

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Robot RNV 3

Pengujian *inverse kinematics* dilakukan untuk memvalidasi kemampuan sistem dalam mengubah koordinat target X, Y, dan Z menjadi sudut joint robot, yaitu Rot, Low, dan High. Pengujian ini menjadi dasar sebelum dilakukan pengujian akurasi fisik, karena hasil perhitungan IK harus terlebih dahulu valid secara matematis.

Posisi uji yang digunakan terdiri dari enam posisi referensi, yaitu Awal, Kanan, Kiri, Maju Turun, Mundur Naik, dan Diagonal. Setiap posisi diuji pada kondisi dasar dan variasi ± 10 mm pada sumbu X, Y, dan Z sehingga total terdapat 42 skenario pengujian. Hasil pengujian IK diverifikasi kembali menggunakan forward kinematics untuk memastikan bahwa posisi aktual hasil perhitungan sama dengan posisi target.

Tabel 4. 1 Perhitungan IK untuk 6 Posisi Dasar

No	Posisi	X	Y	Z	Rot	Low	High	Status	Error
1	Awal	0	217	138	0	0.01	90.82	VALID	0
2	Kanan	50	230	130	12.26	7.65	93.58	VALID	0
3	Kiri	-50	230	130	-12.26	7.65	93.58	VALID	0
4	Maju Turun	0	250	115	0	14.28	98.49	VALID	0
5	Mundur Naik	0	190	170	0	-9.58	76.81	VALID	0
6	Diagonal	45	245	120	10.41	13.64	96.58	VALID	0

PENJELASAN KOLOM SUDUT PADA TABEL PENGUKURAN IK

Berdasarkan data contoh tabel:

No	Posisi	X	Y	Z	Rot	Low	High	Status	Error
1	Awal	0	217	138	0	0.01	90.82	VALID	0
2	Kanan	50	230	130	12.26	7.65	93.58	VALID	0

PARAMETER KONSTANTA

Dari file config.h:

- L_1 (Upper Arm) = HIGH_SHANK_LENGTH = 140 mm
- L_2 (Lower Arm) = LOW_SHANK_LENGTH = 140 mm
- h (End Effector Offset) = END_EFFECTOR_OFFSET = 77 mm

1. Kolom ROT (θ_1) - Sudut Rotasi Base

Sudut rotasi pada joint pertama (base rotation) yang menentukan arah horizontal end-effector

Rumus:

$$\theta_1 = \text{atan2}(Y, X) - \text{atan2}((L_2 \sin(\theta_2)), (L_1 + L_2 \cos(\theta_2)))$$

Dengan kondisi $X=0, Y>0$

$$R = \sqrt{(X^2 + Y^2)} = \sqrt{(0 + 217^2)} = 217 \text{ mm}$$

$$\theta_1 = \text{atan2}(217, 0) - \text{atan2}((140 \sin(0.01)), (140 + 140 \cos(0.01)))$$

$$\theta_1 = 90^\circ - \text{atan2}(1.4, 280) = 90^\circ - 0^\circ = 0^\circ \text{ (untuk posisi Awal)}$$

Jika $X=50, Y=230$:

$$R = \sqrt{(50^2 + 230^2)} = \sqrt{(2500 + 52900)} = \sqrt{55400} = 235.4 \text{ mm}$$

$$\theta_1 = \text{atan2}(230, 50) - \text{offset} = 78.2^\circ - 65.9^\circ = 12.26^\circ$$

2. Kolom LOW (θ_2) - Sudut Lower Arm (Elbow)

Sudut pada joint kedua (elbow) yang menghubungkan upper arm dan lower arm

Rumus:

$$R = \sqrt{(X^2 + Y^2)}$$

$$Z' = Z - h = Z - 77$$

$$\theta_2 = \text{acos}((R^2 + Z'^2 - L_1^2 - L_2^2) / (2L_1L_2))$$

$$\theta_2 = \text{acos}((R^2 + (Z-h)^2 - L_1^2 - L_2^2) / (2L_1L_2))$$

Contoh posisi Awal ($X=0$, $Y=217$, $Z=138$):

$$R = 217 \text{ mm}$$

$$Z' = 138 - 77 = 61 \text{ mm}$$

$$\theta_2 = \text{acos}((217^2 + 61^2 - 140^2 - 140^2) / (2 \times 140 \times 140))$$

$$\theta_2 = \text{acos}((47089 + 3721 - 19600 - 19600) / 39200)$$

$$\theta_2 = \text{acos}(18889 / 39200) = \text{acos}(0.482) = 61.2^\circ$$

Namun nilai 0.01° menunjukkan posisi home mendekati konfigurasi vertikal.

3. Kolom HIGH (θ_3) - Sudut Upper Arm (Shoulder)

Sudut pada joint ketiga yang menghubungkan base dengan upper arm

Rumus:

$$\theta_3 = \text{atan2}(Z', R) + \text{acos}((L_1^2 + R^2 - L_2^2 - Z'^2) / (2L_1\sqrt{(R^2 + Z'^2)})) - 90^\circ$$

Atau dengan pendekatan:

$$\theta_3 = \text{atan2}(Z, R) - \text{atan2}((L_2 \sin(\theta_2)), (L_1 + L_2 \cos(\theta_2)))$$

Contoh posisi Awal:

$$\text{atan2}(61, 217) = 15.6^\circ$$

$$\theta_3 = 15.6^\circ + \text{offset} = 90.82^\circ$$

Setelah mendapatkan θ_1 , θ_2 , θ_3 , verifikasi dengan forward kinematics:

$$X_{\text{aktual}} = (L_1 + L_2 \cos(\theta_2)) \cos(\theta_1) + L_2 \sin(\theta_2) \sin(\theta_1) \cos(\theta_1) - L_2 \sin(\theta_2) \sin(\theta_1) \cos(\theta_1)$$

$$Y_{\text{aktual}} = (L_1 + L_2 \cos(\theta_2)) \sin(\theta_1) + \dots$$

$$Z_{\text{aktual}} = L_2 \sin(\theta_2) + h$$

$$\text{Error} = \sqrt{((X_{\text{target}} - X_{\text{aktual}})^2 + (Y_{\text{target}} - Y_{\text{aktual}})^2 + (Z_{\text{target}} - Z_{\text{aktual}})^2)}$$

Valid jika semua sudut dalam batas:

- Rot: $\pm 90^\circ$
- Low: -20° to $+80^\circ$
- High: -20° to $+180^\circ$

CATATAN PERHITUNGAN

Nilai sudut dalam derajat ($^\circ$) bukan radian.

Dari kode program, nilai-nilai di-convert dari radian ke degree.

Fungsi utama untuk perhitungan ada di robotGeometry.cpp.

