

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISIS

Bab ini menyajikan hasil pengujian lengan robot secara bertahap, dimulai dari sistem *homing* sebagai penentu posisi awal, pengujian ketepatan sudut aktuator, penerapan *inverse kinematics* pada beberapa koordinat target, pengujian keterulangan posisi *end-effector*, hingga pengujian pemetikan yang terintegrasi dengan Jetson Orin Nano dan STM32F411CEU6. Data pengujian dianalisis menggunakan selisih antara nilai target dan nilai aktual serta error dalam persen agar besar penyimpangan dapat dibandingkan pada setiap kondisi. Pada target atau referensi 0° , error dalam persen tidak ditampilkan karena nilai target digunakan sebagai penyebut, sehingga kondisi tersebut dievaluasi berdasarkan selisih sudut aktual terhadap 0° .

4.1. Pengujian Sistem *Homing*

Pengujian sistem *homing* dilakukan untuk mengetahui kemampuan lengan robot membentuk posisi awal yang sama sebelum menerima perintah gerak berikutnya. Proses *homing* memanfaatkan sensor Hall pada *joint base*, *shoulder*, dan *elbow*. Setelah sensor terdeteksi, *firmware* menyinkronkan posisi internal menggunakan zero offset sebesar -86° pada *base*, -15° pada *shoulder*, dan $+4^\circ$ pada *elbow*. Nilai tersebut merupakan referensi internal perangkat lunak, sedangkan evaluasi fisik dilakukan pada pose akhir dengan referensi *base* 0° , *shoulder* -90° , dan *elbow* 70° . Pengujian diulang sebanyak lima kali dengan prosedur yang sama dan hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Hasil pengujian sistem *homing*

Pengulangan	Base ($^\circ$)	Shoulder ($^\circ$)	Elbow ($^\circ$)	Keterangan
1	0,2	-90,0	70,0	Berhasil
2	0,1	-89,8	69,0	Berhasil
3	0,2	-89,9	70,0	Berhasil
4	0,1	-90,2	69,0	Berhasil

Pengulangan	Base (°)	Shoulder (°)	Elbow (°)	Keterangan
5	0,1	-90,1	69,0	Berhasil

Berdasarkan Tabel 4.1, seluruh lima pengulangan *homing* berhasil diselesaikan. Posisi aktual *base* berada pada rentang 0,1–0,2° terhadap referensi 0°, *shoulder* berada pada rentang -90,2° sampai -89,8° terhadap referensi -90°, sedangkan *elbow* berada pada rentang 69–70° terhadap referensi 70°. Data tersebut menunjukkan bahwa setiap *joint* kembali ke area referensi yang berdekatan pada setiap pengulangan, sehingga proses *homing* dapat digunakan sebagai acuan awal sebelum pengujian gerak aktuator dan *inverse kinematics* dilakukan.

Tabel 4. 2 Ringkasan selisih dan error hasil *homing*

<i>Joint</i>	Referensi (°)	Rentang Selisih (°)	Selisih Maks. (°)	Error Maks. (%)
<i>Base</i>	0,00	0,10–0,20	0,20	—
<i>Shoulder</i>	-90,00	0,00–0,20	0,20	0,22
<i>Elbow</i>	70,00	0,00–1,00	1,00	1,43

Ringkasan pada Tabel 4.2 memperlihatkan bahwa selisih maksimum *base* dan *shoulder* sama-sama sebesar 0,20°. Pada *shoulder*, nilai tersebut setara dengan error maksimum 0,22% terhadap referensi -90°. *Elbow* memiliki selisih maksimum 1,00° dengan error maksimum 1,43%, sehingga penyimpangan terbesar pada pengujian *homing* terdapat pada *joint elbow*. Error dalam persen pada *base* tidak ditampilkan karena referensinya 0°, tetapi selisih sudut tetap dapat digunakan untuk menilai kedekatan posisi aktual terhadap titik nol.

Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa sistem *homing* mampu menyediakan kondisi awal yang konsisten untuk ketiga *joint*. Konsistensi posisi awal penting karena perintah *jog* dan perhitungan *inverse kinematics* pada pengujian berikutnya menggunakan posisi hasil *homing* sebagai referensi gerak. Meskipun *elbow* menunjukkan penyimpangan lebih besar dibandingkan *base* dan *shoulder*, seluruh pengulangan tetap berhasil kembali ke pose referensi yang ditetapkan.

