Untuk pengujian kontrol pada Bab 4.5, pencatatan juga mencakup nilai error awal, perubahan error terhadap waktu, keluaran kendali, *final error*, *settling time*, *overshoot*, dan status keberhasilan. Pada pengujian forward, informasi tambahan berupa posisi berhenti aktual atau *stopping error* dicatat untuk mengetahui ketepatan AGV berhenti terhadap jarak referensi docking. Data tersebut diperlukan untuk mengevaluasi apakah penurunan error visual benar-benar diikuti oleh tercapainya posisi fisik yang diinginkan.

Secara keseluruhan, pencatatan data dirancang agar proses mulai dari deteksi objek, pembentukan geometri pallet, perhitungan *error lateral*, *error yaw*, dan *error forward*, filtering, validasi kestabilan, hingga respons kontrol dapat dianalisis secara berurutan.

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 **Pengujian dan Analisis**

Bab ini menyajikan hasil implementasi dan pengujian sistem perception visual berbasis YOLOv8 pada AGV forklift. Pembahasan difokuskan pada kemampuan deteksi halangan dan pallet, akurasi informasi yaw, lateral, dan forward, serta respons sistem kendali selama proses alignment dan docking. Hasil disajikan menggunakan data pengujian, tabel, dokumentasi visual, dan grafik.

4.1.1. Dataset YOLOv8

Dataset YOLOv8 disiapkan melalui akuisisi citra, anotasi kelas, dan pembagian data untuk training, validation, dan testing. Variasi posisi, jarak, orientasi, dan pencahayaan digunakan agar data mewakili kondisi pengujian yang diterapkan pada sistem.

4.1.2. Hasil Implementasi Sistem

Implementasi sistem membentuk alur terintegrasi dari akuisisi citra RGB, deteksi YOLOv8, pembentukan fitur visual pallet, perhitungan error, komunikasi ROS 2, hingga keluaran kontrol. Tahap ini digunakan untuk memastikan bahwa keluaran setiap proses dapat diterima oleh proses berikutnya sebelum dilakukan pengujian kuantitatif.

Kondisi fisik objek, jarak, posisi, orientasi, dan pencahayaan diperlakukan sebagai kondisi pengujian atau ground truth. Sementara itu, confidence, bounding box, posisi fitur, error visual, dan keluaran kontrol merupakan hasil yang dihitung oleh sistem.

Kamera RGB digunakan untuk memperoleh posisi relatif target pada bidang citra. Informasi tersebut tidak diperlakukan sebagai pengukuran kedalaman secara langsung; nilai fisik dalam centimeter hanya digunakan apabila berasal dari ground truth atau hasil kalibrasi yang diterapkan pada pengujian.

Keluaran perception diteruskan melalui ROS 2 sebagai masukan kontrol proporsional. Log sistem digunakan untuk membandingkan perubahan error dengan keluaran kontrol dan respons kendaraan.

Validasi implementasi dilakukan melalui tampilan hasil deteksi, nilai error, komunikasi topic ROS 2, dan respons kendali. Setelah seluruh aliran data terhubung, evaluasi dilanjutkan pada pengujian deteksi dan alignment.

Batas interpretasi hasil mengikuti konfigurasi kamera RGB dan rentang kondisi pengujian yang digunakan. Dengan demikian, hasil tidak digeneralisasi di luar kondisi eksperimen yang telah ditetapkan.

Rangkaian implementasi tersebut menjadi dasar pengujian kuantitatif pada subbab berikutnya.

4.1.3. Implementasi AGV dan Kamera RGB

AGV forklift dilengkapi kamera Orbbec Astra Pro yang pada penelitian ini digunakan melalui stream RGB. Kamera dipasang menghadap area depan kendaraan agar pallet dan objek halangan berada dalam field of view selama pengujian. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Posisi, orientasi, resolusi, dan area pandang kamera dipertahankan selama pengambilan data. Konsistensi konfigurasi ini diperlukan agar perubahan hasil pengujian terutama berasal dari variabel yang diuji, bukan dari perubahan posisi kamera. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Frame RGB diproses oleh YOLOv8 untuk memperoleh bounding box dan fitur target. Informasi tersebut kemudian digunakan untuk membentuk target center, orientasi visual, dan error alignment. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Karena pengolahan utama menggunakan citra RGB dua dimensi, perubahan perspektif dan ukuran objek pada frame tetap menjadi sumber variasi pengukuran. Oleh sebab itu, interpretasi posisi fisik menggunakan hasil kalibrasi atau ground

truth yang dicatat terpisah. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Konfigurasi kamera yang tetap digunakan pada seluruh pengujian agar hasil deteksi dan error visual dapat dibandingkan secara konsisten. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

4.1.4. Implementasi Posisi Visual dan Error

Sistem menampilkan image center, target center, error lateral, orientasi visual, yaw, dan error yaw sebagai keluaran pengolahan citra. Informasi ini digunakan untuk memeriksa hubungan antara posisi target dan titik referensi pada setiap frame. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian.

Error lateral dibentuk dari perbedaan posisi horizontal target terhadap referensi, sedangkan error yaw dibentuk dari perbedaan orientasi visual pallet terhadap orientasi acuan. Konvensi tanda diuji sebelum pengambilan data agar arah koreksi sesuai dengan perubahan posisi target. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian.

Error forward diperoleh dari perubahan posisi fitur pada sumbu vertikal citra terhadap referensi forward yang digunakan pada pengujian. Ketiga error tersebut memiliki fungsi berbeda dan digunakan bersama pada proses alignment. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian.

Verifikasi tanda dilakukan dengan menggeser dan memutar pallet secara terkontrol. Perubahan keluaran harus mengikuti arah perubahan kondisi aktual sebelum nilai tersebut digunakan sebagai masukan kontrol. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian.

Posisi kamera terhadap sumbu kendaraan dipertahankan karena offset atau kemiringan kamera dapat menghasilkan bias pada posisi target dan orientasi visual. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian. Hasil visual pada tahap ini digunakan sebagai informasi relatif untuk alignment. Nilai fisik dinyatakan hanya pada parameter yang telah memiliki acuan pengukuran atau kalibrasi. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian.

4.1.5. Implementasi Kontrol dan ROS 2

Node kontrol menerima error lateral dan error yaw dari sistem perception dan menghitung koreksi menggunakan kontrol proporsional. Besar keluaran berubah sebanding dengan error selama masih berada dalam batas keluaran yang ditentukan. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Gain lateral dan yaw ditetapkan sebagai parameter kontrol, sedangkan error dan keluaran kontrol dicatat sebagai data hasil pengujian. Pemisahan ini digunakan agar respons sistem dapat dianalisis terhadap parameter yang sama. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Deadband digunakan untuk mengabaikan perubahan kecil di sekitar toleransi, sedangkan saturasi membatasi keluaran agar tidak melebihi batas aktuator. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian. Pertukaran data antara perception dan kontrol dilakukan melalui ROS 2. Perubahan nilai error yang diikuti oleh perubahan keluaran kontrol digunakan sebagai indikator bahwa aliran data antar-node berjalan sesuai rancangan. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Log pengujian mencatat error, keluaran kontrol, dan status sistem sehingga respons kendaraan dapat dianalisis berdasarkan data, bukan hanya pengamatan visual. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian. Ketika fitur visual tidak memenuhi kriteria validasi, sistem tidak menggunakan data tersebut sebagai dasar koreksi baru. Status validasi dicatat untuk membedakan kondisi data normal dan kondisi ketika fitur target belum memenuhi kriteria. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Mekanisme tersebut berfungsi sebagai validasi pada tingkat prototipe dan tidak menggantikan sistem keselamatan industri. Implementasi ini selanjutnya dievaluasi melalui pengujian respons docking. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

