

Implementasi *Inverse Kinematics* Pada Lengan Robot Pengambil Sampah

Annisa Rizka Fitriani¹

¹SMK Negeri 6 Surabaya
Korespondensi: claralee436@gmail.com

Received: Juli 2023; Accepted: September 2023; Published: November 2023
DOI: <https://doi.org/10.30649/je.v5i2.128>

Abstrak

Perkembangan teknologi di bidang robotika sangat pesat, berbagai macam robot diciptakan untuk membantu kehidupan manusia. Untuk mendukung perkembangan teknologi di Indonesia, banyak robot yang telah diciptakan. Salah satu robot yang sedang dikembangkan adalah robot pemilah sampah. Robot pemilah sampah ini berjenis robot *manipulator* atau robot yang sistem mekaniknya menyerupai sistem kerja tangan manusia dan mampu menempatkan sesuatu dengan tepat. Oleh karena itu sangat penting untuk memperhatikan pengendalian pergerakan lengan robot agar dapat mengambil sampah tersebut. Pada penelitian ini digunakan metode *Inverse Kinematic* untuk mengendalikan pergerakan lengan robot agar dapat mengambil sampah dengan baik. Dari hasil penelitian, penerapan *Inverse Kinematic* berhasil membuat lengan robot bergerak mengambil sampah dengan baik. Sedangkan untuk rata-rata kesalahan koordinat didapatkan untuk seluruh posisi sampah pada sumbu x adalah 4,17%, sumbu y adalah 6,83%, dan sumbu z adalah 5,64%.

Kata kunci: Robot pemilah sampah, *Manipulator*, *Inverse Kinematic*

Abstract

Technological developments in the field of robotics are very rapid, various kinds of robots have been created to help human life. To support technological developments in Indonesia, many robots have been created. One of the robots being developed is a waste sorting robot. This waste sorting robot is a type of manipulator robot or robot whose mechanical system resembles the working system of a human hand and is able to place things precisely. Therefore, it is very important to pay attention to controlling the movement of the robot arm so that it can pick up the waste. In this research, the Inverse Kinematic method was used to control the movement of the robot arm so that it can pick up trash properly. From the research results, the application of Inverse Kinematic succeeded in making the robot arm move to pick up trash well. Meanwhile, the average coordinate error is obtained for all trash positions on the X-axis was 4,17%, the Y-axis was 6,83%, and the Z-axis was 5,64%.

Key words: Waste sorting robot, *Manipulator*, *Inverse Kinematic*

I. PENDAHULUAN

Manusia dan sampah telah hidup berdampingan selama puluhan abad. Sampah merupakan limbah yang dihasilkan dari adanya aktivitas manusia [1]. Namun saat ini, kesadaran masyarakat akan kebersihan lingkungan semakin menurun. Hal tersebut menyebabkan lingkungan menjadi kumuh dan dapat menjadi sumber berbagai jenis penyakit [2].

Masalah pengelolaan sampah kota semakin mendesak di kota-kota besar dunia. Menurut data Bank Dunia (2024), produksi sampah kota secara global diperkirakan meningkat dari 1,3 miliar ton pada tahun 2010 menjadi 2,2 miliar ton pada tahun 2025. Di Indonesia, Badan Pusat Statistik (2022) melaporkan bahwa jumlah tempat pembuangan sampah meningkat dari 65,2 juta ton pada tahun 2016 menjadi 72 juta ton pada tahun 2022, dengan 36% atau sekitar 9 juta ton sampah tidak dikelola dengan baik. Sampah rumah tangga mendominasi 32,5% dari total tempat pembuangan sampah setiap tahunnya [3].

