

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA

4.1 Pengujian Komponen Perangkat Keras

4.1.1 Pengujian Sensor Posisi AS5600

Pengujian sensor posisi AS5600 bertujuan untuk memvalidasi kemampuan sensor dalam membaca posisi sudut absolut pada poros motor stepper. Pengujian dilakukan dengan memasang sensor AS5600 dan magnet pada poros motor stepper NEMA 17, kemudian motor diputar pada sudut referensi, yaitu 45° , 90° , dan 180° menggunakan busur derajat sebagai acuan, sedangkan sudut aktual diperoleh dari hasil pembacaan sensor AS5600 melalui sistem. Selisih antara sudut referensi dan sudut hasil pembacaan sensor dihitung sebagai nilai *error* pengukuran.

Tabel 4.1 Pengujian AS5600

Joint	Sudut Tujuan	Sudut Bacaan	Sudut Terukur	Selisih Sudut
J1	45°	$45,42^\circ$	$45,38^\circ$	$0,38^\circ$
	90°	$90,81^\circ$	$90,74^\circ$	$0,74^\circ$
	180°	$181,36^\circ$	$181,22^\circ$	$1,22^\circ$
J2	45°	$45,01^\circ$	$45,00^\circ$	$0,00^\circ$
	90°	$90,02^\circ$	$90,01^\circ$	$0,01^\circ$
	180°	$180,03^\circ$	$180,02^\circ$	$0,02^\circ$
J3	45°	$45,27^\circ$	$45,24^\circ$	$0,24^\circ$
	90°	$90,48^\circ$	$90,43^\circ$	$0,43^\circ$
	180°	$180,81^\circ$	$180,74^\circ$	$0,74^\circ$
J4	45°	$45,31^\circ$	$45,26^\circ$	$0,26^\circ$
	90°	$90,55^\circ$	$90,49^\circ$	$0,49^\circ$
	180°	$180,97^\circ$	$180,88^\circ$	$0,88^\circ$

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.1, sensor AS5600 mampu membaca perubahan posisi sudut dengan baik pada seluruh titik pengujian. Nilai *error* pembacaan relatif kecil sehingga menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat akurasi yang memadai sebagai sistem umpan balik (*feedback*) posisi. *Joint 2* menunjukkan tingkat akurasi terbaik dengan nilai *error* maksimum sebesar $0,02^\circ$. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa pembacaan sensor pada *joint* tersebut sangat mendekati sudut referensi. Sementara itu, *joint 3* dan *joint 4* memiliki nilai *error* yang sedikit lebih besar, namun masih berada di bawah 1° , sehingga ketelitian pembacaannya masih tergolong baik. Nilai *error* terbesar diperoleh pada *Joint 1* dengan nilai maksimum sebesar $1,22^\circ$ pada sudut referensi 180° . Perbedaan tersebut masih berada dalam batas toleransi pengukuran dan diduga dipengaruhi oleh toleransi pemasangan magnet terhadap sensor, ketelitian pembacaan busur derajat, serta toleransi mekanik pada proses pengujian. Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor AS5600 mampu memberikan informasi posisi sudut yang konsisten dan valid sehingga layak digunakan sebagai sensor umpan balik pada sistem kendali lengan robot.

4.1.2 Pengujian Motor Stepper NEMA 17 dan Driver TB6600

Pengujian motor *stepper* NEMA 17 dan *driver* TB6600 bertujuan untuk mengetahui pengaruh konfigurasi *microstepping* terhadap ketepatan posisi aktuator. Pengujian dilakukan sebelum motor dipasang pada mekanisme lengan robot sehingga hasil pengujian tidak dipengaruhi oleh beban maupun karakteristik mekanik sistem. Motor diberikan perintah untuk bergerak menuju sudut referensi sebesar 90° menggunakan beberapa konfigurasi *microstepping*, yaitu *full-step* (1), *half-step* (2/A dan 2/B), 1/4, 1/8, 1/16, dan 1/32 langkah. Jumlah pulsa yang diberikan oleh mikrokontroler disesuaikan dengan resolusi masing-masing konfigurasi sehingga target perpindahan tetap sebesar 90° . Posisi aktual motor dibaca menggunakan sensor AS5600, kemudian

dibandingkan terhadap sudut referensi untuk memperoleh nilai *error* posisi pada setiap konfigurasi *microstepping*.

Tabel 4.2 Pengujian TB6600

Konfigurasi	Sudut	Sudut	Error / Selisih
Step	Referensi	Aktual	Sudut
1	90°	87,84°	2,16°
2/A	90°	88,91°	1,09°
2/B	90°	89,02°	0,98°
4	90°	89,41°	0,59°
8	90°	89,73°	0,27°
16	90°	89,86°	0,14°
32	90°	89,92°	0,08°

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.2 konfigurasi *microstepping* memberikan pengaruh terhadap ketepatan posisi motor *stepper*. Pada konfigurasi *full-step* diperoleh nilai *error* sebesar 2,16°, yang merupakan nilai terbesar di antara seluruh konfigurasi pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa resolusi langkah yang masih kasar menghasilkan penyimpangan posisi yang lebih besar terhadap sudut referensi.

Peningkatan resolusi *microstepping* menjadi 1/2 dan 1/4 langkah menyebabkan nilai *error* menurun menjadi 1,09°, 0,98°, dan 0,59°. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa pembagian langkah yang lebih kecil mampu meningkatkan ketelitian posisi motor. Pada konfigurasi 1/8 langkah diperoleh nilai *error* sebesar 0,27°. Selanjutnya, konfigurasi 1/16 dan 1/32 langkah menghasilkan *error* yang lebih kecil, yaitu masing-masing sebesar 0,14° dan 0,08°. Meskipun demikian, peningkatan akurasi dari 1/8 menuju 1/16 dan 1/32 langkah relatif kecil apabila dibandingkan dengan peningkatan kebutuhan frekuensi pulsa yang harus diproses oleh sistem kendali. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, konfigurasi *microstepping* 1/8 dipilih sebagai konfigurasi yang digunakan pada sistem lengan robot. Konfigurasi tersebut telah

memberikan tingkat ketelitian posisi yang baik dengan nilai *error* hanya sebesar $0,27^\circ$, sekaligus tetap mempertahankan kecepatan pergerakan motor dan beban komputasi mikrokontroler maupun *output* torsi pada tingkat yang seimbang. Oleh karena itu, konfigurasi 1/8 langkah dinilai sebagai pilihan yang paling sesuai untuk diterapkan pada sistem lengan robot yang dikembangkan dalam penelitian ini.

4.1.3 Pengujian Motor DC JGB37-545 dan Driver BTS7960

Pengujian pada motor DC JGB37-545 beserta *driver* BTS 7960 dilakukan untuk mengevaluasi kinerja motor yang difungsikan sebagai penggerak *end-effector* (obeng). Parameter yang diuji meliputi kecepatan putaran, akurasi arah putaran baik *Clockwise* (CW) maupun *Counter-Clockwise* (CCW), serta linieritas respons motor terhadap variasi sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) yang dikirimkan dari mikrokontroler Arduino. Pengujian ini memastikan bahwa mekanisme *end-effector* memiliki torsi dan kecepatan yang sesuai untuk menjalankan fungsinya.

