	Penggerak motor stepper
<i>Fastener</i>	Konektor komponen robot



**Gambar 8. Struktur *base*: tampak samping (kiri), isometris (tengah), *assembly* (kanan)**

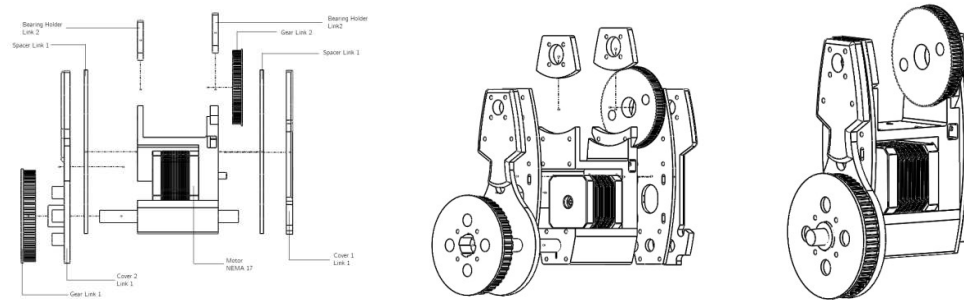
**Tabel 3. Komponen mekanikal-elektrikal pada *base***

Komponen struktur <i>base</i>	Keterangan
<i>Base motor holder</i>	Tempat peletakan <i>motor stepper</i> pada <i>base</i>
Motor shaft	Meneruskan putaran motor <i>stepper</i> ke <i>base</i>
Motor stepper NEMA 23	Aktuator <i>joint</i> struktur <i>base</i>
<i>Ball bearing</i> (28 x 12 x 8 mm)	Mengurangi gesekan antara <i>shaft</i> dan <i>base</i>
<i>Thrust bearing</i> (28x12x9 mm)	Menahan gaya aksial dari lengan robot
<i>Bearing/motor holder</i>	Pengikat bearing base dan motor pada <i>base</i>
<i>Gear base</i>	Komponen penggerak <i>base</i>
Struktur kaki robot	Stabilisasi postur robot

### 3.1.2 Rancangan Struktur *Link 1*

*Link 1* sebagai lengan pertama pada rancangan robot memiliki pergerakan yang diatur oleh joint tipe *revolute*. Aktuator pada *revolute joint* di *link 1* adalah motor stepper NEMA 17. Gambar 9 menunjukkan hasil rancang bangun komponen *link 1* dengan detail komponen utama serta fungsi yang ditunjukkan pada Tabel 4.

## Rancang Bangun Purwarupa Manipulator Lengan Robot Dengan Tiga Derajat Kebebasan



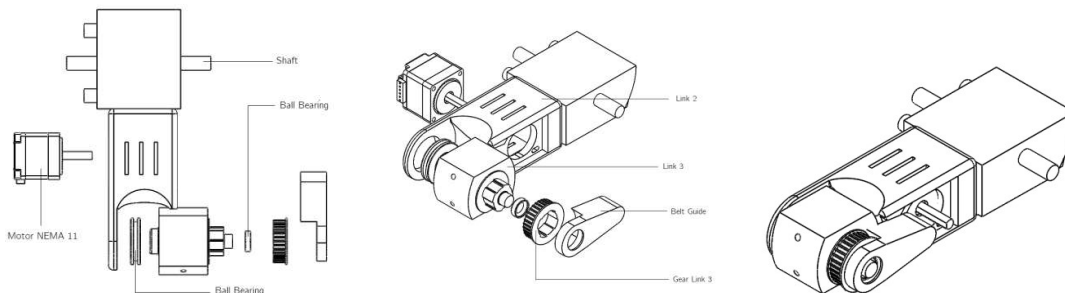
**Gambar 9. Struktur *link 1*: tampak samping (kiri), isometris (tengah), *assembly* (kanan)**