Pertumbuhan populasi yang cepat, urbanisasi, dan pembangunan ekonomi berkontribusi terhadap peningkatan jumlah sampah, yang memberikan beban pada sistem pengelolaan sampah yang ada. Salah satu kelemahan utama dalam pengelolaan sampah adalah pemilahan yang masih dilakukan secara manual. Pekerjaan ini tidak hanya kotor dan tidak sehat bagi pekerjanya tetapi juga mempunyai risiko tinggi terhadap kesehatan akibat paparan zat-zat berbahaya seperti timbal, merkuri dan zat-zat yang berasal dari limbah rumah sakit [3].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, teknologi robotika dan kecerdasan buatan dapat dimanfaatkan. Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Ristek melalui Pusat

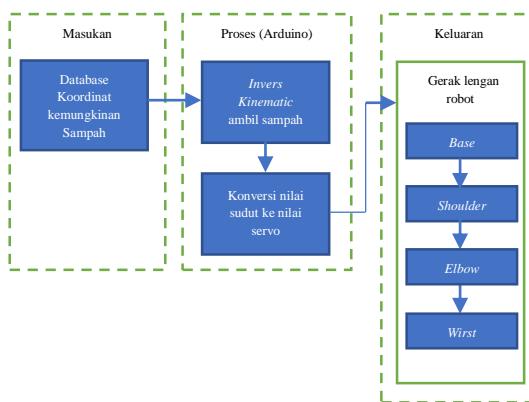
Prestasi Nasional (Puspresnas) menyelenggarakan Kontes Robot Indonesia (KRI), salah satunya Kontes Robot Tematik Indonesia (KRTMI). Pada tahun 2024, KRTMI mengusung tema “Robot Pemilah Sampah” yang bertujuan untuk mengembangkan ide-ide solusi pengelolaan sampah di masa depan [4].

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan robot pemilah sampah, namun masih belum efektif. Misalnya, Eno, F. W., et. al. mengembangkan *prototipe* lengan robot yang hanya dapat mendeteksi limbah logam menggunakan sensor jarak, yang masih belum efisien. Mualief, A. I., et. al. mengembangkan tempat sampah pintar berbasis *Internet of Things* (IoT) yang hanya memberikan informasi kapasitas tanpa pemilahan sampah yang efektif. Elfirza, R. dan Rizky P. telah menciptakan sistem robot yang mengkategorikan sampah berdasarkan sensor, namun belum sepenuhnya optimal. Untuk meningkatkan efisiensi diperlukan struktur robot yang baik dengan lengan robot yang dikendalikan oleh beberapa motor servo, seperti yang diteliti oleh Afrizal, S. A., et. al. dan Heru, S.

Dalam rangka KRTMI 2024, solusi yang diusulkan adalah pembuatan lengan robot pemilah sampah yang dapat mendeteksi sampah kertas berdasarkan warna menggunakan pengolahan gambar dan memindahkannya ke tempat yang sesuai dengan menggunakan perhitungan kinematika terbalik. Robot ini diharapkan dapat berfungsi dengan baik dalam mengambil sampah, sehingga memberikan kontribusi nyata dalam mengatasi permasalahan pengelolaan sampah di masa depan.

II. METODE PENELITIAN

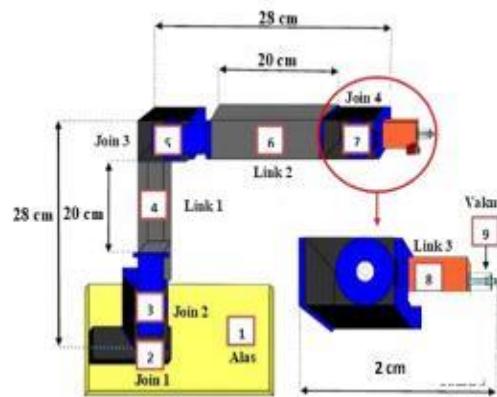
Sistem lengan robot pemilah sampah akan dijelaskan sesuai alur diagram blok pada Gambar 1. Sistem lengan robot pemilah sampah ini diasumsikan sudah mengetahui koordinat kemungkinan sampah berada. Data koordinat tersebut kemudian dikirimkan ke sistem kendali lengan robot untuk mengatur pergerakan lengan sesuai dengan posisi dan orientasi objek.