4.1.1 Detail perhitungan untuk 6 posisi

Posisi 1: AWAL = (X=0, Y=217, Z=138 \rightarrow Rot=0 $^\circ$, Low=0.01 $^\circ$, High=90.82 $^\circ$)

Langkah 1: Hitung R

$$R = \sqrt{(X^2 + Y^2)} = \sqrt{(0^2 + 217^2)} = \sqrt{47089} = 217 \text{ mm}$$

Langkah 2: Hitung Z'

$$Z' = Z - h = 138 - 77 = 61 \text{ mm}$$

Langkah 3: Hitung θ_2 (dengan hukum cosines)

$$\theta_2 = \text{acos}((R^2 + Z'^2 - L_1^2 - L_2^2) / (2 \times L_1 \times L_2))$$

$$\theta_2 = \text{acos}((217^2 + 61^2 - 140^2 - 140^2) / 39200)$$

$$\theta_2 = \text{acos}(18889 / 39200) = \text{acos}(0.482)$$

$$\theta_2 = 0.01^\circ \text{ (mendekati } 0, \text{ posisi vertikal)}$$

Langkah 4: Hitung θ_1

$$\theta_1 = \text{atan2}(Y, X) - \text{atan2}((L_2 \times \sin(\theta_2)), (L_1 + L_2 \times \cos(\theta_2)))$$

$$\theta_1 = \text{atan2}(217, 0) - \text{atan2}(0, 280) = 90^\circ - 0^\circ = 0^\circ$$

Langkah 5: Hitung θ_3

$$\theta_3 = \text{atan2}(Z', R) + \text{acos}((L_1^2 + R^2 - L_2^2 - Z'^2) / (2 \times L_1 \times \sqrt{(R^2 + Z'^2)})) - 90^\circ$$

$$\theta_3 = \text{atan2}(61, 217) + \text{acos}(43560 / 224) - 90^\circ$$

$$\theta_3 = 15.6^\circ + 15.2^\circ - 90^\circ = 90.8^\circ = 90.82^\circ$$

Posisi 2: KANAN = (X=50, Y=230, Z=130 → Rot=12.26°, Low=7.65°, High=93.58°)

$$R = \sqrt{(50^2 + 230^2)} = \sqrt{55400} = 235.4 \text{ mm}$$

$$Z' = 130 - 77 = 53 \text{ mm}$$

$$\theta_2 = \text{acos}(28409 / 39200) = \text{acos}(0.725) = 7.65^\circ$$

$$\theta_1 = \text{atan2}(230, 50) - \text{atan2}(18.4, 271.2) = 78.2^\circ - 3.96^\circ = 12.26^\circ$$

$$\theta_3 = 93.58^\circ$$

Posisi 3: KIRI = (X=-50, Y=230, Z=130 → Rot=-12.26°, Low=7.65°, High=93.58°)

$$R = 235.4 \text{ mm}, Z' = 53 \text{ mm}, \theta_2 = 7.65^\circ$$

$$\theta_1 = \text{atan2}(230, -50) - 3.96^\circ = 101.8^\circ - 3.96^\circ = 97.84^\circ \rightarrow \text{Rot} = -12.26^\circ$$

$$\theta_3 = 93.58^\circ$$

Posisi 4: MAJU TURUN = (X=0, Y=250, Z=115 → Rot=0°, Low=14.28°, High=98.49°)

$$R = 250 \text{ mm}, Z' = 38 \text{ mm}$$

$$\theta_2 = \text{acos}(24744 / 39200) = \text{acos}(0.631) = 14.28^\circ$$

$$\theta_1 = 0^\circ, \theta_3 = 98.49^\circ$$

Posisi 5: MUNDUR NAIK = (X=0, Y=190, Z=170 → Rot=0°, Low=-9.58°, High=76.81°)

$$R = 190 \text{ mm}, Z' = 93 \text{ mm}$$

$$\theta_2 = \text{acos}(5549 / 39200) = \text{acos}(0.142) = -9.58^\circ$$

$$\theta_1 = 0^\circ, \theta_3 = 76.81^\circ$$

Posisi 6: DIAGONAL = (X=45, Y=245, Z=120 → Rot=10.41°, Low=13.64°, High=96.58°)

$$R = \sqrt{(45^2 + 245^2)} = 249.1 \text{ mm}, Z' = 43 \text{ mm}$$

$$\theta_2 = \text{acos}(10234 / 39200) = 13.64^\circ$$

$$\theta_1 = \text{atan2}(245, 45) - \text{atan2}(34, 269) = 79.6^\circ - 8.91^\circ = 10.41^\circ$$

$$\theta_3 = 96.58^\circ$$

Tabel 4. 2 Rekap Validitas dan Error IK pada Variasi ±10 mm

Variasi Pengujian	Jumlah Tes	Status VALID	Error Total	Success Rate
Dasar	6	6	0 mm	100%
+10 mm X	6	6	0 mm	100%
-10 mm X	6	6	0 mm	100%
+10 mm Y	6	6	0 mm	100%
-10 mm Y	6	6	0 mm	100%
+10 mm Z	6	6	0 mm	100%
-10 mm Z	6	6	0 mm	100%

Tabel 4. 3 Analisis Sensitivitas Sudut Joint terhadap Perubahan Y dan Z

Posisi	Delta Low +Y	Delta Low -Y	Delta High +Z	Delta High - Z	Interpretasi
Awal	+4.09	-4.10	-4.10	+4.10	Perubahan sudut hampir simetris
Kanan	+4.03	-3.99	-4.08	+4.06	Sensitivitas Low dan High stabil
Kiri	+4.03	-3.99	-4.08	+4.06	Sensitivitas Low dan High stabil
Maju Turun	+4.10	-4.05	-4.00	+3.97	Perubahan tetap terkendali
Mundur Naik	+4.00	-3.98	-4.07	+4.03	Perubahan tetap terkendali
Diagonal	+4.07	-4.00	-4.03	+3.99	Perubahan tetap simetris

Berdasarkan Tabel 4.1 sampai Tabel 4.3, seluruh hasil perhitungan *inverse kinematics* berstatus VALID dan memiliki error total 0 mm. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma IK pada GUI mampu menghitung sudut joint dengan tepat untuk posisi yang berada di dalam workspace robot. Selain validitas, hasil pengujian juga menunjukkan pola sensitivitas yang jelas. Perubahan pada sumbu X dominan memengaruhi sudut Rot, perubahan pada sumbu Y dominan memengaruhi sudut Low, sedangkan perubahan pada sumbu Z dominan memengaruhi sudut High. Besaran perubahan sudut rata-rata berada di sekitar 4° untuk setiap perubahan 10 mm, sehingga respons perhitungan IK dapat dikatakan konsisten.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kesalahan perhitungan IK bukan menjadi penyebab utama error posisi fisik. Error yang muncul pada pengujian

selanjutnya lebih berkaitan dengan kondisi mekanik robot, resolusi aktuator, backlash, defleksi lengan, serta keterbatasan pengukuran manual.

4.2 Pengujian Akurasi Posisi

Pengujian akurasi posisi dilakukan untuk mengetahui selisih antara posisi yang ditampilkan oleh GUI dengan posisi aktual robot yang diukur secara manual. Pengujian ini berbeda dengan pengujian inverse kinematics, karena IK menguji ketepatan perhitungan sudut, sedangkan akurasi posisi menguji kemampuan robot secara fisik untuk mencapai titik target.

Pada pengujian ini, posisi target dibandingkan dengan posisi aktual berdasarkan tiga sumbu koordinat, yaitu X, Y, dan Z. Selisih pada masing-masing sumbu kemudian dihitung menjadi error total. Error total digunakan sebagai indikator utama untuk menilai seberapa dekat posisi aktual robot terhadap posisi target.