4.2. Pengujian Ketepatan Sudut Aktuator

Pengujian ketepatan sudut aktuator dilakukan untuk mengetahui kesesuaian antara sudut target yang diberikan oleh perangkat lunak dan sudut aktual yang dihasilkan oleh aktuator. Pengujian dilakukan setelah sistem menyelesaikan *homing* agar setiap gerakan dimulai dari referensi yang sama. Aktuator yang diuji terdiri atas motor *stepper* NEMA 23 pada *joint base*, *shoulder*, dan *elbow* serta servo DS3225 pada *wrist pitch* dan *wrist yaw*. Hasil pengukuran digunakan untuk melihat besarnya selisih sudut dan error pada beberapa titik di dalam rentang kerja masing-masing aktuator.

4.2.1. Pengujian Motor *Stepper* NEMA 23

Pengujian motor *stepper* NEMA 23 dilakukan pada *joint base*, *shoulder*, dan *elbow* untuk mengetahui ketepatan perpindahan sudut terhadap nilai target yang diberikan melalui fungsi *jog*. Sebelum setiap rangkaian pengujian, sistem berada pada kondisi *homing* sehingga sudut target memiliki referensi awal yang sama. Pada setiap target dilakukan dua kali pengukuran sudut aktual. Selisih rata-rata dihitung dari besar penyimpangan kedua hasil pengukuran terhadap target, sedangkan error dalam persen digunakan untuk menunjukkan besarnya penyimpangan dibandingkan nilai target. Hasil pengujian motor *stepper* ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Hasil pengujian ketepatan sudut motor *stepper*

<i>Joint</i>	Target (°)	Aktual 1 (°)	Aktual 2 (°)	Selisih Rata-rata (°)	Error (%)
<i>Base</i>	-90	-89,9	-90,0	0,050	0,06
<i>Base</i>	-45	-45,2	-45,1	0,150	0,33
<i>Base</i>	0	0,1	0,2	0,150	—
<i>Base</i>	45	44,9	44,9	0,100	0,22
<i>Shoulder</i>	-60	-60,3	-60,5	0,400	0,67
<i>Shoulder</i>	-20	-20,0	-19,9	0,050	0,25
<i>Shoulder</i>	0	-0,8	-0,6	0,700	—
<i>Shoulder</i>	30	30,9	31,3	1,100	3,67

<i>Joint</i>	Target (°)	Aktual 1 (°)	Aktual 2 (°)	Selisih Rata-rata (°)	Error (%)
<i>Elbow</i>	-90	-90,3	-90,5	0,400	0,44
<i>Elbow</i>	-60	-59,6	-59,2	0,600	1,00
<i>Elbow</i>	-30	-29,0	-29,2	0,900	3,00
<i>Elbow</i>	0	-0,3	0,1	0,200	—

Berdasarkan Tabel 4.3, *joint base* menunjukkan penyimpangan yang kecil pada seluruh target pengujian. Pada target -90° diperoleh selisih rata-rata $0,050^\circ$ dengan error $0,06\%$, pada target -45° selisih rata-rata $0,150^\circ$ dengan error $0,33\%$, dan pada target 45° selisih rata-rata $0,100^\circ$ dengan error $0,22\%$. Pada target 0° , posisi aktual berada pada $0,1^\circ$ dan $0,2^\circ$ sehingga selisih rata-ratanya sebesar $0,150^\circ$. Error dalam persen pada target 0° tidak ditampilkan karena perhitungan persentase tidak dapat menggunakan nilai target nol sebagai penyebut.

Tabel 4. 4 Ringkasan selisih sudut motor *stepper*

<i>Joint</i>	Rentang Selisih Rata-rata (°)	Error Terbesar (%)
<i>Base</i>	0,050–0,150	0,33
<i>Shoulder</i>	0,050–1,100	3,67
<i>Elbow</i>	0,200–0,900	3,00

Pada *joint shoulder*, selisih rata-rata terkecil diperoleh pada target -20° sebesar $0,050^\circ$ dengan error $0,25\%$. Pada target -60° selisih rata-rata sebesar $0,400^\circ$ dengan error $0,67\%$, sedangkan pada target 30° selisih meningkat menjadi $1,100^\circ$ dengan error $3,67\%$. Pengujian pada target 0° menghasilkan selisih rata-rata $0,700^\circ$. Dengan demikian, penyimpangan terbesar pada *shoulder* terjadi pada target 30° , baik dilihat dari selisih sudut maupun persentase error.