Gambar 1. Diagram blok sistem

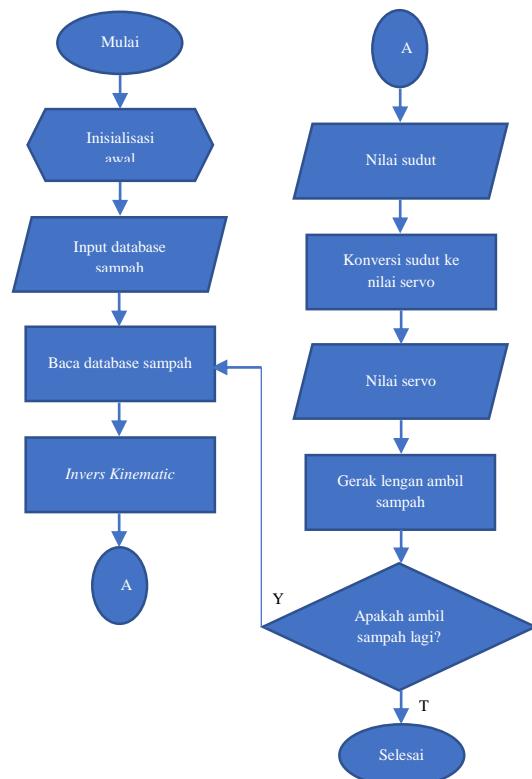
Selanjutnya algoritma perhitungan *inverse kinematic* digunakan untuk mengubah koordinat benda menjadi sudut sambungan yang dibutuhkan oleh lengan robot. Setelah perhitungan *inverse kinematic* selesai, nilai sudut sambungan diubah menjadi nilai servo bertipe data bit sebagai masukan pergerakan lengan robot. Nilai-nilai tersebut kemudian dikirimkan ke setiap sendi pada lengan robot, yang mengatur pergerakan lengan sesuai hasil perhitungan untuk mengambil sampah. Dari diagram blok pada Gambar 1 diperoleh *flowchart* pada Gambar 3. Sedangkan untuk desain dari lengan robot dapat dilihat pada Gambar 2.

Pada Gambar 2 dapat diketahui bahwa rangka utama badan robot terbuat dari bahan akrilik dengan ketebalan alas 5cm dan link 3cm serta terdapat lubang yang digunakan sebagai titik tumpu servo dynamixel.



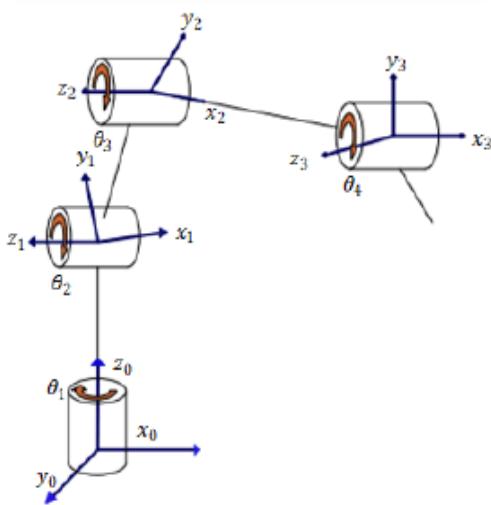
Gambar 2. Desain lengan robot

Sementara itu, *Inverse Kinematic* merupakan suatu metode untuk mengubah besaran kartesius pada setiap kaki menjadi besaran sudut pada setiap servo. Posisi dan orientasi *end-effector* pada masing-masing kaki robot dapat ditentukan berdasarkan posisi sudut sambungan dan struktur lengan pada robot yang dapat ditentukan oleh nilai pada setiap sumbu putar servo yang dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 3. Flowchart sistem

Pada Gambar 4 dapat dilihat bahwa lengan robot mempunyai 4 bagian yaitu bagian pangkal, siku, lengan dan jari, dimana bagian-bagian tersebut mempunyai perhitungan yang berbeda-beda sesuai dengan kebutuhan. Pada penelitian ini derajat kebebasannya adalah 4, sehingga perhitungan yang diperlukan agar hasil derajat sudut servo juga adalah 4.