**Tabel 4. Komponen mekanikal-elektrikal pada *link 1***

Komponen <i>link 1</i>	Keterangan
Struktur utama <i>link 1</i>	Tempat terhubungnya semua komponen <i>link 1</i>
Motor stepper NEMA 17	Aktuator untuk pada <i>link 1</i>
<i>Gear link 1</i>	Komponen penggerak <i>link 1</i>
<i>Cover 2 link 1</i>	Tempat penyambungan <i>gear link 1</i>
<i>Spacer link 1</i>	Tempat melekatnya <i>bearing holder</i> pada <i>link 1</i>
<i>Cover 1 link 1</i>	Tempat menempelkan <i>gear link 1</i> dan penutup bagian <i>link 1</i>
<i>Shaft link 1</i>	Poros pergerakan joint <i>link 1</i>

### 3.1.3 Rancangan struktur *link 2* dan *link 3*

*Link 2* dan *link 3* dirancang secara bersamaan dan simultan dengan mekanisme pergerakan joint tipe *revolute*. Pergerakan *link 2* dan *link 3* diatur oleh tiga komponen utama yaitu *timing belt*, *timing pulley*, dan *gear*. Gambar 10 menunjukkan hasil rancang bangun *link 2* dan *link 3* setelah melalui tahap *assembly*. *Link 3* pada gambar ini merupakan *link* terakhir yang terhubung dengan *end effector* sebagai *gripper* pada robot. Hasil rancang bangun *link 2* dan *link 3* juga terdiri dari beberapa komponen seperti diringkaskan pada Tabel 5.



**Gambar 10. Desain *link 2-3*: tampak atas (kiri), isometris (tengah), *assembly* (kanan)**

**Tabel 5. Komponen mekanikal-elektrikal pada *link 2-3***

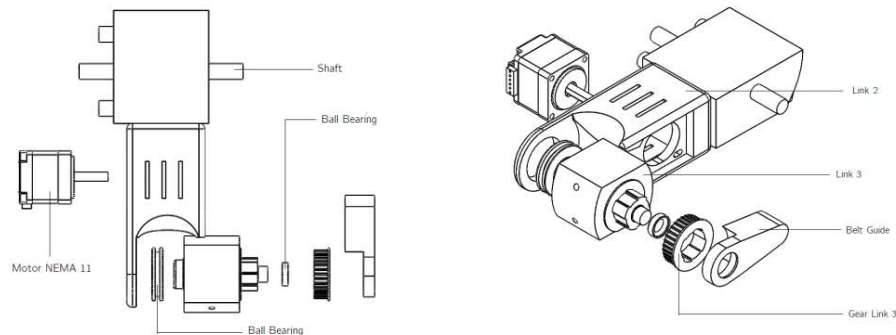
Komponen <i>link 2-3</i>	Keterangan
Struktur utama <i>link 2-3</i>	Tempat terhubungnya semua komponen <i>link 2</i> dan <i>link 3</i>
Motor stepper NEMA 11	Aktuator untuk joint pada <i>link 3</i>
Belt guide	Penghubung <i>timing belt</i> dengan <i>gear link 3</i>
<i>Link 3</i>	<i>Link</i> akhir pada robot yang terhubung dengan <i>end effector</i>
<i>Gear link 3</i>	Komponen penggerak <i>link 3</i>
<i>Shaft link 3</i>	Meneruskan putaran yang dihasilkan oleh motor stepper

### 3.1.4 Rancangan struktur *end effector*

*End effector* merupakan bagian paling ujung lengan robot dengan bentuk dan mekanisme gerak yang disesuaikan dengan fungsi robot. Pada penelitian ini, jenis *end effector* yang



digunakan adalah *gripper* untuk pencengkram objek target robot. Gambar 11 menunjukkan desain komponen *end effector* yang dibangun pada penelitian ini dengan komponen utama seperti diringkaskan di Tabel 6.