4.1.6. Hasil Training Model YOLOv8

Model YOLOv8 hasil training digunakan sebagai model inferensi pada seluruh pengujian deteksi. Evaluasi operasional pada Bab IV didasarkan pada confidence dan detection rate yang diperoleh langsung dari pengujian aktual. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Metrik training seperti loss, precision, recall, F1-score, mAP, dan confusion matrix hanya dapat digunakan apabila data keluaran training tersedia dan dapat ditelusuri. Pada naskah ini, nilai tersebut tidak digunakan sebagai dasar kesimpulan kuantitatif karena data numeriknya tidak disajikan. Dengan pembatasan tersebut, kemampuan model pada sistem dinilai dari hasil inferensi pada variasi jarak, posisi, orientasi, dan pencahayaan yang dibahas pada Subbab 4.2 dan 4.3. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Konfigurasi model, resolusi input, confidence threshold, dan parameter inferensi dipertahankan pada setiap variasi pengujian agar hasil dapat dibandingkan pada

kondisi yang setara. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Model yang sama digunakan pada seluruh rangkaian pengujian perception dan docking. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian. Pembahasan selanjutnya berfokus pada hasil pengujian yang memiliki data numerik aktual. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

4.2 **Pengujian Deteksi Halangan**

Pengujian deteksi halangan mengevaluasi kemampuan model mengenali objek pada variasi jarak, posisi di dalam frame, dan pencahayaan. Parameter utama yang dibandingkan adalah confidence rata-rata dan detection rate. Uraian pada bagian ini digunakan untuk menghubungkan kondisi pengujian dengan nilai confidence dan detection rate sehingga hasil dapat dibandingkan secara objektif.

Confidence menunjukkan tingkat keyakinan model pada deteksi yang dihasilkan, sedangkan detection rate menunjukkan proporsi pengamatan yang menghasilkan deteksi valid. Kedua nilai dihitung dari log hasil inferensi. Uraian pada bagian ini digunakan untuk menghubungkan kondisi pengujian dengan nilai confidence dan detection rate sehingga hasil dapat dibandingkan secara objektif.

Model, resolusi input, confidence threshold, dan IoU threshold dipertahankan sama pada setiap variasi pengujian agar perbandingan tidak dipengaruhi perubahan konfigurasi inferensi. Uraian pada bagian ini digunakan untuk menghubungkan kondisi pengujian dengan nilai confidence dan detection rate sehingga hasil dapat dibandingkan secara objektif.

Frame yang tidak memenuhi kriteria validasi tidak digunakan sebagai dasar pembentukan koreksi kontrol. Uraian pada bagian ini digunakan untuk menghubungkan kondisi pengujian dengan nilai confidence dan detection rate sehingga hasil dapat dibandingkan secara objektif. Hasil pengujian disajikan melalui dokumentasi deteksi, tabel, dan grafik sehingga keberadaan deteksi dan perubahan confidence dapat dibandingkan secara langsung. Uraian pada bagian ini

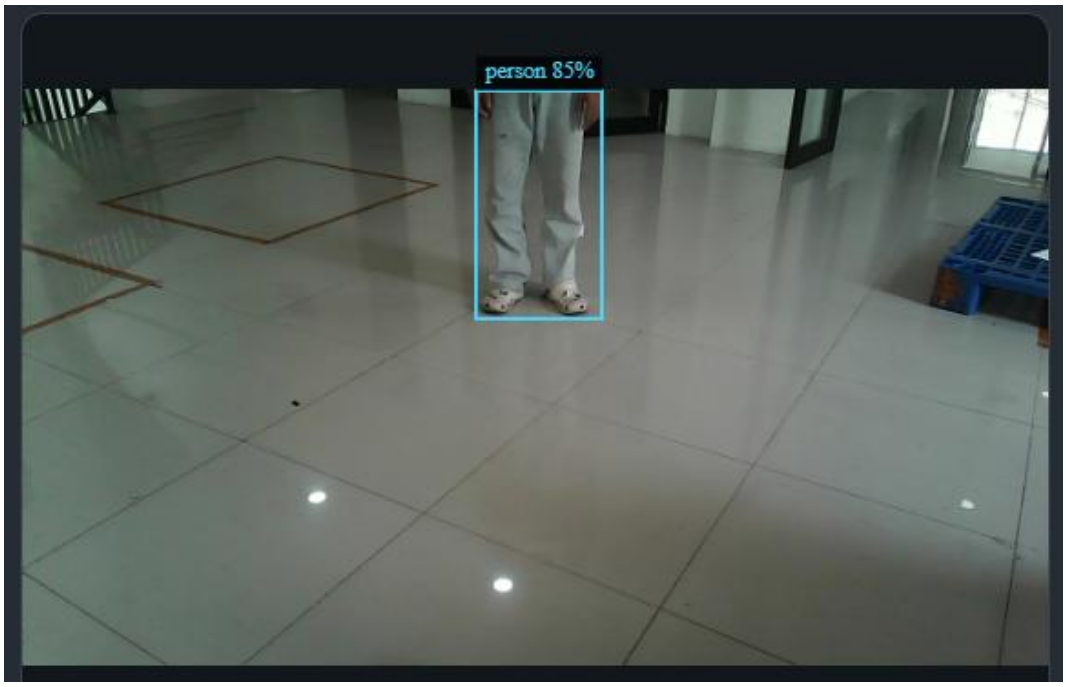
digunakan untuk menghubungkan kondisi pengujian dengan nilai confidence dan detection rate sehingga hasil dapat dibandingkan secara objektif.

Interpretasi hasil dibatasi pada kondisi pengujian yang tercantum pada masing-masing subbab. Uraian pada bagian ini digunakan untuk menghubungkan kondisi pengujian dengan nilai confidence dan detection rate sehingga hasil dapat dibandingkan secara objektif.

4.2.1 Pengujian Variasi Jarak Halangan

Pengujian dilakukan pada jarak 1,2 m hingga 3,0 m dengan konfigurasi inferensi yang sama. Jarak aktual digunakan sebagai variabel pengujian, sedangkan confidence dan detection rate diperoleh dari hasil inferensi. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Setiap jarak menggunakan 25 pengamatan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.1. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian. Tampilan hasil deteksi halangan pada variasi jarak ditunjukkan pada Gambar 4.1. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.



Gambar 4.1 Tampilan Deteksi pada Pengujian Variasi Jarak Halangan

Sumber: Dokumentasi hasil pengujian penulis.

Gambar 4.1 menunjukkan objek halangan tetap menghasilkan bounding box pada seluruh jarak yang diuji. Bukti visual ini konsisten dengan detection rate 100% pada Tabel 4.1. Dokumentasi tersebut mengonfirmasi keberadaan bounding box pada kondisi uji yang ditampilkan. Penilaian performa tetap mengacu pada confidence dan detection rate pada tabel terkait, sehingga pembahasan visual berfungsi sebagai bukti pendukung dan bukan satu-satunya dasar penarikan kesimpulan.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Variasi Jarak Halangan

Jarak Aktual (m)	Confidence Rata-rata	Berhasil / Total	Detection Rate (%)
1,2	0.7894	25/25	100%
1,5	0.8215	25/25	100%
2	0.7815	25/25	100%
2,3	0.7451	25/25	100%
2,5	0.7193	25/25	100%
3,0	0.7072	25/25	100%

Sumber: Hasil pengujian dan pengolahan data penulis.