Gambar 4. Konfigurasi Lengan Robot 4-Dof

Untuk menghitung sudut θ_1 dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (1) [10].

$$\theta_1 = \text{Atan2} \left(\frac{x}{y} \right) \times 57,32 \quad (1)$$

Pada Persamaan (1), faktor kali 57,32 diperoleh dari hasil $180/\pi$, karena dengan menggunakan Atan2 hasil perhitungannya masih dalam satuan radian, oleh karena itu perlu diubah menjadi satuan derajat. Perhitungan pergerakan dari sudut pandang atas lengan robot seperti pada Gambar 5.

Pada Persamaan (2) sampai Persamaan (12) [10] digunakan untuk perhitungan joint 2, joint 3 dan joint 4. Untuk konfigurasinya dapat dilihat pada

Gambar 6 yang menunjukkan konfigurasi lengan robot 4-DoF tampak samping.

$$\emptyset = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \quad (2)$$

$$r_2 = r_3 - a_4 \cos \emptyset \quad (3)$$

$$z_2 = z_3 - a_4 \sin \emptyset \quad (4)$$

$$\cos \theta_2 = \frac{(a_2 + a_3 \cos \theta_3)r_2 + (a_3 \sin \theta_3)z_2}{r_2^2 + z_2^2} \quad (5)$$

$$\sin \theta_2 = \frac{(a_2 + a_3 \cos \theta_3)z_2 + (a_3 \sin \theta_3)}{r_2^2 + z_2^2} \quad (6)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2} \right) \quad (7)$$

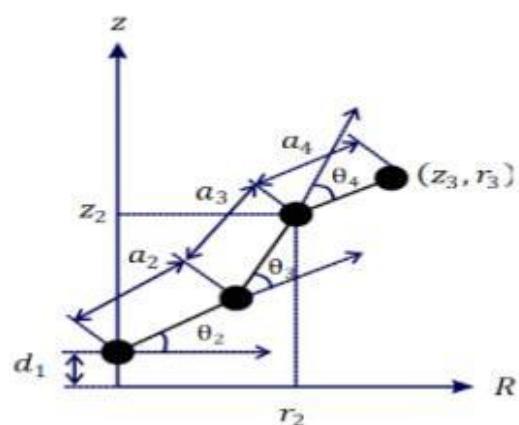
$$\cos \theta_3 = \frac{r_2^2 + z_2^2 - (a_2^2 + a_3^2)}{2a_2 + a_3} \quad (8)$$

$$r_3 = \cos \theta_2 (a_2 + a_3 \cos \theta_3) - \sin \theta_2 (a_3 \sin \theta_3) \quad (9)$$

$$z_3 = \cos \theta_2 (a_3 \sin \theta_3) + \sin \theta_2 (a_2 + a_3 \cos \theta_3) \quad (10)$$

$$\theta_3 = \pm \cos^{-1} \left(\frac{r_2^2 + z_2^2 - (a_2^2 + a_3^2)}{2a_2 + a_3} \right) \quad (11)$$

$$\theta_4 = \theta_2 + \theta_3 \quad (12)$$



Gambar 5. Konfigurasi Lengan Robot 4-Dof Tampak Samping

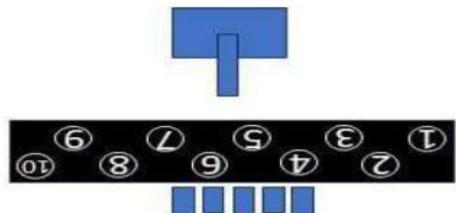
Dari persamaan invers kinematik pada Persamaan (1) sampai Persamaan (12), dapat dicari sudut pada masing-masing servo. Dengan memasukkan koordinat *end-effector* lengan robot pada sumbu X, Y, Z sebagai data masukan ke *inverse kinematic* sehingga menghasilkan data keluaran berupa nilai setiap joint θ_2 , θ_3 , dan θ_4 .

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian pada lengan dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi lengan robot pada tiap langkah atau step yang diambilnya. Pengujian ini dilakukan dengan cara mengukur koordinat yang dicapai oleh lengan kemudian dibandingkan dengan koordinat yang

Gambar 7. Posisi *end effector* lengan robot saat mengambil sampah posisi 1 posisi. Dalam proses pengujian ini, gerakan lengan robot diuji berdasarkan masukan program yang telah ditentukan sebelumnya dan dibandingkan dengan

hasil nyata yang diperoleh saat lengan bergerak untuk mengambil sampah. Gambar 7 menunjukkan posisi sampah dari posisi 1 sampai posisi 10. Gambar 8 menunjukkan posisi *end effector* lengan robot saat mengambil sampah pada posisi 1.