Pada *joint elbow*, target -90° menghasilkan selisih rata-rata $0,400^\circ$ dengan error $0,44\%$, target -60° menghasilkan selisih $0,600^\circ$ dengan error $1,00\%$, dan target -30° menghasilkan selisih $0,900^\circ$ dengan error $3,00\%$. Pada target 0° diperoleh selisih rata-rata $0,200^\circ$. Data ini menunjukkan bahwa pada rentang pengujian yang digunakan, penyimpangan *elbow* terbesar terjadi pada target -30° , sedangkan pada target -90° penyimpangannya lebih kecil.

Ringkasan pada Tabel 4.4 menunjukkan bahwa *base* memiliki rentang selisih rata-rata paling kecil, yaitu 0,050–0,150°, dengan error terbesar 0,33%. *Shoulder* memiliki rentang selisih 0,050–1,100° dengan error terbesar 3,67%, sedangkan *elbow* berada pada rentang 0,200–0,900° dengan error terbesar 3,00%. Besarnya penyimpangan tidak meningkat secara linier terhadap besar sudut target, sehingga data pengujian ini digunakan sebagai karakteristik hasil gerak aktual pada setiap *joint*, bukan untuk menentukan satu penyebab mekanis tertentu.

4.2.2. Pengujian Servo DS3225

Pengujian servo DS3225 dilakukan pada *wrist pitch* dan *wrist yaw* untuk mengetahui kesesuaian sudut aktual terhadap perintah servo pada rentang 0–180°. Lima target sudut, yaitu 0°, 45°, 90°, 135°, dan 180°, diberikan pada masing-masing servo. Setiap target diukur sebanyak dua kali agar perubahan hasil pada posisi yang sama dapat diamati. Selisih rata-rata dan error dalam persen kemudian digunakan untuk mengevaluasi ketepatan gerak servo. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Hasil pengujian sudut servo DS3225

Servo	Target (°)	Aktual 1 (°)	Aktual 2 (°)	Selisih Rata-rata (°)	Error (%)
<i>Wrist Pitch</i>	0	0,4	0,6	0,500	—
<i>Wrist Pitch</i>	45	45,8	45,9	0,850	1,89
<i>Wrist Pitch</i>	90	91,3	91,5	1,400	1,56
<i>Wrist Pitch</i>	135	136,1	136,3	1,200	0,89
<i>Wrist Pitch</i>	180	178,8	179,0	1,100	0,61
<i>Wrist Yaw</i>	0	0,5	0,7	0,600	—
<i>Wrist Yaw</i>	45	44,4	44,2	0,700	1,56
<i>Wrist Yaw</i>	90	88,6	88,8	1,300	1,44
<i>Wrist Yaw</i>	135	133,8	134,0	1,100	0,81
<i>Wrist Yaw</i>	180	178,4	178,6	1,500	0,83

Berdasarkan Tabel 4.5, *wrist pitch* menghasilkan selisih rata-rata sebesar 0,500° pada target 0°, 0,850° pada 45°, 1,400° pada 90°, 1,200° pada 135°, dan 1,100° pada 180°. Selisih sudut terbesar terdapat pada target 90°, sedangkan error

persentase terbesar terdapat pada target 45° sebesar 1,89%. Perbedaan antara posisi dengan selisih terbesar dan posisi dengan error persen terbesar terjadi karena nilai target digunakan sebagai pembagi dalam perhitungan persentase.

Tabel 4. 6 Ringkasan selisih sudut servo DS3225

Servo	Rentang Selisih Rata-rata ($^\circ$)	Error Terbesar (%)
<i>Wrist Pitch</i>	0,500–1,400	1,89
<i>Wrist Yaw</i>	0,600–1,500	1,56

Pada *wrist yaw*, selisih rata-rata berturut-turut sebesar $0,600^\circ$, $0,700^\circ$, $1,300^\circ$, $1,100^\circ$, dan $1,500^\circ$ untuk target 0° , 45° , 90° , 135° , dan 180° . Selisih terbesar terjadi pada target 180° sebesar $1,500^\circ$, sedangkan error terbesar terjadi pada target 45° sebesar 1,56%. Pada target 90° error sebesar 1,44%, kemudian menurun menjadi 0,81% pada 135° dan 0,83% pada 180° . Kondisi ini menunjukkan bahwa persentase error tidak hanya dipengaruhi oleh besar selisih sudut, tetapi juga oleh besar nilai target yang digunakan sebagai acuan.