Berdasarkan Tabel 4.1, confidence tertinggi diperoleh pada jarak 1,5 m sebesar 0,8215 dan terendah pada jarak 3,0 m sebesar 0,7072. Seluruh jarak menghasilkan 25 deteksi dari 25 pengamatan atau detection rate 100%. Data pada tabel menjadi dasar pembahasan kuantitatif pada subbab ini. Perbandingan dilakukan hanya pada parameter dan kondisi yang diuji, sehingga hasil digunakan untuk menjelaskan kecenderungan sistem tanpa memperluas kesimpulan di luar rentang pengujian yang tersedia.



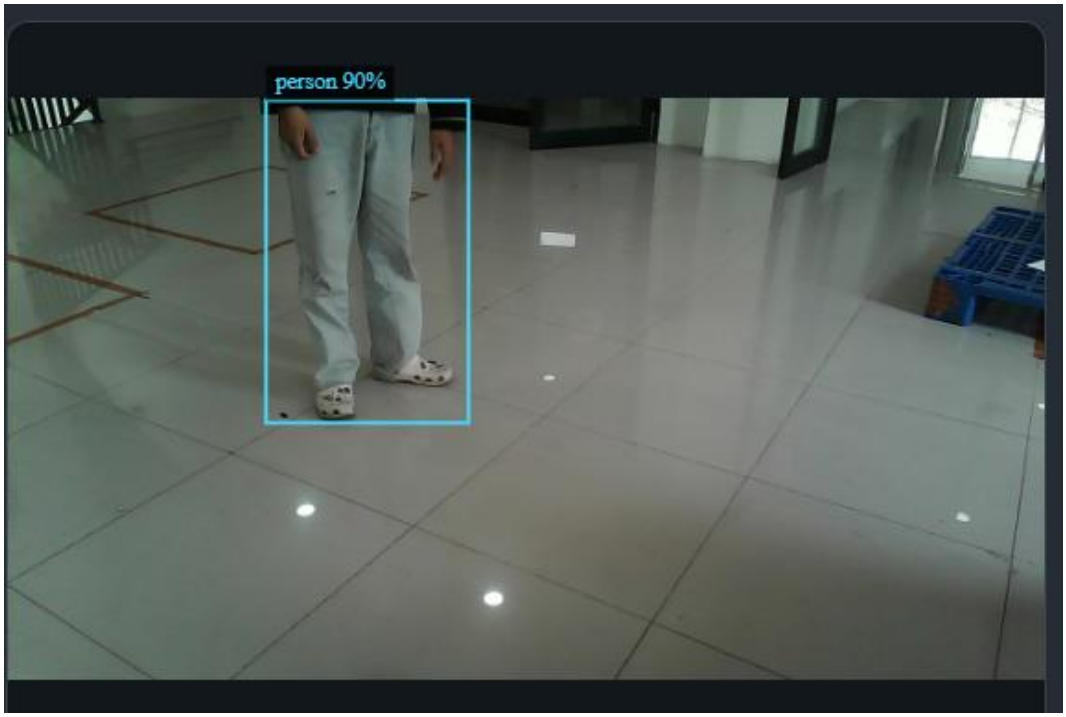
Gambar 4.2 Grafik Confidence Hasil Pengujian Variasi Jarak Halangan
Sumber: Hasil pengujian dan pengolahan data penulis.

Gambar 4.2 memperjelas kecenderungan confidence yang menurun setelah jarak 1,5 m. Pada rentang 1,2–3,0 m, perubahan jarak memengaruhi tingkat keyakinan model tetapi belum menyebabkan kegagalan deteksi. Grafik ini digunakan untuk membandingkan kecenderungan confidence antar kondisi secara langsung, sedangkan keberhasilan deteksi tetap dibaca bersama detection rate pada tabel terkait. Interpretasi dibatasi pada rentang kondisi dan jumlah pengamatan yang benar-benar digunakan selama pengujian.

4.2.2 Pengujian Variasi Posisi Halangan

Pengujian variasi posisi dilakukan pada posisi kiri, tengah, dan kanan frame dengan konfigurasi inferensi yang sama. Confidence dan detection rate digunakan untuk membandingkan hasil pada ketiga posisi. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Tampilan hasil deteksi halangan pada variasi posisi ditunjukkan pada Gambar 4.3. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.



Gambar 4.3 Tampilan Deteksi pada Pengujian Variasi Posisi Halangan

Sumber: Dokumentasi hasil pengujian penulis.

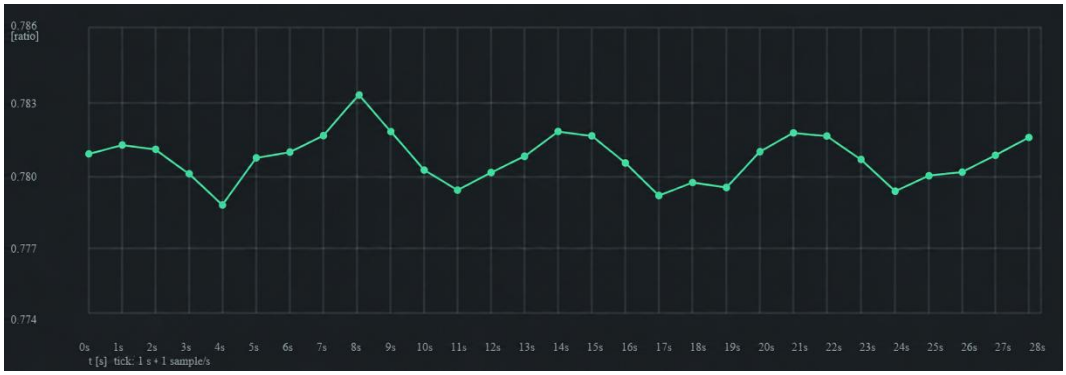
Gambar 4.3 menunjukkan objek tetap terdeteksi pada sisi kiri, tengah, dan kanan frame. Perbedaan performa kuantitatif selanjutnya ditunjukkan pada Tabel 4.2. Dokumentasi tersebut mengonfirmasi keberadaan bounding box pada kondisi uji yang ditampilkan. Penilaian performa tetap mengacu pada confidence dan detection rate pada tabel terkait, sehingga pembahasan visual berfungsi sebagai bukti pendukung dan bukan satu-satunya dasar penarikan kesimpulan.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Variasi Posisi Halangan

Posisi	Confidence Rata-rata	Detection Rate (%)
Kiri	0.7807	100%
Tengah	0.8155	100%
Kanan	0.7098	100%

Sumber: Hasil pengujian dan pengolahan data penulis.

Berdasarkan Tabel 4.2, confidence tertinggi diperoleh pada posisi tengah sebesar 0,8155, diikuti posisi kiri 0,7807 dan kanan 0,7098. Seluruh posisi menghasilkan detection rate 100%. Data pada tabel menjadi dasar pembahasan kuantitatif pada subbab ini. Perbandingan dilakukan hanya pada parameter dan kondisi yang diuji, sehingga hasil digunakan untuk menjelaskan kecenderungan sistem tanpa memperluas kesimpulan di luar rentang pengujian yang tersedia.



Gambar 4.4 Grafik Confidence Hasil Pengujian Variasi Posisi Halangan
Sumber: Hasil pengujian dan pengolahan data penulis.