**Gambar 11. Desain *end effector*: tampak atas (kiri) dan isometris (kanan)**

**Tabel 6. Komponen mekanikal-elektrikal pada *end effector***

Komponen <i>end effector</i>	Keterangan
Struktur utama <i>end effector</i>	Tempat terhubungnya semua komponen <i>end effector</i>
Motor servo SG90	Aktuator untuk joint pada <i>link 3</i>
<i>Gear 1 end effector</i>	Pencengkram sisi kiri
<i>Gear 2 end effector</i>	Pencengkram sisi kanan

### 3.2 Analisis Cakupan Kerja (*Working Envelope*)

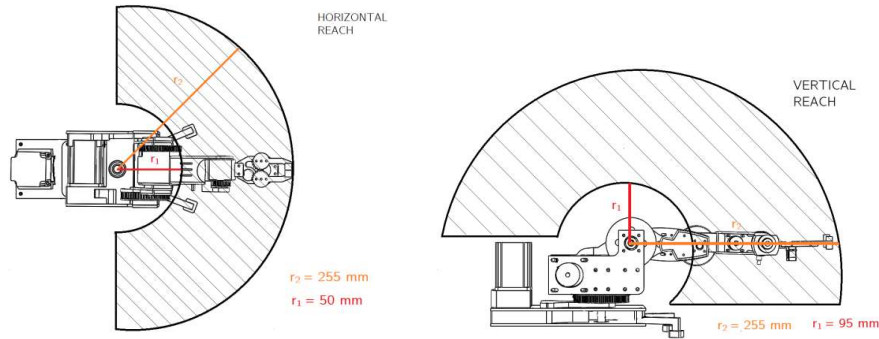
Cakupan kerja atau *working envelope* merupakan bidang/ruang jangkauan yang dapat diraih/dicapai oleh lengan robot dengan minimal satu orientasi. Suatu manipulator lengan robot hanya dapat beroperasi atau melakukan fungsinya di dalam *working envelope* (Corke, 2022)(Craig, 2022). Umumnya, derajat kebebasan suatu manipulator lengan robot akan berbanding secara proporsional dengan besar *working envelope* yang dihasilkan. *Working envelope* suatu robot juga dipengaruhi oleh beberapa hal lain seperti panjang setiap (*link*), tinggi struktur *base*, dan arah sumbu putar (Kojima, dkk, 2022).

*Working envelope* purwarupa lengan robot yang dirancang mencakup bidang horizontal dan vertikal seperti ditunjukkan pada Gambar 12. Sebagaimana ditunjukkan pada gambar ini, penambahan *joint* pada struktur *base* robot menghasilkan *working envelope* maksimum di bidang horizontal berbentuk area setengah lingkaran dengan radius maksimum 50 mm. Selain itu, pergerakan *link 1* hingga *end effector* menghasilkan *working envelope* pada bidang horizontal berbentuk tiga per empat lingkaran dengan radius maksimum 95 mm. Hasil identifikasi *working envelope* ini dapat menjadi basis dalam penentuan jenis fungsi operasi dan bidang kerja yang dapat dilakukan oleh robot

### 3.3 Pengujian Keakuratan Pergerakan Robot

Salah satu hal penting dalam desain dan pengontrolan robot adalah terkait ketepatan perubahan variabel gerak (dalam hal ini sudut rotasi setiap *joint*) aktual pada perangkat keras purwarupa robot sesuai dengan nilai perubahan variabel yang ditentukan pada program/perangkat lunak mikrokontroler robot. Untuk menguji ketepatan gerak robot yang dirancang, dilakukan percobaan untuk membandingkan nilai sudut yang diberikan pada modul mikrokontroler dengan pengukuran nilai sudut aktual yang dihasilkan pada perangkat keras purwarupa robot (Bi, dkk, 2020).