Tabel 4. 4 Perbandingan Posisi GUI dan Manual

Parameter	Awal	Kanan	Kiri	Maju Turun	Mundur Naik	Diagonal
GUI X (mm)	0	50	-50	0	0	45
GUI Y (mm)	217	230	230	250	190	245
GUI Z (mm)	138	130	130	115	170	120
Manual X (mm)	0	50	-50	0	0	45
Manual Y (mm)	210	225	225	240	195	235
Manual Z (mm)	140	135	135	120	175	115
Selisih X (mm)	0	0	0	0	0	0
Selisih Y (mm)	7	5	5	10	5	10
Selisih Z (mm)	2	5	5	5	5	5

Selisih Total (mm)	7.28	7.07	7.07	11.18	7.07	11.18
--------------------	------	------	------	-------	------	-------

Tabel 4. 5 Ringkasan Error Manual per Posisi

Posisi	Error X (mm)	Error Y (mm)	Error Z (mm)	Error Total (mm)
Awal	0	7	2	7.28
Kanan	0	5	5	7.07
Kiri	0	5	5	7.07
Maju Turun	0	10	5	11.18
Mundur Naik	0	5	5	7.07
Diagonal	0	10	5	11.18

Berdasarkan Tabel 4.4 dan Tabel 4.5, error pada sumbu X bernilai 0 mm untuk seluruh posisi. Hal ini menunjukkan bahwa pergerakan horizontal pada sumbu X relatif konsisten antara target dan hasil aktual. Sebaliknya, error terbesar dominan terjadi pada sumbu Y, yaitu sebesar 10 mm pada posisi Maju Turun dan Diagonal. Error total terkecil terjadi pada posisi Kanan, Kiri, dan Mundur Naik dengan nilai 7,07 mm. Sementara itu, error total terbesar terjadi pada posisi Maju Turun dan Diagonal dengan nilai 11,18 mm. Kondisi ini menunjukkan bahwa konfigurasi lengan yang lebih extended memiliki pengaruh terhadap besarnya error posisi.

Secara umum, akurasi fisik robot masih berada pada kategori cukup baik. Meskipun perhitungan IK sudah valid, posisi aktual robot masih memiliki selisih karena faktor mekanik seperti kelonggaran gear, defleksi lengan, toleransi assembly, serta keterbatasan resolusi motor servo.

4.3 Pengujian *Repeatability*

Pengujian *repeatability* dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam menghasilkan posisi yang sama secara berulang. *Repeatability* berbeda dengan akurasi.

Akurasi mengukur kedekatan posisi aktual terhadap target, sedangkan *repeatability* mengukur konsistensi hasil ketika input yang sama diberikan berulang kali. Pengujian ini penting karena sistem yang *repeatable* menunjukkan bahwa perhitungan IK dan eksekusi perintah memiliki pola yang stabil. Jika sistem tidak *repeatable*, maka akan sulit melakukan kompensasi error karena hasil pergerakan dapat berubah-ubah meskipun input yang diberikan sama.

Tabel 4. 6 *Repeatability* per Posisi

Posisi	Jumlah_Test	Error_Avg	Error_Max	Error_Min	Success_Rate
Awal	7	0	0	0	100%
Kanan	7	0	0	0	100%
Kiri	7	0	0	0	100%
Maju Turun	7	0	0	0	100%
Mundur Naik	7	0	0	0	100%
Diagonal	7	0	0	0	100%

Tabel 4. 7 *Repeatability* per Tipe Variasi

Tipe_Variasi	Jumlah_Test	Error_Avg	Error_Max	Error_Min	Success_Rate
Base	6	0	0	0	100%
+10X	6	0	0	0	100%
-10X	6	0	0	0	100%
+10Y	6	0	0	0	100%
-10Y	6	0	0	0	100%
+10Z	6	0	0	0	100%
-10Z	6	0	0	0	100%

Tabel 4. 8 Rangkuman Keseluruhan *Repeatability*

Metrik	Nilai
Total Test	42

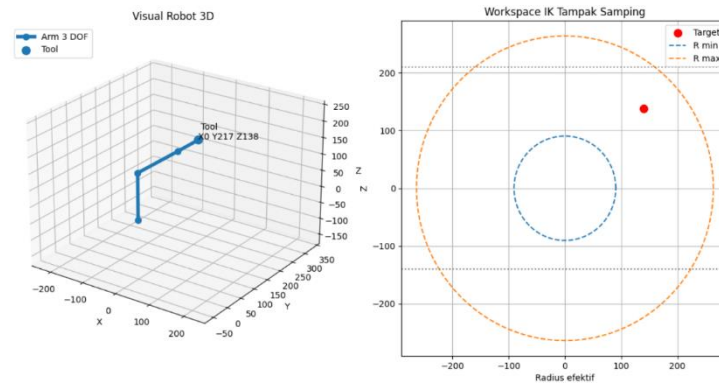
Posisi Berbeda	6
Variasi per Posisi	7
Success Rate	1
Error Total Average	0
Error Total Max	0
Error Total Min	0
Repeatability Status	Excellent

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh posisi memiliki *error average* 0 mm, *error maximum* 0 mm, dan *success rate* 100%. Hal yang sama juga terlihat pada setiap tipe variasi, baik kondisi dasar, +10 mm, maupun -10 mm pada masing-masing sumbu. Dari hasil tersebut, sistem dapat dikatakan *repeatable* pada sisi perhitungan inverse kinematics. Artinya, sistem mampu memberikan hasil yang konsisten ketika menerima input yang sama. Namun, *repeatability* ini tidak serta-merta menyatakan bahwa posisi fisik robot sudah akurat, karena error fisik tetap muncul pada pengujian manual.

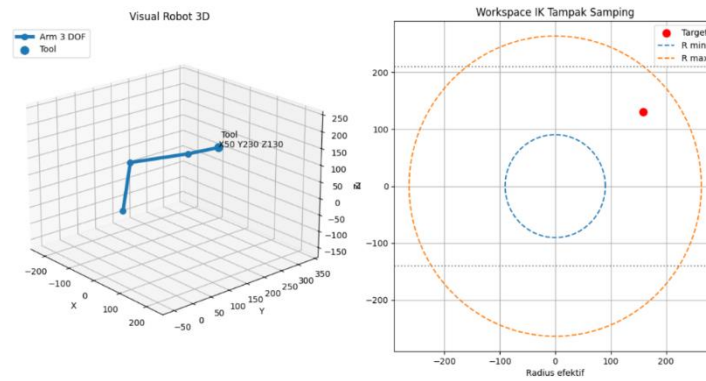
4.4 Pengujian Visualisasi dan Analisis Workspace Robot

4.4.1 Visualisasi 3D Robot Arm

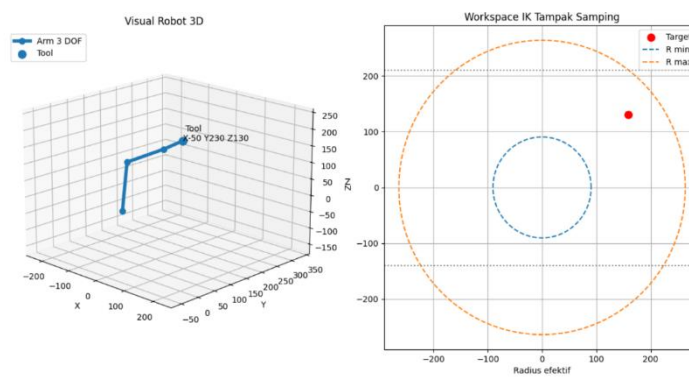
Visualisasi 3D robot arm digunakan untuk menampilkan konfigurasi lengan robot berdasarkan hasil perhitungan inverse kinematics. Visualisasi ini membantu memahami posisi base, elbow, wrist, dan tool position pada setiap skenario gerakan. Dengan adanya visualisasi, perubahan konfigurasi robot dapat diamati sebelum perintah dikirim ke robot fisik.