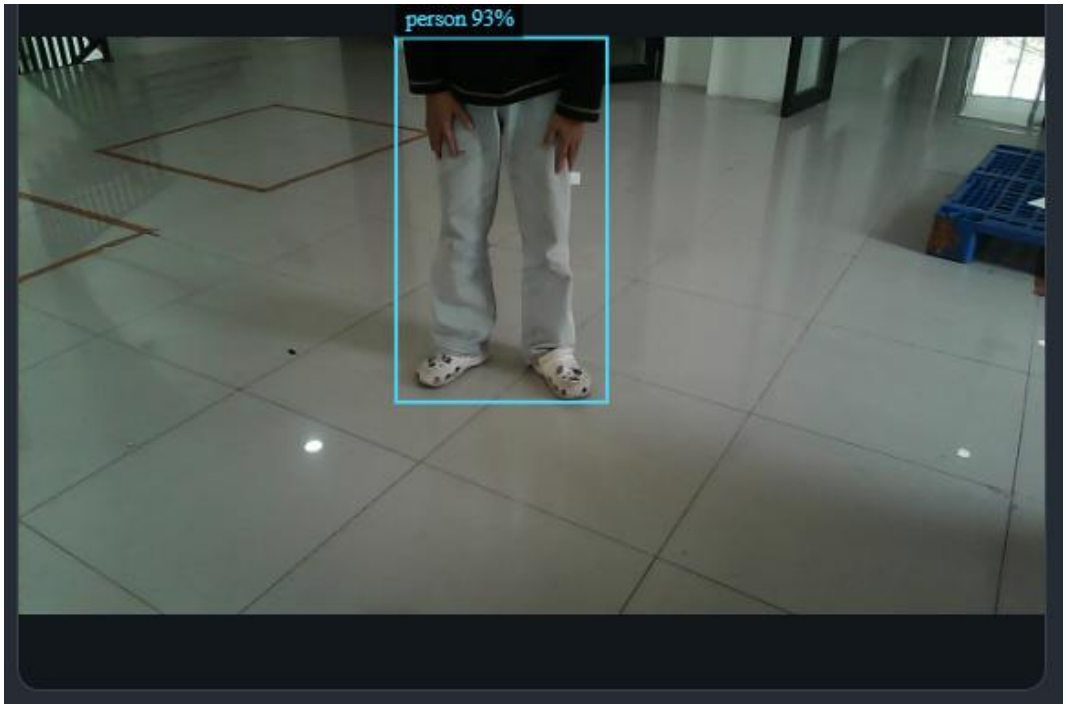
Gambar 4.4 menunjukkan bahwa posisi tengah memberikan confidence tertinggi, sedangkan posisi kanan menghasilkan confidence terendah. Pada kondisi yang diuji, perubahan posisi di dalam frame memengaruhi confidence tanpa menghilangkan deteksi. Grafik ini digunakan untuk membandingkan kecenderungan confidence antar kondisi secara langsung, sedangkan keberhasilan deteksi tetap dibaca bersama detection rate pada tabel terkait. Interpretasi dibatasi pada rentang kondisi dan jumlah pengamatan yang benar-benar digunakan selama pengujian.

Hasil pengujian ini hanya digunakan untuk menilai performa perception pada variasi posisi objek dan tidak digunakan sebagai ukuran keberhasilan docking. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

4.2.3 Pengujian Variasi Pencahayaan Halangan

Pengujian pencahayaan dilakukan pada kondisi redup, normal, dan terang dengan intensitas yang tercatat pada Tabel 4.3. Parameter inferensi dipertahankan sama pada setiap kondisi. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Tampilan hasil deteksi halangan pada variasi pencahayaan ditunjukkan pada Gambar 4.5. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.



Gambar 4.5 Tampilan Deteksi pada Pengujian Variasi Pencahayaan Halangan

Sumber: Dokumentasi hasil pengujian penulis.

Gambar 4.5 menunjukkan halangan tetap terdeteksi pada ketiga kondisi pencahayaan. Perbedaan utama terlihat pada nilai confidence. Dokumentasi tersebut mengonfirmasi keberadaan bounding box pada kondisi uji yang ditampilkan. Penilaian performa tetap mengacu pada confidence dan detection rate pada tabel terkait, sehingga pembahasan visual berfungsi sebagai bukti pendukung dan bukan satu-satunya dasar penarikan kesimpulan.

Hasil numerik confidence dan detection rate disajikan pada Tabel 4.3. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Variasi Pencahayaan Halangan

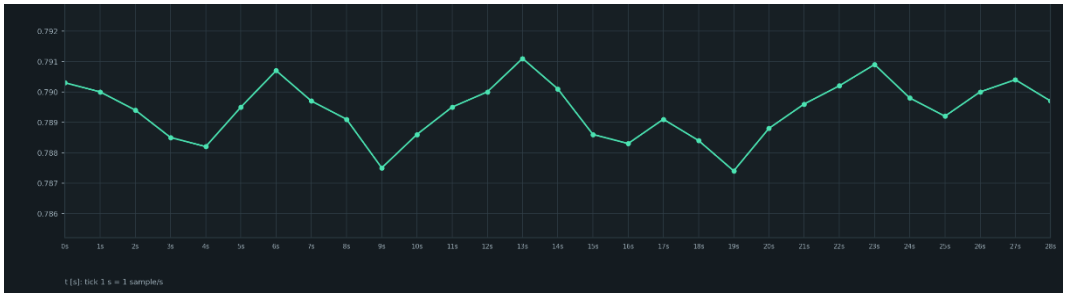
Kondisi	Lux*	Confidence Rata-rata	Detection Rate (%)
Redup	171	0.7098	100%
Normal	392	0.8155	100%
Terang	509	0.7894	100%

Sumber: Hasil pengujian dan pengolahan data penulis.

Berdasarkan Tabel 4.3, confidence tertinggi diperoleh pada kondisi normal sebesar 0,8155, diikuti terang 0,7894 dan redup 0,7098. Detection rate tetap 100% pada seluruh kondisi. Data pada tabel menjadi dasar pembahasan kuantitatif pada subbab

ini. Perbandingan dilakukan hanya pada parameter dan kondisi yang diuji, sehingga hasil digunakan untuk menjelaskan kecenderungan sistem tanpa memperluas kesimpulan di luar rentang pengujian yang tersedia.

Perbedaan confidence menunjukkan bahwa perubahan pencahayaan memengaruhi tingkat keyakinan model. Pada rentang pengujian ini, pengaruh tersebut belum menyebabkan kehilangan deteksi. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.



Gambar 4.6 Grafik Confidence Hasil Pengujian Variasi Pencahayaan Halangan
Sumber: Hasil pengujian dan pengolahan data penulis.

Gambar 4.6 menegaskan bahwa confidence pada kondisi normal lebih tinggi dibandingkan kondisi terang dan redup, sedangkan detection rate tetap 100%. Grafik ini digunakan untuk membandingkan kecenderungan confidence antar kondisi secara langsung, sedangkan keberhasilan deteksi tetap dibaca bersama detection rate pada tabel terkait. Interpretasi dibatasi pada rentang kondisi dan jumlah pengamatan yang benar-benar digunakan selama pengujian.

Dengan demikian, pengujian halangan menunjukkan bahwa model mempertahankan deteksi pada seluruh variasi yang diuji, tetapi confidence berubah mengikuti kondisi visual. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

4.3 **Pengujian Deteksi Pallet**

Pengujian deteksi pallet mengevaluasi kemampuan model mengenali pallet sebagai target alignment pada variasi jarak, orientasi, dan pencahayaan. Parameter yang dibandingkan adalah confidence rata-rata dan detection rate. Uraian pada bagian ini

digunakan untuk menghubungkan kondisi pengujian dengan nilai confidence dan detection rate sehingga hasil dapat dibandingkan secara objektif.