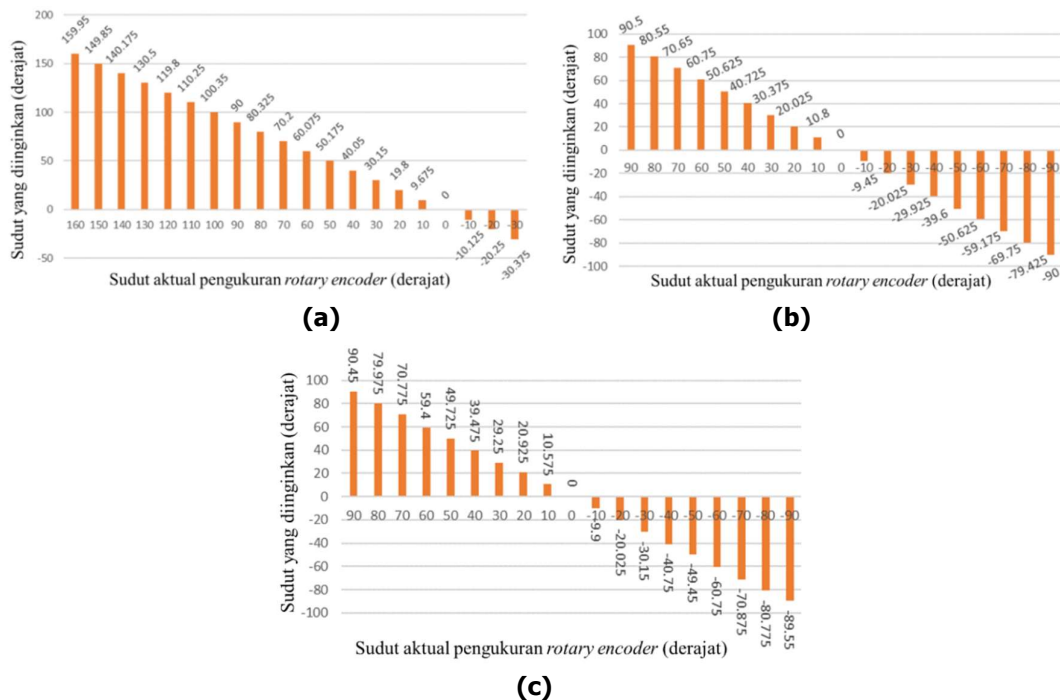
## Rancang Bangun Purwarupa Manipulator Lengan Robot Dengan Tiga Derajat Kebebasan



**Gambar 12. Working envelope di bidang horizontal (kiri) dan vertikal (kanan)**

Pengukuran nilai perubahan sudut aktual *joint* pada setiap struktur *link* robot dilakukan menggunakan sensor *rotary encoder* yang memiliki karakteristik statis 1600 *pulse-per-revolution* (PPR) dan batas kesalahan  $\pm 0,225^\circ$ . Data direkam dengan menghubungkan *rotary encoder* yang terpasang pada perangkat keras purwarupa robot dengan perangkat lunak MATLAB sehingga diperoleh data pengukuran berupa nilai sudut dan jumlah sinyal pulsa (**Oguntosin, dkk, 2019**). Pengukuran dilakukan dengan memvariasikan *input* sudut pada mikrokontroler dan membandingkannya dengan pengukuran sensor *rotary encoder*.

Hasil pengukuran nilai sudut oleh *rotary encoder* untuk *input* variasi nilai sudut yang diberikan pada mikrokontroler untuk *link 1*, *link 2*, dan *link 3* ditunjukkan masing-masing pada Gambar 13. Dari hasil pengukuran tersebut, diperoleh informasi bahwa nilai eror maksimum antara nilai sudut yang diinginkan dan sudut aktual yang dihasilkan adalah  $\pm 0,5^\circ$  untuk *link 1* (pada pengukuran  $5^\circ$ ),  $\pm 0,5^\circ$  untuk *link 2* (pada pengukuran  $10^\circ$ ), dan  $\pm 0,925^\circ$  untuk *link 3* (pada pengukuran  $10^\circ$ ). Karena diperoleh bahwa nilai eror sudut maksimum pergerakan setiap *joint* pada robot yang dirancang adalah  $\pm 0,925^\circ$ , maka disimpulkan pergerakan setiap *link* pada robot memiliki tingkat ketelitian yang cukup baik.