Tabel 4.3 Pengujian Motor DC

Parameter	Hasil	Keterangan
Clock Wise	Berhasil	Motor berputar normal
Counter Clock Wise	Tidak Berhasil	Motor tidak berputar
Stop	Berhasil	Motor berhenti sesuai perintah

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.3 Pengujian Motor DC, motor DC JGB37-545 tidak dapat berputar pada arah *Counterclockwise* (CCW), sedangkan pada arah *Clockwise* (CCW) motor masih dapat beroperasi dengan baik dan fungsi *stop* dapat dijalankan sesuai perintah. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem pengendali menggunakan *driver* BTS7960B masih mampu mengirimkan sinyal kendali kepada motor, namun fungsi putaran dua arah tidak bekerja secara sempurna. Berdasarkan hasil observasi selama proses pengembangan sistem,

kondisi tersebut diduga disebabkan oleh kerusakan pada motor akibat pernah mengalami kondisi *overvoltage*, sehingga salah satu arah putaran tidak lagi dapat berfungsi dengan baik.

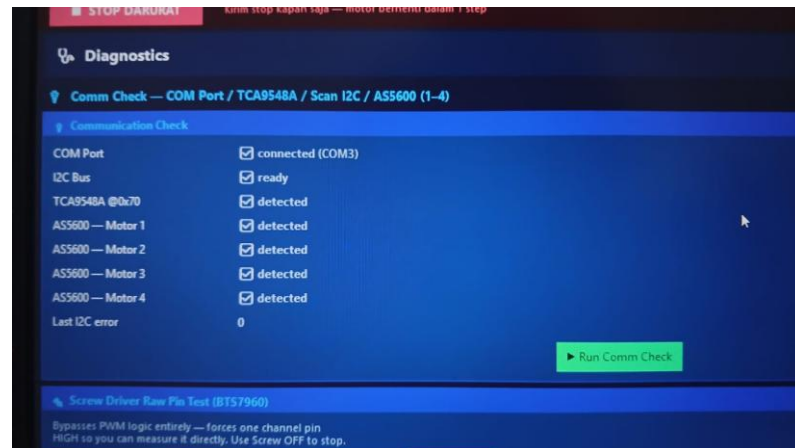
Meskipun demikian, kondisi tersebut tidak mengurangi kemampuan lengan robot dalam melakukan proses pengencangan sekrup, karena mekanisme pengencangan pada penelitian ini hanya memanfaatkan arah putaran *Clockwise (CCW)* yang masih dapat memenuhi kebutuhan proses penyekrupan sesuai dengan skenario pengujian yang telah dirancang.

4.2 Pengujian Komunikasi Data

Pengujian komunikasi sistem dilakukan untuk memastikan seluruh perangkat yang digunakan pada lengan robot dapat berkomunikasi dengan baik. Pengujian meliputi komunikasi serial antara GUI berbasis Python dengan Arduino Mega 2560 serta komunikasi I2C antara Arduino Mega dengan sensor posisi AS5600 melalui modul *multiplexer* TCA9548A. Keberhasilan pengujian ditunjukkan dengan status koneksi setiap perangkat yang ditampilkan pada sistem (*system check*).

Tabel 4.4 Tabel Comm Check

No	Parameter	Status
1	COM Port	Connected
2	TCA9548A	Ready
3	AS5600 Joint 1	Detected
4	AS5600 Joint 2	Detected
5	AS5600 Joint 3	Detected
6	AS5600 Joint 4	Detected



Gambar 4.1 Hasil Comm Check

Berdasarkan Gambar 4.1 Hasil Comm Check hasil pengujian komunikasi menunjukkan bahwa seluruh perangkat yang digunakan pada sistem lengan robot berhasil terhubung dengan baik. GUI berbasis Python berhasil melakukan komunikasi serial dengan Arduino Mega 2560 sehingga proses pertukaran data dapat berlangsung secara normal. Selain itu, hasil pemindaian I2C menunjukkan bahwa modul multiplexer TCA9548A dan seluruh sensor encoder AS5600 pada setiap *joint* berhasil terdeteksi oleh sistem. Status koneksi yang ditampilkan pada fitur *system check* menunjukkan bahwa setiap komponen berada pada kondisi *connected*, *ready*, dan *detected*.

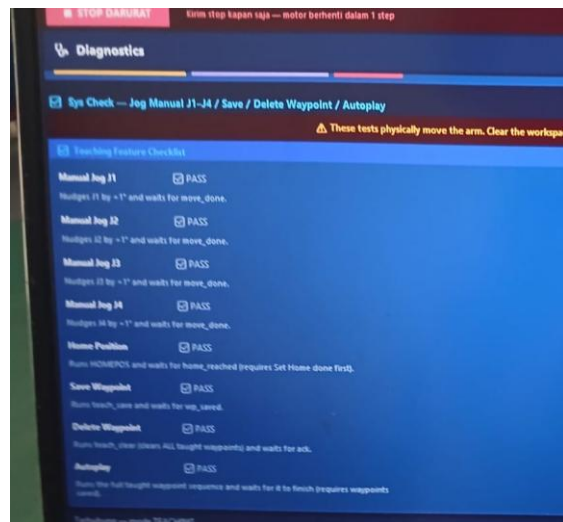
4.3 Pengujian Perangkat Lunak

4.3.1 Pengujian Fitur Teaching Mode

Pengujian fitur *Teaching Mode* dilakukan untuk memverifikasi fungsi-fungsi utama yang digunakan dalam proses perekaman dan eksekusi gerakan lengan robot. Pengujian meliputi kemampuan sistem dalam menyimpan *waypoint*, menghapus *waypoint*, memanggil kembali *waypoint* yang telah disimpan, menjalankan urutan gerakan (*playback*), serta mengembalikan robot ke posisi awal (*home*). Setiap fungsi diuji melalui antarmuka GUI dan dinyatakan berhasil apabila sistem dapat menjalankan perintah sesuai dengan fungsinya tanpa terjadi kesalahan.

Tabel 4.5 Pengujian Fitur Teaching

Fitur	Keterangan
Manual Jog J1	Pass
Manual Jog J2	Pass
Manual Jog J3	Pass
Manual Jog J4	Pass
Homepos	Pass
Autoplay	Pass
Save Waypoint	Pass
Delete Waypoint	Pass



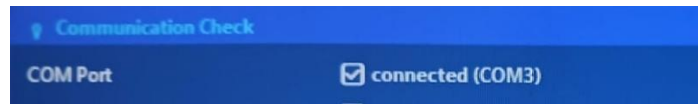
Gambar 4.2 Sys Check Teaching

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.5, seluruh fitur pada *Teaching Mode* dapat dijalankan sesuai dengan fungsinya. Sistem mampu menyimpan, memanggil kembali, menghapus waypoint, menjalankan gerakan hasil *teaching*, serta mengembalikan robot ke posisi *home* ditandai dengan *status pass* pada Gambar 4.2 Sys Check Teaching.

4.3.2 Pengujian Antarmuka GUI (Tkinter)

Pengujian antarmuka GUI dilakukan untuk memastikan aplikasi yang dikembangkan menggunakan Python Tkinter dapat berkomunikasi

dengan Arduino Mega 2560 melalui komunikasi serial. Pengujian dilakukan dengan menghubungkan GUI ke mikrokontroler melalui COM Port dan mengamati status koneksi yang ditampilkan pada aplikasi. GUI dinyatakan berhasil apabila proses koneksi berlangsung dengan baik dan sistem dapat menampilkan status *Connected*.