Gambar 6. Posisi sampah



Sedangkan Tabel 1 menunjukkan nilai hasil pengujian posisi *end effector* saat mengambil sampah pada posisi 1.

Tabel 1. Nilai hasil pengujian posisi *end effector* saat mengambil sampah pada posisi 1

Percobaan Ke-	Input			Output			Error (cm)			Error (%)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	60	10	17	68	10	15	8	0	2	13,3	0,0	11,7
2	60	10	17	60	10	17	0	0	0	0,0	0,0	0,0
3	60	10	17	68	10	15	8	0	2	13,3	0,0	11,7
4	60	10	17	68	10	15	8	0	2	13,3	0,0	11,7
5	60	10	17	68	10	15	8	0	2	13,3	0,0	11,7
Rata-rata							6,4	0	1,6	10,6	0,0	9,4

Pengujian selanjutnya dilakukan pada posisi sampah ke-2. Gambar 9 menunjukkan posisi *end effector* lengan robot saat mengambil sampah pada posisi 2. Sedangkan Tabel 2 menunjukkan nilai hasil pengujian posisi *end effector* saat mengambil sampah pada posisi 2.



Gambar 8. Posisi *end effector* lengan robot saat mengambil sampah posisi 2

Tabel 2. Nilai hasil pengujian posisi *end effector* saat mengambil sampah pada posisi 2

Percobaan Ke-	<i>Input</i>			<i>Output</i>			<i>Error (cm)</i>			<i>Error (%)</i>		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	60	35	17	65	30	17	5	5	0	8,3	14,2	0,0
2	60	35	17	60	35	15	0	0	2	0,0	0,0	11,7
3	60	35	17	62	29	17	2	6	0	3,3	17,1	0,0
4	60	35	17	60	29	17	0	6	0	0,0	17,1	0,0
5	60	35	17	60	35	15	0	0	2	0,0	0,0	11,7
Rata-rata							1,4	3,4	0,8	2,3	9,7	4,7

Selanjutnya dilakukan pengujian pada posisi sampah ke-3. Gambar 10 menunjukkan posisi *end effector* lengan robot saat mengambil sampah pada posisi 3. Sedangkan Tabel 3 menunjukkan nilai hasil pengujian posisi *end effector* saat mengambil sampah pada posisi 3.



Gambar 9. Posisi *end effector* lengan robot saat mengambil sampah posisi 3

Tabel 3. Nilai hasil pengujian posisi *end effector* saat mengambil sampah pada posisi 3

Percobaan Ke-	<i>Input</i>			<i>Output</i>			<i>Error (cm)</i>			<i>Error (%)</i>		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	-60	10	17	-60	15	15	0	5	2	0,0	5,0	11,7
2	-60	10	17	-55	19	17	5	9	0	8,3	9,0	0,0
3	-60	10	17	-60	15	15	0	5	2	0,0	5,0	11,7
4	-60	10	17	-58	19	17	5	9	0	3,3	9,0	0,0
5	-60	10	17	-58	15	17	2	5	0	3,3	5,0	0,0
Rata-rata							2,4	6,6	0,8	3	6,6	4,7

Kemudian, pengujian pada posisi sampah ke-4. Gambar 11 menunjukkan posisi *end effector* lengan robot saat mengambil sampah pada posisi 4. Sedangkan Tabel 4 menunjukkan nilai hasil pengujian posisi *end effector* saat mengambil sampah pada posisi 4.