**Gambar 13. Hasil pengukuran sudut rotasi link 1 (a), link 2 (b), dan link 3 (c)**

### 3.4 Pengujian Implementasi Analisis FK

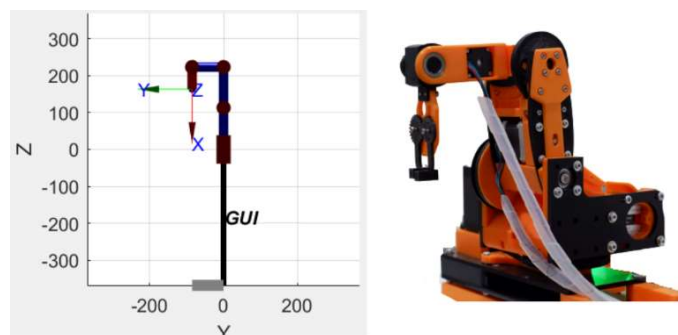
Pengujian selanjutnya adalah terkait implementasi FK untuk penentuan posisi dan orientasi *end effector* relatif terhadap kerangka koordinat *base* berdasarkan *input* nilai sudut rotasi yang ditentukan pada setiap *link* robot. Untuk kombinasi nilai sudut setiap *link* yang ditentukan, pengujian dilakukan untuk membandingkan posisi dan orientasi *end effector* yang dihasilkan pada perangkat keras purwarupa robot dengan hasil simulasi berdasarkan model FK robot pada Tabel 1 dan Persamaan (2). Percobaan implementasi FK pada purwarupa robot dilakukan untuk beberapa kombinasi sudut rotasi pada setiap *link* robot.

Pengujian I dilakukan untuk menguji konfigurasi inersial dari kerangka koordinat *base* robot. Pada pengujian ini, nilai parameter sudut *link* pada simulator MATLAB dan pada *input* program mikrokontroller diprogram untuk menentukan nilai sudut  $\theta_i = 0^\circ$  untuk  $i = 1, 2, 3$ . Percobaan dilakukan sebanyak tiga (3) kali untuk mengamati konsistensi nilai posisi dan orientasi model simulasi maupun perangkat keras purwarupa robot. Tabel 7 meringkaskan perbandingan posisi *end effector* robot yang dihasilkan pada model simulasi MATLAB serta pada purwarupa lengan robot. Berdasarkan Tabel 7, dapat disimpulkan bahwa rerata eror implementasi di sumbu X adalah 1.33% dengan nilai maksimal 2.745%, sedangkan rerata eror pada sumbu Z adalah 2.06% dengan nilai tertinggi 2.654%.

**Tabel 7. Hasil implementasi FK pada pengujian I (kerangka *base*)**

Percobaan ke-	Solusi FK pada MATLAB			Solusi FK pada Purwarupa		
	x	y	z	x	y	z
1	255	0	113	250	0	110
2	255	0	113	248	0	110
3	255	0	113	253	0	112

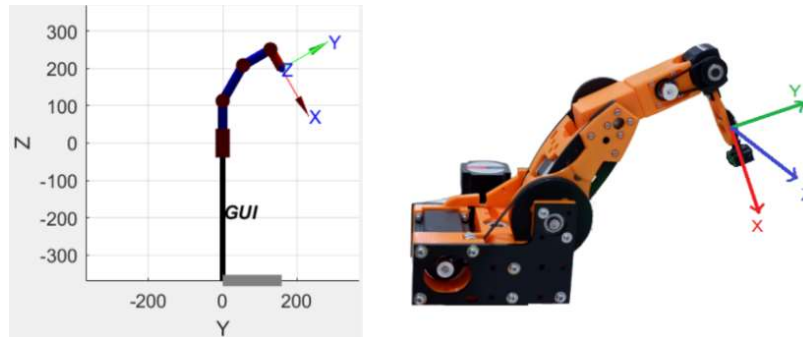
Pengujian II dilakukan dengan terlebih dahulu merotasikan *base* pada konfigurasi sudut  $\theta_0 = -90^\circ$  dan selanjutnya mengatur nilai sudut rotasi untuk setiap *link* masing-masing  $\theta_1 = 90^\circ$ ,  $\theta_2 = \theta_3 = -90^\circ$ . Untuk kombinasi sudut tersebut, hasil simulasi model pada MATLAB dan hasil pengujian pada perangkat keras lengan robot ditunjukkan pada Gambar 14. Perbandingan posisi *end effector* yang dihasilkan model simulasi MATLAB dan pada perangkat keras lengan robot ditunjukkan di Tabel 8. Untuk percobaan ini, nilai eror implementasi di sumbu Y adalah 2.446% sedangkan eror di sumbu Z adalah 0,743%. Percobaan selanjutnya dilakukan untuk kombinasi sudut berbeda di mana *base* dirotasikan pada sudut  $\theta_0 = 90^\circ$  dan sudut rotasi setiap *link* ditentukan sebesar  $\theta_1 = 60^\circ$ ,  $\theta_2 = -30^\circ$ , dan  $\theta_3 = -90^\circ$ . Hasil simulasi MATLAB dan pengujian pada perangkat keras lengan robot untuk percobaan ini ditunjukkan pada Gambar 15 dengan perbandingan konfigurasi *end effector* diringkaskan pada Tabel 8. Diperoleh nilai eror implementasi di sumbu Y adalah 0,285% sedangkan pada sumbu Z adalah 0,609%.