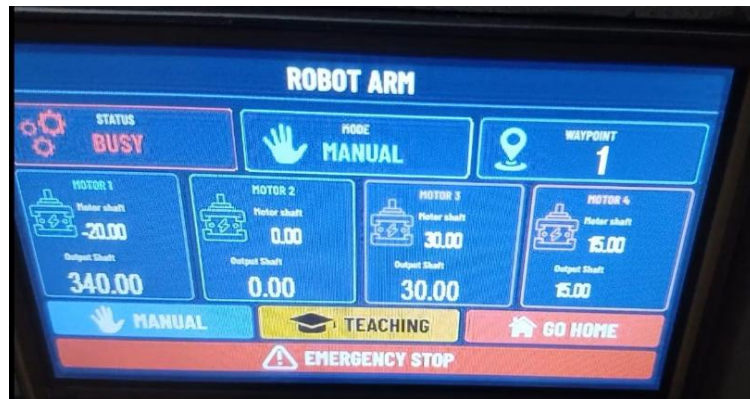


Gambar 4.3 Gambar Terkoneksi

Berdasarkan Gambar 4.3 komunikasi antara GUI dengan Arduino Mega 2560 berhasil terhubung melalui komunikasi serial COM PORT.

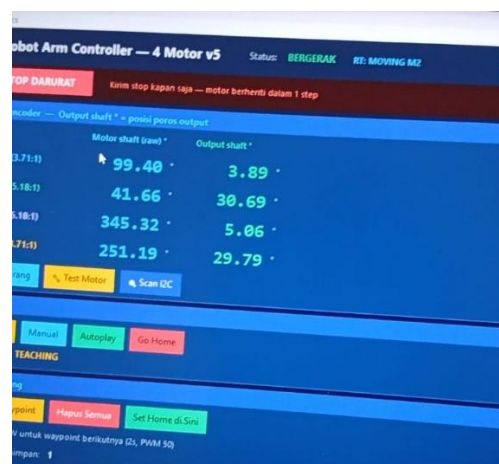
4.3.3 Pengujian Real Time

Pengujian *real-time* dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam menampilkan hasil pembacaan posisi sudut *encoder* secara langsung pada *Graphical User Interface* (GUI), *Human Machine Interface* (HMI), dan *Data Acquisition* (DAQ). Pengujian dilakukan dengan menggerakkan masing-masing *joint* robot dan mengamati perubahan nilai sudut yang ditampilkan pada ketiga antarmuka tersebut. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa data hasil pembacaan *encoder* dapat diterima dan ditampilkan oleh sistem secara *real-time*. Selain itu, pengujian digunakan untuk mengamati kesesuaian perubahan nilai posisi *joint* pada GUI, HMI, dan DAQ ketika terjadi perubahan posisi pada robot. Hasil pengujian didokumentasikan melalui tampilan masing-masing antarmuka.



Gambar 4.4 Realtime View HMI

Gambar 4.4 menunjukkan tampilan hasil pembacaan posisi sudut *encoder* pada HMI ketika sistem beroperasi secara *real-time*. Nilai posisi pada masing-masing *joint* ditampilkan pada HMI dan mengalami perubahan sesuai dengan pergerakan robot. Tampilan tersebut menunjukkan bahwa HMI dapat menerima dan menampilkan data posisi *joint* yang dikirimkan oleh sistem kontrol selama proses pengoperasian robot. Berdasarkan hasil pengamatan, perubahan nilai yang ditampilkan pada HMI mengikuti perubahan posisi *joint* yang dilakukan selama pengujian. Dengan demikian, HMI dapat digunakan sebagai media pemantauan posisi *joint* secara langsung selama robot beroperasi.



Gambar 4.5 Realtime View GUI

Gambar 4.5 menunjukkan tampilan pembacaan posisi sudut *encoder* pada GUI secara *real-time*. GUI menampilkan nilai posisi masing-masing *joint* berdasarkan data yang diterima dari sistem kontrol.

Perubahan nilai pada tampilan terjadi ketika posisi *joint* mengalami perubahan akibat pergerakan robot. Berdasarkan hasil pengamatan, GUI mampu menampilkan informasi posisi *joint* secara langsung sehingga dapat digunakan untuk memantau kondisi posisi robot selama pengujian. Tampilan ini juga memberikan informasi posisi yang dapat digunakan sebagai acuan dalam proses pengoperasian dan pemantauan sistem.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	timestamp,movement_type,motor,target_deg,achieved_deg,delta_deg,source								
2	12:15:58,MANUAL,M1,10.000,12.390,2.390,encoder								
3	12:16:02,MANUAL,M1,0.000,0.640,0.640,encoder								
4	12:16:05,MANUAL,M4,10.000,-3.867,-13.867,encoder								
5	12:16:09,MANUAL,M4,0.000,-3.516,-3.516,encoder								
6	12:16:15,MANUAL,M3,-10.000,0.475,10.475,encoder								
7	12:16:18,MANUAL,M3,0.000,-10.927,-10.927,encoder								
8	12:16:25,MANUAL,M2,10.000,-39.381,-49.381,encoder								
9	12:16:29,MANUAL,M2,0.000,-0.305,-0.305,encoder								
10	12:17:13,MANUAL,M2,-10.000,38.567,48.567,encoder								
11	12:17:22,MANUAL,M3,10.000,-20.938,-30.938,encoder								
12	12:17:26,MANUAL,M4,-10.000,1.934,11.934,encoder								
13	12:17:27,MANUAL,M4,0.000,-4.482,-4.482,encoder								
14	12:17:30,MANUAL,M4,10.000,-10.020,-20.020,encoder								
15	12:17:31,MANUAL,M4,20.000,-15.381,-35.381,encoder								
16	12:17:34,MANUAL,M1,10.000,8.386,-1.614,encoder								
17	12:17:36,MANUAL,M1,0.000,-1.492,-1.492,encoder								

Gambar 4.6 DAQ Excel

Gambar 4.6 menunjukkan hasil akuisisi data posisi *encoder* menggunakan DAQ selama pengujian *real-time*. Data posisi masing-masing *joint* ditampilkan dan diperbarui selama robot mengalami perubahan posisi. Tampilan DAQ digunakan untuk mengamati respons perubahan data hasil pembacaan *encoder* selama sistem beroperasi. Berdasarkan hasil pengamatan, DAQ dapat menerima dan menampilkan perubahan data posisi *encoder* selama pergerakan robot. Hasil ini menunjukkan bahwa data posisi dari *encoder* dapat digunakan sebagai masukan untuk proses akuisisi dan pemantauan data secara *real-time*.

Berdasarkan hasil pengujian, pembacaan posisi *encoder* dapat ditampilkan pada GUI, HMI, dan DAQ selama robot mengalami perubahan posisi. Ketiga antarmuka menunjukkan perubahan nilai posisi *joint* berdasarkan data yang diterima dari sistem *encoder*. Hal tersebut

menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan pemantauan posisi *joint* secara *real-time* melalui beberapa media tampilan. Pengujian ini terutama menunjukkan keberhasilan komunikasi dan visualisasi data antara sistem pembacaan *encoder*, sistem kontrol, dan antarmuka pengguna. Namun, pengujian *real-time* ini tidak digunakan untuk menentukan tingkat akurasi posisi robot, karena akurasi memerlukan perbandingan antara nilai yang diperintahkan atau nilai acuan dengan posisi aktual yang terukur. Oleh karena itu, hasil pengujian ini digunakan untuk memverifikasi fungsi pemantauan dan penampilan data posisi *encoder* selama sistem beroperasi.

4.4 Pengujian *Forward Kinematics*

Forward Kinematics pada penelitian ini tidak digunakan sebagai metode pengendalian gerak robot. Pengujian FK dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem lengan robot 4 DOF dalam menentukan posisi *end-effector* berdasarkan nilai sudut masing-masing *joint*. Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan hasil perhitungan teoritis dengan posisi aktual robot sehingga dapat diketahui tingkat akurasi sistem.