Ringkasan pada Tabel 4.6 menunjukkan bahwa error terbesar pada target nonnol tetap berada di bawah 2% untuk kedua servo. *Wrist pitch* memiliki rentang selisih rata-rata $0,500$ – $1,400^\circ$, sedangkan *wrist yaw* berada pada rentang $0,600$ – $1,500^\circ$. Pada target 0° , error dalam persen tidak ditampilkan karena target bernilai nol, tetapi selisih aktual tetap menunjukkan besarnya penyimpangan dari posisi nol.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa *wrist pitch* dan *wrist yaw* mampu mengikuti perubahan target pada seluruh rentang pengujian 0 – 180° . Data ini digunakan untuk menilai ketepatan aktuator *wrist* secara langsung, sedangkan pengaruh gabungan seluruh *joint* terhadap posisi ujung lengan dievaluasi lebih lanjut melalui pengujian koordinat *end-effector* pada Subbab 4.3.

4.3. Pengujian Penerapan *Inverse Kinematics* pada Lengan Robot

Pengujian penerapan *inverse kinematics* dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem menerjemahkan koordinat target *Cartesian X*, *Y*, dan *Z* menjadi gerakan *joint* yang membawa *end-effector* menuju posisi yang diperintahkan. Koordinat target berasal dari Jetson Orin Nano dan dikirim menuju STM32F411CEU6 untuk divalidasi, dihitung menggunakan *inverse kinematics*, diperiksa terhadap batas gerak, kemudian diteruskan menjadi perintah aktuator.

Evaluasi tidak berfokus pada perbandingan sudut teoritis setiap *joint*, tetapi pada hasil akhir berupa ketercapaian koordinat, selisih posisi *end-effector*, error dalam persen, dan konsistensi hasil ketika target yang sama diberikan berulang kali.

4.3.1. Penentuan Koordinat Target Pengujian

Empat posisi pengujian dipilih untuk mewakili variasi koordinat X, Y, dan Z pada area kerja lengan. Posisi 1 menggunakan target (500; -150; 300) mm dan Posisi 2 menggunakan (500; 150; 300) mm. Posisi 3 menggunakan target (800; -150; 500) mm dan Posisi 4 menggunakan (800; 150; 500) mm. Pasangan Posisi 1–2 dan Posisi 3–4 memiliki nilai X dan Z yang sama tetapi nilai Y yang berlawanan, sehingga respons sistem dapat diamati pada dua sisi lateral dengan tingkat jangkauan yang sama. Koordinat target pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Koordinat target pengujian *inverse kinematics*

Posisi	X Target (mm)	Y Target (mm)	Z Target (mm)	Status
Posisi 1	500	-150	300	Valid
Posisi 2	500	150	300	Valid
Posisi 3	800	-150	500	Valid
Posisi 4	800	150	500	Valid

Berdasarkan Tabel 4.7, seluruh koordinat yang dipilih berstatus valid dan dapat digunakan sebagai target pengujian. Posisi 1 dan Posisi 2 mewakili konfigurasi dengan X = 500 mm dan Z = 300 mm, sedangkan Posisi 3 dan Posisi 4 menggunakan X = 800 mm dan Z = 500 mm. Susunan tersebut memungkinkan hasil pengujian dibandingkan berdasarkan perubahan jangkauan X dan Z sekaligus perubahan sisi lateral pada sumbu Y tanpa mengubah terlalu banyak variabel secara bersamaan.

4.3.2. Pengujian Ketercapaian dan Akurasi Posisi *End-Effector*

Setiap posisi pada Tabel 4.7 diuji sebanyak lima kali menggunakan koordinat target yang sama pada setiap pengulangan. Setelah gerakan selesai, posisi aktual *end-effector* diukur pada sumbu X, Y, dan Z. Selisih posisi dihitung sebagai jarak tiga dimensi antara koordinat target dan koordinat aktual, sedangkan error dalam persen menunjukkan besar selisih tersebut terhadap jarak target dari titik

referensi robot. Status Tercapai diberikan ketika sistem dapat menjalankan target dan *end-effector* berhenti pada posisi yang dapat diukur. Hasil pengujian ketercapaian dan akurasi ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Data pengujian ketercapaian dan akurasi posisi *end-effector*

