

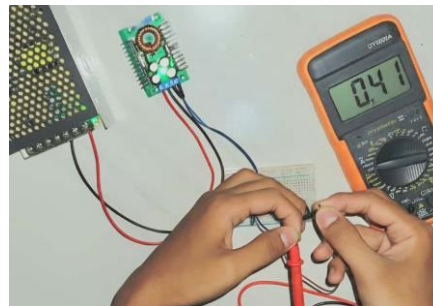
BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA

Bab ini berisi hasil dari pengujian dan analisa implementasi lengan robot 4 DOF untuk *pick and place* berbasis STM32 dengan sistem kendali melalui HMI Nextion. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk memastikan sistem dapat bekerja secara baik dan memenuhi spesifikasi yang telah direncanakan.

4.1. Hasil Pengujian *Power Supply* 12VDC 10A dan *Stepdown* XL4016

Pengujian *power supply* dan modul *stepdown* pada alat bertujuan untuk memastikan tegangan pada rangkaian alat tidak terjadi *over voltage* yang akan merusak komponen. Pengujian ini dilakukan bersamaan agar mengetahui nilai efisiensinya. Pengujian *power supply* 12VDC 10A dengan modul *stepdown* XL4016 dengan *output* 5VDC terdapat pada **Gambar 4.1**.



Gambar 4.1. Pengujian Power Supply dan XL4016

Pengujian pada **Gambar 4.1**. ini melibatkan penggunaan *power supply* 12 VDC 10A sebagai sumber utama dan konversi tegangan AC ke DC, *stepdown* XL4016 untuk menurunkan tegangan 12VDC ke 5VDC, dengan menggunakan beberapa variasi resistor sebagai beban. Berikut merupakan hasil pengujian yang dapat dilihat pada **Tabel 4.1**.

Tabel 4.1. Hasil Pengujian Power Supply dan XL4016

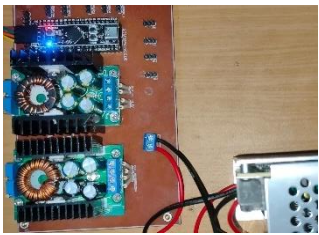
No	R (Ω)	<i>Power Supply</i> 12V 10A			<i>Stepdown</i> XL4016			Efisiensi (%)
		V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} (W)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	P_{out} (W)	
1	10	12,13	0,2	2,43	5	0,41	2,05	84,5
2	20	12,13	0,16	1,94	5	0,33	1,65	85,02
3	100	12,13	0,05	0,61	5	0,1	0,5	82,44
4	180	12,13	0,01	0,12	5	0,02	0,1	82,44

Berdasarkan hasil pengujian pada **Tabel 4.1**, *Stepdown* XL4016 mampu menjaga kestabilan tegangan *output* meskipun terjadi perubahan pada arus beban. Nilai efisiensi yang berada pada kisaran 82% hingga 85% menunjukkan kinerja yang cukup baik untuk penggunaan umum, meskipun masih terdapat potensi peningkatan dengan pemilihan regulator berspesifikasi lebih tinggi. Pengujian ini juga menegaskan pentingnya pengelolaan kerugian daya pada regulator, terutama saat bekerja pada beban tinggi, guna memastikan keandalan dan umur pakai sistem dalam jangka panjang. Perolehan nilai efisiensi tersebut dihitung menggunakan persamaan (2.11).

4.2. Hasil Pengujian Mikrokontroler STM32F411CEU6

Pengujian dilakukan pada mikrokontroler STM32F411CEU6 dengan tujuan memastikan bahwa perangkat berada dalam kondisi baik dan dapat beroperasi sebagaimana mestinya. Metode pengujian yang digunakan adalah dengan mengoperasikan program sederhana untuk mengendalikan LED pada pin PC13 agar berkedip (*blink*) secara periodik. Hasil pengujian fungsional terdapat pada **Tabel 4.2**.

Tabel 4.2. Pengujian Fungsional STM32F411CEU6

Hasil Pengujian	Keterangan
	LED di pin PC13 pada STM32 dapat menyala dan berkedip sesuai dengan program yang dijalankan, yang menandakan mikrokontroler STM32 dapat berfungsi dan bekerja dengan baik.

4.3. Hasil Pengujian Sensor Infrared E18 D80NK

Pengujian sensor infrared E18 D80NK dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam mendeteksi keberadaan objek yang berada di depannya. Proses pengujian dilakukan dengan memosisikan objek pada jarak bervariasi mulai dari 1 cm hingga 7 cm dari sensor, sesuai dengan ilustrasi yang ditunjukkan pada **Gambar 4.2**.



Gambar 4.2. Pengujian Jarak pada Sensor Infrared E18 D80NK

Berdasarkan **Gambar 4.2**, setiap jarak pengujian diamati untuk melihat apakah sensor dapat memberikan respons deteksi secara akurat. Hasil pengujian tersebut kemudian dicatat dan disajikan dalam **Tabel 4.3** sebagai data pendukung dalam menganalisis kinerja sensor.

Tabel 4.3. Hasil Pengujian Jarak pada Sensor Infrared E18 D80NK

No	Jarak Sensor ke Objek	Lampu Sensor	Keterangan
1	1 cm	Tidak Menyala	Tidak Mendeteksi
2	2 cm	Menyala	Mendeteksi
3	3 cm	Menyala	Mendeteksi
4	4 cm	Menyala	Mendeteksi
5	5 cm	Tidak Menyala	Tidak Mendeteksi
6	6 cm	Tidak Menyala	Tidak Mendeteksi
7	7 cm	Tidak Menyala	Tidak Mendeteksi

4.4. Hasil Pengujian Motor Servo

Pengujian motor servo bertujuan untuk menilai ketepatan sudut putar yang dihasilkan dibandingkan dengan sudut perintah yang diberikan. Dalam proses ini, digunakan alat bantu berupa busur derajat untuk mengukur sudut aktual yang dicapai motor servo. Penggunaan busur derajat memungkinkan peneliti mengetahui adanya perbedaan antara sudut perintah dengan sudut yang benar-benar dicapai oleh motor servo. Dengan demikian, tingkat akurasi pergerakan motor servo dapat dievaluasi secara langsung, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4.3**.



Gambar 4.3. Pengujian Sudut Motor Servo

Berdasarkan **Gambar 4.3.** tersebut jenis motor servo yang diuji merupakan tipe standar dengan rentang pergerakan dari 0° hingga 180° . Proses pengujian dilakukan secara bertahap dengan memberikan perintah sudut tertentu, dimulai dari posisi awal 0° , kemudian bergerak ke 30° , 60° , 90° , dan seterusnya hingga mencapai sudut maksimum 180° . Setiap hasil pergerakan dicatat dan dibandingkan dengan nilai perintah untuk mengetahui perbedaan yang terjadi. Data hasil pengukuran sudut aktual motor servo disajikan secara rinci dalam **Tabel 4.4.**

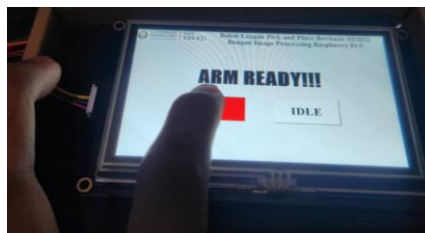
Tabel 4.4. Hasil Pengujian Sudut Motor Servo

No	Putaran Sudut Kode Program	Putaran Sudut Aktual	Error (%)
1	0°	0°	0
2	30°	29°	3,3
3	60°	59°	1,6
4	90°	90°	0
5	135°	133°	1,5
6	180°	180°	0

Motor servo ini bekerja dengan sinyal kendali berbasis PWM (*Pulse Width Modulation*) pada frekuensi sekitar 50 Hz atau periode 20 ms. Pada frekuensi ini, lebar pulsa menentukan sudut gerakan servo. Lebar pulsa yang digunakan 0,5ms mewakili sudut 0° sampai pulsa 2,4ms mewakili 180° . Karena itu, yang harus diatur pada STM32 bukan hanya frekuensi PWM, melainkan juga durasi pulsa (*duty cycle*) di rentang 0,5-2,4 ms.

4.5. Hasil Pengujian HMI Nextion NX4827K043

Pengujian dilakukan pada perangkat HMI Nextion tipe NX4827K043 dengan tujuan untuk memastikan perangkat dalam kondisi baik. Proses pengujian dilakukan dengan cara mengunggah rancangan antarmuka HMI menggunakan Nextion Editor, kemudian mengoperasikannya secara langsung pada perangkat. Tahapan ini bertujuan untuk memverifikasi bahwa HMI dapat menerima dan menjalankan program melalui komunikasi serial UART. Dokumentasi hasil pengujian ditampilkan pada **Gambar 4.4**.



Gambar 4.4. Hasil Pengujian HMI Nextion NX4827K043

Berdasarkan **Gambar 4.4**, dapat diketahui bahwa HMI Nextion mampu menerima unggahan program dari Nextion Editor dan menampilkan hasil desain tersebut dengan baik pada layar. Selain itu, perangkat juga berfungsi sebagaimana mestinya ketika tombol pada tampilan ditekan, yaitu dengan berpindah ke halaman (*page*) yang sesuai. Tidak hanya itu, HMI Nextion juga dapat menampilkan karakter pada layar, sehingga menunjukkan bahwa fungsi dasar dari perangkat sudah berjalan normal dan siap digunakan.

4.6. Hasil Pengujian Serial Komunikasi UART

Pengujian dilakukan pada jalur komunikasi serial UART yang menghubungkan Raspberry Pi 5 dengan STM32F411CEU6, serta antara STM32F411CEU6 dengan HMI Nextion NX4827K043. Tujuan utama pengujian ini adalah untuk memastikan bahwa seluruh perangkat berada dalam kondisi baik serta mampu merespons data yang diterima dengan benar. Proses pengujian dilakukan dengan membuat program Python pada Raspberry Pi 5 untuk mengirimkan karakter ke STM32 melalui UART. Selanjutnya, karakter yang diterima oleh STM32 diteruskan dan ditampilkan pada layar HMI Nextion. Hasil dari proses pengujian ini didokumentasikan pada **Gambar 4.5**.



Gambar 4.5. Pengujian Serial Komunikasi UART

Berdasarkan **Gambar 4.5**, karakter yang dikirim dari Raspberry Pi 5 ke STM32 divariasikan untuk memastikan bahwa STM32 mampu menerima setiap karakter dengan benar. Selanjutnya, karakter yang diterima tersebut ditampilkan pada layar HMI Nextion guna memverifikasi bahwa proses komunikasi berjalan sesuai harapan. Hasil pengujian kemudian dicatat secara sistematis dan disajikan pada **Tabel 4.5**, sehingga dapat digunakan sebagai data pendukung dalam menganalisis kinerja jalur komunikasi serial UART.

