

PERANCANGAN *ARM MANIPULATOR* PEMILAH BARANG BERDASARKAN WARNA DENGAN METODE GERAK *INVERSE KINEMATICS*

Lanang Febriramadhan^{*)}, Aris Triwiyatno, and Sumardi

Program S1 Teknik Elektro, Departemen Teknik Elektro,
Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Jln. Prof. Sudharto, Tembalang, Semarang, Indonesia

^{*)}E-mail : febriramadhan22294@gmail.com

Abstrak

Arm manipulator merupakan salah satu jenis robot yang banyak diaplikasikan di dunia industri. Robot dengan jenis ini biasa digunakan untuk membantu manusia dalam pekerjaan yang berat, berbahaya, ataupun pekerjaan yang berulang-ulang. Penerapan arm manipulator yang telah banyak digunakan yaitu untuk pengelasan, pengecatan, pengeboran, dan pemindahan. Dalam perkembangannya arm manipulator memiliki 2 metode gerak yaitu forward kinematics dan inverse kinematics. Pada penelitian ini dirancang prototype arm manipulator 3 DOF sebagai pemilah barang berdasarkan warna. Prototype arm manipulator tersebut menggunakan metode gerak inverse kinematics dalam menentukan posisi pemindahan barang yang dipilah. Dalam pemilahan barang ini digunakan fotodiode sebagai sensor pendeteksi barang dan membedakan warna barang yang dipilah. Keluaran dari penelitian ini yaitu menghasilkan prototype arm manipulator 3 DOF yang dapat memindahkan dan memilah barang berdasarkan warna. Dalam penelitian ini didapatkan hasil rata-rata standar deviasi pada sumbu X sebesar 0,866 cm dan pada sumbu Y sebesar 1,197 cm. Standar deviasi ini didapatkan dari 4 macam variasi lokasi pengujian pemilahan barang.

Kata kunci : Arm Manipulator 3 DOF, Inverse Kinematics, Pemilahan Barang, Fotodiode.

Abstract

Arm manipulator is one type of robot that is widely applied in the industrial world. Robots of this type are commonly used to help people in the hard work, dangerous or repetitive work. Arm manipulator application that has been widely used are for welding, painting, drilling, and displacement. There are two methods of motion in the arm manipulator development, they are forward kinematics and inverse kinematics. In this research, a 3 DOF arm manipulator prototype designed as sorting object by color. The arm manipulator's prototype using inverse kinematics motion in determining the position of the sorted object transfer. In sorting this object is used as a sensor photodiode detector and distinguishing colors object are sorted. The output of this research is to produce a 3 DOF arm manipulator prototype that can move and sort object by its color. In this research, the average yield on a standard deviation is 0.866 cm for X axis and the Y axis is 1.197 cm. The standard deviation is obtained from 4 kinds of the test site sorting of object variations.

Keywords: 3 DOF Arm Manipulator, Inverse Kinematics, Sorting object, Photodiode.

1. Pendahuluan

Pada era globalisasi seperti saat ini persaingan pasar sangatlah ketat. Alasan utama penggunaan robot di dunia industri adalah untuk mengoptimalkan biaya yang dikeluarkan. Selain itu robot juga dapat bekerja lebih cepat, akurat, tahan lama dan lebih fleksibel.

Robot *arm* tidak hanya digunakan di bidang industri, namun juga digunakan di bidang penelitian [1] dan kesehatan [2]. Contoh robot lengan yang ada dalam dunia industri adalah robot pengelasan dari Fanuc Industry [3]

dan robot pengecatan dari Kawasaki [3]. Salah satu bentuk robot *arm* yang sering dipakai adalah bentuk robot *arm* anthropomorphic [4][5][6][7][8]. Bentuk robot lengan ini mempunyai keunggulan fleksibilitas daerah kerja dalam 3 dimensi ruang sehingga sangat cocok untuk diaplikasikan di sebagian besar robot industri [9].

Pada umumnya struktur robot *arm* terdiri dari lengan dan pergelangan. Bagian lengan tersusun dari serangkaian *link*, dimana *link* yang satu dengan *link* yang lainnya dihubungkan dengan *joint*. Dengan adanya *joint* yang menghubungkan dua *link* tersebut, *joint* itu akan

membentuk satu derajat kebebasan. Sedangkan pada pergelangan tangan dipasang *end-effector* berupa *gripper* yang digunakan untuk melakukan suatu tujuan tertentu [9].

Agar dapat melakukan hal tertentu dan mudah diterapkan untuk berbagai keperluan, diperlukan suatu metode gerak robot. *Forward kinematics* dan *inverse kinematics* dari sebuah robot *manipulator* adalah dua bahasan utama dalam pergerakan robot [10].