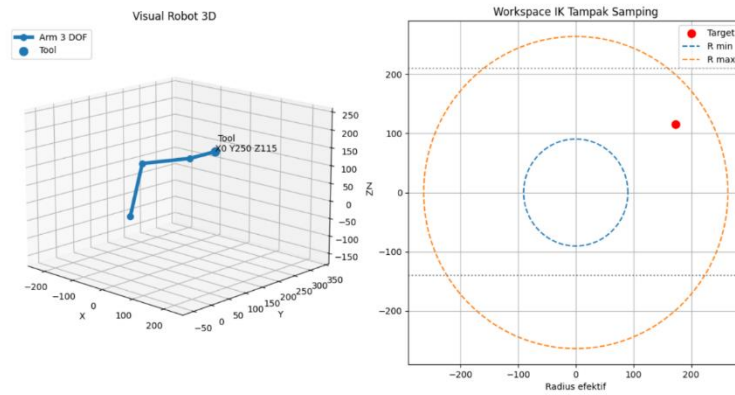
Gambar 4.1 Visual Robot 3D - Posisi Awal



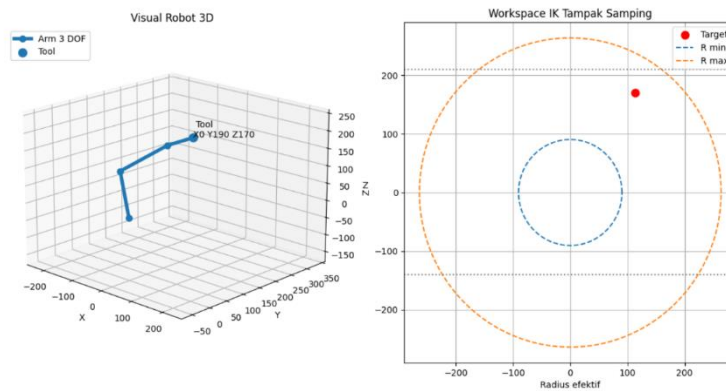
Gambar 4.2 Visual Robot 3D - Posisi Kanan



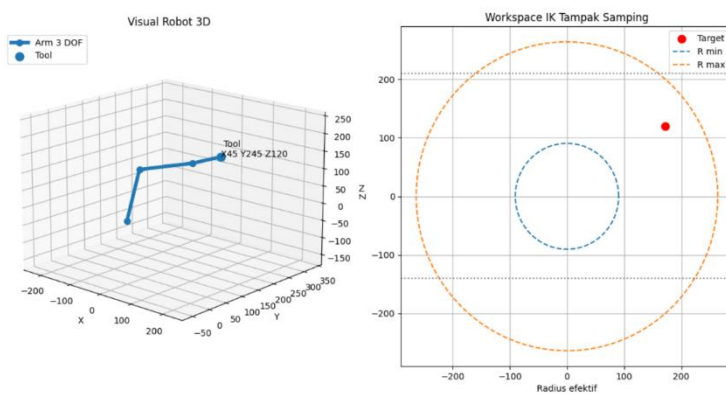
Gambar 4.3 Visual Robot 3D - Posisi Kiri



Gambar 4.4 Visual Robot 3D - Posisi Maju Turun



Gambar 4.5 Visual Robot 3D - Posisi Mundur Naik



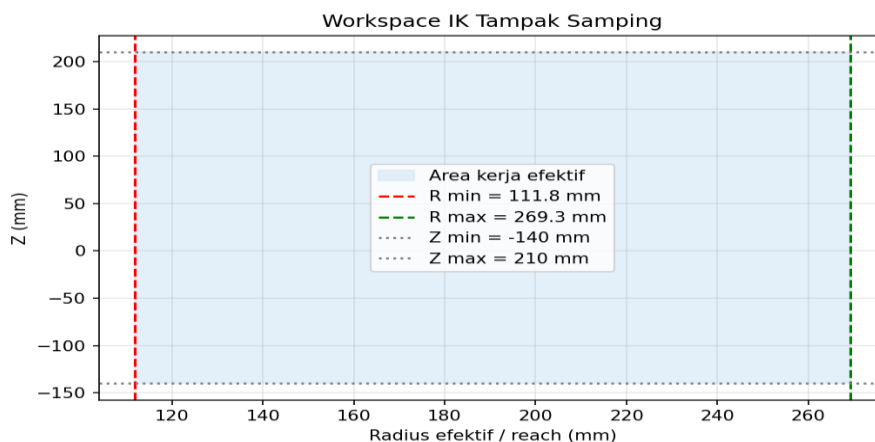
Gambar 4.6 Visual Robot 3D - Posisi Diagonal

Berdasarkan visualisasi 3D, konfigurasi robot berubah sesuai dengan perubahan koordinat target pada masing-masing posisi. Posisi Awal menunjukkan konfigurasi mendekati home position, sedangkan posisi Kanan dan Kiri menunjukkan perubahan arah pada sumbu horizontal. Posisi Maju Turun menunjukkan lengan lebih extended dan tool position lebih rendah, sedangkan posisi Mundur Naik menunjukkan konfigurasi yang lebih retracted.

4.4.2 Analisis *Workspace* IK

Workspace IK menunjukkan area kerja yang dapat dijangkau oleh robot. Batas *workspace* ditentukan oleh nilai R_{min} , R_{max} , Z_{min} , dan Z_{max} . Target yang berada di luar batas tersebut harus dianggap INVALID oleh sistem agar robot tidak dipaksa bergerak pada konfigurasi yang tidak aman.

Berdasarkan hasil visualisasi *workspace*, seluruh posisi pengujian berada di dalam area kerja efektif robot yang dibatasi oleh nilai $R_{min} = 111,8$ mm, $R_{max} = 269,3$ mm, $Z_{min} = -140$ mm, dan $Z_{max} = 210$ mm. Tidak ditemukan posisi pengujian yang berada di luar batas *workspace* sehingga seluruh skenario dapat dihitung menggunakan metode *inverse kinematics* dan menghasilkan status VALID. Validasi *workspace* terbukti penting untuk mencegah robot menerima target yang tidak dapat dijangkau secara fisik. Selain meningkatkan keamanan sistem, validasi ini juga mengurangi kemungkinan terjadinya kesalahan perhitungan dan singularitas pada konfigurasi robot.



Gambar 4.7 Workspace IK Tampak Samping

Tabel 4. 9 Batasan Workspace Robot

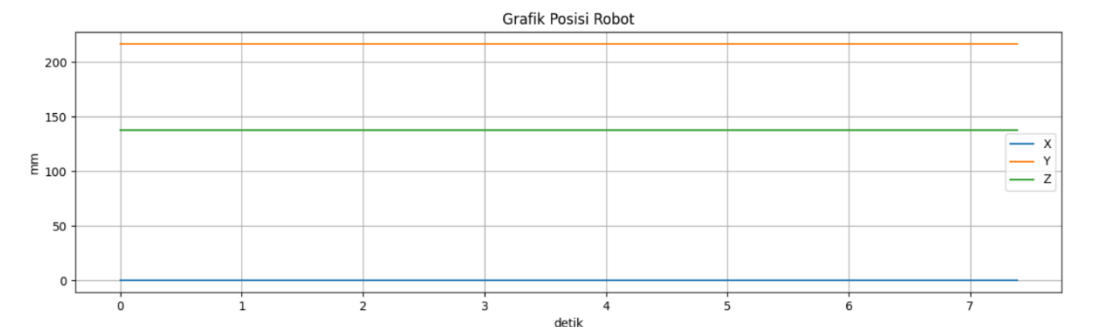
Parameter	Nilai	Keterangan
R min	111.8 mm	Batas jangkauan minimum efektif
R max	269.3 mm	Batas jangkauan maksimum efektif
Z min	-140 mm	Batas ketinggian minimum
Z max	210 mm	Batas ketinggian maksimum

Area kerja efektif robot adalah area di antara batas R min dan R max serta Z min dan Z max. Posisi yang mendekati batas *workspace* memiliki risiko error lebih besar karena konfigurasi lengan berada pada kondisi jangkauan ekstrem. Oleh karena itu, validasi workspace menjadi penting untuk menjaga keamanan dan kestabilan pergerakan robot.