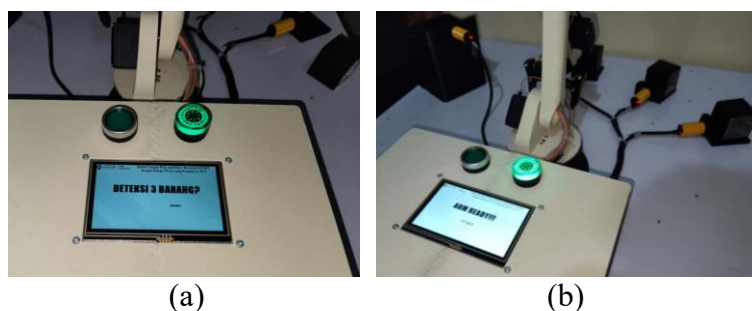
Tabel 4.5. Hasil Pengujian Serial Komunikasi UART

No	Karakter yang Dikirim	Karakter yang Ditampilkan	Keterangan
1	Barang 1	Barang 1	Berhasil
2	Barang 2	Barang 2	Berhasil
3	Barang 3	Barang 3	Berhasil

Berdasarkan **Tabel 4.5**, dapat dijelaskan bahwa pengujian komunikasi serial UART antara Raspberry Pi 5, STM32F411CEU6, dan HMI Nextion berjalan dengan baik. Pada saat data berupa karakter "Barang 1" dikirimkan dari Raspberry Pi 5, karakter tersebut dapat diterima oleh STM32 dan ditampilkan pada HMI Nextion dengan tepat sesuai yang dikirimkan. Hal yang sama juga terjadi ketika dikirimkan data "Barang 2" dan "Barang 3", di mana hasil penerimaan dan tampilan pada HMI Nextion sesuai dengan data yang dikirimkan. Dengan demikian, seluruh proses komunikasi serial mulai dari pengiriman data, penerimaan oleh STM32, hingga penampilan pada HMI dapat berlangsung tanpa adanya kesalahan. Hasil ini menunjukkan bahwa jalur komunikasi UART yang digunakan sudah berfungsi dengan baik

4.7. Pendeteksian Tiga Barang

Pendeteksian tiga barang pada sistem ini dilakukan menggunakan tiga sensor infrared E18 D80NK yang dipasang pada tempat barang. Masing-masing sensor berfungsi untuk mendeteksi keberadaan satu barang, sehingga ketika sensor pertama aktif maka barang pertama telah terdeteksi, begitu pula sensor kedua dan ketiga. Tampilan pada HMI Nextion akan berubah jika ketiga sensor terdeteksi. Hasil pendeteksian ketiga barang bisa dilihat di **Gambar 4.6**.



Gambar 4.6. (a) Sebelum dan (b) Sesudah Pendeteksian Ketiga Barang

Berdasarkan **Gambar 4.6**, proses pendeteksian dilakukan terhadap tiga barang yang telah diatur posisinya. Sistem ini dirancang hanya dapat berjalan apabila ketiga barang terdeteksi secara bersamaan oleh sensor infrared. Hal ini berarti, apabila hanya satu barang atau dua barang saja yang terdeteksi, maka sistem tidak akan aktif dan proses tidak dapat dilanjutkan. Dengan demikian, sistem akan mengirimkan sinyal ke HMI Nextion untuk melanjutkan. Hasil pengujian mengenai pendeteksian tiga barang ini dapat dilihat pada **Tabel 4.6**.

Tabel 4.6. Hasil Pengujian Pendeteksian Tiga Barang

No	Barang 1	Barang 2	Barang 3	Keterangan
1	Tidak Ada	Tidak Ada	Tidak Ada	Tidak Berlanjut
2	Ada	Tidak Ada	Tidak Ada	Tidak Berlanjut
3	Tidak Ada	Ada	Tidak Ada	Tidak Berlanjut
4	Tidak Ada	Tidak Ada	Ada	Tidak Berlanjut
5	Ada	Ada	Tidak Ada	Tidak Berlanjut
6	Ada	Tidak Ada	Ada	Tidak Berlanjut
7	Tidak Ada	Ada	Ada	Tidak Berlanjut
8	Ada	Ada	Ada	Berlanjut

4.8. Pengujian *Invers Kinematics* Keseluruhan Posisi Lengan Robot

Pengujian *invers kinematics* keseluruhan posisi lengan robot 4 DOF ini dilakukan dengan mengambil tiga kondisi yakni, kondisi pada saat pendeteksian barang cacat, pengambilan barang cacat dan pelepasan barang cacat ke *garbage box*. Kemudian di setiap kondisi dilakukan pengujian terhadap nilai koordinat X,Y,Z yang dikirim dari HMI akan dibandingkan dengan posisi aktual yang dicapai lengan robot dengan satuan milimeter (mm).

4.8.1. Koordinat Pendeteksian Barang Cacat 1

Pengujian koordinat X, Y, dan Z pada pergerakan lengan robot dilakukan untuk memastikan bahwa sistem mampu menempatkan *end-effector* secara tepat pada posisi pendeteksian barang cacat 1. Hasil dari proses pendeteksian barang cacat 1 dapat dilihat di **Gambar 4.7**.



Gambar 4.7. Hasil Pendeteksian Barang Cacat 1

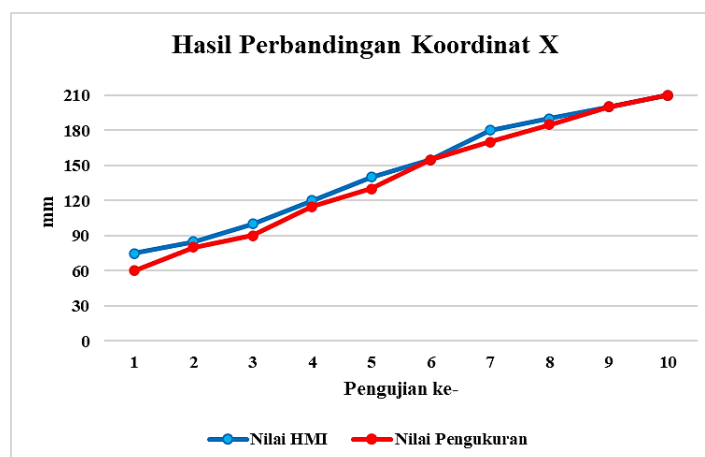
Pada **Gambar 4.7**. ini dilakukan pengujian untuk memverifikasi akurasi gerakan setiap koordinat serta konsistensi *inverse kinematics*. Pada tahap ini, nilai koordinat yang dikirim dari HMI akan dibandingkan dengan posisi aktual yang dicapai lengan robot. Koordinat acuan yang berhasil mendeteksi barang cacat 1 yaitu X=200mm, Y=130mm, dan Z=40mm. Hasil pengujian untuk koordinat x deteksi barang cacat 1 dapat dilihat pada **Tabel 4.7**.

Tabel 4.7. Hasil Pengujian Koordinat X Deteksi 1

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
1	75	60	15	0,25
2	85	80	5	0,06

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
3	100	90	10	0,11
4	120	115	5	0,04
5	140	130	10	0,08
6	155	155	0	0
7	180	170	10	0,06
8	190	185	5	0,03
9	200	200	0	0
10	210	210	0	0

Berdasarkan **Tabel 4.7.** hasil pengujian koordinat X pada area deteksi barang cacat 1 dengan membandingkan nilai *input* dari HMI terhadap nilai pengukuran posisi aktual lengan robot. Secara umum, pergerakan lengan robot menunjukkan respons yang cukup akurat, ditandai dengan selisih nilai yang relatif kecil, yaitu 0–15 mm. Persentase *error* paling tinggi di 0,25%, yang menunjukkan bahwa sistem mampu mengikuti *setpoint* koordinat dengan baik. Hasil ini mengindikasikan bahwa mekanisme pengendalian koordinat X telah bekerja dengan stabil dan dapat digunakan untuk posisi pendeteksian barang cacat 1. Perbandingan hasil ditampilkan pada **Gambar 4.8.**



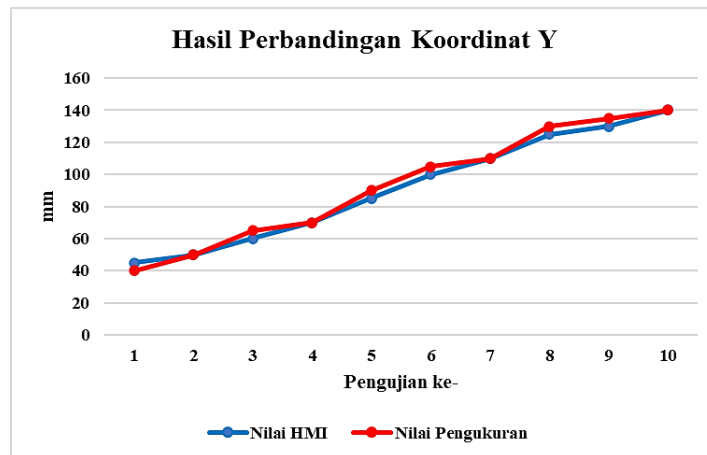
Gambar 4.8. Hasil Perbandingan Koordinat X Deteksi 1

Kemudian dilanjutkan untuk pengujian terhadap koordinat Y pada posisi pendeteksian barang cacat. Pengujian ini tetap sama menggunakan acuan koordinat pada pengujian koordinat X. Hasil pengujian untuk koordinat Y deteksi barang cacat 1 dapat dilihat pada **Tabel 4.8.**

Tabel 4.8. Hasil Pengujian Koordinat Y Deteksi 1

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
1	45	40	5	0,13
2	50	50	0	0
3	60	65	5	0,08
4	70	70	0	0
5	85	90	5	0,06
6	100	105	5	0,05
7	110	110	0	0
8	125	130	5	0,04
9	130	135	5	0,04
10	140	140	0	0

Berdasarkan **Tabel 4.8.** hasil pengujian koordinat Y pada area deteksi barang cacat 1 dengan membandingkan nilai *input* dari HMI terhadap nilai pengukuran aktual posisi lengan robot. Secara keseluruhan, sistem menunjukkan performa yang stabil, dengan selisih pengukuran berada pada rentang 0–5 mm, yang mencerminkan respon gerakan yang cukup presisi. Persentase *error* yang dihasilkan juga relatif kecil, yaitu antara 0% hingga 0,13%, sehingga masih berada dalam batas toleransi pergerakan lengan robot. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa sistem kendali koordinat Y mampu mengikuti *setpoint* dengan baik pada posisi deteksi barang cacat 1. Perbandingan hasil ditampilkan pada **Gambar 4.9.**



Gambar 4.9. Hasil Perbandingan Koordinat Y Deteksi 1

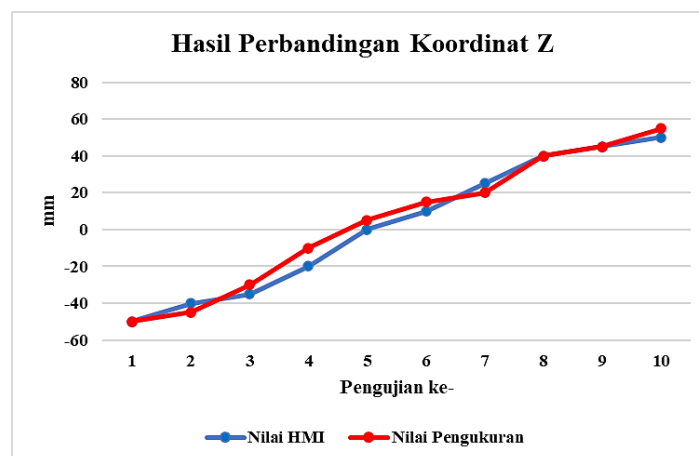
Kemudian dilanjutkan untuk pengujian terhadap koordinat Z pada posisi pendeteksian barang cacat. Pengujian ini tetap sama menggunakan acuan koordinat pada pengujian koordinat X. Hasil pengujian untuk koordinat Z deteksi barang cacat 1 dapat dilihat pada **Tabel 4.9**.

Tabel 4.9. Hasil Pengujian Koordinat Z Deteksi 1

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
1	-50	-50	0	0,00
2	-40	-45	5	0,11
3	-35	-30	5	0,17
4	-20	-10	10	1,00
5	0	5	5	1,00
6	10	15	5	0,33
7	25	20	5	0,25
8	40	40	0	0,00
9	45	45	0	0,00
10	50	55	5	0,09

Berdasarkan **Tabel 4.9**, hasil pengujian koordinat Z pada area deteksi barang cacat 1 dengan membandingkan nilai *input* dari HMI terhadap nilai posisi aktual yang dicapai lengan robot. Secara keseluruhan, sistem menunjukkan kemampuan mengikuti nilai *setpoint*

dengan cukup baik, ditandai dengan sebagian besar selisih berada pada rentang 0–10 mm. Persentase *error* bervariasi dari 0% hingga 1%, dengan nilai *error* terbesar muncul pada *input* –20 mm dan 0 mm, yang mengindikasikan adanya sedikit ketidaktepatan pergerakan pada daerah transisi mendekati titik tengah ($Z = 0$). Meskipun demikian, *error* tersebut masih berada dalam batas yang dapat diterima dan tidak mempengaruhi proses pendeteksian secara signifikan. Hasil ini menunjukkan bahwa kendali koordinat Z bekerja stabil dan cukup akurat untuk digunakan dalam posisi pendeteksian barang cacat 1. Perbandingan hasil ditampilkan pada **Gambar 4.10**.