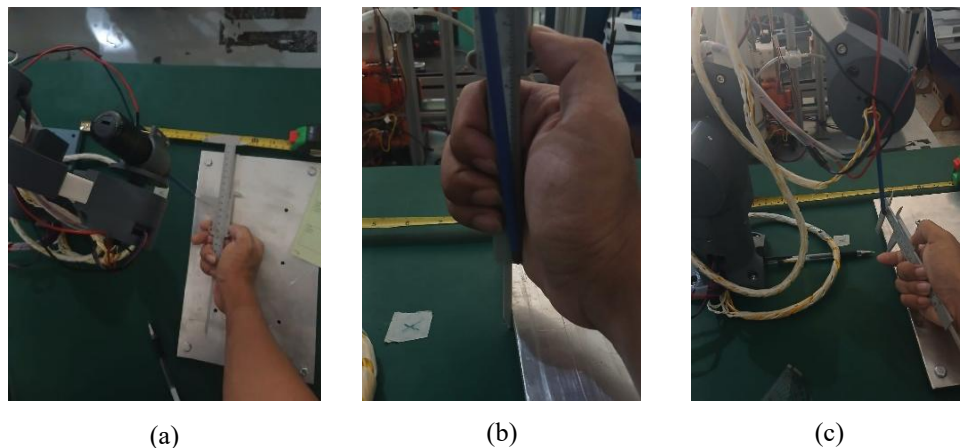
Pada metode FK digunakan parameter *Denavit-Hartenberg* (DH) untuk merepresentasikan hubungan antar *joint* dan *link* pada lengan robot 4 DOF. Parameter θ (*joint angle*) digunakan untuk menunjukkan sudut rotasi joint terhadap sumbu sebelumnya. Parameter d (*link offset*) menyatakan jarak perpindahan sepanjang sumbu z . Parameter a (*link length*) menunjukkan panjang link sepanjang sumbu x . Parameter α (*link twist*) digunakan untuk menyatakan sudut kemiringan antar sumbu z . Parameter β (*offset degree*) menyatakan sudut penyesuaian posisi awal atau orientasi sumbu pada perhitungan *forward kinematics*. Parameter ini digunakan untuk menyesuaikan model kinematika dengan kondisi aktual lengan robot.

Tabel 4.6 Parameter DH lengan robot 4 DOF

Joint	θ (Theta)	d (mm)	a (mm)	α (Alpha)	β (Beta)
1	θ_1	39	0	90°	-160.46
2	θ_2	0	325.4	0°	-131.03

3	θ_3	0	195.48	0°	-93.51
4	θ_4	0	180	0°	-112.44

Posisi *end-effector* dapat dihitung dengan rumus 2.1. Selanjutnya, dilakukan pengujian *forward kinematics* dengan membandingkan hasil koordinat posisi *end-effector* secara teoritis dan aktual. Cara dan hasil pengujian tersebut ditunjukkan pada tabel dan gambar berikut.



Gambar 4.7 Pengujian *Forward Kinematics*

Pada Gambar 4.7 merupakan proses pengukuran *forward kinematics*. Gambar 4.7a merupakan proses pengukuran posisi *end effector* pada sumbu X dilakukan dengan menentukan garis acuan yang ditarik dari titik tengah *base* robot menuju arah depan robot. Jarak antara garis acuan tersebut dengan posisi *end effector* kemudian diukur menggunakan alat ukur panjang. Pengukuran ini digunakan untuk memperoleh nilai posisi *end effector* terhadap sumbu X pada bidang horizontal. Gambar 4.7b merupakan proses pengukuran posisi *end effector* pada sumbu Y dilakukan dengan mengukur jarak ketinggian antara permukaan meja sebagai bidang acuan dengan posisi *end effector*. Pengukuran dilakukan secara vertikal dari permukaan meja hingga titik pengukuran pada *end effector*. Nilai yang diperoleh digunakan untuk menentukan posisi *end effector* terhadap sumbu Y. Gambar 4.7c merupakan proses pengukuran posisi *end effector* pada sumbu Z dilakukan dengan menentukan garis acuan yang ditarik dari titik tengah *base* robot ke arah samping atau kanan robot. Jarak antara garis acuan tersebut dengan posisi *end effector* kemudian diukur

menggunakan alat ukur panjang. Pengukuran ini digunakan untuk memperoleh nilai posisi *end effector* terhadap sumbu Z pada bidang horizontal.

Tabel 4.7 Pengujian Dengan Parameter Lama

No	Encoder (J1,J2,J3,J4)	FK Teoritis (x, y, z) mm	Aktual (x, y, z) mm	Error (mm)
HOME	(0, 0, 0, 0)	(176.5, 1.0, 62.6)	(170.0, -41.5, 32.5)	52.5
1	(0, 10, 10, 10)	(204.5, 12.0, 72.6)	(160.0, -36.0, 36.5)	74.7
2	(-10, 0, 10, -10)	(239.7, 27.2, 40.3)	(285.0, 18.0, 68.0)	53.9
3	(-20, 10, 10, 15)	(214.1, -3.4, -1.7)	(145.0, 5.5, 39.0)	80.7
4	(0, 20, 0, 20)	(185.2, 5.3, 65.7)	(267.0, 96.0, 73.0)	122.3
5	(5, 9, 17, 6)	(221.3, 22.5, 101.1)	(240.0, 49.0, 42.0)	67.4
6	(-25, 15, 26, -9)	(299.8, 88.0, -28.7)	(332.0, 139.0, 75.5)	120.4
7	(-11, 12, 22, -8)	(282.0, 72.3, 42.4)	(303.0, 49.0, 51.0)	32.5
8	(-35, 0, 10, 0)	(215.6, 2.5, -59.6)	(211.0, 89.0, 53.0)	142.1
9	(20, 10, 30, 25)	(200.2, -28.8, 165.3)	(231.0, -86.0, 63.0)	121.2
10	(30, -15, 10, 5)	(126.8, -65.2, 148.7)	(194.0, -121.0, 89.0)	105.8

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.7, diperoleh *error* posisi yang bervariasi pada setiap titik pengujian. Galat terkecil sebesar 32,5 mm terdapat pada titik 7, sedangkan galat terbesar sebesar 142,1 mm terdapat pada titik 8. Variasi *error* tersebut menunjukkan bahwa terdapat perbedaan antara posisi yang dihitung menggunakan *forward kinematics* dan posisi aktual ujung lengan robot pada beberapa konfigurasi. Nilai *root mean square* (RMS) yang dihitung menggunakan metode per-komponen sumbu, yaitu dengan meratakan kuadrat galat pada komponen x, y, dan z untuk seluruh titik pengujian, diperoleh sebesar 54,7 mm. Nilai tersebut menunjukkan bahwa penyimpangan posisi

pada konfigurasi ini masih relatif besar. Salah satu faktor yang berkontribusi terhadap penyimpangan tersebut adalah *backlash* mekanis pada J1 yang mencapai sekitar 5° . Selain itu, toleransi pengukuran dan perbedaan kondisi mekanis aktual terhadap parameter geometri yang digunakan dalam perhitungan turut memengaruhi hasil pengujian.

Setelah pengujian menggunakan parameter sebelumnya, dilakukan pengukuran ulang terhadap dimensi geometris lengan robot dan penyesuaian referensi sudut untuk memperoleh parameter yang lebih sesuai dengan kondisi aktual robot.