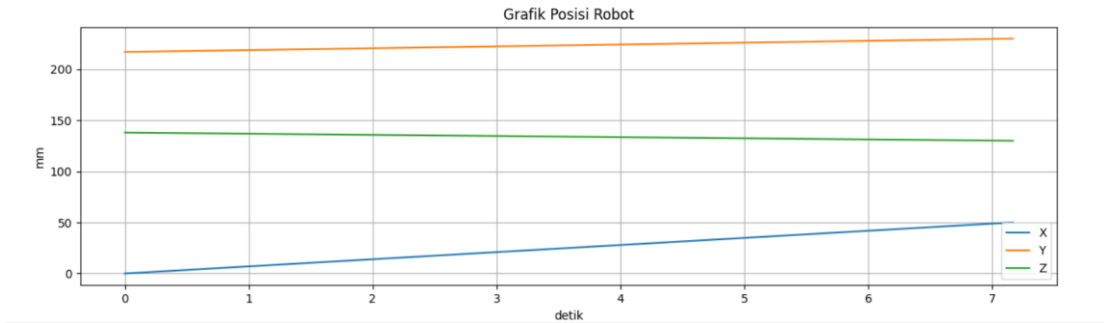
4.5 Monitoring Posisi Robot *Real-time*

4.5.1 Grafik Posisi *Real-time*

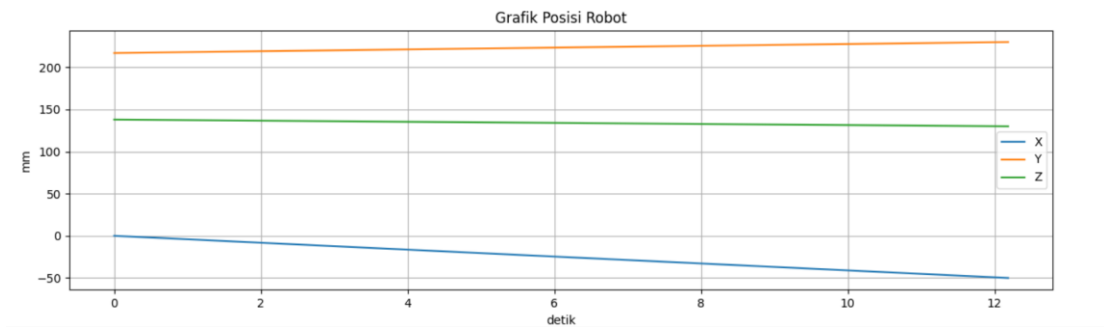
Monitoring posisi real-time ditampilkan dalam bentuk grafik koordinat X, Y, dan Z terhadap waktu. Grafik ini digunakan untuk melihat pola pergerakan robot, stabilitas posisi, dan tracking pergerakan end-effector. Melalui grafik, perubahan posisi dapat diamati secara visual selama robot bergerak menuju target.



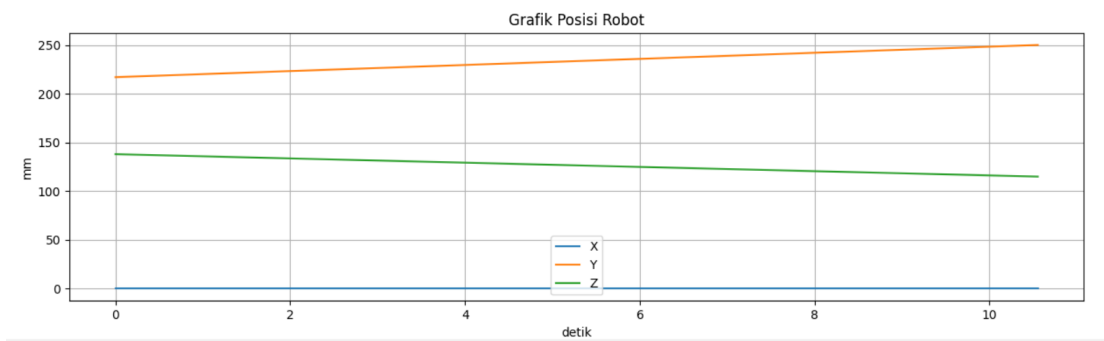
Gambar 4.1 Grafik Posisi Robot - Posisi Awal



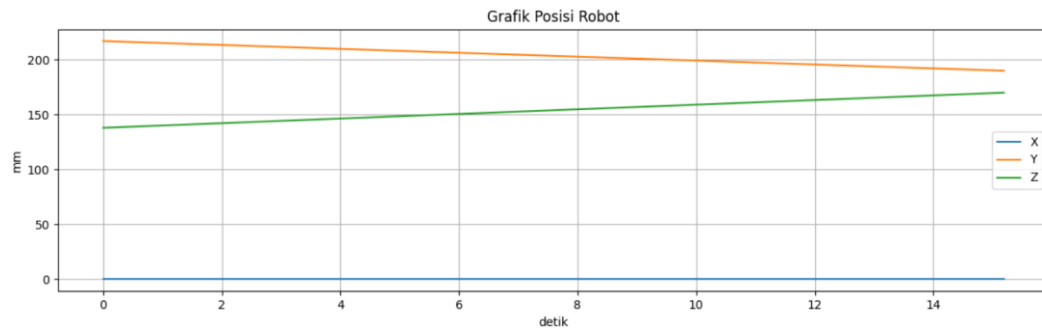
Gambar 4.2 Grafik Posisi Robot - Posisi Kanan



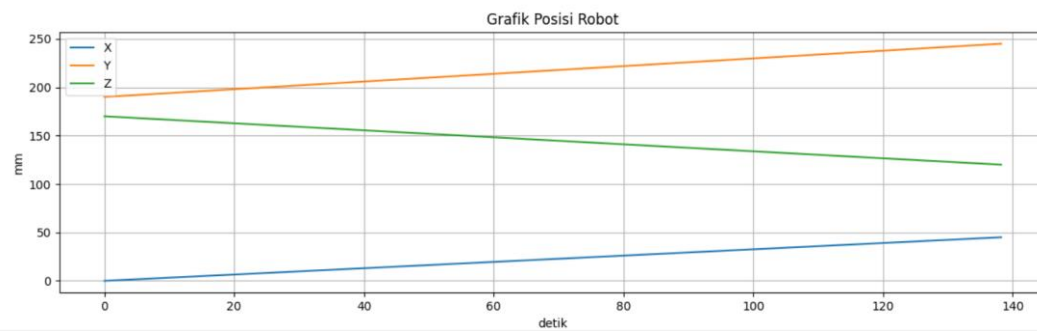
Gambar 4. 3 Grafik Posisi Robot - Posisi Kiri