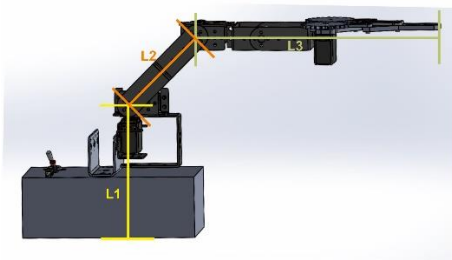
Penelitian ini akan membahas pengendalian robot *arm manipulator* 3DOF menggunakan metode gerak *inverse kinematics*. Robot *arm manipulator* ini dirancang sebagai alat pemilah barang yang berbeda warna. Agar dapat membedakan warna dalam pemilahannya, robot *arm manipulator* ini dilengkapi dengan sensor barang dan sensor warna menggunakan fotodiode.

2. Metode

Robot *arm manipulator* 3 DOF yang dirancang pada penelitian ini yaitu berskala *prototype*. Robot ini dirancang agar dapat memilah barang berdasarkan warna dan memindahkan sesuai dengan tempatnya. Untuk menentukan posisi pergerakan *end-effector* dari robot digunakan metode gerak *inverse kinematics* geometri.

2.1. Perancangan Spesifikasi Arm Manipulator Pemilah Barang

Robot arm manipulator pada perancangan ini dibuat dengan spesifikasi dengan panjang *link* 1 (L1) 129,45 mm, *link* 2 (L2) 103,35 mm, dan *link* 3 (L3) 239,8 mm. Dari spesifikasi diatas, robot dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Spesifikasi *prototype arm manipulator*.

Untuk tiap *joint* pada robot arm manipulator dirancang dengan jangkauan sudut yang berbeda-beda. Untuk joint 1 (θ_1) sebesar 170° (-85°) sampai (85°) , joint 2 (θ_2) sebesar 175° (0°) sampai (175°) , joint 3 (θ_3) sebesar 175° (-121°) sampai (54°) , dan Gripper ($\theta_{Gripper}$) sebesar 72° (0°) sampai (72°) .

2.2. Perancangan Hardware

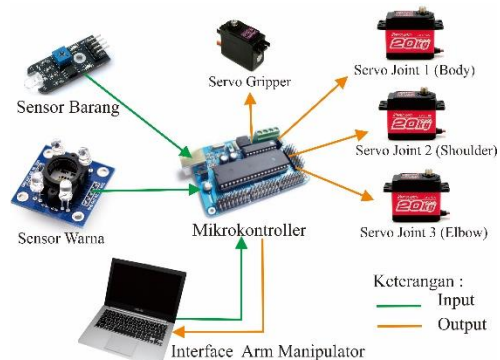
Perancangan *arm manipulator* 3 DOF pemilah barang yang dirancang menggunakan aktuator motor servo.

Sensor yang digunakan untuk pendeteksian barang dan warna adalah fotodiode. Sementara itu controller yang digunakan adalah mikrokontroler ATmega16 yang berfungsi untuk membaca sensor, menjalankan dan mengolah algoritma, berkomunikasi dengan komputer dan menjadi servo *controller*.

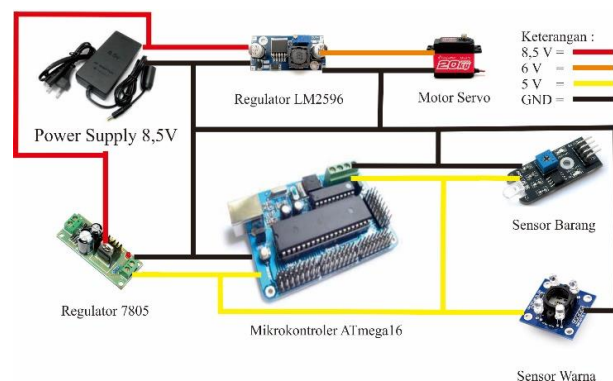
Prototype arm manipulator 3 DOF yang dirancang pada penelitian ini dapat dilihat seperti Gambar 2. Hubungan antar *hardware* berdasarkan sistem kerja dari setiap *hardware* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat seperti pada Gambar 3. Kemudian *supply* yang digunakan adaptor 8,5 V 5,6A. Rangkaian catu daya dari masing-masing *hardware* ditunjukkan seperti Gambar 4.



Gambar 2. *Prototype arm manipulator* 3 DOF.



Gambar 3. Diagram hubungan antar *hardware*.



Gambar 4. Rangkaian *supply* robot.