Posisi	Uji ke-	Target (X; Y; Z) mm	Aktual (X; Y; Z) mm	Selisih (mm)	Error (%)	Status
Posisi 1	1	(500; -150; 300)	(504; -147; 297)	5,83	0,97	Tercapai
Posisi 1	2	(500; -150; 300)	(503; -148; 296)	5,39	0,89	Tercapai
Posisi 1	3	(500; -150; 300)	(505; -149; 298)	5,48	0,91	Tercapai
Posisi 1	4	(500; -150; 300)	(504; -148; 297)	5,39	0,89	Tercapai
Posisi 1	5	(500; -150; 300)	(503; -147; 298)	4,69	0,78	Tercapai
Posisi 2	1	(500; 150; 300)	(496; 153; 297)	5,83	0,97	Tercapai
Posisi 2	2	(500; 150; 300)	(497; 152; 296)	5,39	0,89	Tercapai
Posisi 2	3	(500; 150; 300)	(496; 151; 298)	4,58	0,76	Tercapai
Posisi 2	4	(500; 150; 300)	(497; 153; 297)	5,20	0,86	Tercapai
Posisi 2	5	(500; 150; 300)	(495; 152; 298)	5,74	0,95	Tercapai
Posisi 3	1	(800; -150; 500)	(792; -146; 494)	10,77	1,13	Tercapai
Posisi 3	2	(800; -150; 500)	(794; -145; 495)	9,27	0,97	Tercapai
Posisi 3	3	(800; -150; 500)	(793; -147; 494)	9,70	1,02	Tercapai
Posisi 3	4	(800; -150; 500)	(793; -146; 495)	9,49	0,99	Tercapai
Posisi 3	5	(800; -150; 500)	(794; -144; 494)	10,39	1,09	Tercapai
Posisi 4	1	(800; 150; 500)	(793; 154; 494)	10,05	1,05	Tercapai
Posisi 4	2	(800; 150; 500)	(794; 153; 495)	8,37	0,88	Tercapai
Posisi 4	3	(800; 150; 500)	(792; 152; 496)	9,17	0,96	Tercapai
Posisi 4	4	(800; 150; 500)	(793; 153; 495)	9,11	0,95	Tercapai
Posisi 4	5	(800; 150; 500)	(794; 154; 494)	9,38	0,98	Tercapai

Berdasarkan Tabel 4.8, seluruh 20 percobaan pada empat posisi berstatus Tercapai. Posisi 1 menghasilkan selisih 4,69–5,83 mm dengan error 0,78–0,97%. Rata-rata selisih dari lima pengulangan sebesar 5,36 mm dengan rata-rata error

0,89%. Posisi 2 menghasilkan selisih 4,58–5,83 mm dengan error 0,76–0,97%, sedangkan rata-rata selisih dan error masing-masing sebesar 5,35 mm dan 0,89%. Hasil Posisi 1 dan Posisi 2 menunjukkan tingkat penyimpangan yang hampir sama meskipun nilai Y target memiliki tanda yang berbeda.

Pada Posisi 3, selisih berada pada rentang 9,27–10,77 mm dengan error 0,97–1,13%. Rata-rata selisihnya sebesar 9,92 mm dengan rata-rata error 1,04%. Posisi 4 menghasilkan selisih 8,37–10,05 mm dengan error 0,88–1,05%, serta rata-rata selisih 9,22 mm dan rata-rata error 0,96%. Nilai selisih terbesar pada seluruh pengujian terdapat pada Posisi 3 pengujian pertama sebesar 10,77 mm, sedangkan selisih terkecil terdapat pada Posisi 2 pengujian ketiga sebesar 4,58 mm.

Jika seluruh data digabungkan, rata-rata selisih posisi dari 20 pengujian sebesar 7,46 mm dengan rata-rata error 0,94%. Posisi 3 dan Posisi 4 memiliki selisih absolut yang lebih besar dibandingkan Posisi 1 dan Posisi 2 karena koordinat targetnya memiliki nilai X dan Z yang lebih besar. Namun, error dalam persen pada seluruh posisi tetap berada pada rentang 0,76–1,13%. Hal ini menunjukkan bahwa kenaikan selisih dalam satuan milimeter tidak selalu menghasilkan kenaikan persentase error dengan besaran yang sama karena jarak target yang digunakan sebagai acuan juga berbeda.

Ketercapaian 20 dari 20 percobaan menunjukkan bahwa *inverse kinematics* mampu menghasilkan solusi gerak yang dapat dijalankan pada keempat koordinat yang diuji. Meskipun demikian, hasil ini hanya mewakili titik pengujian yang digunakan dan tidak dimaksudkan untuk menyatakan bahwa seluruh area *workspace* memiliki tingkat error yang sama.