Tabel 4.8 Parameter Baru

Joint	θ (Theta)	d (mm)	a (mm)	α (Alpha)	β (Beta)
1	θ_1	39	0	90°	-160.46
2	θ_2	0	325.4	0°	-131.03
3	θ_3	0	195.48	0°	-93.51
4	θ_4	0	180	0°	-112.44

Hasil pengukuran ulang diperoleh nilai d1 sebesar 70 mm, a2 sebesar 270 mm, a3 sebesar 195 mm, dan a4 sebesar 220 mm. Selain dimensi geometris, ditetapkan pula nilai β pada masing-masing sendi, yaitu β_1 sebesar $18,06^\circ$, β_2 sebesar $90,00^\circ$, β_3 sebesar $-116,82^\circ$, dan β_4 sebesar $-77,13^\circ$. Posisi HOME aktual yang digunakan sebagai acuan pada pengujian berikutnya adalah (115; 38,5; 37,5) mm. Posisi tersebut menjadi referensi kondisi HOME dalam penyesuaian parameter *forward kinematics*. Dengan menggunakan parameter hasil pengukuran ulang tersebut, perhitungan pada pengujian berikutnya dilakukan menggunakan konfigurasi geometris dan referensi sudut yang telah disesuaikan dengan kondisi aktual lengan robot.

Tabel 4.9 Pengukuran Dengan Parameter Baru dan Kompensasi

No	Encoder (J1,J2,J3,J4)	FK Teoritis (x, y, z) mm	Aktual (x, y, z) mm	Error (mm)
HOME	(0, 0, 0, 0)	(115.0, 38.5, 37.5)	(115.0, 38.5, 37.5)	0.0
1	(0, 10, 10, 10)	(125.1, 46.9, 40.8)	(140.0, 28.0, 31.0)	26.0
2	(-10, 0, 10, -10)	(207.7, 64.8, 29.4)	(190.0, 60.0, -22.5)	55.1
3	(-20, 10, 10, 15)	(114.3, 55.4, -3.9)	(132.0, 34.0, -24.5)	34.6
4	(20, 0, 20, 0)	(170.7, 98.1, 133.6)	(210.0, 83.0, 100.0)	53.9
5	(5, 9, 17, 6)	(166.8, 58.5, 71.0)	(200.0, 71.0, 35.0)	50.6
6	(-25, 15, 26, -9)	(278.6, 58.8, -33.9)	(233.0, 55.0, -125.0)	101.9
7	(-11, 12, 22, -8)	(256.3, 58.2, 31.8)	(230.0, 52.5, -45.0)	81.3
8	(-35, 0, 10, 0)	(164.0, 64.1, -50.0)	(144.0, 56.0, -100.0)	54.5
9	(20, 10, 30, 25)	(133.1, 104.7, 104.2)	(215.0, 70.0, 103.0)	88.9
10	(30, -15, 10, 5)	(99.0, 105.8, 110.2)	(145.0, 95.0, 124.0)	49.2

Berdasarkan hasil pengujian dengan konfigurasi baru pada Tabel 4.9, posisi aktual pada titik HOME diperoleh pada koordinat (115,0; 38,5; 37,5) mm. Posisi aktual tersebut digunakan sebagai acuan dalam penyesuaian parameter perhitungan *forward kinematics*. Pada sepuluh titik pengujian, *error* terkecil diperoleh sebesar 26,0 mm pada titik 1, sedangkan galat terbesar sebesar 101,9 mm pada titik 6. Perhitungan RMS menggunakan metode per-komponen sumbu menghasilkan nilai sebesar 35,11 mm. Nilai tersebut menunjukkan peningkatan kesesuaian antara hasil perhitungan *forward kinematics* dan posisi aktual. Penurunan RMS dari 54,7 mm menjadi 35,11 mm menunjukkan peningkatan hasil sebesar sekitar 36%. Pada konfigurasi ini, penyimpangan

yang masih muncul dapat dipengaruhi oleh *backlash* mekanis, terutama pada J1 dan J2. Rata-rata radius toleransi posisi akibat *backlash* J1 sekitar 7,94 mm dan J2 sekitar 4,01 mm, dengan kontribusi J1 lebih besar dibandingkan J2. Selain itu, pada konfigurasi data dan parameter baru telah diterapkan kompensasi perangkat lunak terhadap *backlash* mekanis sebesar 5° untuk mengurangi pengaruh perubahan arah gerak.

Berdasarkan hasil pengujian *forward kinematics*, konfigurasi dengan data dan parameter baru memberikan hasil yang lebih baik dengan nilai RMS sebesar 35,11 mm. Posisi aktual pada titik HOME digunakan sebagai acuan untuk penyesuaian parameter. Penyesuaian parameter geometri dan β berdasarkan kondisi aktual lengan robot mampu meningkatkan kesesuaian hasil perhitungan *forward kinematics* terhadap posisi aktual pada titik pengujian. Pada konfigurasi ini juga telah diterapkan kompensasi perangkat lunak terhadap *backlash* mekanis sebesar 5° . Meskipun demikian, masih terdapat *error* pada beberapa titik pengujian yang dapat dipengaruhi oleh kondisi mekanis lengan robot, terutama *backlash* pada J1 dan J2 dan pemilihan bahan fabrikasi arm robot ini yaitu PLA sehingga menyebabkan *armrobot* berpotensi untuk mengalami *bending*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penyesuaian parameter dan penerapan kompensasi *backlash* telah meningkatkan kesesuaian antara hasil perhitungan dan posisi aktual robot.

4.5 Pengujian Sistem Secara Menyeluruh (Integrasi)

4.5.1 Pengujian Repeatability (Keberulangan Posisi)

Pengujian *repeatability* dilakukan untuk mengetahui kemampuan lengan robot 4 DOF dalam mengulangi gerakan menuju titik posisi yang sama secara berulang secara konsisten. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kestabilan gerakan robot serta mengetahui selisih posisi akhir (*end-effector*) pada setiap pengulangan gerakan. Pada pengujian ini, robot diarahkan menuju satu titik koordinat target sebanyak beberapa kali, kemudian posisi aktual *end-effector* diukur dan dibandingkan terhadap posisi target.



Gambar 4.8 Pengukuran *Repeatability*

Pada setiap siklus pengujian, robot diarahkan menuju Waypoint 1 dengan kondisi awal yang sama. Setelah robot mencapai posisi tujuan, posisi sudut masing-masing *joint* diukur secara aktual. Pengukuran tersebut dilakukan secara berulang untuk mengetahui seberapa besar penyimpangan posisi yang terjadi ketika robot kembali menuju titik yang sama.

Tabel 4.10 Pengukuran Aktual *Repeatability*

No	J1 (°)	J2 (°)	J3 (°)	J4 (°)
1	2	7	10	10
2	2	8	9	10
3	4	5	10	9
4	2	7	10	9
5	5	6	9	10
6	4	6	9	9
7	4	7	10	9
8	2	6	9	9
9	3	8	10	10
10	3	5	10	10

Pada Tabel 4.10 menunjukkan hasil pengukuran posisi aktual masing-masing *joint* pada 10 kali percobaan. Pengukuran dilakukan secara langsung pada posisi yang dicapai oleh mekanisme *robot* setelah

diberikan perintah posisi yang sama dengan menggunakan busur. Hasil pengukuran ini digunakan sebagai data aktual untuk mengetahui tingkat konsistensi posisi yang dicapai oleh masing-masing *joint* dan sebagai pembandingan terhadap hasil pembacaan *encoder*.