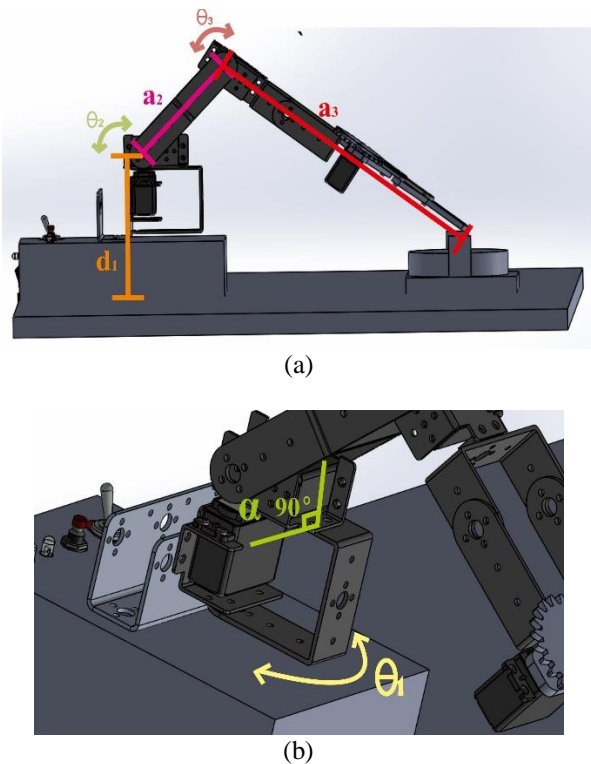
2.3. Perancangan Algoritma

Robot *arm manipulator* pemilah barang ini dirancang dengan menggunakan algoritma yaitu diawali dengan

sensor barang akan mendeteksi keberadaan ada atau tidaknya barang pada tempat penyimpanan barang. Jika tidak terdeteksi adanya barang maka robot akan tetap diposisi inisialisasi dan menunggu sampai terdeteksi adanya barang ditempat penyimpanan. Selanjutnya jika terdeteksi bahwa ada barang ditempat penyimpanan itu, maka sensor warna akan mendeteksi warna barang tersebut. Kemudian hasil pendeteksian warna tersebut digunakan untuk menentukan ke koordinat mana *end-effector* robot akan bergerak. Untuk menjalankan algoritma tersebut digunakan metode *inverse kinematics* dan untuk melihat relasi kinematika digunakan *forward kinematics*.

2.3.1. Forward Kinematics

Untuk mendapatkan persamaan forward kinematics dari arm manipulator digunakan metode Denavit-Hartenberg. Dari data model yang ada didapat parameter dari robot yang ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Parameter DH (a) tampak samping, (b) tampak serong.

Dari Gambar 5 dapat diambil parameter seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter D-H arm manipulator 3DOF.

Joint	Sudut α_i	Link a_i	Link d_i	Sudut θ_i
1	90°	0 cm	12,945 cm	θ_1
2	0°	10,335 cm	0 cm	θ_2
3	0°	23,98 cm	0 cm	θ_3

Dengan parameter D-H yang ada maka matriks A dari setiap *joint* dapat dibentuk seperti pada persamaan 1.

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

Sehingga didapatkan persamaan *forward kinematics* dari robot *arm manipulator* 3 DOF ini seperti pada persamaan 2 kolom ke-4.

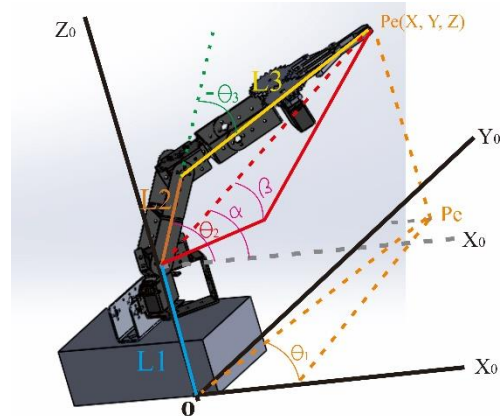
$$T_3^1 = A_1^0 \cdot A_2^1 \cdot A_3^2 = \begin{pmatrix} C_1 & 0 & S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & -C_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & L_2 \cdot C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & L_2 \cdot S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & L_3 \cdot C_3 \\ S_3 & C_3 & 0 & L_3 \cdot S_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1 C_{23} & -C_1 S_{23} & S_1 & C_1(L_2 C_2 + L_3 C_{23}) \\ S_1 C_{23} & -S_1 S_{23} & -C_1 & S_1(L_2 C_2 + L_3 C_{23}) \\ S_{23} & C_{23} & 0 & L_1 + L_2 S_2 + L_3 S_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

persamaan 3 merupakan persamaan *forward kinematics* yang digunakan pada robot *arm manipulator* pemilah barang ini

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_1(L_2 \cdot \cos\theta_2 + L_3 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3)) \\ \sin\theta_1(L_2 \cdot \cos\theta_2 + L_3 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3)) \\ L_1 + L_2 \sin\theta_2 + L_3 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) \end{pmatrix} \quad (3)$$

2.3.2. Inverse Kinematics

Dengan melihat model geometri pada Gambar 6 maka dapat ditentukan θ_1, θ_2 , dan θ_3 .



Gambar 6. Model geometri arm manipulator 3 DOF

Mencari besar θ_1 berdasarkan Gambar 6 maka didapatkan persamaan 4.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{Y}{X} \right) \quad (4)$$

Kemudian untuk memperoleh θ_2 , bisa dengan cara persamaan 5.