4.3.3. Pengujian *Repeatability* Posisi *End-Effector*

Keterulangan gerak dievaluasi menggunakan rentang perubahan posisi aktual dari lima kali pengujian pada koordinat target yang sama. Rentang dihitung dari nilai maksimum dikurangi nilai minimum pada masing-masing sumbu X, Y, dan Z. Pendekatan ini digunakan untuk menunjukkan seberapa dekat hasil posisi akhir yang diperoleh ketika sistem menerima target yang sama secara berulang. Hasil pengujian keterulangan ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Rentang hasil pengulangan posisi *end-effector*

Posisi	Rentang X (mm)	ΔX (mm)	Rentang Y (mm)	ΔY (mm)	Rentang Z (mm)	ΔZ (mm)
Posisi 1	503–505	2	-149 s.d. -147	2	296–298	2
Posisi 2	495–497	2	151–153	2	296–298	2
Posisi 3	792–794	2	-147 s.d. -144	3	494–495	1
Posisi 4	792–794	2	152–154	2	494–496	2

Berdasarkan Tabel 4.9, Posisi 1 memiliki rentang 2 mm pada sumbu X, Y, dan Z. Posisi 2 menunjukkan pola yang sama dengan rentang 2 mm pada ketiga sumbu. Pada Posisi 3, rentang sumbu X sebesar 2 mm, sumbu Y sebesar 3 mm, dan sumbu Z sebesar 1 mm. Posisi 4 kembali menghasilkan rentang 2 mm pada sumbu X, Y, dan Z. Dengan demikian, perubahan terbesar dari seluruh pengulangan adalah 3 mm dan hanya terjadi pada sumbu Y Posisi 3.

Sebagian besar rentang perubahan berada pada 1–2 mm, sedangkan selisih posisi terhadap target pada Tabel 4.8 berada pada 4,58–10,77 mm. Perbandingan tersebut menunjukkan bahwa hasil pengulangan pada target yang sama cenderung berkumpul pada area yang berdekatan, walaupun pusat hasil pengukuran masih memiliki selisih terhadap koordinat target. Dengan kata lain, variasi antar-pengulangan lebih kecil daripada selisih posisi terhadap target.

Hasil ini menunjukkan bahwa sistem memiliki keterulangan gerak yang relatif konsisten pada keempat posisi yang diuji. Pengujian ini tidak digunakan untuk menentukan sumber penyimpangan, tetapi untuk menunjukkan bahwa ketika target yang sama diberikan berulang kali, *end-effector* tidak berpindah secara acak dalam rentang yang besar.

4.3.4. Analisis Penerapan *Inverse Kinematics*

Hasil pengujian pada Subbab 4.3.1 sampai 4.3.3 menunjukkan bahwa metode *inverse kinematics* yang diterapkan mampu mengubah koordinat target X, Y, dan Z menjadi gerakan *joint* hingga *end-effector* mencapai keempat posisi pengujian. Masing-masing posisi diuji lima kali sehingga terdapat 20 percobaan, dan seluruhnya berhasil dieksekusi. Hasil tersebut membuktikan bahwa alur

penerimaan koordinat, validasi target, perhitungan *inverse kinematics*, dan pembangkitan gerak aktuator telah dapat bekerja pada koordinat yang diuji.

Dari sisi akurasi, selisih posisi *end-effector* berada pada rentang 4,58–10,77 mm dengan error 0,76–1,13%. Posisi 1 dan Posisi 2 memiliki rata-rata selisih sekitar 5,35 mm, sedangkan Posisi 3 dan Posisi 4 memiliki rata-rata selisih masing-masing 9,92 mm dan 9,22 mm. Peningkatan selisih absolut pada Posisi 3 dan Posisi 4 menunjukkan bahwa konfigurasi dengan jangkauan X dan Z yang lebih besar menghasilkan penyimpangan posisi yang lebih besar pada data pengujian ini. Namun, persentase error tetap berada di sekitar 1%, karena nilai acuan jarak target pada kedua posisi tersebut juga lebih besar.

Dari sisi keterulangan, rentang posisi aktual berada pada 1–3 mm. Rentang tersebut lebih kecil dibandingkan selisih posisi terhadap target, sehingga hasil gerakan pada target yang sama cenderung terkumpul pada area yang serupa. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem dapat mengulang gerakan dengan pola yang relatif konsisten, tetapi masih terdapat selisih posisi terhadap koordinat target yang perlu diperhatikan sebagai bagian dari ketelitian keseluruhan sistem.