Gambar 4.10. Hasil Perbandingan Koordinat Z Deteksi 1

Dari hasil pengujian koordinat X, Y, dan Z pada posisi pendeteksian barang cacat 1 diperoleh bahwa sistem lengan robot mampu mengikuti *setpoint* yang diberikan melalui HMI dengan tingkat akurasi yang cukup baik. Pada koordinat X, nilai *error* berada pada rentang 0–0,25%, pada koordinat Y nilai *error* berkisar antara 0–0,13%, sedangkan pada koordinat Z nilai *error* berkisar antara 0–1%. Secara keseluruhan, pengujian ketiga koordinat menunjukkan bahwa mekanisme kontrol dan pergerakan lengan robot pada area pendeteksian barang cacat 1 dapat bekerja dengan baik, dengan rata-rata *error* keseluruhan berada pada kisaran +0,5%, sehingga pergerakan lengan dinilai akurat. Perbandingan antara masukkan HMI dan pengukuran ditunjukkan pada **Tabel 4.10**.

Tabel 4.10. Perbandingan Masukkan HMI dan Pengukuran Deteksi 1

Koordinat	Rata-Rata Selisih Masukkan HMI dan Pengukuran (mm)	Rata-Rata Error Masukkan HMI dan Pengukuran (%)
X	6	0,06
Y	3	0,04
Z	4	0,3

4.8.2. Koordinat Pendeteksian Barang Cacat 2

Pengujian koordinat X, Y, dan Z pada pergerakan lengan robot dilakukan untuk memastikan bahwa sistem mampu menempatkan *end-effector* secara tepat pada posisi pendeteksian barang cacat 2. Hasil dari proses pendeteksian barang cacat 2 dapat dilihat di **Gambar 4.11.**

**Gambar 4.11.** Hasil Pendeteksian Barang Cacat 2

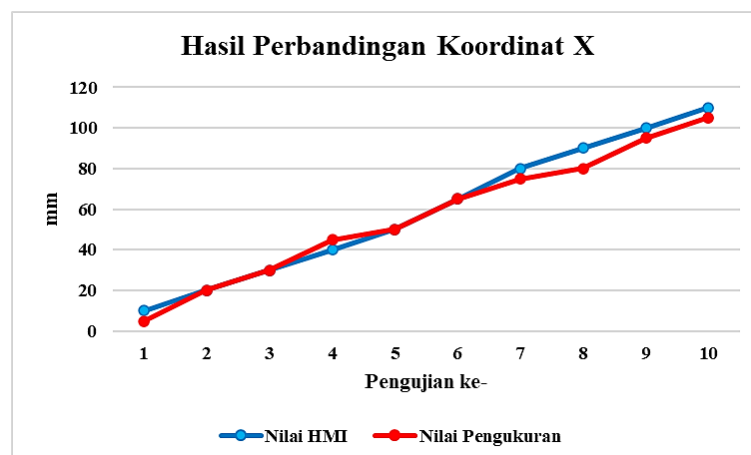
Pada **Gambar 4.11.** ini dilakukan pengujian untuk memverifikasi akurasi gerakan setiap koordinat. Pada tahap ini, nilai koordinat yang dikirim dari HMI akan dibandingkan dengan posisi aktual yang dicapai lengan robot. Koordinat acuan yang berhasil mendeteksi barang cacat 2 yaitu X=100mm, Y=210mm, dan Z=40mm. Hasil pengujian untuk koordinat x deteksi barang cacat 2 dapat dilihat pada **Tabel 4.11.**

Tabel 4.11. Hasil Pengujian Koordinat X Deteksi 2

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
1	10	5	5	1,00

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
2	20	20	0	0
3	30	30	0	0
4	40	45	5	0,11
5	50	50	0	0
6	65	65	0	0
7	80	75	5	0,07
8	90	80	10	0,13
9	100	95	5	0,05
10	110	105	5	0,05

Pada **Tabel 4.11.** menyajikan hasil pengujian koordinat X pada area deteksi barang cacat 2 dengan membandingkan nilai *input* dari HMI terhadap posisi aktual lengan robot. Secara umum, pergerakan koordinat X menunjukkan akurasi yang baik, dengan selisih hasil pengukuran berada pada rentang 0–10 mm dan *error* antara 0% hingga 1%. *Error* tertinggi muncul pada *input* 10 mm, sedangkan *input* lainnya menunjukkan nilai *error* yang kecil. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem kendali koordinat X pada posisi pendeteksian barang cacat 2 bekerja secara konsisten dan mampu mengikuti *setpoint* dengan baik. Perbandingan hasil ditampilkan pada **Gambar 4.12.**



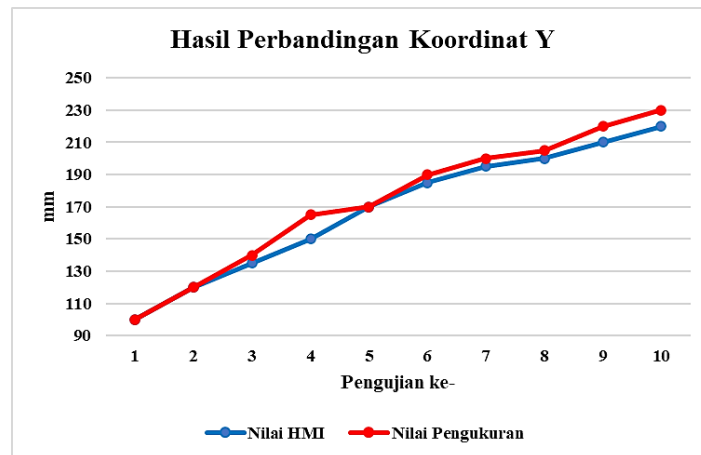
Gambar 4.12. Hasil Perbandingan Koordinat X Deteksi 2

Kemudian dilanjutkan untuk pengujian terhadap koordinat Y pada posisi pendeteksian barang cacat. Pengujian ini tetap sama menggunakan acuan koordinat pada pengujian koordinat X. Hasil pengujian untuk koordinat Y deteksi barang cacat 2 dapat dilihat pada **Tabel 4.12**.

Tabel 4.12. Hasil Pengujian Koordinat Y Deteksi 2

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
1	100	100	0	0
2	120	120	0	0
3	135	140	5	0,04
4	150	165	15	0,09
5	170	170	0	0
6	185	190	5	0,03
7	195	200	5	0,03
8	200	205	5	0,02
9	210	220	10	0,05
10	220	230	10	0,04

Berdasarkan **Tabel 4.12**, pengujian koordinat Y pada deteksi barang cacat 2 menunjukkan bahwa pergerakan lengan robot mampu mengikuti nilai *setpoint* dari HMI dengan cukup baik. Selisih antara nilai *input* dan nilai pengukuran berada pada kisaran 0–15 mm, dengan *error* relatif kecil yaitu antara 0% hingga 0,09%. Beberapa penyimpangan kecil terlihat pada *input* 135 mm, 150 mm, dan seterusnya, namun nilai *error* tersebut masih dalam batas toleransi dan tidak mengganggu akurasi pergerakan secara keseluruhan. Pada sebagian besar titik, terutama pada nilai 100 mm, 120 mm, dan 170 mm, lengan robot mampu mencapai koordinat yang tepat tanpa selisih. Hasil ini menunjukkan bahwa kontrol koordinat Y pada area deteksi barang cacat 2 berjalan stabil dan cukup akurat. Perbandingan hasil ditampilkan pada **Gambar 4.13**.



Gambar 4.13. Hasil Perbandingan Koordinat Y Deteksi 2

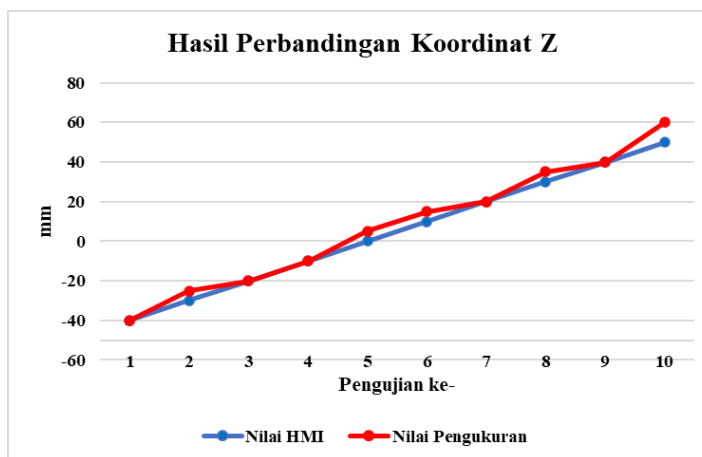
Kemudian dilanjutkan untuk pengujian terhadap koordinat Z pada posisi pendeteksian barang cacat. Pengujian ini tetap sama menggunakan acuan koordinat pada pengujian koordinat X. Hasil pengujian untuk koordinat Z deteksi barang cacat 2 dapat dilihat pada **Tabel 4.13**.

Tabel 4.13. Hasil Pengujian Koordinat Z Deteksi 2

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
1	-40	-40	0	0
2	-30	-25	5	0,20
3	-20	-20	0	0
4	-10	-10	0	0
5	0	5	5	1,00
6	10	15	5	0,33
7	20	20	0	0
8	30	35	5	0,14
9	40	40	0	0,00
10	50	60	10	0,17

Berdasarkan **Tabel 4.13**, menunjukkan hasil pengujian koordinat Z pada posisi deteksi barang cacat 2 dengan membandingkan nilai *input* HMI terhadap nilai pengukuran aktual lengan robot. Secara umum, akurasi pergerakan koordinat Z terbilang cukup baik, dengan selisih

pengukuran berada pada rentang 0–10 mm dan nilai *error* antara 0% hingga 1%. Penyimpangan terbesar terjadi pada input 0 mm, yang menghasilkan *error* sebesar 1%, sedangkan sebagian besar titik pengujian lainnya memiliki *error* sangat kecil atau bahkan 0%, seperti pada *input* –40 mm, –20 mm, –10 mm, 20 mm, dan 40 mm. Secara keseluruhan, respon servo pada sumbu Z menunjukkan kinerja stabil dan mampu mengikuti *setpoint* dengan baik, sehingga cukup andal digunakan untuk proses pendeteksian barang cacat 2. Perbandingan hasil ditampilkan pada **Gambar 4.14**.



Gambar 4.14. Hasil Perbandingan Koordinat Z Deteksi 2

Dari hasil pengujian koordinat X, Y, dan Z pada posisi pendeteksian barang cacat 2 diperoleh bahwa lengan robot mampu mengikuti *setpoint* yang diberikan melalui HMI dengan tingkat akurasi yang baik dan konsisten. Pada koordinat X, nilai *error* berada pada 0–1%, sedangkan pada koordinat Y *error* 0–0,09%, dan pada koordinat Z *error* berada 0–1%. Ketiga hasil pengujian tersebut menunjukkan bahwa mekanisme kontrol posisi pada sumbu X, Y, dan Z mampu bekerja stabil dengan deviasi yang kecil serta masih berada dalam batas toleransi sistem. Secara keseluruhan, rata-rata *error* koordinat pada deteksi barang cacat 2 berada pada kisaran $\pm 0,4\%$, sehingga dapat disimpulkan bahwa pergerakan lengan robot pada posisi ini sudah akurat. Perbandingan antara masukkan HMI dan pengukuran ditunjukkan pada **Tabel 4.14**.