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{Z-L_1}{\sqrt{X^2+Y^2}} \right) + \cos^{-1} \left(\frac{(X^2+Y^2+(Z-L_1)^2+L_2^2-L_3^2)}{2XL_2\sqrt{X^2+Y^2+(Z-L_1)^2}} \right) \quad (5)$$

Penentuan sudut θ_3 dapat dicari dengan persamaan 6.

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{X^2+Y^2+(Z-L_1)^2-(L_2)^2-(L_3)^2}{2.L_2.L_3} \right) \quad (6)$$

2.2. Perancangan Software

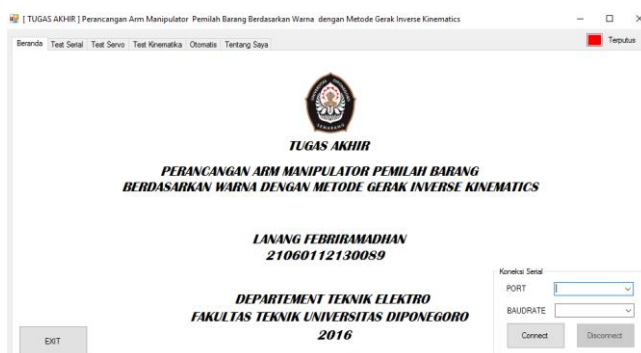
Perangkat lunak (*software*) yang digunakan pada mikrokontroler ATmega16 adalah bahasa pemrograman C

dan pada *interface* komputer adalah bahasa pemrograman C#.

Mikrokontroller pada perancangan ini digunakan sebagai pembaca sensor barang dan sensor warna, menjadi servo *controller*, pengolah algoritma dan metode gerak, serta menerima data dari *interface* pada komputer.

Interface pada komputer dirancang untuk melakukan berbagai pengujian dan melakukan kontrol kepada robot *arm manipulator*. Pengujian yang dapat dilakukan pada *arm manipulator* dengan menggunakan *interface* yaitu pengujian komunikasi serial, pengujian motor servo, dan pengujian kinematika gerak robot. Selain itu *interface* yang dirancang juga berguna untuk mengontrol *arm manipulator* yaitu sebagai pemberi perintah untuk memulai, berhenti, dan pemberi data lokasi pemindahan.

Gambar 7 menunjukkan pada tampilan *interface* yang dirancang terdapat 6 *tab* yaitu tab Beranda, tab Test Serial, tab Test Servo, tab Kinematika, tab Otomatis, dan tab Tentang Saya. Pada masing-masing tab yang telah dirancang memiliki fungsi khusus tersendiri.



Gambar 7. Tampilan *interface*.

3. Hasil dan Analisa

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kondisi dan hasil dari *prototype arm manipulator* yang dirancang. Pengujian juga dilakukan untuk mengetahui kemampuan robot *arm manipulator* dalam memilah dan memindahkan barang sesuai dengan tempatnya.

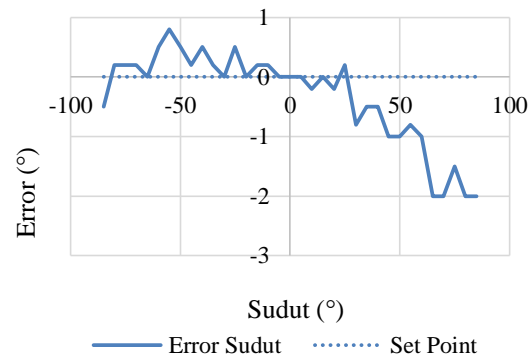
3.1. Pengujian Perangkat Keras (*Hardware*)

Pengujian *hardware* yang dilakukan pada *prototype* robot *arm manipulator* ini meliputi pengujian motor servo, pengujian sensor barang dan pengujian sensor warna.

3.1.1. Pengujian Motor Servo

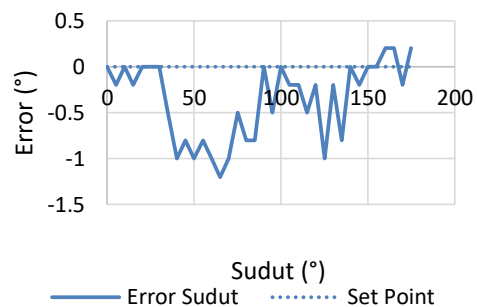
Pengujian *joint 1* dengan rentang sudut -85° sampai dengan 85° . Pada Gambar 8 terlihat *error* sudut terbesar

pada motor servo *joint 1* sebesar 2° dan *error* terkecil sebesar 0° .



Gambar 8. Pengujian sudut *joint 1*.