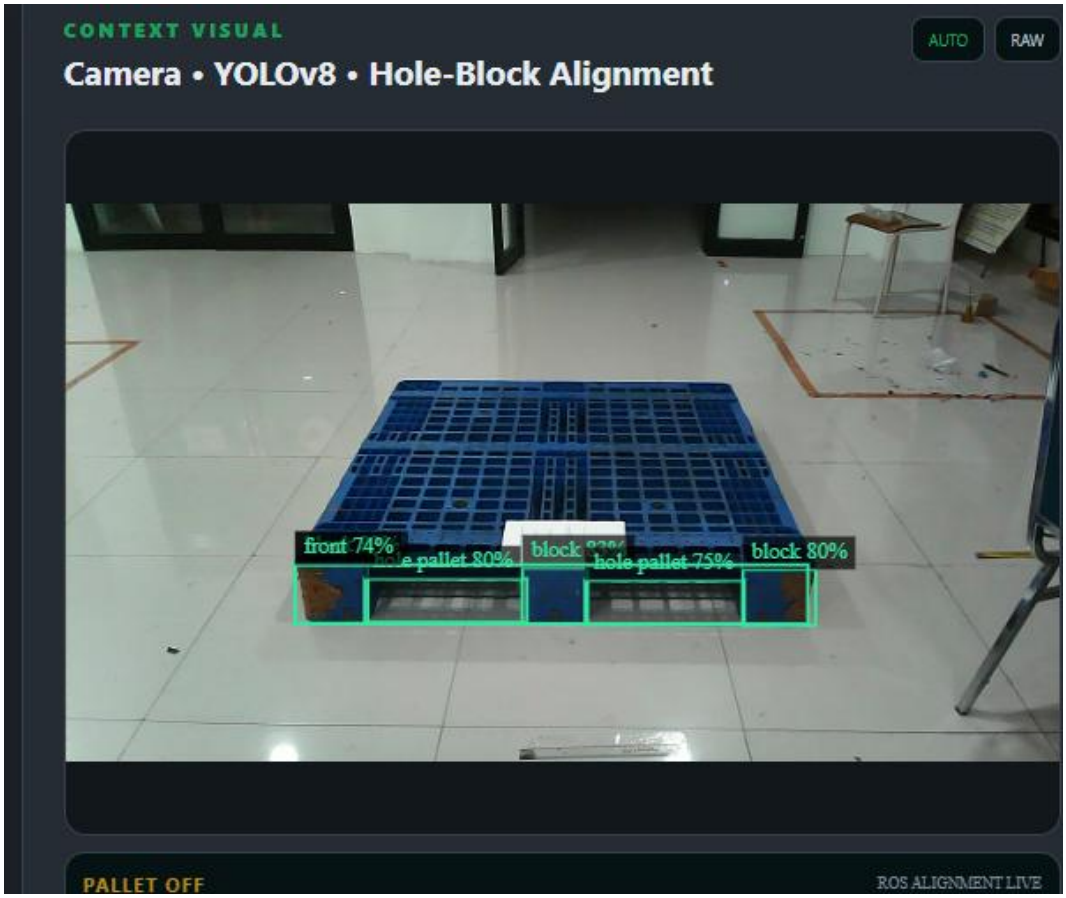
Hasil deteksi berupa bounding box digunakan sebagai dasar pembentukan fitur visual pallet. Deteksi yang valid kemudian diteruskan ke tahap perhitungan posisi dan orientasi. Uraian pada bagian ini digunakan untuk menghubungkan kondisi pengujian dengan nilai confidence dan detection rate sehingga hasil dapat dibandingkan secara objektif.

Keberhasilan deteksi pallet dibedakan dari keberhasilan alignment. Deteksi dinilai melalui confidence dan detection rate, sedangkan alignment dievaluasi melalui error yaw, lateral, forward, dan respons kontrol pada subbab berikutnya. Uraian pada bagian ini digunakan untuk menghubungkan kondisi pengujian dengan nilai confidence dan detection rate sehingga hasil dapat dibandingkan secara objektif.

4.3.1 Pengujian Variasi Jarak Pallet

Pengujian jarak pallet dilakukan pada rentang 1,2–3,0 m dengan konfigurasi inferensi yang sama. Jarak aktual digunakan sebagai variabel pengujian, sedangkan confidence dan detection rate diperoleh dari hasil inferensi. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Tampilan hasil deteksi pallet pada variasi jarak ditunjukkan pada Gambar 4.7. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.



Gambar 4.7 Tampilan Deteksi pada Pengujian Variasi Jarak Pallet

Sumber: Dokumentasi hasil pengujian penulis.

Gambar 4.7 menunjukkan pallet tetap terdeteksi pada seluruh jarak yang diuji. Hasil kuantitatif per jarak disajikan pada Tabel 4.4. Dokumentasi tersebut mengonfirmasi keberadaan bounding box pada kondisi uji yang ditampilkan. Penilaian performa tetap mengacu pada confidence dan detection rate pada tabel terkait, sehingga pembahasan visual berfungsi sebagai bukti pendukung dan bukan satu-satunya dasar penarikan kesimpulan.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Variasi Jarak Pallet

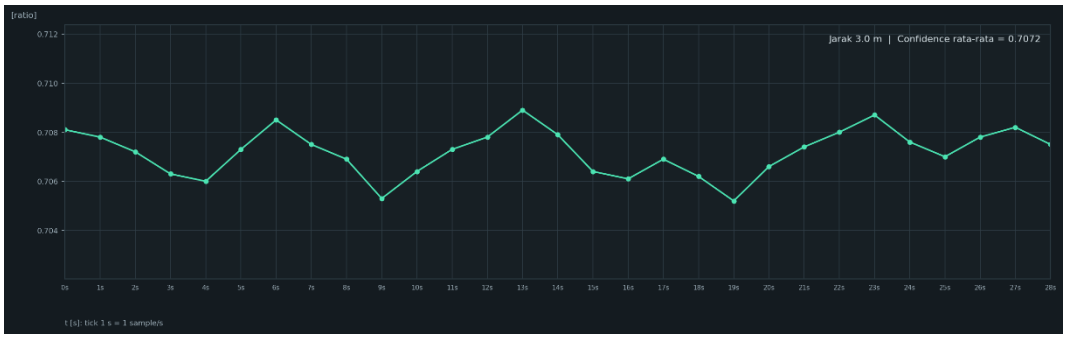
Jarak Aktual (m)	Confidence Rata-rata	Detection Rate (%)
1,2	0.7528	100%
1,5	0.7796	100%
2	0.8215	100%
2,3	0.7815	100%
2,5	0.7193	100%
3,0	0.7072	100%

Sumber: Hasil pengujian dan pengolahan data penulis.

Berdasarkan Tabel 4.4, confidence tertinggi diperoleh pada jarak 2 m sebesar 0,8215 dan terendah pada jarak 3 m sebesar 0,7072. Detection rate tetap 100% pada seluruh jarak. Data pada tabel menjadi dasar pembahasan kuantitatif pada subbab ini. Perbandingan dilakukan hanya pada parameter dan kondisi yang diuji, sehingga hasil digunakan untuk menjelaskan kecenderungan sistem tanpa memperluas kesimpulan di luar rentang pengujian yang tersedia.

Penurunan confidence pada jarak yang lebih jauh menunjukkan perubahan tingkat keyakinan model seiring perubahan ukuran objek pada frame. Hasil ini dibatasi pada rentang jarak yang diuji. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Data deteksi pada setiap jarak tetap diteruskan melalui alur ROS 2 yang sama untuk membentuk informasi target pada tahap alignment. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian. Visualisasi perubahan confidence terhadap jarak ditunjukkan pada Gambar 4.8. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.