Tabel 4.14. Perbandingan Masukkan HMI dan Pengukuran Deteksi 2

Koordinat	Rata-Rata Selisih Masukkan HMI dan Pengukuran (mm)	Rata-Rata Error Masukkan HMI dan Pengukuran (%)
X	3,5	0,14
Y	5,5	0,03
Z	3	0,18

4.8.3. Koordinat Pendeteksian Barang Cacat 3

Pengujian koordinat X, Y, dan Z pada pergerakan lengan robot dilakukan untuk memastikan bahwa sistem mampu menempatkan *end-effector* secara tepat pada posisi pendeteksian barang cacat 3. Hasil dari proses pendeteksian barang cacat 3 dapat dilihat di **Gambar 4.15**.

**Gambar 4.15.** Hasil Pendeteksian Barang Cacat 3

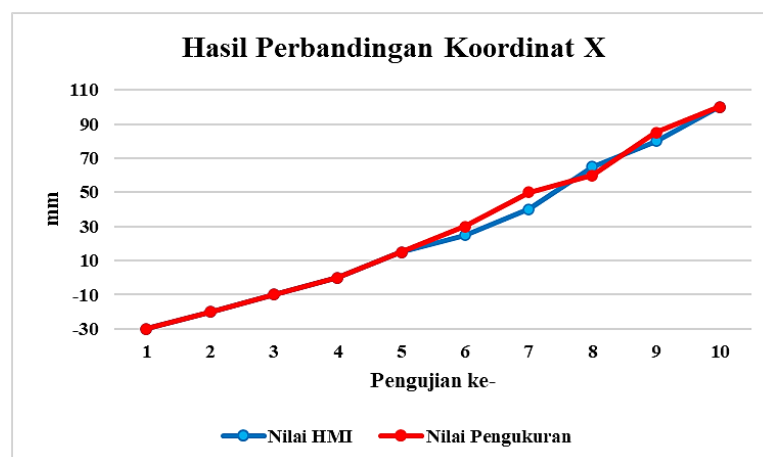
Pada **Gambar 4.15**, ini dilakukan pengujian untuk memverifikasi akurasi gerakan setiap koordinat. Pada tahap ini, nilai koordinat yang dikirim dari HMI akan dibandingkan dengan posisi aktual yang dicapai lengan robot. Koordinat acuan yang berhasil mendeteksi barang cacat 3 yaitu $X=0\text{mm}$, $Y=220\text{mm}$, dan $Z=40\text{mm}$. Hasil pengujian untuk koordinat x deteksi barang cacat 3 dapat dilihat pada **Tabel 4.15**.

Tabel 4.15. Hasil Pengujian Koordinat X Deteksi 3

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
1	-30	-30	0	0

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
2	-20	-20	0	0
3	-10	-10	0	0
4	0	0	0	0
5	15	15	0	0
6	25	30	5	0,17
7	40	50	10	0,20
8	65	60	5	0,08
9	80	85	5	0,06
10	100	100	0	0

Pada **Tabel 4.15.** menunjukkan hasil pengujian koordinat X pada posisi pendeteksian barang cacat 3 dengan membandingkan nilai *input* dari HMI terhadap nilai pengukuran aktual yang dicapai lengan robot. Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa pergerakan koordinat X memiliki akurasi yang sangat baik, ditandai dengan sebagian besar titik pengujian memiliki selisih 0 mm dan *error* 0%. Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa lengan robot mampu mengikuti koordinat X dengan tepat pada area pendeteksian barang cacat 3. Perbandingan hasil ditampilkan pada **Gambar 4.16.**



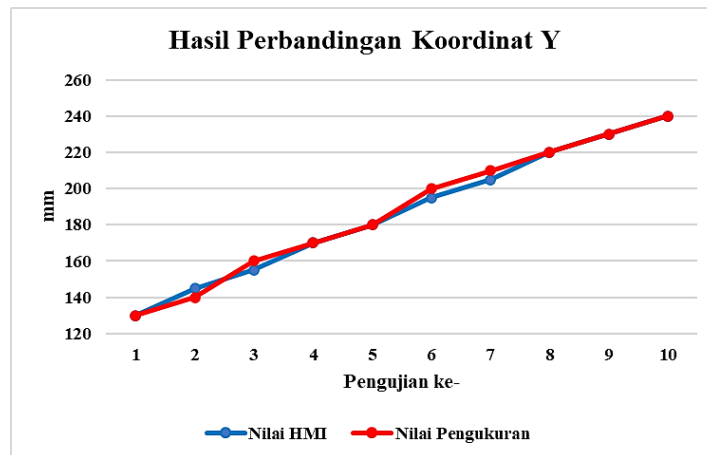
Gambar 4.16. Hasil Perbandingan Koordinat X Deteksi 3

Kemudian dilanjutkan untuk pengujian terhadap koordinat Y pada posisi pendeteksian barang cacat. Pengujian ini tetap sama menggunakan acuan koordinat pada pengujian koordinat X. Hasil pengujian untuk koordinat Y deteksi barang cacat 3 dapat dilihat pada **Tabel 4.16**.

Tabel 4.16. Hasil Pengujian Koordinat Y Deteksi 3

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
1	130	130	0	0
2	145	140	5	0,04
3	155	160	5	0,03
4	170	170	0	0
5	180	180	0	0
6	195	200	5	0,03
7	205	210	5	0,02
8	220	220	0	0
9	230	230	0	0
10	240	240	0	0

Pada **Tabel 4.16**, menunjukkan hasil pengujian koordinat Y pada posisi pendeteksian barang cacat 3 dengan membandingkan nilai *input* HMI terhadap posisi aktual lengan robot. Secara keseluruhan, pergerakan koordinat Y menunjukkan akurasi yang baik, ditandai dengan sebagian besar nilai pengukuran yang sama tepat dengan nilai *input* tanpa selisih, menghasilkan *error* 0% pada sebagian besar titik pengujian. Beberapa penyimpangan kecil terlihat pada *input* 145 mm, 155 mm, 195 mm, dan 205 mm dengan selisih 5 mm dan *error* yang sangat rendah, yaitu hanya 0,02%–0,04%. Dengan *error* yang kecil dan pergerakan yang konsisten, hasil ini menunjukkan bahwa kontrol koordinat Y pada deteksi barang cacat 3 bekerja stabil dan mampu mengikuti *setpoint* yang diberikan secara akurat. Perbandingan hasil ditampilkan pada **Gambar 4.17**.



Gambar 4.17. Hasil Perbandingan Koordinat Y Deteksi 3

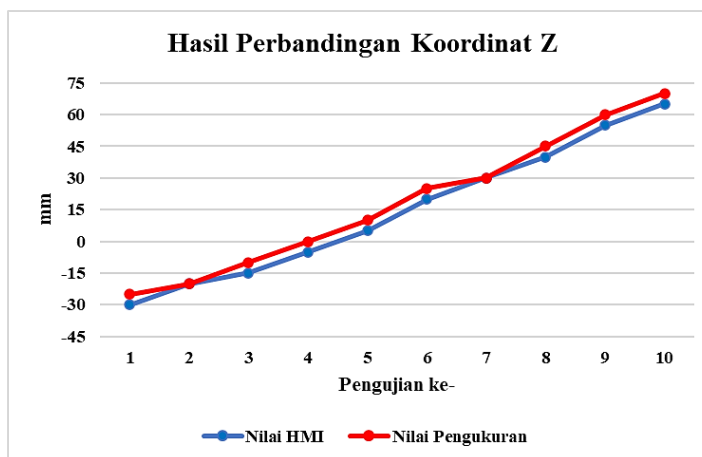
Kemudian dilanjutkan untuk pengujian terhadap koordinat Z pada posisi pendeteksian barang cacat. Pengujian ini tetap sama menggunakan acuan koordinat pada pengujian koordinat X. Hasil pengujian untuk koordinat Z deteksi barang cacat 3 dapat dilihat pada **Tabel 4.17**.

Tabel 4.17. Hasil Pengujian Koordinat Z Deteksi 3

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
1	-30	-25	5	0,20
2	-20	-20	0	0
3	-15	-10	5	0,50
4	-5	-5	0	0
5	5	10	5	0,50
6	20	25	5	0,20
7	30	30	0	0
8	40	45	5	0,11
9	55	60	5	0,08
10	65	70	5	0,07

Pada **Tabel 4.17**, menunjukkan hasil pengujian koordinat Z pada posisi pendeteksian barang cacat 3 dengan membandingkan nilai *input* HMI terhadap posisi aktual yang dicapai lengan robot. Secara umum, akurasi pergerakan koordinat Z cukup baik, dengan selisih yang

konsisten berada pada rentang 0–5 mm. Nilai *error* juga relatif kecil, yaitu antara 0% hingga 0,50%, dengan *error* tertinggi terjadi pada *input* –15 mm dan 5 mm akibat pergerakan mendekati titik tengah yang biasanya lebih sensitif. Pada beberapa titik seperti –20 mm, –5 mm, dan 30 mm, tidak terdapat selisih sehingga *error* tercatat 0%, menunjukkan pergerakan yang presisi. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa kontrol koordinat Z pada deteksi barang cacat 3 bekerja stabil dan masih berada dalam batas toleransi pergerakan yang aman untuk sistem pendeteksian. Perbandingan hasil ditampilkan pada **Gambar 4.18**.



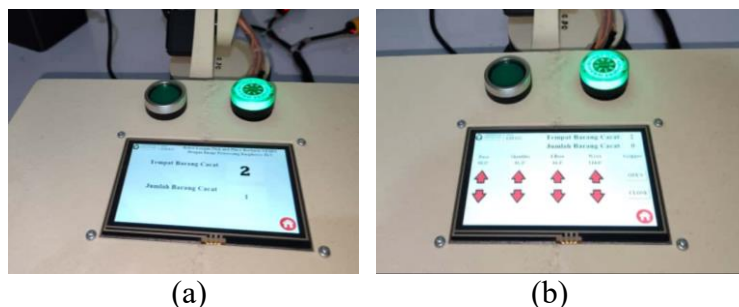
Gambar 4.18. Hasil Perbandingan Koordinat Z Deteksi 3

Dari hasil pengujian koordinat X, Y, dan Z pada posisi pendeteksian barang cacat 3 diperoleh bahwa sistem lengan robot mampu mengikuti *setpoint* yang diberikan melalui HMI dengan tingkat akurasi yang baik. Pada koordinat X, nilai *error* berada 0–0,20%, sedangkan pada koordinat Y nilai *error* antara 0–0,04%, dan pada koordinat Z nilai *error* berada pada 0–0,50%. Ketiga pengujian tersebut menunjukkan bahwa pergerakan lengan robot stabil, konsisten, dan berada dalam batas toleransi yang aman untuk proses pendeteksian. Secara keseluruhan, rata-rata *error* pada koordinat X, Y, dan Z untuk deteksi barang cacat 3 berada pada kisaran $\pm 0,25\%$, sehingga dapat disimpulkan bahwa pergerakan lengan robot pada posisi ini sangat akurat. Perbandingan antara masukkan HMI dan pengukuran ditunjukkan pada **Tabel 4.18**.