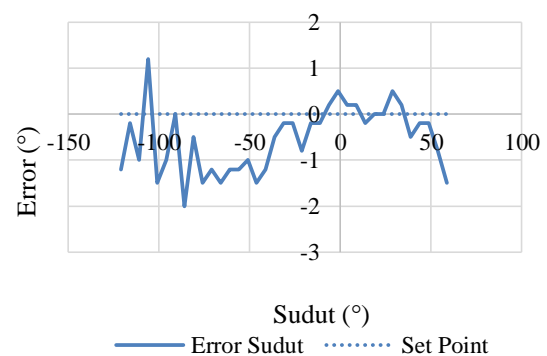
Kemudian pengujian *joint 2* dengan rentang sudut 0° sampai dengan 175° . Pada Gambar 9 memperlihatkan bahwa *error* sudut terbesar pada motor servo *joint 2* sebesar $1,2^{\circ}$ dan *error* terkecil sebesar 0° .



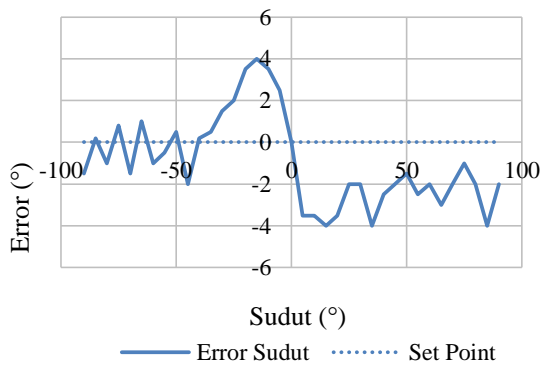
Gambar 9. Pengujian sudut *joint 2*.

Selanjutnya pengujian *joint 3* dengan rentang sudut -121° sampai dengan 59° . Pada Gambar 10 terlihat *error* sudut terbesar pada motor servo *joint 3* sebesar 2° dan *error* terkecil sebesar 0° .

Lalu pengujian *gripper* dengan rentang sudut -90° sampai dengan 90° . Pada Gambar 11 terlihat *error* sudut terbesar pada motor servo *gripper* sebesar 4° dan *error* terkecil sebesar 0° .



Gambar 10. Pengujian sudut *joint 3*.



Gambar 11. Pengujian sudut gripper.

3.1.2. Pengujian Sensor Warna

Pengujian sensor warna dilakukan untuk mengetahui tegangan keluaran dari masing-masing warna. Tabel 2 merupakan hasil dari 5 kali pengukuran dari warna kuning, biru, ungu, dan hijau. Dari Tabel 2 dapat diketahui bahwa tegangan keluaran rata-rata pada barang berwarna kuning sebesar 0,1964 V; biru sebesar 1,354 V; ungu sebesar 1,866 V; dan hijau sebesar 3,068 V.

Tabel 2. Pengujian tegangan keluaran sensor warna.

No	Kuning	Biru	Ungu	Hijau
1	0,196 V	1,35 V	1,86 V	3,06 V
2	0,196 V	1,36 V	1,86 V	3,07 V
3	0,197 V	1,35 V	1,87 V	3,06 V
4	0,196 V	1,35 V	1,86 V	3,08 V
5	0,197 V	1,36 V	1,88 V	3,07 V
Rata-rata	0,1964 V	1,354 V	1,866 V	3,068 V

3.1.3. Pengujian Sensor Barang

Pengujian sensor barang ini dilakukan dengan cara membuat suatu kondisi pada saat barang terdeteksi kemudian di ukur tegangan keluarannya dan juga pada saat barang tidak terdeteksi juga diukur tegangan keluarannya.

Dari Tabel 3 dapat diketahui bahwa tegangan rata-rata pada saat terdeteksi barang sebesar 4,336 V dan pada saat tidak terdeteksi barang sebesar 0,9424 V.

Tabel 3. Pengujian tegangan keluaran sensor barang.

No	Kondisi	
	Ada Barang	Tidak Ada Barang
1	4,33 V	0,942 V
2	4,35 V	0,943 V
3	4,33 V	0,942 V
4	4,34 V	0,942 V
5	4,33 V	0,943 V
Rata-rata	4,336 V	0,9424 V

3.2. Pengujian Perangkat Lunak (Software)

Pengujian perangkat lunak (*software*) dilakukan untuk menguji kemampuan dari program mikrokontroler yang telah dirancang. Pada pengujian *software* ini dilakukan pengujian keluaran sinyal PWM seperti pada Tabel 4.

Berdasarkan Tabel 5 dapat diketahui bahwa standar deviasi dari keluaran lebar pulsa sinyal PWM yang dihasilkan mikrokontroler untuk menggerakkan motor servo sebesar 0,05805 ms.

3.3. Pengujian Inverse Kinematics

Pengujian *inverse kinematics* dilakukan untuk menguji kepresisian dari robot *arm manipulator* ini untuk bergerak ke posisi tertentu serta untuk mengetahui perubahan sudut tiap *joint*. Pada pengujian *inverse kinematics* ini berisi pengujian variasi sumbu X, variasi sumbu Y, dan variasi sumbu Z.