Tabel 4.11 Pengukuran Encoder Repeatability

Percobaan	Joint 1 (°)	Joint 2 (°)	Joint 3 (°)	Joint 4 (°)
1	1,45	0,02	0,8	8,17
2	1,64	0,02	0,94	8
3	1,68	0,02	0,98	8,09
4	2,67	0,02	0,98	8,09
5	4,45	0,02	0,97	8
6	5,2	0,02	0,98	8,17
7	5,35	0,02	1	7,73
8	5,53	0,02	0,99	12,13
9	6,3	0,02	0,97	14,24
10	5,55	0,02	0,96	21,01

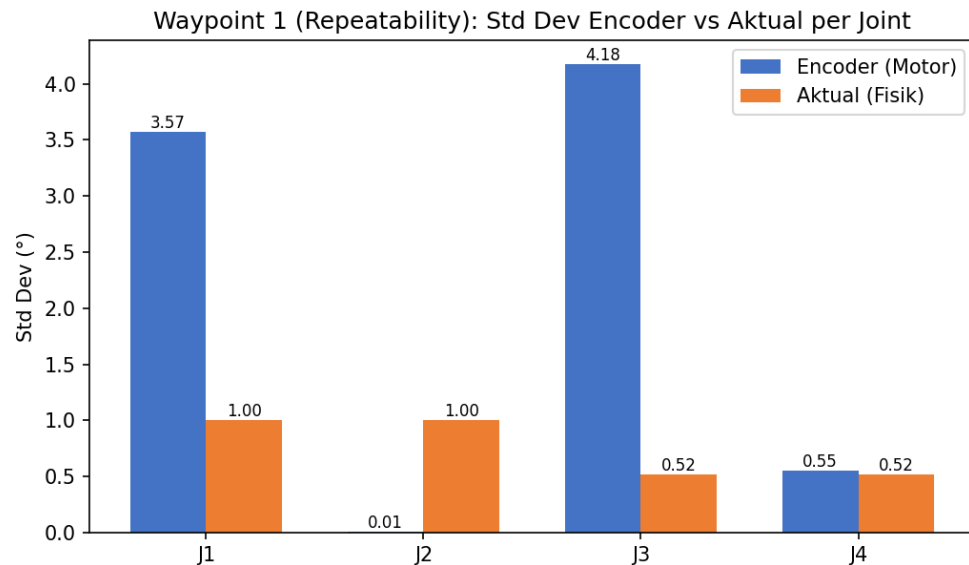
Tabel 4.11 menunjukkan hasil pengukuran posisi sudut masing-masing *joint* menggunakan *encoder* pada 10 kali percobaan. Pengukuran dilakukan dengan memberikan perintah posisi yang sama secara berulang pada *robot*, kemudian nilai sudut yang terbaca oleh *encoder* dicatat untuk setiap *joint*. Data tersebut digunakan untuk mengetahui variasi pembacaan posisi sudut berdasarkan sistem pembacaan *encoder*.

Tabel 4.12 Tabel Statistik Repeatability

Statistik	J1	J2	J3	J4
Std Dev Encoder (°)	3,57	0,006	4,18*	0,55
Std Dev Aktual (°)	1,00	1,00	0,52	0,52

Tabel 4.12 menunjukkan nilai *standard deviation* dari hasil pembacaan *encoder* dan hasil pengukuran posisi aktual pada masing-masing *joint*. Nilai *standard deviation* digunakan untuk mengetahui tingkat penyebaran

data dari 10 kali percobaan. Semakin kecil nilai *standard deviation*, semakin kecil variasi hasil pengukuran terhadap nilai rata-ratanya. Perbandingan kedua nilai tersebut digunakan untuk melihat perbedaan variasi antara pembacaan posisi oleh *encoder* dan posisi aktual yang dihasilkan oleh mekanisme *robot*.



Gambar 4.9 Gambar Statistik Repeatability

Berdasarkan Gambar 4.9 J3 dan J4 menunjukkan hasil yang relatif konsisten antara pembacaan encoder dan pengukuran aktual. Pada J2 ditemukan perbedaan yang cukup besar. Encoder menunjukkan standar deviasi hanya sebesar $0,006^\circ$, sedangkan pengukuran aktual menunjukkan standar deviasi sebesar $1,00^\circ$. Hal ini menunjukkan bahwa encoder memberikan pembacaan yang sangat stabil, tetapi posisi fisik output masih mengalami variasi ketika robot kembali menuju Waypoint 1. Pada J1, standar deviasi encoder sebesar $3,57^\circ$ lebih besar dibandingkan hasil pengukuran aktual sebesar $1,00^\circ$. Hal tersebut menunjukkan bahwa variasi yang terbaca oleh encoder tidak selalu memiliki nilai yang sama dengan perubahan posisi fisik yang terjadi pada output joint. Dengan demikian, hubungan antara pembacaan encoder dan posisi aktual dipengaruhi oleh karakteristik mekanis pada masing-masing

joint. Berdasarkan pengukuran actual pada Tabel 4.8, urutan konsistensi repeatability adalah J3 dan J4, kemudian J1, dan J2.

4.5.2 Pengujian Proses Pemasangan Baut

Pengujian proses pemasangan baut dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem lengan robot 4 DOF dalam melakukan proses dan pemasangan baut. Pada proses pemasangan baut, lengan robot bekerja dengan mengikuti urutan gerakan yang telah diprogram pada Arduino Mega 2560. Robot bergerak menuju memasang baut pada titik target yang telah ditentukan. Berikut ini merupakan dokumentasi proses pemasangan baut.



Gambar 4. 10 Proses Pemasangan Baut

Berikut ini merupakan hasil pengujian proses pemasangan baut, pengulangan pemasangan baut secara manual melalui *GUI* dilakukan sebanyak 10 kali lalu dicatat waktu pemasangan nya dan dicatat menjadi data untuk menguji tingkat keberhasilan *arm robot* dalam melakukan proses pemasangan baut.

Tabel 4.13 Pengujian Proses Pembautan

Percobaan	Baut berhasil dipasang	Waktu proses	Keterangan
1	Ya	6,10	Berhasil
2	Ya	6,08	Berhasil
3	Ya	6,12	Berhasil
4	Ya	6,05	Berhasil
5	Ya	6,09	Berhasil
6	Ya	6,11	Berhasil
7	Ya	6,07	Berhasil
8	Ya	6,13	Berhasil
9	Ya	6,06	Berhasil
10	Ya	6,10	Berhasil

Berdasarkan hasil pengujian, sistem lengan robot mampu melakukan proses pemasangan baut. Robot dapat melakukan pemasangan baut sesuai perintah *manual jog* yang diberikan.

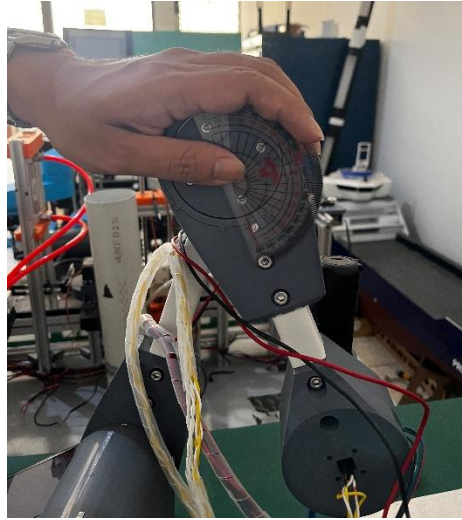
4.5.3 Pengujian Posisi Home

Pengujian *Home Position* dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengembalikan lengan robot menuju posisi awal (*home position*) yang telah ditentukan. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali dengan membandingkan posisi referensi hasil perancangan terhadap posisi aktual yang diperoleh berdasarkan hasil pembacaan sensor encoder dan perhitungan *Forward Kinematics*. Selisih antara posisi referensi dan posisi aktual dinyatakan sebagai nilai deviasi.