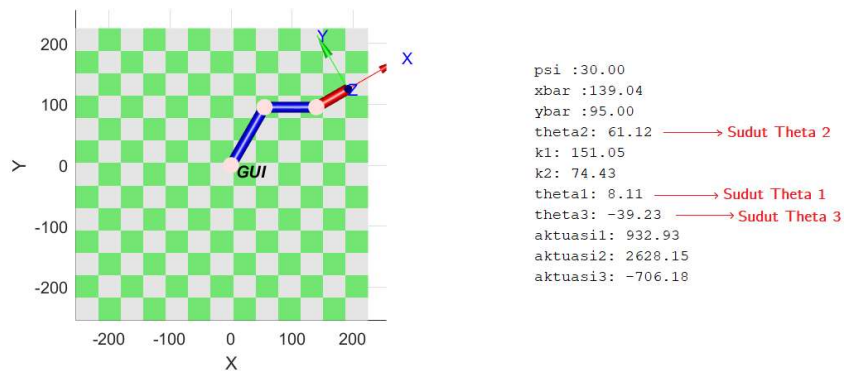
**Gambar 14. Hasil Simulasi (kiri) dan Eksperimen (kanan) FK untuk Pengujian II**

**Tabel 8. Hasil implementasi FK pada pengujian II (kombinasi sudut *link*)**

Percobaan ke-	Solusi FK Pada MATLAB			Solusi FK Pada Purwarupa		
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
1	0	-85	163	-0,025	-82.92	161,78
2	0	158,6	198,8	0,1583	158,15	197,58



**Gambar 15. Hasil simulasi (kiri) dan eksperimen (kanan) FK untuk Percobaan II**



**Gambar 16. Hasil simulasi IK pada MATLAB (kiri) dan pada Arduino (kanan).**

**Tabel 9. Hasil implementasi iK pada pengujian II (kombinasi sudut *link*)**

Parameter	Solusi IK Pada MATLAB			Solusi FK Pada Purwarupa		
	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$
	60°	-60°	30°	8,11°	61,12°	-39,23°
Koordinat	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
	191	125	0	191.004	124,994	0

### 3.5 Pengujian Implementasi Analisis IK

Pengujian dilakukan untuk membandingkan solusi IK pada model simulasi dan purwarupa lengan robot. Posisi *end effector* yang ditinjau adalah  $x = 191, y = 125, z = 0$  relatif terhadap kerangka koordinat *link* 1, dan objektif pengujian adalah menentukan kombinasi sudut rotasi yang sesuai dengan posisi *end effector* yang diketahui. Pengujian terlebih dahulu dilakukan pada MATLAB dengan solusi IK  $\theta_1 = 60^\circ, \theta_2 = -60^\circ, \theta_3 = 30^\circ$  dan konfigurasi robot seperti ditunjukkan pada Gambar 16 (kiri). Pengujian perangkat keras purwarupa robot kemudian dilakukan dengan solusi permasalahan IK ditentukan berdasarkan nilai sudut rotasi sebagaimana tercatat pada modul pengontrol ARDUINO pada robot (Rahul, dkk, 2019).