3.3.1. Pengujian Variasi Sumbu X

Pengujian pada variasi sumbu X dilakukan dengan merubah nilai pada sumbu X kemudian mempertahankan nilai Y=0 dan Z=0. Dari Gambar 12 dan Gambar 13 pengujian *inverse kinematics* secara keseluruhan masih terdapat *error*. Untuk koordinat posisi terdapat rentang *error* terbesar adalah sejauh 0,5 cm untuk sumbu X. Sedangkan untuk perubahan sudut tiap *joint*, rentang *error* sudut terbesar adalah sejauh 0° untuk *joint* 1; 3,1° untuk *joint* 2; 1,7° untuk *joint* 3.

Tabel 4. Pengujian sinyal PWM.

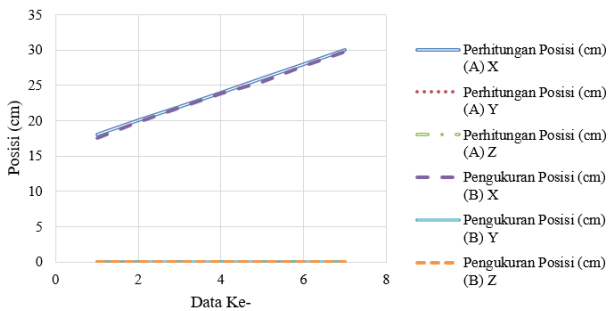
Nilai Servo	Terhitung		Terukur	
	Lebar Pulsa (ms)	Duty Cycle (%)	Lebar Pulsa (ms)	Duty Cycle (%)
900	0,45	2,236	0,508	2,524
1400	0,7	3,479	0,757	3,762
1900	0,95	4,721	1,008	5,009
2400	1,2	5,964	1,258	6,252
2900	1,45	7,206	1,509	7,5
3400	1,7	8,449	1,758	8,737
3900	1,95	9,691	2,008	9,980
4400	2,2	10,934	2,259	11,227
4800	2,4	11,928	2,459	12,221

Tabel 5. Error dan deviasi sinyal PWM.

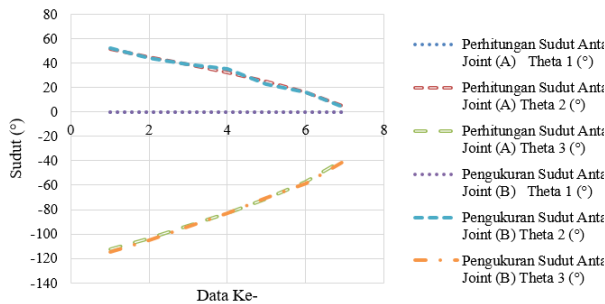
Nilai Servo	Error		Deviasi	
	Lebar Pulsa (ms)	Duty Cycle (%)	Lebar Pulsa (ms)	Duty Cycle (%)
900	0,058	0,288	0,00336	0,08309
1400	0,057	0,283	0,00324	0,08025
1900	0,058	0,288	0,00336	0,08309
2400	0,058	0,288	0,00336	0,08309
2900	0,059	0,293	0,00348	0,08599
3400	0,058	0,288	0,00336	0,08309
3900	0,058	0,288	0,00336	0,08309
4400	0,059	0,293	0,00348	0,08599
4800	0,059	0,293	0,00348	0,08599
Standar Deviasi			0,05805	0,28854

3.3.2. Pengujian Variasi Sumbu Y

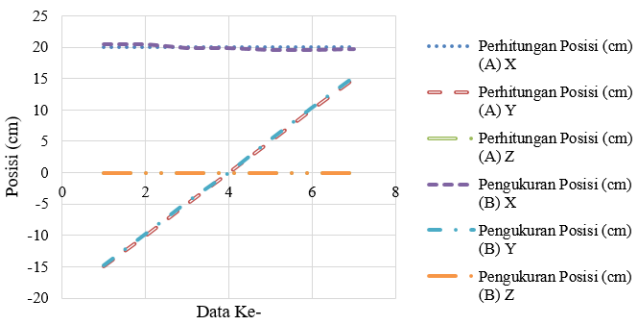
Pengujian pada variasi sumbu Y dilakukan dengan merubah nilai pada sumbu Y kemudian mempertahankan nilai $X=20$ dan $Z=0$. Dari Gambar 14 dan Gambar 15 pengujian *inverse kinematics* secara keseluruhan masih terdapat *error*. Untuk koordinat posisi terdapat rentang *error* terbesar adalah sejauh 0,5 cm untuk sumbu X dan 0,4 cm untuk sumbu Y. Sedangkan untuk perubahan sudut tiap *joint* rentang *error* sudut terbesar adalah sejauh $0,7^\circ$ untuk *joint* 1; $3,5^\circ$ untuk *joint* 2; $3,7^\circ$ untuk *joint* 3.