Tabel 4.18. Perbandingan Masukkan HMI dan Pengukuran Deteksi 3

Koordinat	Rata-Rata Selisih Masukkan HMI dan Pengukuran (mm)	Rata-Rata Error Masukkan HMI dan Pengukuran (%)
X	2,5	0,05
Y	2	0,01
Z	4	0,17

Setelah lengan robot melakukan proses pendeteksian terhadap tiga barang, informasi mengenai posisi barang cacat ini diperoleh dari hasil pemrosesan citra pada Raspberry Pi, kemudian data posisi tersebut dikirimkan ke mikrokontroler STM32 melalui komunikasi UART. Selanjutnya, STM32 mengirim ke HMI Nextion. Pada tampilan HMI Nextion, posisi barang cacat ditampilkan dalam mode otomatis, di mana lengan robot langsung mengambil barang cacat sesuai posisi yang terdeteksi, maupun pada mode manual, di mana operator dapat mengoperasikan lengan robot untuk pengambilan barang cacat. Tampilan HMI Nextion dapat dilihat pada **Gambar 4.19**.

**Gambar 4.19.** (a) Otomatis dan (b) Manual Tampilan HMI Deteksi Barang Cacat

4.8.4. Koordinat Pengambilan Barang Cacat 1

Pengujian koordinat X, Y, dan Z pada pergerakan lengan robot dilakukan untuk memastikan bahwa sistem mampu menempatkan *end-effector* secara tepat pada posisi pengambilan barang cacat 1. Hasil dari proses pengambilan barang cacat 1 dapat dilihat di **Gambar 4.20**.



Gambar 4.20. Hasil Pengambilan Barang Cacat 1

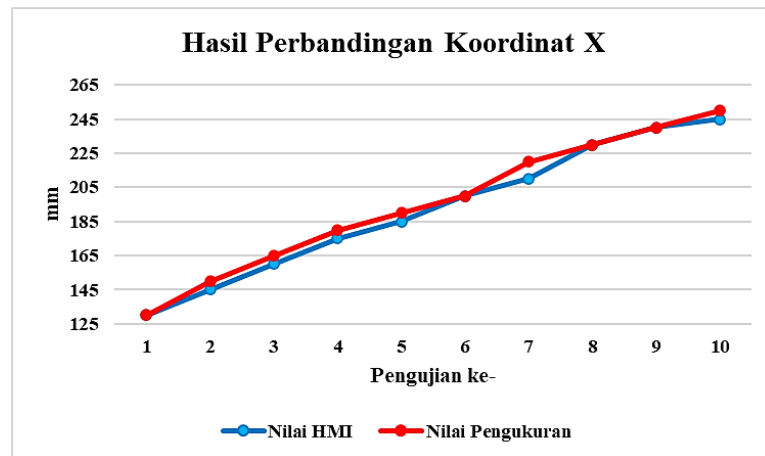
Pada **Gambar 4.20.** ini dilakukan pengujian untuk memverifikasi akurasi gerakan setiap koordinat. Pada tahap ini, nilai koordinat yang dikirim dari HMI akan dibandingkan dengan posisi aktual yang dicapai lengan robot. Koordinat acuan yang berhasil mengambil barang cacat 1 yaitu $X=240\text{mm}$, $Y=130\text{mm}$, dan $Z=-40\text{mm}$. Hasil pengujian untuk koordinat x deteksi barang cacat 1 dapat dilihat pada **Tabel 4.19.**

Tabel 4.19. Hasil Pengujian Koordinat X Ambil 1

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
1	130	130	0	0
2	145	150	5	0,03
3	160	165	5	0,03
4	175	180	5	0,03
5	185	190	5	0,03
6	200	200	0	0
7	210	220	10	0,05
8	230	230	0	0
9	240	240	0	0
10	245	250	5	0,02

Pada **Tabel 4.19.** menunjukkan hasil pengujian koordinat X pada proses pengambilan barang cacat 1 dengan membandingkan nilai *input* HMI terhadap posisi aktual yang dicapai lengan robot. Sebagian besar titik memiliki selisih kecil antara 0–10 mm dan nilai *error* rendah, yaitu 0–0,05%. Beberapa penyimpangan kecil terjadi pada *input* 145–185 mm

serta 210 mm dan 245 mm, namun besarnya selisih hanya 5–10 mm dan masih dalam batas toleransi sistem. Hasil ini menunjukkan bahwa kontrol koordinat X pada area pengambilan barang cacat 1 bekerja stabil. Perbandingan hasil ditampilkan pada **Gambar 4.21**.



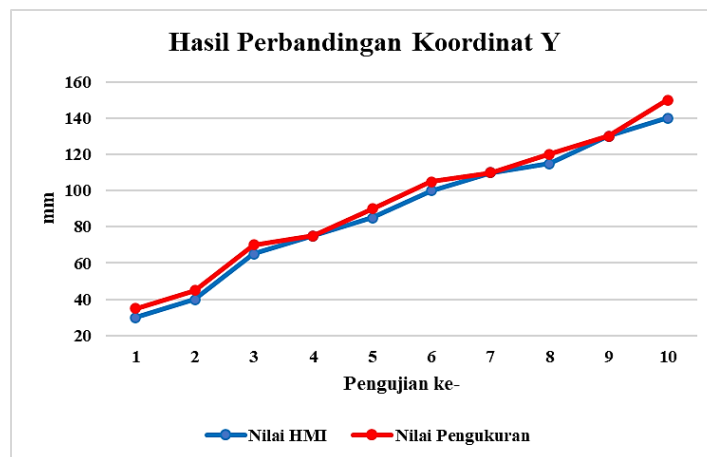
Gambar 4.21. Hasil Perbandingan Koordinat X Ambil 1

Kemudian dilanjutkan untuk pengujian terhadap koordinat Y pada posisi pengambilan barang cacat. Pengujian ini tetap sama menggunakan acuan koordinat pada pengujian koordinat X. Hasil pengujian koordinat Y ambil barang cacat 1 dapat dilihat **Tabel 4.20**.

Tabel 4.20. Hasil Pengujian Koordinat Y Ambil 1

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
1	30	35	5	0,14
2	40	45	5	0,11
3	65	70	5	0,07
4	75	75	0	0
5	85	90	5	0,06
6	100	105	5	0,05
7	110	110	0	0
8	115	120	5	0,04
9	130	130	0	0
10	140	150	10	0,07

Pada **Tabel 4.20.** menunjukkan hasil pengujian koordinat Y pada proses pengambilan barang cacat 1 dengan membandingkan nilai *input* dari HMI terhadap posisi aktual yang dicapai lengan robot. Secara keseluruhan, akurasi pergerakan koordinat Y baik, dengan selisih pengukuran yang berada pada rentang 0–10 mm dan nilai *error* kecil, yaitu antara 0-0,14%. Beberapa penyimpangan kecil terjadi pada sebagian besar titik seperti 30 mm, 40 mm, 65 mm, 85 mm, dan 100 mm, namun nilai *error* tetap rendah dan masih dalam toleransi sistem. Secara keseluruhan menunjukkan bahwa kontrol koordinat Y pada area ambil barang cacat 1 stabil. Perbandingan hasil ditampilkan **Gambar 4.22.**



Gambar 4.22. Hasil Perbandingan Koordinat Y Ambil 1

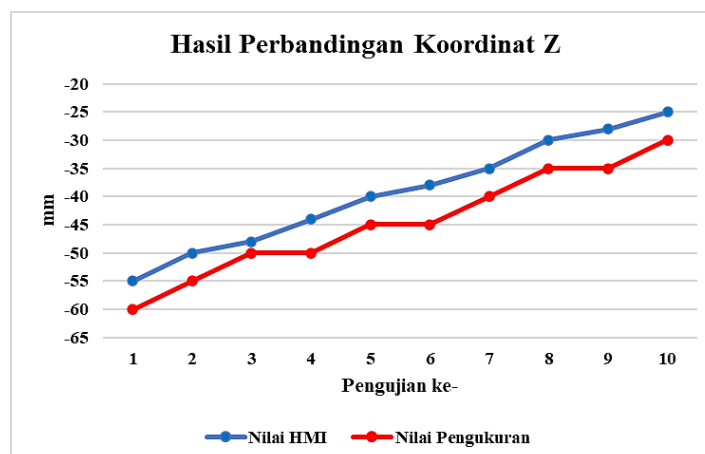
Kemudian dilanjutkan untuk pengujian terhadap koordinat Z pada posisi pengambilan barang cacat 1. Pengujian tetap sama menggunakan acuan koordinat pada pengujian koordinat X. Hasil pengujian untuk koordinat Z ambil barang cacat 1 dapat dilihat pada **Tabel 4.21.**

Tabel 4.21. Hasil Pengujian Koordinat Z Ambil 1

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
1	-55	-60	5	0,08
2	-50	-55	5	0,09
3	-48	-50	2	0,04
4	-44	-50	6	0,12

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
5	-40	-45	5	0,11
6	-38	-45	7	0,16
7	-35	-40	5	0,13
8	-30	-35	5	0,14
9	-28	-35	7	0,20
10	-25	-30	5	0,17

Pada **Tabel 4.21**, menunjukkan hasil pengujian koordinat Z pada proses pengambilan barang cacat 1 dengan membandingkan nilai *input* HMI terhadap posisi aktual yang dicapai lengan robot. Secara umum, hasil pengujian menunjukkan bahwa pergerakan sumbu Z masih dalam batas toleransi dengan selisih antara 2–7 mm dan *error* berkisar antara 0,04% hingga 0,20%. Meskipun terdapat beberapa deviasi kecil, nilai *error* tetap rendah dan menunjukkan bahwa pergerakan *servo* pada sumbu Z bekerja cukup stabil. Rentang data pengujian hanya dilakukan dari –25 mm hingga –55 mm, karena posisi –25 mm telah mencapai batas maksimal. Sebaliknya, nilai –55 mm merupakan batas terendah, karena *gripper* sudah menyentuh meja kerja. Dengan demikian, pengujian dilakukan dalam rentang aman yang sesuai dengan batas fisik pergerakan lengan robot. Perbandingan hasil ditampilkan pada **Gambar 4.23**.



Gambar 4.23. Hasil Perbandingan Koordinat Z Ambil 1

Dari hasil pengujian koordinat X, Y, dan Z pada posisi pengambilan barang cacat 1 diperoleh bahwa lengan robot mampu mengikuti *setpoint* dari HMI. Pada koordinat X, nilai *error* 0–0,05%, sedangkan koordinat Y nilai *error* 0–0,14%, dan koordinat Z nilai *error* 0,04–0,20%. Rentang pengujian sumbu Z dibatasi pada –25 mm hingga –55 mm karena –25 mm merupakan batas maksimal kenaikan lengan robot, sedangkan –55 mm merupakan batas terendah yang sudah mencapai dasar meja kerja. Secara keseluruhan, rata-rata *error* pengujian koordinat berada pada kisaran $\pm 0,13\%$, sehingga pergerakan lengan robot dapat dinilai akurat. Perbandingan antara masukkan HMI dan pengukuran ditunjukkan pada **Tabel 4.22**.

Tabel 4.22. Perbandingan Masukkan HMI dan Pengukuran Ambil 1

Koordinat	Rata-Rata Selisih Masukkan HMI dan Pengukuran (mm)	Rata-Rata Error Masukkan HMI dan Pengukuran (%)
X	3,5	0,02
Y	4	0,05
Z	5,2	0,12

4.8.5. Koordinat Pengambilan Barang Cacat 2

Pengujian koordinat X, Y, dan Z pada pergerakan lengan robot dilakukan untuk memastikan bahwa sistem mampu menempatkan *end-effector* secara tepat pada posisi pengambilan barang cacat 2. Hasil dari proses pengambilan barang cacat 2 dapat dilihat di **Gambar 4.24**.