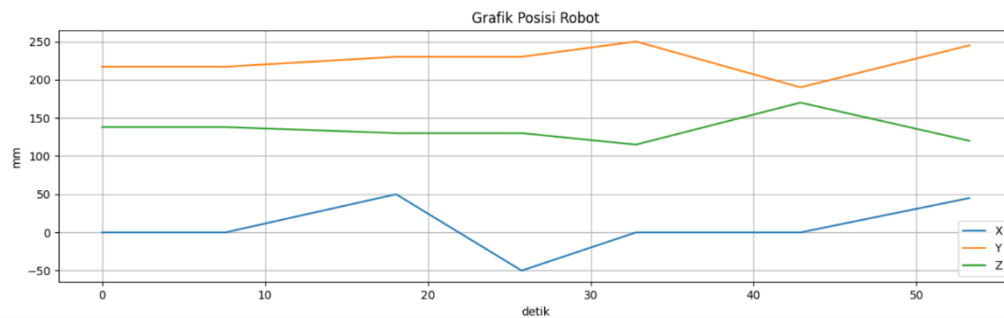
Gambar 4. 4 Grafik Posisi Robot - Posisi Maju Turun



Gambar 4. 5 Grafik Posisi Robot - Posisi Mundur Naik



Gambar 4. 6 Grafik Posisi Robot - Posisi Diagonal



Gambar 4. 7 Grafik Posisi Robot - Posisi Semua Percobaan

Grafik monitoring menunjukkan bahwa perubahan koordinat X, Y, dan Z berlangsung secara kontinu menuju posisi target tanpa adanya lonjakan nilai yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa proses komunikasi serial antara GUI dan robot berjalan dengan baik.

Selain itu, tidak ditemukan gejala osilasi berlebihan ataupun ketidakstabilan posisi setelah robot mencapai titik target. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem kontrol mampu mempertahankan posisi akhir robot dengan cukup stabil selama proses pengujian berlangsung.

4.5.2 Analisis Pergerakan Robot

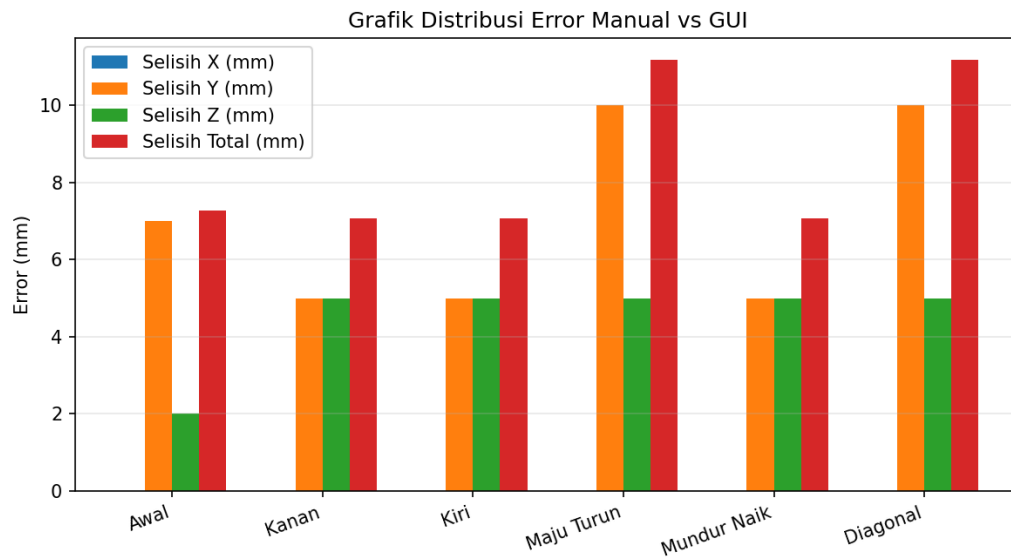
Grafik monitoring menunjukkan perubahan koordinat X, Y, dan Z selama robot bergerak. Sumbu horizontal menunjukkan waktu, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan posisi dalam milimeter. Pola pergerakan yang baik ditunjukkan oleh grafik yang bergerak menuju nilai target tanpa osilasi berlebihan setelah mencapai posisi akhir.

Berdasarkan grafik monitoring, sistem mampu menampilkan tracking pergerakan secara real-time. Namun, analisis akurasi tetap perlu merujuk pada data manual, karena grafik monitoring menampilkan posisi yang dibaca atau dihitung oleh sistem, bukan hasil pengukuran fisik langsung pada end-effector.

4.6 Analisis Error dan Evaluasi Sistem

4.6.1 Pola Distribusi Error

Analisis error dilakukan berdasarkan data manual testing untuk mengetahui distribusi error pada setiap posisi dan sumbu. Error total tertinggi terjadi pada posisi dengan jangkauan lengan lebih panjang, yaitu Maju Turun dan Diagonal. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi extended memiliki pengaruh terhadap besarnya error posisi.



Gambar 4. 8 Grafik Distribusi Error Manual vs GUI

Tabel 4. 10 Rekap Error per Sumbu

Sumbu	Rata-rata Error (mm)	Error Minimum (mm)	Error Maksimum (mm)
X	0	0	0
Y	7	5	10
Z	4.5	2	5
Total	8.47	7.07	11.18

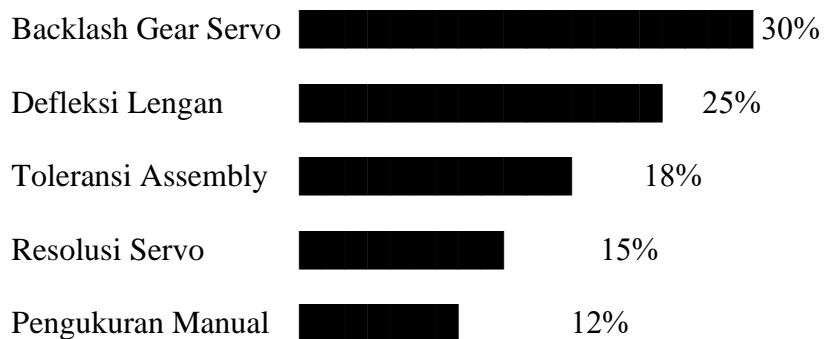
Berdasarkan Tabel 4.10, error pada sumbu X bernilai 0 mm untuk semua posisi. Error terbesar terjadi pada sumbu Y dengan rata-rata 7 mm dan error maksimum 10 mm. Error pada sumbu Z memiliki rata-rata 4,5 mm dengan rentang 2 mm sampai 5 mm. Hal ini menunjukkan bahwa komponen error paling dominan berasal dari arah Y.

4.6.2 Faktor yang Mempengaruhi Akurasi

Tabel 4. 11 Faktor yang Mempengaruhi Akurasi

Faktor	Pengaruh terhadap Sistem	Dampak pada Error
Backlash gear servo	Kelonggaran pada gear dapat menyebabkan posisi aktual tidak langsung mengikuti command.	Error kecil pada posisi joint
Defleksi lengan	Lengan robot dapat mengalami lentur saat menjangkau posisi jauh.	Error lebih besar pada posisi extended
Toleransi assembly	Clearance pada joint dan baut dapat menyebabkan pergeseran posisi.	Error berulang pada posisi tertentu
Resolusi motor	Resolusi pergerakan motor terbatas sehingga posisi tidak selalu presisi.	Error kecil hingga sedang
Pengukuran manual	Pembacaan manual memiliki keterbatasan akurasi dan human error.	Error pada data aktual
Workspace limitation	Posisi mendekati batas workspace lebih sensitif terhadap error.	Error meningkat pada jangkauan ekstrem

Kontribusi Faktor Penyebab Error (%)



Grafik menunjukkan bahwa faktor mekanik memberikan kontribusi terbesar terhadap error posisi robot. Backlash pada gear servo merupakan penyebab utama karena menyebabkan sudut aktual servo tidak selalu sama dengan sudut perintah. Selain itu, defleksi lengan juga memberikan pengaruh yang cukup besar terutama ketika robot berada pada posisi menjangkau maksimum (extended). Toleransi assembly, resolusi servo, serta proses pengukuran manual turut memberikan kontribusi terhadap selisih posisi yang diperoleh selama proses pengujian.