Tabel 4.14 Sudut Home

<i>Joint</i>	Sudut Home
<i>Joint 1</i>	0°
<i>Joint 2</i>	0°
<i>Joint 3</i>	0°
<i>Joint 4</i>	0°

Berikut ini merupakan dokumentasi pengujian posisi home



Gambar 4.11 Pengukuran Sudut Homepos

Pengukuran aktual dilakukan dengan mengamati posisi sudut masing-masing joint setelah robot kembali ke posisi home. Hasil pengukuran tersebut kemudian dibandingkan dengan data yang diperoleh dari encoder untuk mengetahui kesesuaian antara posisi yang terbaca oleh sensor dan posisi mekanis aktual.

Tabel 4.15 Tabel Pengukuran Aktual Homepos

No	J1 (°)	J2 (°)	J3 (°)	J4 (°)
1	3	5	9	9
2	2	5	9	9
3	3	6	9	10
4	2	6	10	9
5	4	5	10	10
6	3	7	10	9
7	2	7	9	9
8	4	6	10	10
9	3	8	9	10
10	2	8	9	9

Tabel 4.15 menunjukkan hasil pengukuran home position aktual pada masing-masing joint robot, yaitu J1, J2, J3, dan J4. Pengukuran dilakukan sebanyak 10 kali dengan mengembalikan robot ke posisi home position pada setiap percobaan. Nilai yang diperoleh merupakan posisi sudut aktual masing-masing joint yang diukur setelah robot mencapai posisi tersebut. Data hasil pengukuran digunakan untuk mengetahui variasi posisi home position yang dihasilkan oleh mekanisme robot pada setiap percobaan serta sebagai dasar dalam mengevaluasi konsistensi posisi home position robot.

Tabel 4.16 Sudut Hasil Pengujian Home

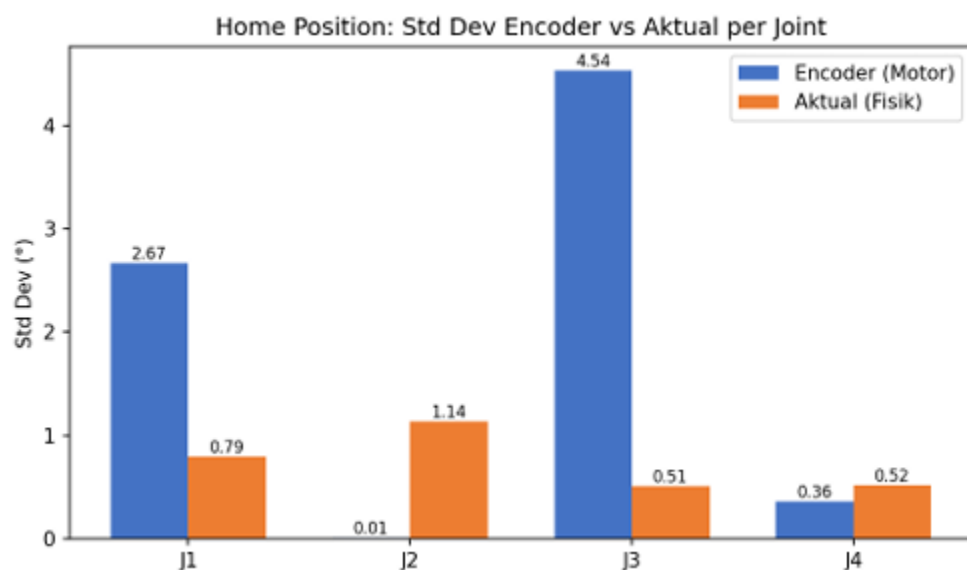
Percobaan	Joint 1 (°)	Joint 2 (°)	Joint 3 (°)	Joint 4 (°)
1	1,39	1,123	0,13	1,76
2	0,44	1,123	0,33	1,76
3	0,18	1,123	0,58	1,76
4	5,52	1,123	0,88	1,85
5	3,49	1,123	1,47	1,85
6	2,38	1,123	1,84	1,85
7	2,58	1,123	2,28	1,85
8	2,35	1,123	1,48	1,76
9	1,76	1,123	1,4	1,76
10	2,38	1,123	1,38	1,76

Tabel 4.16 menunjukkan hasil pembacaan posisi sudut masing-masing *joint* menggunakan *encoder* pada saat robot berada pada posisi *home position*. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali dengan mengembalikan robot ke posisi *home position* pada setiap percobaan. Nilai yang diperoleh merupakan sudut yang terbaca oleh *encoder* pada J1, J2, J3, dan J4 pada *console gui*, *log gui*, dan hasil rekaman data *movement gui*. Data tersebut digunakan untuk mengetahui variasi pembacaan posisi sudut *encoder* ketika robot kembali ke posisi *home position* secara berulang.

Tabel 4.17 Statistik Sudut Homepos

Statistik	J1	J2	J3	J4
Std Dev Encoder (°)	2,67	0,012	4,54*	0,36
Std Dev Aktual (°)	0,79	1,14	0,51	0,52

Tabel 4.17 menunjukkan nilai *standard deviation* dari hasil pengukuran *home position* berdasarkan pembacaan *encoder* dan pengukuran aktual pada masing-masing *joint*. Nilai *standard deviation* diperoleh dari 10 kali percobaan dan digunakan untuk mengetahui tingkat variasi data terhadap nilai rata-rata. Perbandingan nilai *standard deviation* antara *encoder* dan pengukuran aktual digunakan untuk melihat perbedaan konsistensi pembacaan sistem *encoder* dengan posisi aktual mekanisme robot pada saat kembali ke *home position*.



Gambar 4.12 Grafik Statistik Homepos

Pada Gambar 4.12, terdapat perbedaan antara hasil pembacaan *encoder* dan pengukuran aktual pada beberapa *joint*. J3 dan J4 menunjukkan hasil yang relatif sejalan antara kedua metode pengukuran. Sebaliknya, J1 dan terutama J2 menunjukkan perbedaan yang lebih besar. Pada J2, standar deviasi *encoder* hanya sebesar 0,012°, sedangkan hasil pengukuran aktual mencapai 1,14° dengan rentang perubahan posisi sekitar 5°–8°. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kestabilan

pembacaan encoder belum tentu menunjukkan kestabilan posisi output mekanis. Perbedaan tersebut dapat terjadi karena encoder membaca posisi pada sisi motor, sedangkan posisi aktual yang diamati merupakan posisi output mekanis setelah melalui sistem transmisi. Adanya mekanisme reduksi dan celah mekanis dapat menyebabkan perubahan posisi pada output tidak sepenuhnya terdeteksi oleh encoder.

Berdasarkan hasil pengukuran aktual, urutan konsistensi posisi home dari yang paling baik hingga paling rendah adalah J3 dan J4, kemudian J1, dan J2. Dengan demikian, data *encoder* tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya indikator untuk menentukan konsistensi posisi home. Pengukuran fisik aktual diperlukan untuk mengetahui kondisi posisi sebenarnya pada output masing-masing *joint*. Hasil tersebut sama dengan pola yang diperoleh pada pengujian *repeatability*. Kesamaan pola pada dua posisi pengujian menunjukkan bahwa ketidaksesuaian antara pembacaan encoder dan posisi aktual bukan hanya terjadi pada satu kondisi pengujian, tetapi merupakan karakteristik yang muncul secara konsisten pada joint tertentu.

4.5.4 Pengujian Backlash

Pengujian *backlash* dilakukan untuk mengetahui besar sudut bebas yang terjadi pada masing-masing *joint* lengan robot. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh celah mekanis pada sistem transmisi terhadap akurasi posisi robot, terutama saat terjadi perubahan arah gerakan.