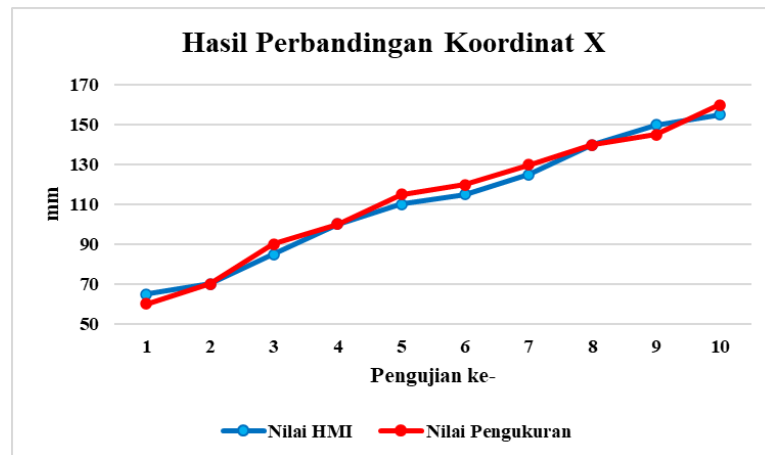
Gambar 4.24. Hasil Pengambilan Barang Cacat 2

Pada **Gambar 4.24.** ini dilakukan pengujian untuk memverifikasi akurasi gerakan setiap koordinat. Pada tahap ini, nilai koordinat yang dikirim dari HMI akan dibandingkan dengan posisi aktual yang dicapai lengan robot. Koordinat acuan yang berhasil mengambil barang cacat 2 yaitu $X=150\text{mm}$, $Y=230\text{mm}$, dan $Z=-40\text{mm}$. Hasil pengujian untuk koordinat x deteksi barang cacat 2 dapat dilihat pada **Tabel 4.23.**

Tabel 4.23. Hasil Pengujian Koordinat X Ambil 2

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
1	65	60	5	0,08
2	70	70	0	0
3	85	90	5	0,06
4	100	100	0	0
5	110	115	5	0,04
6	115	120	5	0,04
7	125	130	5	0,04
8	140	140	0	0
9	150	145	5	0,03
10	155	160	5	0,03

Pada **Tabel 4.23.** menunjukkan hasil pengujian akurasi pergerakan koordinat X pada posisi ambil barang cacat 2 dengan membandingkan nilai *input* dari HMI terhadap hasil pengukuran posisi aktual lengan robot. Dari sepuluh kali pengujian, sebagian besar selisih berada pada rentang 0–5 mm, dengan persentase *error* sangat kecil antara 0% hingga 0,08%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kendali servo mampu mengikuti *setpoint* koordinat dengan cukup baik, meskipun masih terdapat deviasi kecil pada beberapa titik akibat faktor mekanik, dan toleransi struktur lengan robot. Perbandingan hasil ditampilkan pada **Gambar 4.25.**



Gambar 4.25. Hasil Perbandingan Koordinat X Ambil 2

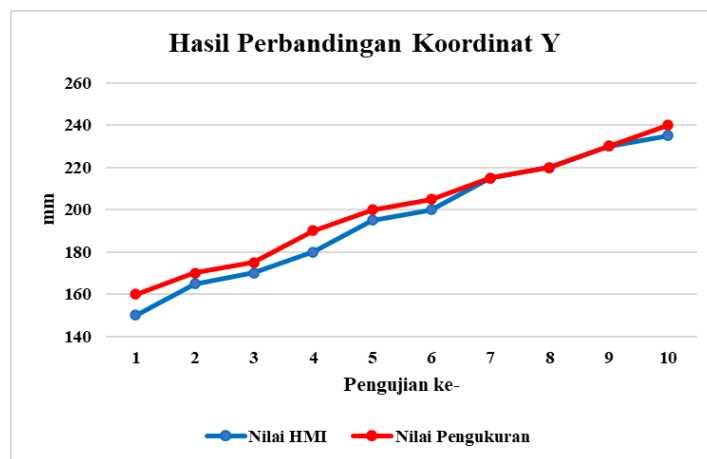
Kemudian dilanjutkan untuk pengujian terhadap koordinat Y pada posisi pengambilan barang cacat 2. Pengujian ini tetap sama menggunakan acuan koordinat pada pengujian koordinat X. Hasil pengujian untuk koordinat Y ambil barang cacat 2 dapat dilihat pada **Tabel 4.24.**

Tabel 4.24. Hasil Pengujian Koordinat Y Ambil 2

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
1	150	160	10	0,06
2	165	170	5	0,03
3	170	175	5	0,03
4	180	190	10	0,05
5	195	200	5	0,03
6	200	205	5	0,02
7	215	215	0	0
8	220	220	0	0
9	230	230	0	0
10	235	240	5	0,02

Pada **Tabel 4.24.** menunjukkan hasil pengujian akurasi koordinat Y pada posisi ambil barang cacat 2 dengan membandingkan nilai *input* dari HMI terhadap nilai pengukuran aktual. Berdasarkan sepuluh

pengujian, selisih posisi berada dalam rentang 0–10 mm dengan persentase *error* relatif kecil, yaitu 0% hingga 0,06%. Deviasi terbesar terjadi pada titik *input* 150 mm dan 180 mm dengan selisih 10 mm, sedangkan titik lainnya menunjukkan akurasi cukup baik dengan selisih hanya 0–5 mm. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa pergerakan pada sumbu Y berjalan cukup stabil dan mampu mengikuti *setpoint* dengan baik, meskipun tetap terdapat sedikit ketidaksesuaian yang disebabkan oleh toleransi mekanik atau keterlambatan respons servo. Perbandingan hasil ditampilkan pada **Gambar 4.26**.



Gambar 4.26. Hasil Perbandingan Koordinat Y Ambil 2

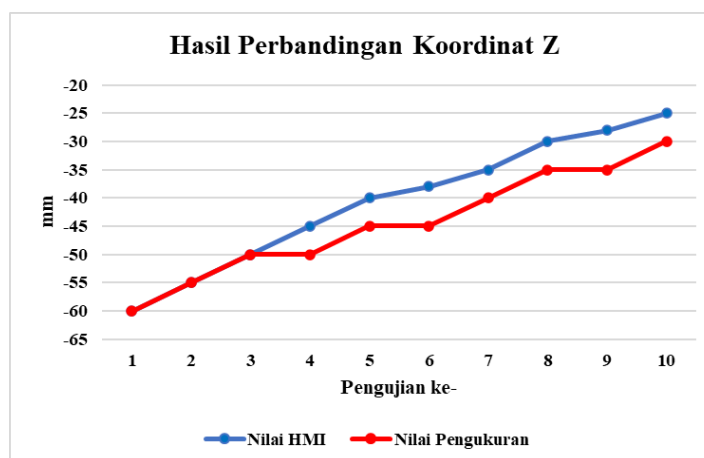
Kemudian dilanjutkan untuk pengujian terhadap koordinat Z pada posisi pengambilan barang cacat 2. Pengujian tetap sama menggunakan acuan koordinat pada pengujian koordinat X. Hasil pengujian untuk koordinat Z ambil barang cacat 2 dapat dilihat pada **Tabel 4.25**.

Tabel 4.25. Hasil Pengujian Koordinat Z Ambil 2

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
1	-60	-60	0	0
2	-55	-55	0	0
3	-50	-50	0	0
4	-45	-50	5	0,10
5	-40	-45	5	0,11

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
6	-38	-45	7	0,16
7	-35	-40	5	0,13
8	-30	-35	5	0,14
9	-28	-35	7	0,20
10	-25	-30	5	0,17

Pada **Tabel 4.25.** menunjukkan hasil pengujian akurasi koordinat Z pada posisi ambil barang cacat 2 dengan membandingkan nilai *input* HMI terhadap posisi aktual yang dicapai lengan robot. Dari sepuluh data pengujian, nilai pengukuran menunjukkan bahwa rentang pergerakan yang diuji berada antara -25 mm hingga -60 mm, karena -25 mm merupakan batas maksimum kenaikan, sedangkan -60 mm mendekati dasar meja kerja. Hasil pengujian memperlihatkan pada nilai koordinat yang lebih tinggi seperti -45 mm hingga -25 mm, mulai muncul deviasi 5–7 mm dengan *error* berkisar 0,10% hingga 0,20%. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa pergerakan sumbu Z bekerja dengan baik pada rentang tertentu, namun terdapat sedikit ketidaktepatan di bagian atas pergerakan akibat keterbatasan mekanik dan toleransi aktuator servo. Perbandingan hasil ditampilkan pada **Gambar 4.27.**



Gambar 4.27. Hasil Perbandingan Koordinat Z Ambil 2

Berdasarkan hasil pengujian koordinat X, Y, dan Z pada posisi pengambilan barang cacat 2, dapat disimpulkan bahwa sistem kendali lengan robot mampu mengikuti nilai *setpoint* yang dikirim dari HMI dengan tingkat akurasi yang cukup baik. Pada koordinat X, selisih maksimum adalah 5 mm dengan *error* terbesar 0,08%. Pada koordinat Y, deviasi terbesar 10 mm dengan *error* maksimum 0,06%. Sementara itu, pada koordinat Z, dengan *error* tertinggi 0,20% pada rentang pergerakan mendekati batas maksimal. Secara keseluruhan, nilai *error* pada ketiga sumbu berada pada kisaran 0–0,20%, yang menunjukkan bahwa sistem sudah cukup presisi. Perbandingan antara masukkan HMI dan pengukuran ditunjukkan pada **Tabel 4.26**.

Tabel 4.26. Perbandingan Masukkan HMI dan Pengukuran Ambil 2

Koordinat	Rata-Rata Selisih Masukkan HMI dan Pengukuran (mm)	Rata-Rata Error Masukkan HMI dan Pengukuran (%)
X	3,5	0,03
Y	4,5	0,02
Z	3,9	0,1

4.8.6. Koordinat Pengambilan Barang Cacat 3

Pengujian koordinat X, Y, dan Z pada pergerakan lengan robot dilakukan untuk memastikan bahwa sistem mampu menempatkan *end-effector* secara tepat pada posisi pengambilan barang cacat 3. Hasil dari proses pengambilan barang cacat 3 dapat dilihat di **Gambar 4.28**.



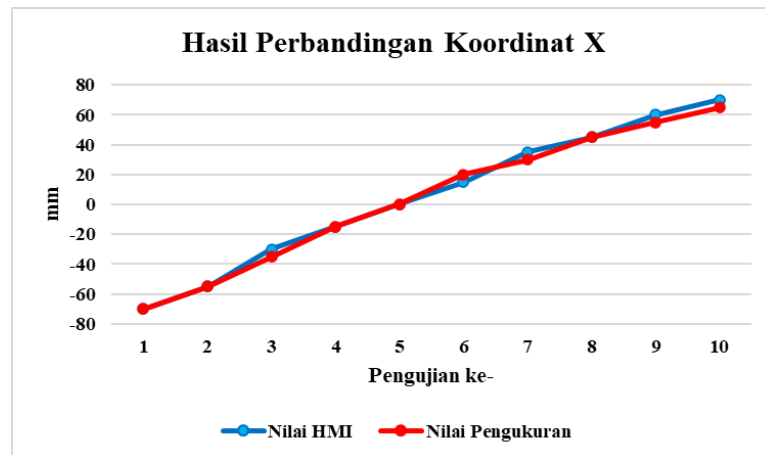
Gambar 4.28. Hasil Pengambilan Barang Cacat 3

Pada **Gambar 4.28.** ini dilakukan pengujian untuk memverifikasi akurasi gerakan setiap koordinat. Pada tahap ini, nilai koordinat yang dikirim dari HMI akan dibandingkan dengan posisi aktual yang dicapai lengan robot. Koordinat acuan yang berhasil mengambil barang cacat 3 yaitu $X=0\text{mm}$, $Y=275\text{mm}$, dan $Z=-40\text{mm}$. Hasil pengujian untuk koordinat x deteksi barang cacat 3 dapat dilihat pada **Tabel 4.27.**