Gambar 4.8 Grafik Confidence Hasil Pengujian Variasi Jarak Pallet
Sumber: Hasil pengujian dan pengolahan data penulis.

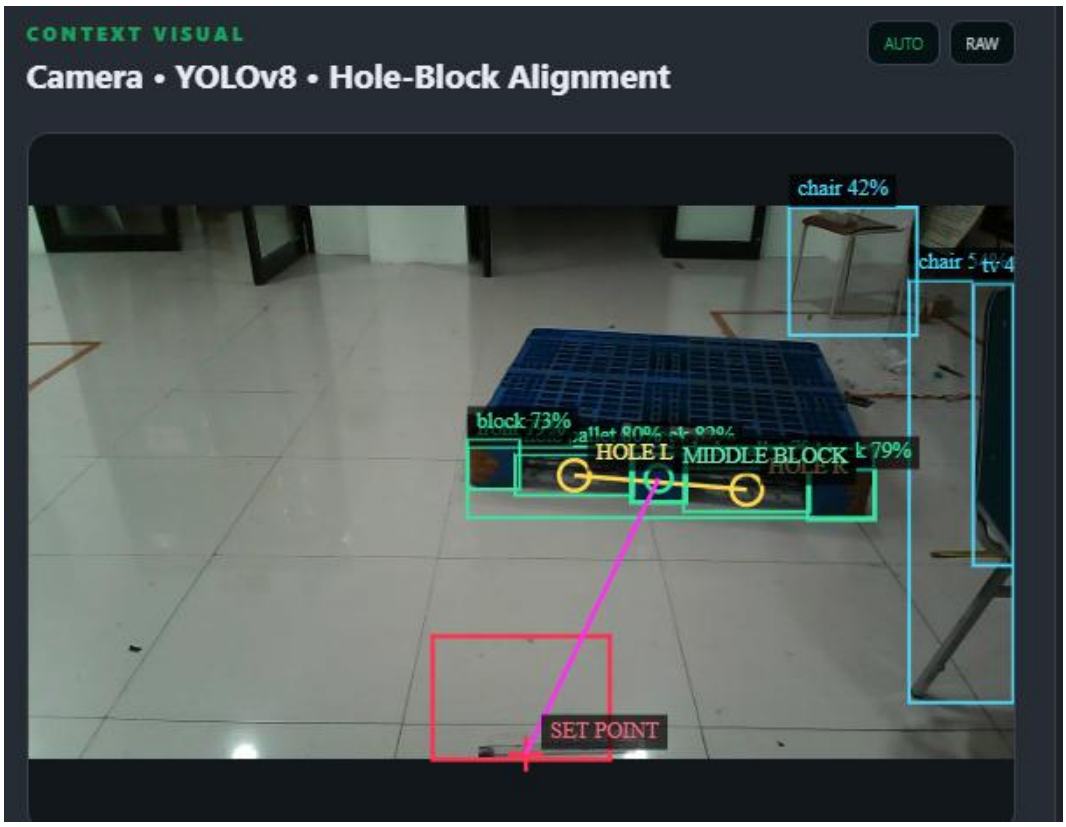
Gambar 4.8 menunjukkan confidence mencapai nilai tertinggi pada 2 m dan menurun hingga 0,7072 pada 3 m. Seluruh titik tetap menghasilkan detection rate 100%. Grafik ini digunakan untuk membandingkan kecenderungan confidence antar kondisi secara langsung, sedangkan keberhasilan deteksi tetap dibaca bersama

detection rate pada tabel terkait. Interpretasi dibatasi pada rentang kondisi dan jumlah pengamatan yang benar-benar digunakan selama pengujian.

4.3.2 Pengujian Variasi Orientasi Pallet

Pengujian orientasi dilakukan pada sudut −15°, −10°, 0°, +10°, dan +15°. Sudut aktual digunakan sebagai kondisi pengujian, sedangkan confidence dan detection rate merupakan keluaran model. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Tampilan hasil deteksi pallet pada variasi orientasi ditunjukkan pada Gambar 4.9. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.



Gambar 4.9 Tampilan Deteksi pada Pengujian Variasi Orientasi Pallet

Sumber: Dokumentasi hasil pengujian penulis.

Gambar 4.9 menunjukkan pallet tetap menghasilkan bounding box pada seluruh orientasi yang diuji. Perubahan sudut terutama mengubah bentuk tampilan pallet pada citra. Dokumentasi tersebut mengonfirmasi keberadaan bounding box

pada kondisi uji yang ditampilkan. Penilaian performa tetap mengacu pada confidence dan detection rate pada tabel terkait, sehingga pembahasan visual berfungsi sebagai bukti pendukung dan bukan satu-satunya dasar penarikan kesimpulan.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Variasi Orientasi Pallet

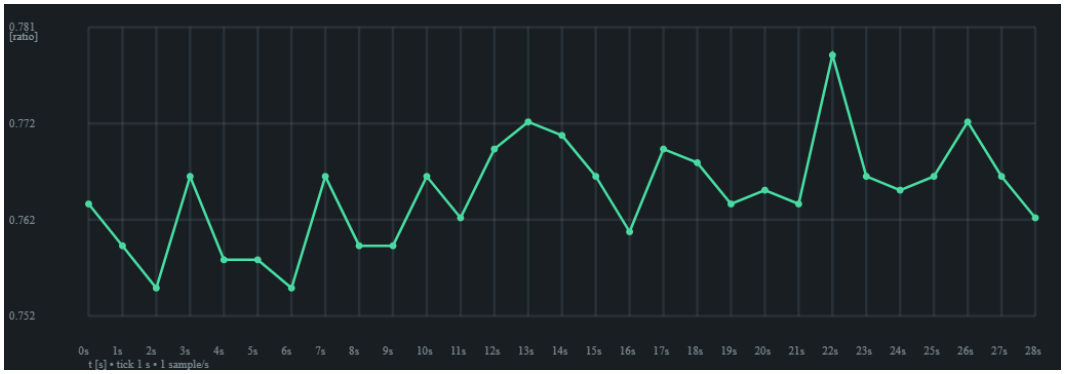
Sudut Pallet (°)	Confidence Rata-rata	Detection Rate (%)
0	0.8258	100
10	0.8082	100
15	0.797	100
-10	0.7942	100
-15	0.7645	100

Sumber: Hasil pengujian dan pengolahan data penulis.

Berdasarkan Tabel 4.5, confidence tertinggi diperoleh pada orientasi 0° sebesar 0,8258 dan terendah pada −15° sebesar 0,7645. Detection rate tetap 100% pada seluruh orientasi. Data pada tabel menjadi dasar pembahasan kuantitatif pada subbab ini. Perbandingan dilakukan hanya pada parameter dan kondisi yang diuji, sehingga hasil digunakan untuk menjelaskan kecenderungan sistem tanpa memperluas kesimpulan di luar rentang pengujian yang tersedia.

Perbedaan confidence antara orientasi positif dan negatif menunjukkan bahwa tingkat keyakinan model tidak sepenuhnya simetris terhadap perubahan sudut. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian. Hasil deteksi orientasi selanjutnya digunakan sebagai dasar pengujian error yaw pada Subbab 4.4. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Perubahan confidence pada setiap orientasi ditunjukkan pada Gambar 4.10. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.



Gambar 4.10 Grafik Confidence Hasil Pengujian Variasi Orientasi Pallet

Sumber: Hasil pengujian dan pengolahan data penulis.