Gambar 10. Posisi *end effector* lengan robot saat mengambil sampah posisi 4

Tabel 4. Nilai hasil pengujian posisi end effector saat mengambil sampah pada posisi 4

Percobaan Ke-	Input			Output			Error (cm)			Error (%)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	60	35	17	65	30	17	5	5	0	8,3	14,2	0,0
2	60	35	17	60	35	15	0	0	2	0,0	0,0	11,7
3	60	35	17	62	29	17	2	6	0	3,3	17,1	0,0
4	60	35	17	60	29	17	0	6	0	0,0	17,1	0,0
5	60	35	17	60	35	15	0	0	2	0,0	0,0	11,7
Rata-rata							1,4	3,4	0,8	2,3	9,7	4,7

Selanjutnya dilakukan pengujian pada posisi sampah ke-5. Gambar 12 menunjukkan posisi *end effector* lengan robot saat mengambil sampah pada posisi 5. Untuk nilai hasil pengujian posisi *end effector* saat mengambil sampah pada posisi 5 dapat dilihat pada Tabel 5

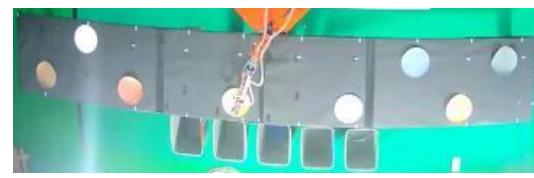


Gambar 11. Posisi *end effector* lengan robot saat mengambil sampah posisi 5

Tabel 5. Nilai hasil pengujian posisi end effector saat mengambil sampah pada posisi 5

Percobaan Ke-	Input			Output			Error (cm)			Error (%)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	60	10	17	68	10	15	8	0	2	13,3	0,0	11,7
2	60	10	17	60	10	17	0	0	0	0,0	0,0	0,0
3	60	10	17	68	10	15	8	0	2	13,3	0,0	11,7
4	60	10	17	68	10	15	8	0	2	13,3	0,0	11,7
5	60	10	17	68	10	15	8	0	2	13,3	0,0	11,7
Rata-rata							6,4	0	1,6	10,6	0,0	9,4

Pengujian selanjutnya pada posisi sampah ke-6 dapat dilihat pada Gambar 13 menunjukkan posisi *end effector* lengan robot saat mengambil sampah pada posisi 6. Untuk nilai hasil pengujian posisi *end effector* saat mengambil sampah pada posisi 6 dapat dilihat pada Tabel 6.

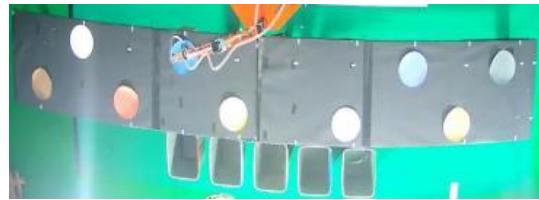


Gambar 12. Posisi *end effector* lengan robot saat mengambil sampah posisi 6

Tabel 6. Nilai hasil pengujian posisi end effector saat mengambil sampah pada posisi 6

Percobaan Ke-	Input			Output			Error (cm)			Error (%)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	60	35	17	65	30	17	5	5	0	8,3	14,2	0,0
2	60	35	17	60	35	15	0	0	2	0,0	0,0	11,7
3	60	35	17	62	29	17	2	6	0	3,3	17,1	0,0
4	60	35	17	60	29	17	0	6	0	0,0	17,1	0,0
5	60	35	17	60	35	15	0	0	2	0,0	0,0	11,7
Rata-rata							1,4	3,4	0,8	2,3	9,7	4,7

Posisi selanjutnya dilakukan pengujian pada posisi sampah ke-7. Gambar 14 menunjukkan posisi *end effector* lengan robot saat mengambil sampah pada posisi 7. Sedangkan Tabel 7 menunjukkan nilai hasil pengujian posisi *end effector* saat mengambil sampah pada posisi 7.