Secara keseluruhan, pengujian menunjukkan bahwa *inverse kinematics* telah dapat diterapkan sebagai metode konversi koordinat target menjadi gerakan lengan robot 5 DOF pada titik pengujian yang digunakan. Ketercapaian 20 dari 20 percobaan menunjukkan fungsi perhitungan dan eksekusi gerak bekerja secara konsisten, sedangkan data selisih, error, dan keterulangan memberikan ukuran kuantitatif terhadap kualitas posisi akhir. Penyimpangan posisi yang masih muncul merupakan hasil akhir dari keseluruhan rantai sistem, termasuk referensi *homing*, ketepatan aktuator, parameter geometri, transmisi mekanik, dan proses pengukuran, sehingga pengujian ini tidak digunakan untuk mengatribusikan error hanya pada persamaan *inverse kinematics*.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode *inverse kinematics* yang diterapkan dapat mengarahkan *end-effector* menuju koordinat target yang diberikan. Dari hasil pengukuran diperoleh error posisi sebesar 0,76–1,13%, dengan rentang perubahan posisi maksimum sebesar 3 mm pada pengujian *repeatability*.

Data tersebut menunjukkan bahwa lengan robot mampu mencapai target dengan hasil posisi yang relatif konsisten pada setiap pengulangan.

4.4. Pengujian Sistem Pemetikan Terintegrasi

Pengujian sistem pemetikan terintegrasi dilakukan untuk mengevaluasi keberhasilan fungsi lengan robot ketika seluruh alur kendali dijalankan secara berurutan, mulai dari penerimaan koordinat target yang dikirimkan NVIDIA Jetson Orin Nano, pemrosesan koordinat pada STM32F411CEU6, perhitungan *inverse kinematics*, pergerakan lengan menuju target, hingga pelaksanaan penjepitan oleh *gripper*. Berbeda dengan Subbab 4.3 yang menilai akurasi dan keterulangan posisi *end-effector* secara kuantitatif, pengujian pada Subbab 4.4 difokuskan pada validasi fungsional sistem secara menyeluruh. Dengan demikian, parameter utama yang diamati adalah keberhasilan lengan mencapai target dan keberhasilan *gripper* menjepit objek setelah target dicapai.

Pengujian dilakukan melalui pengamatan langsung terhadap respons fisik robot. Pencapaian target dinyatakan berhasil apabila lengan bergerak berdasarkan koordinat yang diterima dan *end-effector* mencapai area target sehingga urutan gerak dapat dilanjutkan ke tahap penjepitan. Penjepitan dinyatakan berhasil apabila objek berada di antara rahang *gripper* dan tetap tertahan setelah perintah penutupan diberikan. Metode pengamatan visual digunakan karena sistem *gripper* belum dilengkapi sensor yang dapat memberikan umpan balik langsung mengenai kondisi objek setelah penjepitan. Oleh sebab itu, hasil pada subbab ini bersifat validasi fungsional berbasis observasi dan tidak digunakan sebagai ukuran akurasi absolut posisi maupun sebagai ukuran performa sistem visi.

Pengujian terdiri atas tiga *trial* dengan total sembilan target. Setiap target diperlakukan sebagai satu unit pengujian yang independen dalam pencatatan hasil. Untuk menghindari interpretasi yang berlebihan, hasil hanya diklasifikasikan berdasarkan kejadian yang dapat diamati, yaitu berhasil atau tidak berhasil mencapai target, berhasil atau tidak berhasil melakukan penjepitan, serta keberhasilan akhir siklus. Ringkasan hasil pengujian disajikan pada Tabel 4.10.

Tabel 4. 10 Hasil validasi fungsional sistem pemetikan terintegrasi

No.	Trial	Target	Pencapaian target	Penjepitan gripper	Hasil akhir
1	1	1	Berhasil	Berhasil	Berhasil
2	1	2	Berhasil	Berhasil	Berhasil
3	1	3	Tidak berhasil	—	Tidak berhasil
4	2	1	Berhasil	Berhasil	Berhasil
5	2	3	Berhasil	Berhasil	Berhasil
6	2	4	Berhasil	Berhasil	Berhasil
7	3	1	Berhasil	Berhasil	Berhasil
8	3	2	Berhasil	Berhasil	Berhasil
9	3	3	Berhasil	Tidak berhasil	Tidak berhasil
Total	3 trial	9 target	8/9 (88,89%)	7/8 (87,50%)	7/9 (77,78%)

Berdasarkan Tabel 4.10, lengan berhasil mencapai delapan dari sembilan target yang dikirimkan Jetson. Hasil tersebut memberikan tingkat keberhasilan pencapaian target sebesar 88,89%. Satu pengujian tidak mencapai tahap penjepitan, sehingga pada pengujian tersebut kinerja *gripper* tidak dapat dinilai. Pemisahan ini penting karena kegagalan sebelum tahap penjepitan tidak dapat dikategorikan sebagai kegagalan *gripper*.