Solusi permasalahan IK pada purwarupa robot adalah  $\theta_1 = 8,11^\circ$ ,  $\theta_2 = -39,23^\circ$ , dan  $\theta_3 = 61,12^\circ$  seperti ditunjukkan pada Gambar 16 (kanan). Karena hasil solusi IK yang diperoleh dari simulasi dan eksperimen cukup berbeda, kemudian dilakukan pengujian FK pada kedua solusi tersebut untuk membandingkan posisi *end effector* yang dihasilkan masing-masing kombinasi sudut. Hasil perbandingan tersebut ditunjukkan di Tabel 9 yang mengindikasikan kedua kombinasi sudut menghasilkan posisi *end effector* yang sesuai. Hasil percobaan ini mengindikasikan kemungkinan didapatkan beberapa solusi kombinasi parameter (sudut rotasi atau panjang translasi) untuk posisi *end effector* yang sama pada permasalahan IK pada sistem manipulator lengan robot.

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini telah melakukan studi dan penelitian terkait desain, konstruksi, dan analisis purwarupa manipulator lengan robot dengan tiga derajat kebebasan. Proses rancang bangun yang dilakukan mencakup desain model matematis kinematika (maju/*forward* dan balik/*inverse*) pergerakan lengan robot, desain simulator model kinematika lengan robot dengan mengintegrasikan perangkat lunak MATLAB dan SOLIDWORKS, serta konstruksi/integrasi komponen perangkat keras purwarupa lengan robot menggunakan 3D *printer*. Untuk tujuan pengujian, analisis perbandingan dilakukan antara pergerakan purwarupa robot yang dibangun dengan simulasi pergerakan model robot pada perangkat lunak MATLAB. Hasil percobaan terkait perbandingan pergerakan antara perangkat keras dan model simulasi lengan robot yang dilakukan menunjukkan tingkat akurasi yang cukup baik di mana eror maksimum pada penentuan solusi permasalahan *forward kinematics* adalah 2.745% sementara eror maksimum pada penentuan solusi permasalahan *inverse kinematics* adalah 0,06%. Penelitian selanjutnya akan diarahkan pada upaya peningkatan tingkat presisi pergerakan pada pengoperasian purwarupa manipulator robot yang saat ini telah dirancang.

#### DAFTAR RUJUKAN

- Al Tahtawi, A. R., Agni, M., & Hendrawati, T. D. (2021). Small-scale Robot Arm Design with Pick and Place Mission Based on Inverse Kinematics. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 2(6), 469–475. <https://doi.org/10.18196/jrc.26124>
- Baby, A., Augustine, C., Thampi, C., George, M., A P, A., & C Jose, P. (2017). Pick and Place Robotic Arm Implementation Using Arduino. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 12(02), 38–41. <https://doi.org/10.9790/1676-1202033841>
- Bai, Y., Luo, M., & Pang, F. (2021). An Algorithm for Solving Robot Inverse Kinematics Based on FOA Optimized BP Neural Network. *Applied Sciences*, 11(15), 7129. <https://doi.org/10.3390/app11157129>
- Bi, Z. M., Zhonghua, M., Bin, Z., & Chris, Z. (2020). The State of the Art of Testing Standards for Integrated Robotic Systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 63(1), 101893. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101893>
- Corke, P. (2017). Robot Manipulator Capability in MATLAB: A Tutorial on Using the Robotics System Toolbox [Tutorial]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 24(3), 165–166.