Gambar 13. Posisi *end effector* lengan robot saat mengambil sampah posisi 7

Tabel 7. Nilai hasil pengujian posisi end effector saat mengambil sampah pada posisi 7

Percobaan Ke-	Input			Output			Error (cm)			Error (%)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	-60	10	17	-60	15	15	0	5	2	0,0	5,0	11,7
2	-60	10	17	-55	19	17	5	9	0	8,3	9,0	0,0
3	-60	10	17	-60	15	15	0	5	2	0,0	5,0	11,7
4	-60	10	17	-58	19	17	5	9	0	3,3	9,0	0,0
5	-60	10	17	-58	15	17	2	5	0	3,3	5,0	0,0
Rata-rata							2,4	6,6	0,8	3	6,6	4,7

Kemudian, pengujian pada posisi sampah ke-8. Gambar 15 menunjukkan posisi *end effector* lengan robot saat mengambil sampah pada posisi 8. Untuk nilai hasil pengujian posisi *end effector* saat mengambil sampah pada posisi 8 dapat dilihat pada Tabel 8.



Gambar 14. Posisi *end effector* lengan robot saat mengambil sampah posisi 8

Tabel 8. Nilai hasil pengujian posisi end effector saat mengambil sampah pada posisi 8

Percobaan Ke-	Input			Output			Error (cm)			Error (%)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	60	35	17	65	30	17	5	5	0	8,3	14,2	0,0
2	60	35	17	60	35	15	0	0	2	0,0	0,0	11,7
3	60	35	17	62	29	17	2	6	0	3,3	17,1	0,0
4	60	35	17	60	29	17	0	6	0	0,0	17,1	0,0
5	60	35	17	60	35	15	0	0	2	0,0	0,0	11,7
Rata-rata							1,4	3,4	0,8	2,3	9,7	4,7

Selanjutnya dilakukan pengujian pada posisi sampah ke-9. Gambar 16 menunjukkan posisi *end effector* lengan robot saat mengambil sampah pada posisi 9. Sedangkan Tabel 9 menunjukkan nilai hasil pengujian posisi *end effector* saat mengambil sampah pada posisi 9.



Gambar 15. Posisi *end effector* lengan robot saat mengambil sampah posisi 9

Tabel 9. Nilai hasil pengujian posisi end effector saat mengambil sampah pada posisi 9

Percobaan Ke-	Input			Output			Error (cm)			Error (%)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	-60	10	17	-60	15	15	0	5	2	0,0	5,0	11,7
2	-60	10	17	-55	19	17	5	9	0	8,3	9,0	0,0
3	-60	10	17	-60	15	15	0	5	2	0,0	5,0	11,7
4	-60	10	17	-58	19	17	5	9	0	3,3	9,0	0,0
5	-60	10	17	-58	15	17	2	5	0	3,3	5,0	0,0
Rata-rata							2,4	6,6	0,8	3	6,6	4,7

Pengujian selanjutnya pada posisi sampah ke-10 dapat dilihat pada Gambar 17. Untuk nilai hasil pengujian posisi *end effector* saat mengambil sampah pada posisi 10 dapat dilihat pada Tabel 10.



Gambar 16. Posisi *end effector* lengan robot saat mengambil sampah posisi 10

Tabel 10. Nilai hasil pengujian posisi end effector saat mengambil sampah pada posisi 10

Percobaan Ke-	Input			Output			Error (cm)			Error (%)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	60	35	17	65	30	17	5	5	0	8,3	14,2	0,0
2	60	35	17	60	35	15	0	0	2	0,0	0,0	11,7
3	60	35	17	62	29	17	2	6	0	3,3	17,1	0,0
4	60	35	17	60	29	17	0	6	0	0,0	17,1	0,0
5	60	35	17	60	35	15	0	0	2	0,0	0,0	11,7
Rata-rata							1,4	3,4	0,8	2,3	9,7	4,7

IV. SIMPULAN

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa rata-rata *error* untuk sumbu X pada posisi sampah ke-1 sebesar 10,6%, untuk sumbu Y sebesar 0,0%, untuk sumbu Z sebesar 9,4%. Sedangkan untuk posisi sampah ke-2 rata-rata *error* untuk sumbu X sebesar 2,3%, untuk sumbu Y sebesar 9,7%, dan untuk sumbu Z sebesar 4,7%. Untuk posisi sampah ke-3 rata-rata *error* untuk sumbu X sebesar 3%, untuk sumbu Y sebesar 6,6%, dan untuk sumbu Z sebesar 4,7%. Untuk posisi sampah ke-4 rata-rata *error* untuk sumbu X sebesar 2,3%, untuk sumbu Y sebesar 9,7%, dan untuk sumbu Z sebesar 4,7%. Kemudian untuk posisi sampah ke-5 rata-rata *error* untuk sumbu X sebesar 10,6%, untuk sumbu Y sebesar 0,0%, dan untuk sumbu Z sebesar 9,4%.