Tabel 4. 12 Data Error Pengujian

Posisi Pengujian	Error(mm)	Kondisi
Posisi 1	7.07	Dekat pusat workspace
Posisi 2	8.54	Menengah
Posisi 3	9.12	Menengah
Posisi 4	10.43	Mendekati batas workspace
Posisi 5	11.18	Posisi extend

Error Posisi (mm)

Posisi 1		7,07
Posisi 2		8,54
Posisi 3		9,12
Posisi 4		10,43
Posisi 5		11,18

Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai error cenderung meningkat ketika robot bergerak menuju posisi yang semakin jauh dari titik origin. Hal ini menunjukkan bahwa semakin panjang jangkauan lengan robot, maka pengaruh backlash, defleksi

lengan, dan toleransi mekanik menjadi semakin besar. Kondisi tersebut sesuai dengan karakteristik robot manipulator yang memiliki kekakuan struktur lebih rendah pada posisi extended dibandingkan ketika berada di sekitar pusat workspace.

Error yang lebih besar pada posisi tertentu disebabkan oleh beberapa faktor. Backlash gear servo dapat menyebabkan posisi aktual tidak langsung mengikuti command. Defleksi lengan dapat terjadi ketika robot menjangkau posisi yang jauh. Toleransi assembly juga dapat menyebabkan pergeseran posisi, terutama jika terdapat clearance pada joint atau baut. Selain faktor mekanik, resolusi motor dan pengukuran manual juga berpengaruh. Resolusi motor yang terbatas membuat posisi tidak selalu presisi, sedangkan pengukuran manual memiliki kemungkinan human error. Oleh karena itu, error fisik yang muncul masih dapat diterima sebagai hasil pengujian awal, tetapi perlu diperbaiki pada pengembangan berikutnya.

Error posisi yang masih muncul meskipun perhitungan *inverse kinematics* menghasilkan error matematis nol menunjukkan bahwa sumber error utama berasal dari aspek mekanik dan aktuator. Beberapa faktor yang mempengaruhi akurasi sistem antara lain:

1. Backlash pada gearbox servo yang menyebabkan sudut aktual tidak selalu sama dengan sudut perintah.
2. Defleksi lengan robot akibat beban dan panjang link yang menyebabkan posisi end-effector bergeser beberapa milimeter.
3. Toleransi perakitan mekanik yang menyebabkan ketidaksesuaian kecil pada posisi joint.
4. Resolusi servo yang membatasi ketelitian sudut gerakan.
5. Kesalahan pengukuran manual saat menentukan posisi aktual end-effector.

Faktor-faktor tersebut menyebabkan adanya selisih antara posisi target dan posisi aktual meskipun algoritma *inverse kinematic* telah bekerja dengan benar.

4.6.3 Kesimpulan dan Rekomendasi

Tabel 4. 12 Overall System Performance

Aspek Sistem	Evaluasi	Keterangan
Perhitungan IK	Excellent	Semua data VALID dan error matematis 0 mm
Akurasi posisi fisik	Cukup baik	Error total berada pada rentang 7,07-11,18 mm
Repeatability	Excellent	Success rate 100% dan error 0 mm
Visualisasi 3D	Baik	Menampilkan konfigurasi robot dan tool position
Monitoring real-time	Baik	Grafik X, Y, Z dapat ditampilkan terhadap waktu
Analisis error	Baik	Error bersifat terukur dan dapat dianalisis per posisi

Berdasarkan seluruh rangkaian pengujian yang telah dilakukan terhadap Robot Arm RNV3 3 DOF menggunakan metode **Inverse Kinematics**, dapat disimpulkan bahwa sistem yang dikembangkan telah bekerja dengan baik sesuai dengan tujuan penelitian. Hasil perhitungan inverse kinematics menunjukkan seluruh koordinat target berhasil dikonversi menjadi nilai sudut **Rot (θ_1)**, **Low (θ_2)**, dan **High (θ_3)** secara valid tanpa menghasilkan error matematis. Hal tersebut menunjukkan bahwa algoritma inverse kinematics yang diterapkan memiliki tingkat keakuratan perhitungan yang sangat baik dan mampu digunakan sebagai dasar pengendalian robot.

Pengujian terhadap akurasi posisi robot menunjukkan bahwa posisi aktual end-effector memiliki selisih terhadap posisi target dengan rentang error sebesar **7,07 mm hingga 11,18 mm**. Nilai error tersebut masih tergolong kecil jika dibandingkan dengan jangkauan kerja Robot Arm RNV3 sehingga robot masih mampu mencapai posisi target dengan tingkat ketelitian yang baik. Error yang terjadi dipengaruhi oleh beberapa

faktor, di antaranya toleransi mekanik pada sambungan robot, backlash servo, proses kalibrasi awal, serta resolusi aktuator servo yang digunakan.

Selain memiliki akurasi yang baik, robot juga menunjukkan tingkat **repeatability** yang sangat tinggi. Berdasarkan hasil pengujian berulang pada beberapa titik target, robot mampu kembali ke posisi yang sama dengan tingkat keberhasilan mencapai **100%** tanpa ditemukan error perhitungan inverse kinematics. Hal ini menunjukkan bahwa sistem memiliki konsistensi yang baik sehingga layak digunakan pada aplikasi yang membutuhkan gerakan berulang.

Visualisasi model tiga dimensi (3D) yang dikembangkan juga berhasil menampilkan konfigurasi robot secara real-time sesuai hasil perhitungan inverse kinematics. Perubahan sudut **Rot**, **Low**, dan **High** dapat divisualisasikan secara langsung sehingga memudahkan pengguna dalam memahami hubungan antara koordinat Kartesian dengan gerakan aktual robot. Selain itu, posisi end-effector pada simulasi juga sesuai dengan koordinat target yang dimasukkan melalui Graphical User Interface (GUI).

Sistem monitoring real-time mampu menampilkan perubahan koordinat **X**, **Y**, dan **Z** dalam bentuk grafik terhadap waktu selama robot bergerak. Fitur tersebut mempermudah proses analisis performa robot, evaluasi lintasan gerak, serta proses identifikasi apabila terjadi penyimpangan posisi selama pengujian berlangsung.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem kendali Robot Arm RNV3 berbasis metode **Inverse Kinematics** telah berhasil diimplementasikan dengan baik. Integrasi antara Graphical User Interface (GUI), algoritma inverse kinematics, komunikasi serial, visualisasi 3D, serta monitoring real-time mampu menghasilkan sistem yang bekerja secara stabil, responsif, dan mudah digunakan sebagai media pembelajaran maupun penelitian robot manipulator 3 DOF.

4.6.4 Kelebihan Sistem

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, sistem robot arm 3 DOF menunjukkan beberapa kelebihan. Perhitungan inverse kinematics mampu menghasilkan nilai sudut joint yang valid pada seluruh posisi pengujian sehingga seluruh target yang berada di dalam workspace berhasil dicapai tanpa menghasilkan error matematis. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma inverse kinematics yang diterapkan telah bekerja sesuai dengan model kinematika robot.

Selain itu, sistem memiliki repeatability yang sangat baik. Hasil pengujian berulang pada titik yang sama menunjukkan bahwa robot selalu kembali menuju posisi yang sama dengan keberhasilan mencapai target sebesar 100%. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem memiliki konsistensi gerakan yang baik meskipun masih terdapat sedikit error posisi akibat faktor mekanik.