- <https://doi.org/10.1109/MRA.2017.2718418>
- Corke, P. (2022). *Robotics and Control* (1st ed., Vol. 141). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-79179-7>
- Covaciu, F. (2019). Control and Actuation System of a Six Degrees of Freedom Robotic Arm. *Acta Technica Napocensis-Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering*, 62(1), 99–106. <https://atna-mam.utcluj.ro/index.php/Acta/article/view/1150>
- Craig, J. J. (2022). *Introduction to Robotics: Mechanics and Control* (4th ed.). Pearson Education Limited. <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/introduction-to-robotics-mechanics-and-control/P200000003304/9780137848744>
- Dave, H. K., Chanpura, M. D., Kathrotiya, S. J., Patolia, D. D., Dodiya, D. D., & Kharva, P. S. (2022). Design, Development and Control of SCARA for Manufacturing Processes. In S. Kumar, J. Ramkumar, & P. Kyratsis (Eds.), *Recent Advances in Manufacturing Modelling and Optimization* (1st ed., Vol. 1, pp. 551–567). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-9952-8\\_47](https://doi.org/10.1007/978-981-16-9952-8_47)
- Dewi, T., Nurmaini, S., Risma, P., Oktarina, Y., & Roriz, M. (2020). Inverse Kinematic Analysis of 4 DOF Pick and Place Arm Robot Manipulator using Fuzzy Logic Controller. *International Journal of Electrical & Computer Engineering*, 10(2), 2088–8708. <https://doi.org/h10.11591/ijece.v10i2.pp1376-1386>
- Dzedzickis, A., Subačiūtė-Žemaitienė, J., Šutinyš, E., Samukaitė-Bubnienė, U., & Bučinskas, V. (2021). Advanced Applications of Industrial Robotics: New Trends and Possibilities. *Applied Sciences*, 12(1), 135. <https://doi.org/10.3390/app12010135>
- Kojima, A., Tran, D. T., & Lee, J.-H. (2022). Investigation of the Mounting Position of a Wearable Robot Arm. *Robotics*, 11(1), 1–17. <https://doi.org/10.3390/robotics11010019>
- Kundu, D., Dan, A., & Hui, N. B. (2022). Dynamics and Control of a 6-DOF Biped Robot on MATLAB/SimMechanics. In R. Kumar, V. S. Chauhan, M. Talha, & H. Pathak (Eds.), *Machines, Mechanism and Robotics (Lecture Notes in Mechanical Engineering)* (1st ed., Vol. 1, pp. 661–671). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-0550-5\\_65](https://doi.org/10.1007/978-981-16-0550-5_65)
- Landers, R. G., Barton, K., Devasia, S., Kurfess, T., Pagilla, P., & Tomizuka, M. (2020). A Review of Manufacturing Process Control. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(11), 110814. <https://doi.org/10.1115/1.4048111>
- Lee, H. W. (2020). The Study of Mechanical Arm and Intelligent Robot. *IEEE Access*, 8(1), 119624–119634. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3003807>
- Lobbezoo, A., & Kwon, H. J. (2023). Simulated and Real Robotic Reach, Grasp, and Pick-and-

- Place Using Combined Reinforcement Learning and Traditional Controls. *Robotics*, 12(1), 12. <https://doi.org/10.3390/robotics12010012>
- Long, D. T., Binh, T. V., Hoa, R. V., Anh, L. V., & Toan, N. V. (2020). Robotic Arm Simulation by using Matlab and Robotics Toolbox for Industry Application. *International Journal of Electronics and Communication Engineering*, 7(10), 1–4. <https://doi.org/10.14445/23488549/IJECE-V7I10P101>
- Lynch, K. M., & Park, F. C. (2017). *Modern Robotics* (1st ed., Vol. 1). Cambridge University Press.
- Manjula, V. S., & Karamagi, R. I. (2018). Automatic Pick and Place Robot Manipulation Using a Microcontroller. *Journal of Applied & Computational Mathematics*, 7(3), 1–8. <https://doi.org/10.4172/2168-9679.1000408>
- Oguntosin, V., Olasina, J., & Akindele, A. (2019). Control Design and Analysis of Cruise Control System. *Journal of Physics: Conference Series*, 2437(1), 020170. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1299/1/012108>
- Qian, H., Chen, B., Xia, X., Deng, S., & Wang, Y. (2022). D-H Parameter Method-based Wearable Motion Tracking. *Journal of Physics: Conference Series*, 2216(1), 012027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2216/1/012027>
- Rahul, K., Raheman, H., & Paradkar, V. (2020). Design of 4 DOF Parallel Robot Arm and Firmware Implementation on Embedded System to Transplant Pot Seedlings. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 4(1), 172–183. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2020.09.003>
- Rahul, T. N. M., Reddy, K. T., & Mary, A. V. A. (2019). Cost Effective Robotic System Using Arduino. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 16(8), 3222–3227. <https://doi.org/10.1166/jctn.2019.8166>
- Zeng, C., Zhou, H., Ye, W., & Gu, X. (2022). iArm: Design an Educational Robotic Arm Kit for Inspiring Students' Computational Thinking. *Sensors*, 22(8), 2957. <https://doi.org/10.3390/s22082957>