Sedangkan untuk posisi sampah ke-6 rata-rata *error* untuk sumbu X sebesar 2,3%, untuk sumbu Y sebesar 9,7%, dan untuk sumbu Z sebesar 4,7%. Kemudian untuk posisi sampah ke-7 rata-rata *error* untuk sumbu X sebesar 3%, untuk sumbu Y sebesar 6,6%, dan untuk sumbu Z sebesar 4,7%. Untuk posisi sampah ke-8 rata-rata *error* untuk sumbu X sebesar 2,3%, untuk sumbu Y sebesar 9,7%, dan untuk sumbu Z sebesar 4,7%. Untuk posisi sampah ke-9 rata-rata *error* untuk sumbu X sebesar 3%, untuk sumbu Y sebesar 6,6%, dan untuk sumbu Z sebesar 4,7%.

Sedangkan untuk posisi sampah terakhir atau posisi ke-10, rata-rata *error* untuk sumbu X sebesar 2,3%, untuk sumbu Y sebesar 9,7%, dan untuk sumbu Z sebesar 4,7%.

V. RUJUKAN

- [1] N. Harahap, “Pengembangan Robot Pemilah Sampah untuk Meningkatkan Sikap Peduli Lingkungan di MTsN 1 Banda Aceh,” *Jurnal Biologi Edukasi*, Vol. 12 No. 2, 2020.
- [2] A. Rohman, J. Aditama, M. B. Arifin, R. Rahmawati, S. Sendari, “Rancang Bangun Smart Cleaner Robot sebagai Robot Pengambil dan Pemilah Sampah,” *SinarFe7*, Vol. 1 No. 1, 2018.
- [3] N. Midayanti, C. Widya, D. Aryanti, Krisnawati, “Statistik Lingkungan Hidup Indonesia 2022,” Badan Pusat Statistik, 2022.
- [4] B. Kusumoputro, M. H. Purnomo, H. S. B. Rochardjo, et. al., “Pedoman Kontes Robot Indonesia Tahun 2024,” Balai Pengembangan Talenta Indonesia, 2024.
- [5] E. F. Wardani, N. K. Daulay, M. N. Alamsyah, “Prototype Lengan Robot Pemilah Sampah Organik dan Anorganik,” *Kajian Ilmiah Informatika dan Komputer*. Vol 3, No 5, 2023.

- [6] M. Ismail, R. K. Abdullah, S. Abdussamad, "Tempat Sampah Pintar Berbasis Internet of Things (IoT) Dengan Sistem Teknologi Informasi," *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering (JJEEE)*, Vol. 3, No. 1, 2021.
- [7] E. Rosiana, R. Perdana, "Rancang Bangun Sistem Robot Pemilah Sampah Anorganik dengan *Inductive Proximity* dan LDR Sebagai Sensor," *Building of Informatics, Technology and Science (BITS)*, Vol. 4, No. 2, 2022.
- [8] A. S. Arisandi, J. Subur, Suryadhi, "Rancang Bangun Robot Lengan Pemindah Barang 3 Dof Menggunakan Metode Inverse Kinematics Berbasis Android," *Jurnal: Elektrika Borneo (JEB)*, Vol. 6, No. 2, Oktober 2020.
- [9] H. Suprapto, "Trajectory Planning Pada Robot Manipulator Menggunakan Inverse Kinematic," Tesis, Jakarta: Institut Sains dan Teknologi Nasional Jakarta, 2017.
- [10] H. Z. Ting, M. H. M. Zaman, M. F. Ibrahim, A. M. Moubarak, "Kinematic Analysis for Trajectory Planning of Open-Source 4-DoF Robot Arm," *(IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, Vol. 12, No. 6, 2021.