Gambar 4.10 memperlihatkan confidence tertinggi pada 0° dan terendah pada −15°. Pada rentang ±15°, perubahan orientasi memengaruhi confidence tetapi tidak menyebabkan kegagalan deteksi. Grafik ini digunakan untuk membandingkan kecenderungan confidence antar kondisi secara langsung, sedangkan keberhasilan deteksi tetap dibaca bersama detection rate pada tabel terkait. Interpretasi dibatasi pada rentang kondisi dan jumlah pengamatan yang benar-benar digunakan selama pengujian.

4.3.3 Pengujian Variasi Pencahayaan Pallet

Pengujian pencahayaan pallet dilakukan pada kondisi redup, normal, dan terang dengan intensitas yang tercatat pada Tabel 4.6. Konfigurasi inferensi dipertahankan sama pada setiap kondisi. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Intensitas pencahayaan digunakan sebagai kondisi pengujian, sedangkan confidence dan detection rate diperoleh dari hasil inferensi. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian. Hasil kuantitatif pengujian disajikan pada Tabel 4.6. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

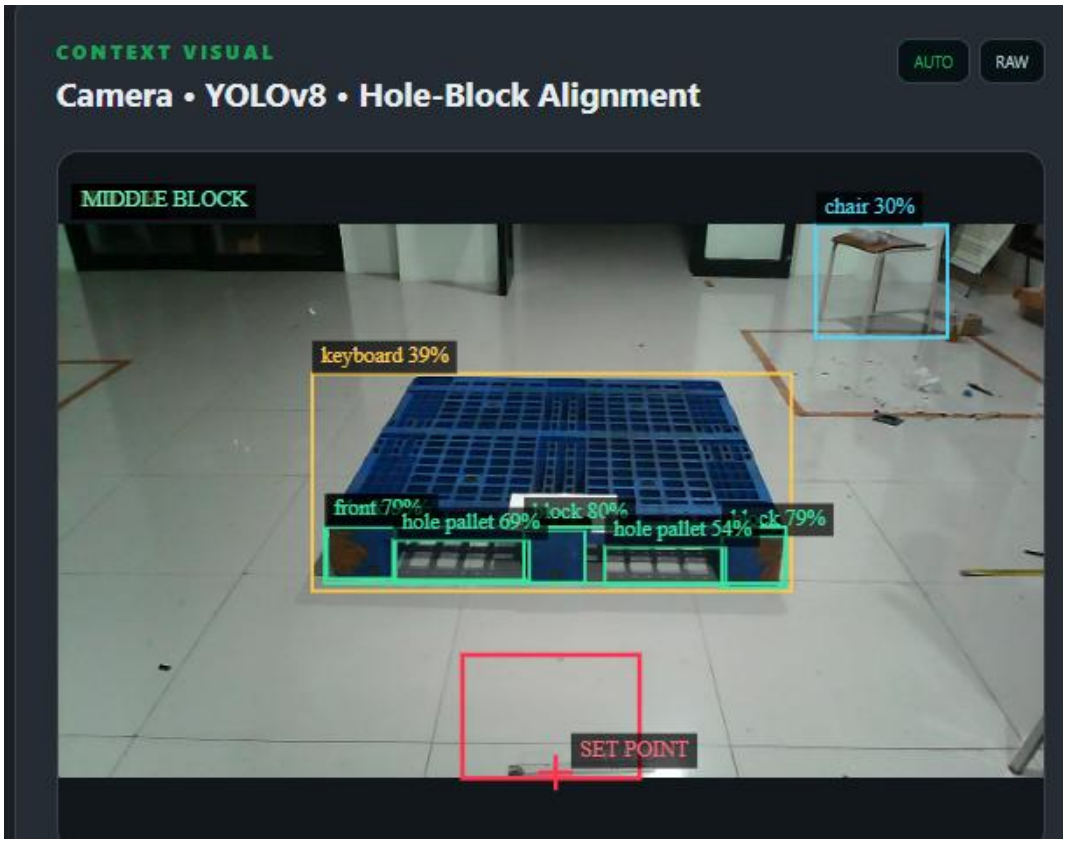
Tabel 4.6 Hasil Pengujian Variasi Pencahayaan Pallet

Kondisi	Lux*	Confidence Rata-rata	Detection Rate (%)
Redup	171	0.7098	100%
Normal	392	0.8155	100%
Terang	509	0.7894	100%

Sumber: Hasil pengujian dan pengolahan data penulis.

Berdasarkan Tabel 4.6, confidence tertinggi diperoleh pada kondisi normal sebesar 0,8155, diikuti terang 0,7894 dan redup 0,7098. Detection rate tetap 100% pada seluruh kondisi. Data pada tabel menjadi dasar pembahasan kuantitatif pada subbab ini. Perbandingan dilakukan hanya pada parameter dan kondisi yang diuji, sehingga hasil digunakan untuk menjelaskan kecenderungan sistem tanpa memperluas kesimpulan di luar rentang pengujian yang tersedia.

Tampilan hasil deteksi pallet pada variasi pencahayaan ditunjukkan pada Gambar 4.11. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.



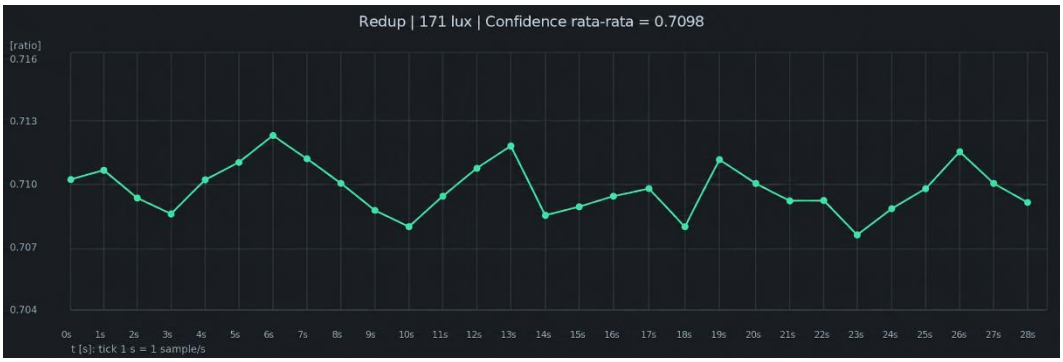
Gambar 4.11 Tampilan Deteksi pada Pengujian Variasi Pencahayaan Pallet

Sumber: Dokumentasi hasil pengujian penulis.

Gambar 4.11 menunjukkan pallet tetap terdeteksi pada kondisi redup, normal, dan terang. Hasil visual tersebut konsisten dengan detection rate 100% pada Tabel 4.6. Dokumentasi tersebut mengonfirmasi keberadaan bounding box pada kondisi uji yang ditampilkan. Penilaian performa tetap mengacu pada confidence

dan detection rate pada tabel terkait, sehingga pembahasan visual berfungsi sebagai bukti pendukung dan bukan satu-satunya dasar penarikan kesimpulan.

Perubahan pencahayaan memengaruhi confidence, tetapi pada rentang yang diuji belum menyebabkan kehilangan deteksi pallet. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.



Gambar 4.12 Grafik Confidence Hasil Pengujian Variasi Pencahayaan Pallet
Sumber: Hasil pengujian dan pengolahan data penulis.

Gambar 4.12 memperjelas perbedaan confidence antar kondisi pencahayaan, dengan nilai tertinggi pada kondisi normal dan terendah pada kondisi redup. Grafik ini digunakan untuk membandingkan kecenderungan confidence antar kondisi secara langsung, sedangkan keberhasilan deteksi tetap dibaca bersama detection rate pada tabel terkait. Interpretasi dibatasi pada rentang kondisi dan jumlah pengamatan yang benar-benar digunakan selama pengujian.