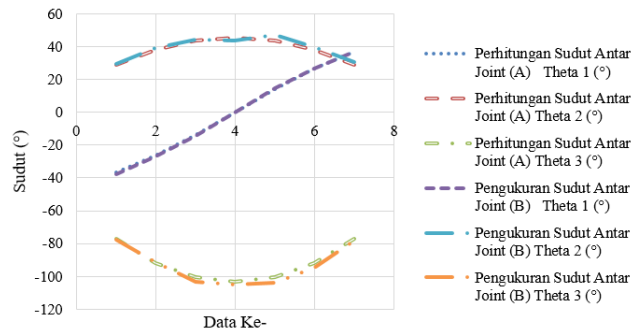
Gambar 12. Perbandingan hasil hitung dan ukur posisi variasi sumbu X.



Gambar 13. Perbandingan hasil hitung dan ukur sudut variasi sumbu X.



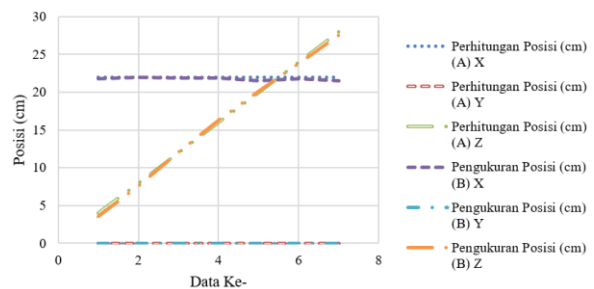
Gambar 14. Perbandingan hasil hitung dan ukur posisi variasi sumbu Y.



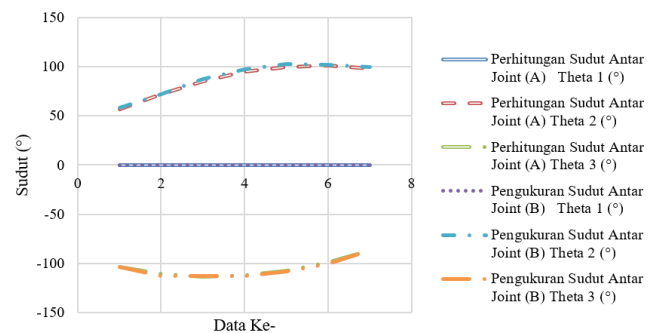
Gambar 15. Perbandingan hasil hitung dan ukur sudut variasi sumbu Y.

3.3.3. Pengujian Variasi Sumbu Z

Pengujian pada variasi sumbu Z dilakukan dengan merubah nilai pada sumbu Z kemudian mempertahankan nilai $X=22$ dan $Y=0$. Dari Gambar 16 dan Gambar 17 pengujian *inverse kinematics* secara keseluruhan masih terdapat *error*. Untuk koordinat posisi terdapat rentang *error* terbesar adalah sejauh 0,5 cm untuk sumbu X dan 0,4 cm untuk sumbu Z. Sedangkan untuk perubahan sudut tiap *joint* rentang *error* sudut terbesar adalah sejauh $3,2^\circ$ untuk *joint* 2; $2,6^\circ$ untuk *joint* 3.



Gambar 16. Perbandingan hasil hitung dan ukur posisi variasi sumbu Z.



Gambar 17. Perbandingan hasil hitung dan ukur sudut variasi sumbu Z.

3.4. Pengujian Pemilahan Barang

Pengujian pemilahan barang dilakukan untuk mengetahui kemampuan dari robot *arm manipulator* ini. Sebagai robot yang dirancang untuk memilah barang, maka pengujian ini perlu dilakukan untuk mengetahui kemampuan tersebut. Pengujian ini dilakukan dengan 2 mode, yaitu mode *standalone* dan mode kontrol *interface*.

Pengujian mode *standalone* dilakukan dengan posisi pemindahan barang warna kuning pada X=2 cm dan Y=21 cm, biru pada X=17 cm dan Y=0 cm, ungu pada X=12 cm dan Y=-14 cm, dan hijau pada X=2 cm dan Y=-21 cm. Hasil pengujian terlihat seperti pada Tabel 6. Dari Tabel 7 diketahui bahwa standar deviasi pada pemilahan dan pemindahan barang pada mode *standalone* sebesar 1,042 cm untuk sumbu X dan 1,177 cm untuk sumbu Y.

Tabel 6. Pengujian pemindahan barang mode *standalone*.

Percobaan Ke-	Warna	Lokasi Masukan Pemindahan (cm)		Lokasi Hasil Pemindahan (cm)	
		X	Y	X	Y
1	Kuning	2	21	2,5	19
	Biru	17	0	14,7	0
	Ungu	12	-14	11,3	-11,8
	Hijau	2	-21	3,5	-20,8
2	Kuning	2	21	2	20
	Biru	17	0	15,5	-0,5
	Ungu	12	-14	12	-13,3
	Hijau	2	-21	2,5	-20,4
3	Kuning	2	21	2	19,5
	Biru	17	0	16	-1
	Ungu	12	-14	13	-12,5
	Hijau	2	-21	2,5	-21,4

Dengan cara yang sama dengan pengujian mode *standalone*, maka didapat standar deviasi dari pengujian pemilahan barang mode kontrol *interface*. Tabel 8 menunjukkan rata-rata standar deviasi pada semua pengujian pemilahan barang dengan nilai 0,866 cm untuk X dan 1,197 untuk Y.