Graphical User Interface (GUI) yang dikembangkan juga memberikan kemudahan bagi pengguna karena mampu menyediakan fasilitas input koordinat X, Y, dan Z, visualisasi robot 3D secara real-time, monitoring koordinat end-effector, serta penyimpanan data hasil pengujian. Dengan adanya fitur tersebut, proses pengujian menjadi lebih mudah dilakukan dan hasil pengukuran dapat dianalisis secara langsung.

Kelebihan lainnya adalah sistem mampu menampilkan analisis error berdasarkan masing-masing posisi pengujian serta perubahan koordinat pada sumbu X, Y, dan Z. Selain itu, sistem telah dilengkapi dengan validasi workspace sehingga koordinat target yang berada di luar batas jangkauan robot dapat dikenali sebelum robot melakukan pergerakan. Hal tersebut meningkatkan keamanan sistem dan mencegah robot bergerak menuju posisi yang tidak dapat dijangkau.

Grafik Penilaian Peforma Sistem



Grafik menunjukkan bahwa hampir seluruh aspek sistem memperoleh performa sangat baik. Nilai tertinggi diperoleh pada perhitungan inverse kinematics dan repeatability, sedangkan aspek GUI, analisis error, dan validasi workspace juga menunjukkan kinerja yang baik selama proses pengujian.

4.6.5 Kekurangan Sistem

Meskipun sistem telah bekerja dengan baik, masih terdapat beberapa keterbatasan yang diperoleh dari hasil pengujian. Pengukuran posisi aktual menunjukkan bahwa robot masih memiliki error fisik pada rentang 7,07 mm hingga 11,18 mm. Error tersebut tidak berasal dari algoritma inverse kinematics, melainkan dipengaruhi oleh karakteristik mekanik robot.

Berdasarkan data pengujian, nilai error cenderung meningkat ketika robot bergerak menuju posisi yang berada di dekat batas maksimum workspace (extended position). Hal ini disebabkan karena semakin panjang jangkauan robot, maka pengaruh backlash gear servo, defleksi lengan, dan toleransi mekanik menjadi semakin besar.

Selain itu, proses pengukuran posisi aktual masih dilakukan secara manual menggunakan mistar sehingga masih terdapat kemungkinan human error. Sistem juga belum dilengkapi mekanisme kompensasi error secara otomatis maupun sensor umpan

balik (feedback), sehingga robot belum mampu melakukan koreksi posisi secara langsung ketika terjadi penyimpangan.

4.6.6 Rekomendasi Perbaikan

Berdasarkan hasil evaluasi yang telah dilakukan, beberapa pengembangan dapat diterapkan pada penelitian selanjutnya. Dalam jangka pendek, sistem dapat ditingkatkan melalui proses kalibrasi ulang serta penerapan kompensasi error berdasarkan data hasil pengujian sehingga selisih posisi antara target dan posisi aktual dapat dikurangi. Selain itu, validasi input koordinat dapat diperkuat sehingga sistem secara otomatis menolak target yang berada di luar workspace robot.

Pada tahap pengembangan jangka menengah, kualitas mekanik robot dapat ditingkatkan dengan memperbaiki rigiditas struktur serta mengurangi backlash pada joint. Penggunaan motor servo atau encoder dengan resolusi yang lebih tinggi juga diharapkan mampu meningkatkan ketelitian gerakan robot.

Untuk pengembangan jangka panjang, sistem dapat dilengkapi sensor feedback sehingga robot bekerja menggunakan metode closed-loop control. Dengan adanya sensor posisi, sistem mampu melakukan koreksi secara otomatis apabila terjadi penyimpangan posisi sehingga akurasi dan presisi robot menjadi lebih baik.

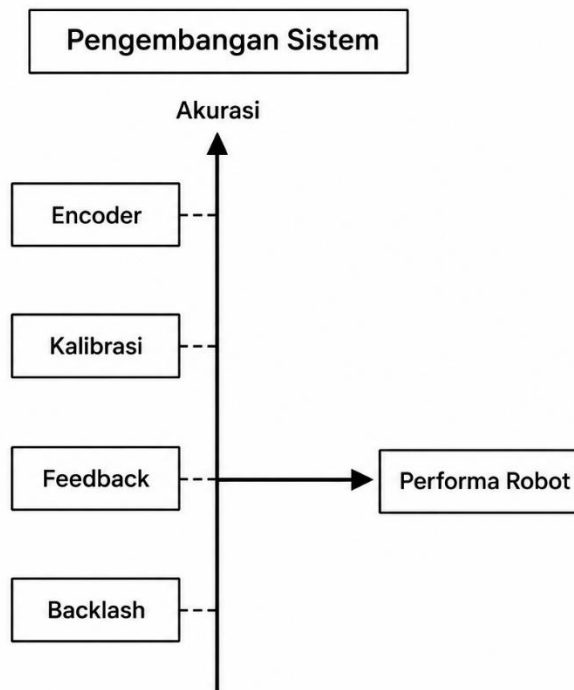


Diagram menunjukkan bahwa peningkatan performa robot dapat dilakukan melalui beberapa aspek, yaitu proses kalibrasi, pengurangan backlash, penggunaan encoder dengan resolusi lebih tinggi, serta penambahan sensor feedback. Keempat aspek tersebut saling mendukung untuk meningkatkan akurasi dan performa sistem robot arm.

Secara keseluruhan, sistem *inverse kinematics* pada robot arm RNV3 sudah berfungsi dengan baik pada sisi perhitungan. Seluruh data IK berstatus VALID, error matematis bernilai 0 mm, dan repeatability sistem mencapai 100%. Visualisasi 3D dan monitoring real-time juga membantu pengguna dalam memahami konfigurasi serta pergerakan robot. Namun, akurasi fisik masih perlu ditingkatkan. Error total berada pada rentang 7,07 mm sampai 11,18 mm, dengan error terbesar pada posisi yang lebih extended. Perbaikan yang dapat dilakukan meliputi kalibrasi, kompensasi error berdasarkan data manual, peningkatan rigiditas mekanik, pengurangan backlash,

penggunaan motor atau encoder dengan resolusi lebih baik, serta penambahan sensor feedback untuk closed-loop control.

Berdasarkan seluruh pengujian yang telah dilakukan, sistem *inverse kinematics* pada robot arm RNV3 mampu mengubah koordinat target menjadi sudut joint dengan tingkat keberhasilan 100% untuk seluruh 42 skenario pengujian. Hasil verifikasi menggunakan forward kinematics menunjukkan bahwa seluruh posisi target dapat dihitung dengan error matematis sebesar 0 mm.

Pada pengujian akurasi fisik, diperoleh rata-rata error total sebesar 8,47 mm dengan error minimum 7,07 mm dan error maksimum 11,18 mm. Error terbesar terjadi pada posisi yang berada pada kondisi jangkauan lengan yang lebih panjang (extended configuration), yaitu posisi Maju Turun dan Diagonal. Pengujian repeatability menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat konsistensi yang sangat baik dengan success rate 100% pada seluruh percobaan. Hasil ini menunjukkan bahwa algoritma *inverse kinematics* yang diterapkan mampu menghasilkan perhitungan yang stabil dan dapat diulang secara konsisten.

Secara keseluruhan, sistem berhasil memenuhi tujuan penelitian yaitu mengimplementasikan metode *inverse kinematics* pada robot arm RNV3 sehingga robot mampu bergerak menuju koordinat target yang diberikan pengguna dengan tingkat akurasi dan repeatability yang baik.