Dari delapan pengujian yang berhasil mencapai target, tujuh di antaranya menghasilkan penjepitan yang berhasil. Dengan demikian, tingkat keberhasilan *gripper* pada kondisi ketika target telah tercapai adalah 87,50%. Jika keseluruhan alur pengujian dinilai sebagai satu rangkaian dari penerimaan target hingga objek berhasil dijepit, tujuh dari sembilan pengujian berhasil menyelesaikan kedua tahapan tersebut, sehingga tingkat keberhasilan sistem secara keseluruhan adalah 77,78%. Nilai ini lebih rendah dibandingkan keberhasilan pencapaian target karena terdapat satu kegagalan tambahan pada tahap penjepitan setelah target berhasil dicapai.

Perbandingan ketiga nilai tersebut memperlihatkan bahwa kegagalan sistem tidak terkonsentrasi pada satu tahap saja. Sebanyak satu dari sembilan pengujian berhenti sebelum proses penjepitan, sedangkan satu dari delapan pengujian yang mencapai target tidak menghasilkan penjepitan yang berhasil. Secara fungsional, kondisi tersebut menunjukkan bahwa keberhasilan pemetikan merupakan hasil berantai dari keberhasilan penentuan target, pergerakan lengan, dan penjepitan objek. Oleh karena itu, keberhasilan atau kegagalan pada pengujian terintegrasi tidak dapat langsung digunakan untuk menilai ketepatan metode *inverse kinematics* secara terpisah.

Hasil pengujian sistem terintegrasi menunjukkan bahwa kemampuan lengan dalam mencapai koordinat target pada pengujian *inverse kinematics* dapat diterapkan pada rangkaian kerja CHIMI-BOT. Pengujian pada Subbab 4.3 menunjukkan bahwa *end-effector* mampu mencapai posisi target dengan tingkat akurasi dan keterulangan tertentu, sedangkan pengujian terintegrasi menunjukkan bahwa koordinat target yang dihasilkan oleh Jetson dapat diterima dan diproses oleh STM32F411CEU6 hingga menghasilkan gerakan lengan dan proses penjepitan oleh *gripper*. Dengan demikian, hasil pengujian ini menunjukkan kesinambungan antara proses pembentukan koordinat target, perhitungan *inverse kinematics*, pergerakan lengan, dan proses penjepitan objek.

Dari sembilan pengujian yang dilakukan, tujuh pengujian berhasil menyelesaikan tahapan pencapaian target dan penjepitan objek, sehingga diperoleh tingkat keberhasilan sebesar 77,78%. Sementara itu, dua pengujian tidak berhasil menyelesaikan seluruh tahapan tersebut. Hasil ini menunjukkan bahwa keberhasilan sistem terintegrasi tidak hanya bergantung pada kemampuan lengan menghasilkan gerakan menuju koordinat target, tetapi juga pada keberhasilan setiap tahapan yang berlangsung secara berurutan sampai objek dapat dijepit oleh *gripper*.

Penilaian keberhasilan pada pengujian ini dilakukan berdasarkan pengamatan langsung terhadap posisi lengan dan kondisi objek setelah proses penjepitan. Oleh karena itu, nilai keberhasilan sebesar 77,78% menggambarkan kinerja sistem pada sembilan kondisi pengujian yang dilakukan dan tidak digunakan untuk menyatakan tingkat keberhasilan sistem pada seluruh kondisi

pemetikan. Selain itu, pengujian ini tidak digunakan untuk menentukan besar penyimpangan posisi *end-effector*, karena pengukuran tersebut telah dilakukan secara terpisah pada Subbab 4.3.

Secara keseluruhan, hasil pengujian memperlihatkan bahwa integrasi Jetson, STM32F411CEU6, lengan robot, dan *gripper* telah mampu menjalankan alur pemetikan secara berurutan pada sebagian besar percobaan. Hasil tersebut menjadi verifikasi fungsional bahwa koordinat target yang diterima dari Jetson dapat diterjemahkan melalui perhitungan *inverse kinematics* menjadi gerakan lengan hingga proses penjepitan objek.