Tabel 4.27. Hasil Pengujian Koordinat X Ambil 3

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
1	-70	-70	0	0
2	-55	-55	0	0
3	-30	-35	5	-0,14
4	-15	-15	0	0
5	0	0	0	0
6	15	20	5	0,25
7	35	30	5	0,17
8	45	45	0	0
9	60	55	5	0,09
10	70	65	5	0,08

Pada **Tabel 4.27.** menunjukkan hasil pengujian koordinat X pada posisi pengambilan barang cacat 3 dengan membandingkan nilai *input* dari HMI terhadap posisi aktual lengan robot. Secara umum, pergerakan sumbu X menunjukkan respons yang cukup baik, di mana sebagian besar nilai pengukuran memiliki selisih kecil, yaitu 0–5 mm. *Error* yang muncul juga relatif rendah, berada dalam rentang 0% hingga sekitar 0,25%, menunjukkan bahwa servo mampu mengikuti *setpoint* dengan cukup stabil. Beberapa deviasi kecil, seperti pada *input* -30 mm, 15 mm, dan 35 mm, masih terjadi namun tidak mengganggu akurasi keseluruhan sistem. Perbandingan hasil ditampilkan pada **Gambar 4.29.**



Gambar 4.29. Hasil Perbandingan Koordinat X Ambil 3

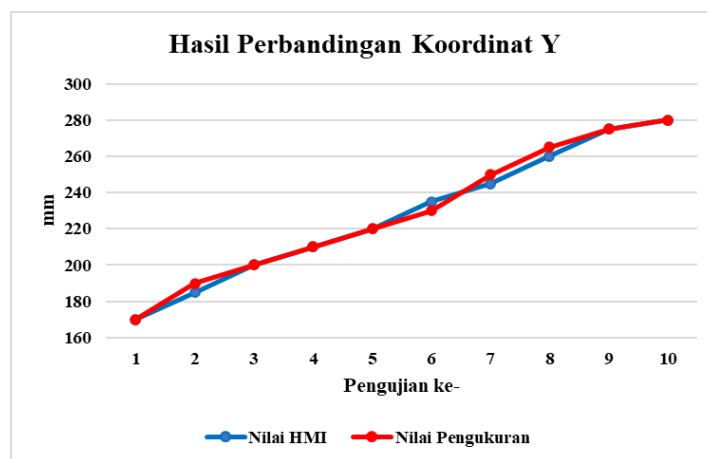
Kemudian dilanjutkan untuk pengujian terhadap koordinat Y pada posisi pengambilan barang cacat 3. Pengujian ini tetap sama menggunakan acuan koordinat pada pengujian koordinat X. Hasil pengujian untuk koordinat Y ambil barang cacat 3 dapat dilihat pada **Tabel 4.28.**

Tabel 4.28. Hasil Pengujian Koordinat Y Ambil 3

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
1	170	170	0	0
2	185	190	5	0,03
3	200	200	0	0
4	210	210	0	0
5	220	220	0	0
6	235	230	5	0,02
7	245	250	5	0,02
8	260	265	5	0,02
9	275	275	0	0
10	280	280	0	0

Pada **Tabel 4.28.** menunjukkan hasil pengujian koordinat Y pada posisi pengambilan barang cacat 3 dengan membandingkan nilai input HMI terhadap posisi aktual lengan robot. Secara keseluruhan, hasil

pengujian menunjukkan bahwa pergerakan sumbu Y memiliki akurasi yang baik, ditandai dengan sebagian besar nilai pengukuran yang sesuai dengan *input* tanpa selisih, yaitu 0 mm. Beberapa penyimpangan kecil sebesar 5 mm muncul pada beberapa titik pengujian, namun nilai *error* tetap sangat rendah, berada pada kisaran 0,02% hingga 0,03%. Rendahnya nilai *error* ini menunjukkan bahwa mekanisme kontrol pada sumbu Y bekerja dengan stabil. Perbandingan hasil ditampilkan pada **Gambar 4.30**.



Gambar 4.30. Hasil Perbandingan Koordinat Y Ambil 3

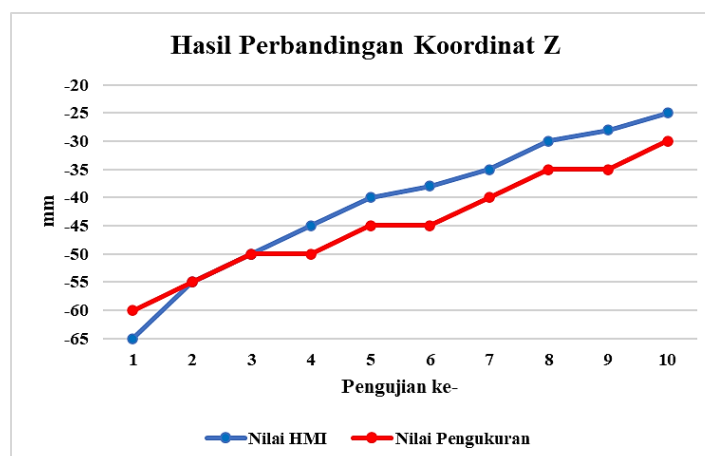
Kemudian dilanjutkan untuk pengujian terhadap koordinat Z pada posisi pengambilan barang cacat 3. Pengujian tetap sama menggunakan acuan koordinat pada pengujian koordinat X. Hasil pengujian untuk koordinat Z ambil barang cacat 3 dapat dilihat pada **Tabel 4.29**.

Tabel 4.29. Hasil Pengujian Koordinat Z Ambil 3

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
1	-65	-60	5	0,08
2	-55	-55	0	0
3	-50	-50	0	0
4	-45	-50	5	0,10
5	-40	-45	5	0,11
6	-38	-45	7	0,16

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
7	-35	-40	5	0,13
8	-30	-35	5	0,14
9	-28	-35	7	0,20
10	-25	-30	5	0,17

Pada **Tabel 4.29**, menunjukkan hasil pengujian koordinat Z pada posisi pengambilan barang cacat 3 dengan membandingkan nilai input dari HMI terhadap posisi aktual yang dicapai lengan robot. Rentang pengujian hanya dilakukan dari $Z = -25$ mm hingga $Z = -65$ mm karena posisi -25 mm merupakan batas maksimum ketinggian, sedangkan -65 mm mendekati batas bawah meja kerja. Dari hasil pengukuran terlihat bahwa sebagian besar titik memiliki selisih antara 0–7 mm dengan nilai *error* berkisar antara 0% hingga 0,20%. Penyimpangan terbesar muncul pada *input* -38 mm dan -28 mm dengan selisih 7 mm. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa pergerakan sumbu Z pada area pengambilan barang cacat 3 masih dapat mengikuti *setpoint* dengan baik. Perbandingan hasil ditampilkan pada **Gambar 4.31**.



Gambar 4.31. Hasil Perbandingan Koordinat Z Ambil 3

Berdasarkan hasil pengujian koordinat X, Y, dan Z pada posisi pengambilan barang cacat 3, dapat disimpulkan bahwa lengan robot mampu mengikuti *setpoint* yang diberikan melalui HMI dengan tingkat

akurasi yang baik. Pada koordinat X, nilai *error* 0–0,25%, pada koordinat Y *error* 0–0,03%, sedangkan pada koordinat Z *error* 0–0,20%. Pengujian koordinat Z dilakukan hanya pada rentang –25 mm hingga –65 mm karena –25 mm merupakan batas maksimum ketinggian lengan robot saat bergerak naik, sementara –65 mm mendekati batas bawah meja kerja sehingga tidak dapat diturunkan lebih jauh untuk menjaga keamanan sistem. Secara keseluruhan, ketiga pengujian koordinat menunjukkan bahwa sistem kontrol lengan robot pada area pengambilan barang cacat 3 bekerja stabil dan presisi. Perbandingan antara masukkan HMI dan pengukuran ditunjukkan pada **Tabel 4.30**.

Tabel 4.30. Perbandingan Masukkan HMI dan Pengukuran Ambil 3

Koordinat	Rata-Rata Selisih Masukkan HMI dan Pengukuran (mm)	Rata-Rata Error Masukkan HMI dan Pengukuran (%)
X	2,5	0,04
Y	2	0,01
Z	4,4	0,11

4.8.7. Koordinat Pelepasan Barang Cacat

Pengujian koordinat X, Y, dan Z pada pergerakan lengan robot dilakukan untuk memastikan bahwa sistem mampu menempatkan *end-effector* secara tepat pada posisi pelepasan barang cacat ke dalam *garbage box*. Hasil dari proses pelepasan barang cacat ke dalam *garbage box* dapat dilihat di **Gambar 4.32**.



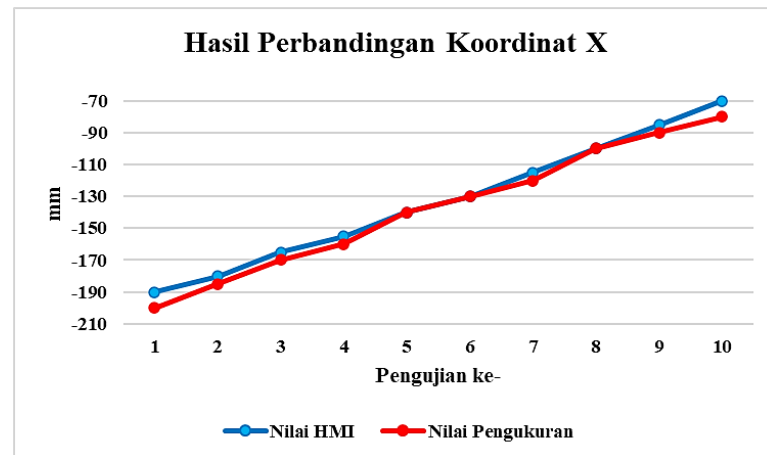
Gambar 4.32. Hasil Pelepasan Barang Cacat ke *Garbage box*

Pada **Gambar 4.32.** ini dilakukan pengujian untuk memverifikasi akurasi gerakan setiap koordinat. Pada tahap ini, nilai koordinat yang dikirim dari HMI akan dibandingkan dengan posisi aktual yang dicapai lengan robot. Koordinat acuan yang berhasil melepas barang cacat ke dalam *garbage box* yaitu $X = -190\text{mm}$, $Y = 100\text{mm}$, dan $Z = 80\text{mm}$. Hasil pengujian untuk koordinat x pelepasan barang cacat ke dalam *garbage box* dapat dilihat pada **Tabel 4.27.**

Tabel 4.31. Hasil Pengujian Koordinat X Pelepasan Barang Cacat

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
1	-190	-200	10	0,05
2	-180	-185	5	0,03
3	-165	-170	5	0,03
4	-155	-160	5	0,03
5	-140	-140	0	0
6	-130	-130	0	0
7	-115	-120	5	0,04
8	-100	-100	0	0,00
9	-85	-90	5	0,06
10	-70	-80	10	0,13

Pada **Tabel 4.27.** menunjukkan hasil pengujian koordinat X pada proses pelepasan barang cacat ke *garbagebox*, di mana nilai *input* dari HMI dibandingkan dengan posisi aktual yang dicapai lengan robot. Secara umum, pergerakan lengan robot menunjukkan respons yang cukup akurat dengan selisih antara 0-10 mm dan nilai *error* relatif kecil, yaitu 0–0,13%. Beberapa penyimpangan kecil, seperti pada nilai *input* – 190 mm dan –70 mm, disebabkan oleh keterbatasan mekanis serta akumulasi toleransi motor saat bergerak pada jarak ekstrem. Secara keseluruhan, tabel ini mengindikasikan bahwa koordinat X dapat dicapai dengan stabil. Perbandingan hasil ditampilkan pada **Gambar 4.33.**



Gambar 4.33. Hasil Perbandingan Koordinat X Pelepasan Barang Cacat

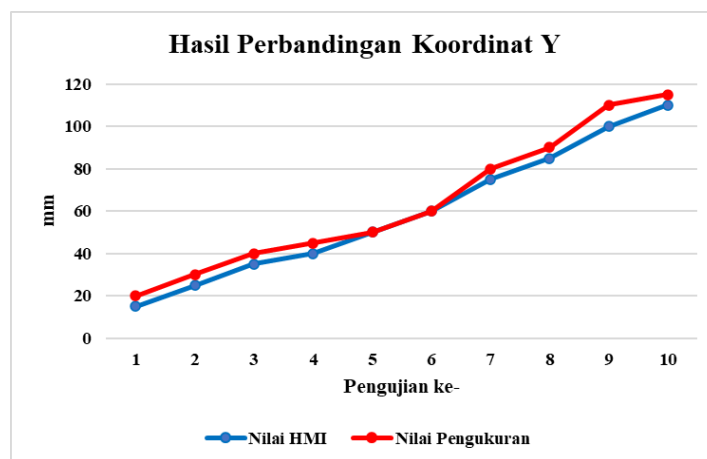
Kemudian dilanjutkan untuk pengujian terhadap koordinat Y pada posisi pengambilan barang cacat 3. Pengujian ini tetap sama menggunakan acuan koordinat pada pengujian koordinat X. Hasil pengujian untuk koordinat Y ambil barang cacat 3 dapat dilihat pada **Tabel 4.28**.