Pengujian dilakukan dengan mengaktifkan sistem sehingga motor stepper berada dalam kondisi *holding*. Selanjutnya, setiap *joint* digerakkan secara perlahan menggunakan tangan ke arah kanan, kemudian digerakkan kembali ke arah kiri. Besarnya sudut bebas yang terjadi sebelum joint kembali memberikan tahanan dicatat menggunakan pembacaan sudut encoder AS5600. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali pada setiap joint 5 ke arah kanan dan 5 ke arah sebaliknya. Berikut adalah gambar pengukuran backlash.



Gambar 4.13 Pengukuran Pada Joint 1

Berikut adalah tabel hasil pengukuran backlash berdasar encoder.

Tabel 4.18 Pengujian Backlash

No	Joint 1	Joint 2	Joint 3	Joint 4
1	4,78	2,52	0,57	4,13
2	0,041	0,034	1,68	3,52
3	3,22	2,52	0,32	4,22
4	0,063	0,034	2,25	3,69
5	3,95	2,52	0,186	4,22
6	0,436	0,034	2,17	3,69
7	3,923	2,52	0,041	4,22
8	1,06	0,034	2,13	3,52
9	2,78	2,52	0,006	4,22
10	0,236	0,034	2,088	3,60

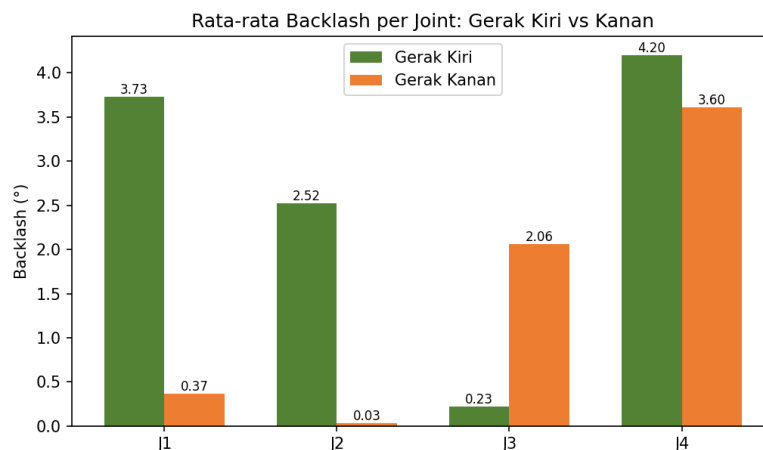
Tabel 4.18 menunjukkan hasil pengukuran posisi sudut aktual pada masing-masing *joint* selama pengujian pergerakan robot ke arah kanan dan kiri. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali percobaan dengan arah pergerakan yang dilakukan secara bergantian. Pada percobaan bernomor ganjil, robot digerakkan ke arah kanan, sedangkan pada percobaan

bernomor genap, robot digerakkan ke arah kiri. Nilai yang diperoleh merupakan hasil pengukuran posisi sudut dari encoder pada J1, J2, J3, dan J4.

Tabel 4.19 Rerata Backlash Berdasar Encoder

Joint	Mean Kiri (°)	Mean Kanan (°)	Lebar Backlash (°)	Karakteristik
J1	3,73	0,37	3,36	Tidak stabil, membesar seiring waktu
J2	2,52	0,034	2,49	Sangat deterministik (Std Dev = 0)
J3	0,23 → ~0	2,06	1,84	Mengecil (wear-in), sisi lain stabil
J4	4,2	3,6	0,6	Magnitude besar, tapi paling konsisten

Tabel 4.19 menunjukkan hasil perhitungan rerata *backlash* pada masing-masing *joint* berdasarkan data pembacaan *encoder*. Nilai *backlash* diperoleh dengan membandingkan nilai rerata posisi *joint* ketika bergerak dari arah kiri dan kanan. Selisih antara kedua nilai tersebut digunakan untuk menentukan lebar *backlash* pada masing-masing *joint*.



Gambar 4.14 Grafik Rerata Backlash

Berdasarkan Gambar 4.14 hasil pengujian menunjukkan bahwa masing-masing *joint* memiliki karakteristik backlash yang berbeda. Pada J1 diperoleh rata-rata pergerakan dari arah kiri sebesar 3,73° dan dari arah kanan sebesar

0,37°, sehingga lebar backlash yang diperoleh sebesar 3,36°. Kondisi J1 bersifat tidak stabil dan cenderung membesar seiring waktu. Pada J2, rata-rata pergerakan dari arah kiri sebesar 2,52° dan dari arah kanan sebesar 0,034°, sehingga diperoleh backlash sebesar 2,49°. Backlash pada J2 bersifat sangat deterministik dengan standar deviasi sebesar 0°.

Pada J3, rata-rata pergerakan dari arah kiri mengalami perubahan dari sekitar 0,23° hingga mendekati 0°, sedangkan dari arah kanan sebesar 2,06°. Dengan demikian, lebar backlash yang diperoleh sebesar 1,84°. Kondisi tersebut menunjukkan kecenderungan berkurangnya backlash atau proses *wear-in*, sementara sisi lainnya relatif stabil. Pada J4, rata-rata pergerakan dari arah kiri sebesar 4,20° dan dari arah kanan sebesar 3,60°, menghasilkan lebar backlash sebesar 0,60°. Walaupun magnitude pergerakan bebas pada J4 relatif besar, perbedaan antarah menghasilkan lebar backlash yang paling kecil dan karakteristik yang paling konsisten dibandingkan joint lainnya. Hasil pengujian backlash dapat digunakan untuk menjelaskan perbedaan antara data encoder dan pengukuran aktual pada pengujian home position maupun repeatability. Pada J2, backlash yang relatif besar tetapi bersifat tetap menyebabkan encoder yang berada pada sisi motor tidak dapat mendeteksi perubahan posisi yang terjadi setelah titik backlash. Akibatnya, data encoder dapat terlihat sangat stabil meskipun output mekanis mengalami perubahan posisi. Kondisi tersebut sesuai dengan hasil pengujian J2, dimana standar deviasi encoder sangat kecil sementara pengukuran aktual menunjukkan variasi yang lebih besar.

Pada J1, backlash yang tidak stabil dan cenderung membesar dapat menjelaskan mengapa variasi ditemukan baik pada data encoder maupun pengukuran aktual. Berbeda dengan J2, sumber ketidakstabilan pada J1 belum bersifat tetap sehingga menghasilkan perubahan yang lebih signifikan. Sementara itu, J3 memiliki backlash yang relatif kecil dan menunjukkan kecenderungan membaik, sehingga sesuai dengan hasil pengujian home position dan repeatability yang menunjukkan kondisi relatif stabil. Pada J4,

nilai backlash memiliki karakteristik yang berbeda. Meskipun terdapat pergerakan bebas dengan magnitude yang relatif besar, backlash tersebut bersifat konsisten sehingga tidak menghasilkan variasi posisi yang besar pada pengujian repeatability. Kondisi ini menunjukkan bahwa besar backlash tidak selalu berbanding langsung dengan buruknya repeatability. Backlash yang besar tetapi konsisten dapat menghasilkan posisi yang lebih berulang dibandingkan backlash yang lebih kecil tetapi berubah-ubah. Dalam sistem ini, kondisi tersebut juga dapat dipengaruhi oleh strategi pendekatan akhir gerak yang dilakukan dari arah yang sama.

Berdasarkan keseluruhan hasil pengujian, backlash menjadi salah satu faktor mekanis yang memengaruhi hubungan antara pembacaan encoder dan posisi aktual output robot yang pada akhirnya berpengaruh kepada kemampuan robot untuk melakukan tugas *pick and place*. Oleh karena itu, pengujian backlash diperlukan sebagai data pendukung untuk menjelaskan perbedaan hasil antara sensor dan kondisi mekanis sebenarnya.