Tabel 7. Error pemindahan barang mode *standalone*.

Percobaan Ke-	Warna	Error Lokasi Pemindahan (cm)		Deviasi (cm)	
		X	Y	X	Y
1	Kuning	0,5	-2	0,25	4
	Biru	-2,3	0	5,29	0
	Ungu	-0,7	2,2	0,49	4,84
	Hijau	1,5	0,2	2,25	0,04
2	Kuning	0	-1	0	1
	Biru	-1,5	-0,5	2,25	0,25
	Ungu	0	0,7	0	0,49
	Hijau	0,5	0,6	0,25	0,36
3	Kuning	0	-1,5	0	2,25
	Biru	-1	-1	1	1
	Ungu	1	1,5	1	2,25
	Hijau	0,5	-0,4	0,25	0,16
Rata-rata Deviasi (cm)				1,085	1,386
Standar Deviasi (cm)				1,042	1,177

Tabel 8. Standar deviasi pengujian pemilahan barang.

Mode	Standar Deviasi (cm)	
	X	Y
<i>Standalone</i>	1,042	1,177
Kontrol <i>Interface</i> Variasi 1	0,912	1,420
Kontrol <i>Interface</i> Variasi 2	0,708	1,233
Kontrol <i>Interface</i> Variasi 3	0,802	0,957
Rata-rata Standar Deviasi (cm)	0,866	1,197

4. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan robot *arm manipulator* 3 DOF dengan metode gerak *invers kinematics* telah berhasil dirancang dan dapat memilah barang berdasarkan warna serta dapat memindahkan barang tersebut sesuai dengan tempat yang ditentukan dengan rata-rata standar deviasi pada sumbu X sebesar 0,866 cm dan pada sumbu Y sebesar 1,197 cm. Sensor warna yang digunakan berhasil membedakan tegangan dari 4 macam warna, yaitu tegangan rata-rata pada warna kuning sebesar 0,1964 V, warna biru 1,354 V, warna ungu 1,866 V, dan warna hijau 3,068 V. Sensor barang yang digunakan dapat membedakan keberadaan barang ditempat penyimpanan. Perbedaan kondisi ini dibedakan dengan besar tegangan pada saat ada barang sebesar 4,336 V dan saat tidak ada barang sebesar 0,942 V. Terdapat perbedaan antara perhitungan dan pengukuran sinyal PWM dengan standar deviasi sebesar 0,058 ms. Metode gerak *inverse kinematics* yang diterapkan pada robot mempunyai error posisi terbesar pada variasi sumbu X, variasi sumbu Y, dan variasi sumbu Z sebesar 0,5 cm.

Referensi

- [1]. T. Rachidi and A. Elouafiq, "Design and Engineering of a Robot Arm."
- [2]. L. E. Kahn, P. S. Lum, W. Z. Rymer, and D. J. Reinkensmeyer, "Robot-assisted movement training for the stroke-impaired arm: Does it matter what the robot does?," vol. 43, no. 5, pp. 619-629, 2006.
- [3]. R. Syam, *Kinematika dan Dinamika Robot Lengan*. Makassar, 2015.
- [4]. A. Sharma, K. Lewis, V. Ansari, and V. Noronha, "Design And Implementation Of Anthropomorphic Robotic Arm," vol. 4, no. 1, pp. 73-79, 2014.
- [5]. N. A. Senanayake, K. B. How, and Q. W. Wai, "Tele-Operated Anthropomorphic Arm and Hand Design," vol. 2, no. 3, pp. 166-171, 2008.
- [6]. I. Iossifidis and G. Sch, "Reaching with a Redundant Anthropomorphic Robot Arm using Attractor Dynamics," 2006.
- [7]. Z. Xu, V. Kumar, Y. Matsuoka, and E. Todorov, "Design of an Anthropomorphic Robotic Finger System with Biomimetic Artificial Joints."
- [8]. P. T. Katsiaris, P. K. Artemiadis, and K. J. Kyriakopoulos, "Modeling Anthropomorphism in Dynamic Human Arm Movements," pp. 3507-3512, 2010.

- [9]. F. Faris, A. Triwiyatno, and I. Setiawan, *Arm Manipulator 4 DOF dengan Cartesian Space-Trajectory Planning*, no. Desember. 2012.
- [10]. A.-V. Duka, "ANFIS based Solution to the Inverse Kinematics of a 3 DOF Planar Manipulator," vol. 19, pp. 526–533, 2015.