Tabel 4.32. Hasil Pengujian Koordinat Y Pelepasan Barang Cacat

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
1	15	20	5	0,25
2	25	30	5	0,17
3	35	40	5	0,13
4	40	45	5	0,11
5	50	50	0	0
6	60	60	0	0
7	75	80	5	0,06
8	85	90	5	0,06
9	100	110	10	0,09
10	110	115	5	0,04

Pada **Tabel 4.28**, menunjukkan hasil pengujian koordinat Y pada proses pelepasan barang cacat, di mana nilai *input* dari HMI dibandingkan dengan posisi aktual lengan robot. Berdasarkan data,

selisih pergerakan berada pada rentang 0-10 mm dengan nilai error antara 0–0,25%. Nilai *error* terbesar muncul pada *input* 15 mm dengan *error* 0,25%, yang kemungkinan disebabkan oleh posisi lengan yang masih berada pada area awal gerak sehingga toleransi mekanis lebih terasa. Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa koordinat Y pada posisi pelepasan barang cacat dapat dicapai secara stabil. Perbandingan hasil ditampilkan pada **Gambar 4.34**.



Gambar 4.34. Hasil Perbandingan Koordinat Y Pelepasan Barang Cacat

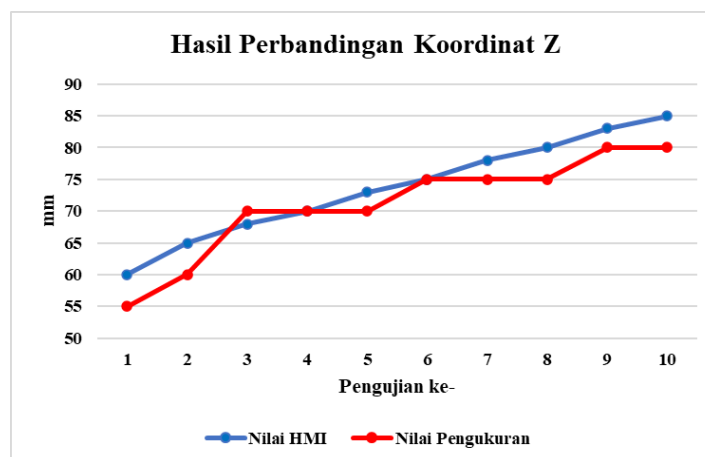
Kemudian dilanjutkan untuk pengujian terhadap koordinat Z pada posisi pelepasan barang cacat ke dalam *garbage box*. Pengujian tetap sama menggunakan acuan koordinat pada pengujian koordinat X. Hasil pengujian untuk koordinat Z pelepasan barang cacat ke dalam *garbage box* dapat dilihat pada **Tabel 4.29**.

Tabel 4.33. Hasil Pengujian Koordinat Z Pelepasan Barang Cacat

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
1	60	55	5	0,09
2	65	60	5	0,08
3	68	70	2	0,03
4	70	70	0	0
5	73	70	3	0,04
6	75	75	0	0

No	Nilai <i>Input</i> HMI (mm)	Nilai Pengukuran (mm)	Selisih (mm)	<i>Error</i> (%)
7	78	75	3	0,04
8	80	75	5	0,07
9	83	80	3	0,04
10	85	80	5	0,06

Pada **Tabel 4.29**, menunjukkan hasil pengujian koordinat Z pada proses pelepasan barang cacat, di mana nilai *input* HMI dibandingkan dengan posisi aktual yang dicapai lengan robot. Berdasarkan data, selisih 0–5 mm dengan nilai *error* antara 0–0,09%. Titik-titik uji sebagian besar menunjukkan *error* kecil (0–0,07%), menandakan mekanisme penggerak sumbu Z mampu mengikuti *setpoint* dengan cukup stabil dan akurat. *Error* terbesar sebesar 0,09% terjadi pada *input* 60 mm, yang masih berada dalam batas toleransi sistem. Secara keseluruhan, akurasi koordinat Z pada tahap pelepasan barang cacat dengan baik. Perbandingan hasil ditampilkan pada **Gambar 4.35**.



Gambar 4.35. Hasil Perbandingan Koordinat Z Pelepasan Barang Cacat

Berdasarkan hasil pengujian koordinat X, Y, dan Z pada posisi pelepasan barang cacat ke *garbagebox*, diperoleh bahwa sistem lengan robot mampu mengikuti *setpoint* yang diberikan melalui HMI dengan tingkat akurasi yang cukup baik. Pada koordinat X, nilai *error* berada 0–0,13%, pada koordinat Y nilai *error* antara 0–0,25%, dan koordinat Z

nilai error berada 0–0,09%. Ketiga hasil pengujian menunjukkan bahwa pergerakan lengan robot pada pelepasan barang dapat berjalan dengan baik, di mana seluruh error masih dalam batas toleransi sistem. Dengan rata-rata error keseluruhan yang di bawah 0,2%, mekanisme kontrol dan respons servo dapat dinilai stabil dan akurat. Perbandingan antara masukkan HMI dan pengukuran ditunjukkan pada **Tabel 4.30**.

Tabel 4.34. Perbandingan Masukkan HMI dan Pengukuran Pelepasan Barang Cacat

Koordinat	Rata-Rata Selisih Masukkan HMI dan Pengukuran (mm)	Rata-Rata Error Masukkan HMI dan Pengukuran (%)
X	4,5	0,04
Y	4,5	0,09
Z	3,1	0,05

Pada saat proses pelepasan barang cacat ke *garbage box*, digunakan sensor infrared E18-D80NK yang dipasang pada *garbage box* untuk mendeteksi dan menghitung jumlah barang cacat yang berhasil masuk. Setiap kali barang melewati sensor, sinyal deteksi akan dikirimkan ke mikrokontroler STM32. Data jumlah barang cacat ini kemudian ditampilkan secara *real-time* pada layar HMI Nextion, baik ketika sistem bekerja dalam mode otomatis maupun manual. Tampilan HMI Nextion dapat dilihat pada **Gambar 4.36**.



Gambar 4.36. (a) Otomatis dan (b) Manual Jumlah Barang Cacat *Garbage Box*

Pada saat barang cacat masuk ke *garbage box*, sistem akan secara otomatis menghitung jumlah barang yang terdeteksi oleh sensor infrared.

Tampilan jumlah barang cacat ini diperbarui secara real-time pada layar HMI Nextion, sehingga pengguna dapat memantau baik dalam mode otomatis maupun manual. Sistem dibatasi hingga jumlah maksimal empat barang cacat yang dapat masuk ke dalam garbage box. Apabila jumlah barang sudah mencapai batas tersebut, maka secara otomatis akan muncul notifikasi berupa peringatan “GARBAGE BOX PENUH” pada tampilan HMI. Tampilan HMI Nextion dapat dilihat pada **Gambar 4.37**.



Gambar 4.37. (a) Otomatis dan (b) Manual Notifikasi Garbage Box Penuh

4.9. Analisa Pengujian

Hasil pengujian catu daya yang menggunakan *power supply* 12VDC 10A dan modul *stepdown* XL4016 dengan keluaran 5VDC menunjukkan performa yang stabil terhadap variasi beban. Tegangan keluaran mampu mendekati nilai nominal, dengan efisiensi antara 82% hingga 85%. Efisiensi ini cukup baik untuk penggunaan sistem secara berkelanjutan. Hal ini membuktikan bahwa sistem catu daya layak digunakan sebagai penyuplai.

Pengujian pada mikrokontroler STM32F411CEU6 dilakukan melalui program uji sederhana berupa pengendalian LED pada pin PC13. Hasil pengujian menunjukkan bahwa mikrokontroler berfungsi dengan baik dan dapat mengeksekusi instruksi sesuai dengan program yang dijalankan. Keberhasilan ini menandakan bahwa perangkat berada dalam kondisi optimal sehingga dapat diimplementasikan sebagai pusat kendali sistem robot lengan.

Sensor *proximity* infrared E18-D80NK diuji untuk mengetahui kemampuan deteksi objek pada jarak 1–7 cm. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa sensor bekerja optimal pada jarak 2–4 cm, sedangkan di luar jarak

tersebut deteksi tidak terjadi. Hal ini menunjukkan bahwa sensor memiliki sensitivitas pada jarak pendek, sehingga sesuai untuk digunakan dalam proses pendeteksian barang yang posisinya sudah ditentukan secara tetap pada sistem.

Pengujian motor servo menunjukkan bahwa perangkat mampu merespons sinyal PWM dengan baik pada frekuensi 50 Hz dengan *duty cycle* antara 0,5–2,4 ms. Rentang ini memungkinkan motor servo bergerak dari posisi 0° hingga 180° dengan tingkat *error* rata-rata hanya $\pm 1-2^\circ$, yang masih berada dalam batas toleransi kerja servo.

Pengujian *inverse kinematics* dilakukan pada seluruh posisi deteksi, pengambilan, dan pelepasan barang cacat dengan membandingkan masukan koordinat X, Y, dan Z dari HMI dengan hasil pengukuran aktual lengan robot. Secara keseluruhan, *error* rata-rata yang didapat berkisar antara 0,04% hingga 1%, dengan penyimpangan terbesar terdapat pada koordinat Z di beberapa kondisi akibat keterbatasan mekanik dan karakteristik servo. Dengan nilai *error* yang kecil tersebut, dapat disimpulkan bahwa metode *inverse kinematics* telah diimplementasikan dengan baik dan mampu menghasilkan posisi *end-effector* yang mendekati perhitungan teoritis.

Pengujian komunikasi UART antara Raspberry Pi, STM32, dan HMI Nextion menunjukkan pengiriman data berjalan tanpa *error*. Karakter “Barang 1”, “Barang 2”, dan “Barang 3” tampil sesuai dengan yang dikirimkan. Ini menunjukkan bahwa jalur komunikasi serial berfungsi stabil. Selain itu, HMI merespons *input* dengan baik pada mode otomatis maupun manual. Dengan demikian, sistem komunikasi dapat diandalkan untuk serial komunikasi.

Pengujian keseluruhan sistem menunjukkan bahwa lengan robot dapat mendeteksi, mengambil, dan melepas barang cacat dengan akurat. Pada proses pelepasan, sensor di *garbage box* berhasil menghitung jumlah barang cacat secara *real-time*. Ketika kapasitas mencapai empat barang, HMI menampilkan peringatan “GARBAGE BOX PENUH”. Hal ini membuktikan bahwa integrasi seluruh perangkat bekerja sesuai tujuan perancangan.