4.4 **Pengujian Akurasi Error Visual**

Pengujian error visual mengevaluasi kemampuan sistem menghasilkan informasi yaw, lateral, dan forward dari fitur visual pallet. Kondisi fisik yang ditetapkan selama pengujian digunakan sebagai acuan pembanding terhadap keluaran perception. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian.

Setiap parameter error diuji secara terpisah agar karakteristik yaw, lateral, dan forward dapat dianalisis tanpa mencampurkan sumber variasi yang berbeda. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian. Konfigurasi kamera, model, dan parameter inferensi dipertahankan selama pengujian. Pembahasan

difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian.

Data aktual dan keluaran perception dicatat secara terpisah sehingga error dapat dihitung secara objektif. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian. Konsistensi tanda juga diperiksa untuk memastikan arah error sesuai dengan arah penyimpangan aktual. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian.

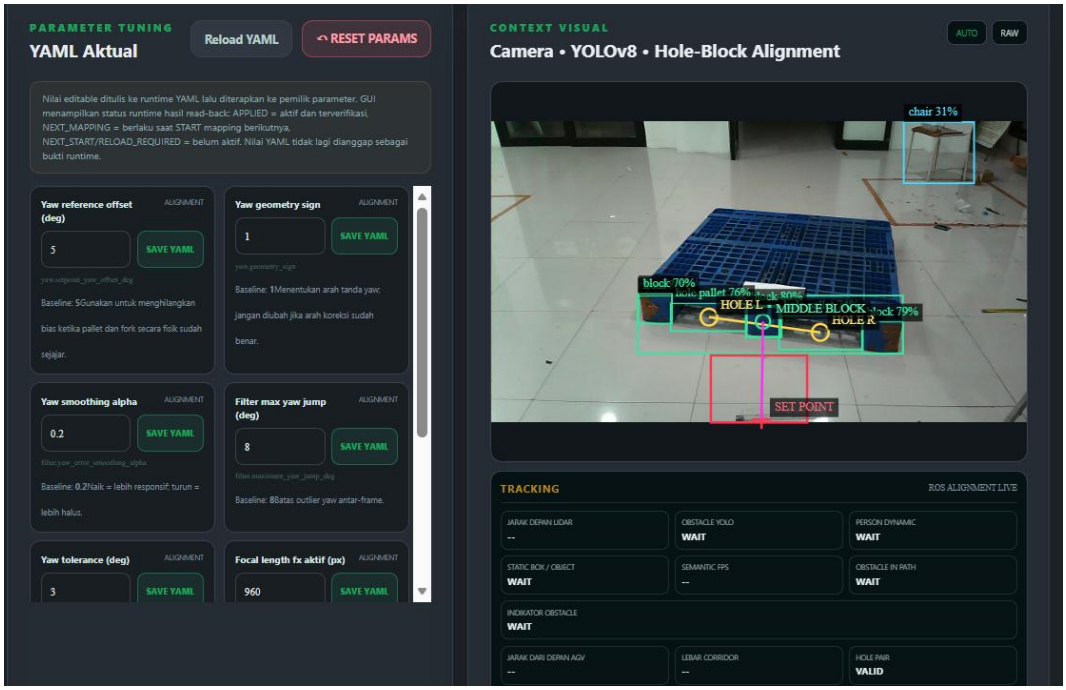
Seluruh data pengujian direkam melalui antarmuka dan log sistem. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian. Parameter evaluasi meliputi error absolut, MAE, RMSE, dan kecenderungan hubungan terhadap kondisi aktual sesuai jenis pengujian. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian.

Hasil setiap pengujian dibahas pada Subbab 4.4.1 sampai 4.4.3. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian.

4.4.1. Pengujian Akurasi Error Yaw

Pengujian yaw dilakukan pada lima orientasi aktual, yaitu −15°, −10°, 0°, +10°, dan +15°. Yaw visual dibandingkan dengan yaw aktual untuk memperoleh error absolut pada setiap titik uji. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian.

Tampilan antarmuka pengujian akurasi error yaw ditunjukkan pada Gambar 4.13. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian.



Gambar 4.13 Tampilan Antarmuka Pengujian Akurasi Error Yaw

Sumber: Dokumentasi hasil pengujian penulis.

Gambar 4.13 menunjukkan antarmuka yang digunakan untuk mencatat yaw aktual dan yaw hasil perception. Data yang ditampilkan menjadi dasar penyusunan Tabel 4.7. Antarmuka digunakan untuk memastikan parameter pengujian dan keluaran sistem dapat dipantau pada kondisi yang sama saat data direkam. Evaluasi kuantitatif tetap mengacu pada tabel hasil pengujian, sehingga gambar ini diposisikan sebagai dokumentasi pendukung terhadap data numerik.

Error yaw dihitung dari selisih antara yaw visual dan yaw aktual, sedangkan error absolut digunakan untuk menghitung MAE. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian.

Tabel 4.7 Hasil Pengujian Akurasi Error Yaw

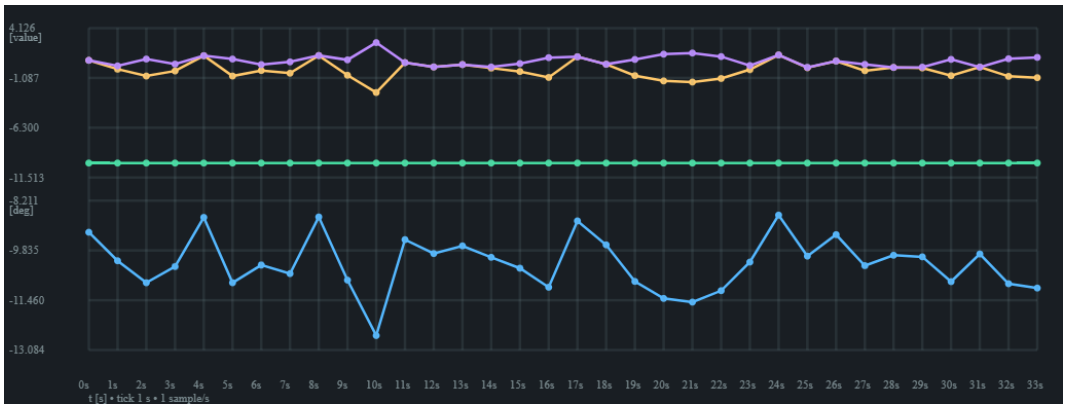
Yaw Aktual (°)	Yaw Visual (°)	Error Absolut (°)
-15	-20.841	5.841
-10	-10.291	0.291
0	-1.732	1.732
+10	4.728	5.272
+15	10.46	4.54

Sumber: Hasil pengujian dan pengolahan data penulis.

Berdasarkan Tabel 4.7, error absolut berturut-turut sebesar 5,841°, 0,291°, 1,732°, 5,272°, dan 4,540°. MAE dari lima titik pengujian sebesar 3,535° dengan error maksimum 5,841°. Data pada tabel menjadi dasar pembahasan kuantitatif pada subbab ini. Perbandingan dilakukan hanya pada parameter dan kondisi yang diuji, sehingga hasil digunakan untuk menjelaskan kecenderungan sistem tanpa memperluas kesimpulan di luar rentang pengujian yang tersedia.

Yaw visual mengikuti arah perubahan yaw aktual, tetapi seluruh estimasi pada lima titik cenderung lebih negatif daripada nilai aktual. Hal ini menunjukkan adanya bias orientasi yang perlu diperhatikan pada proses alignment. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian.

Rentang pengujian yaw dibatasi pada −15° hingga +15°. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian.

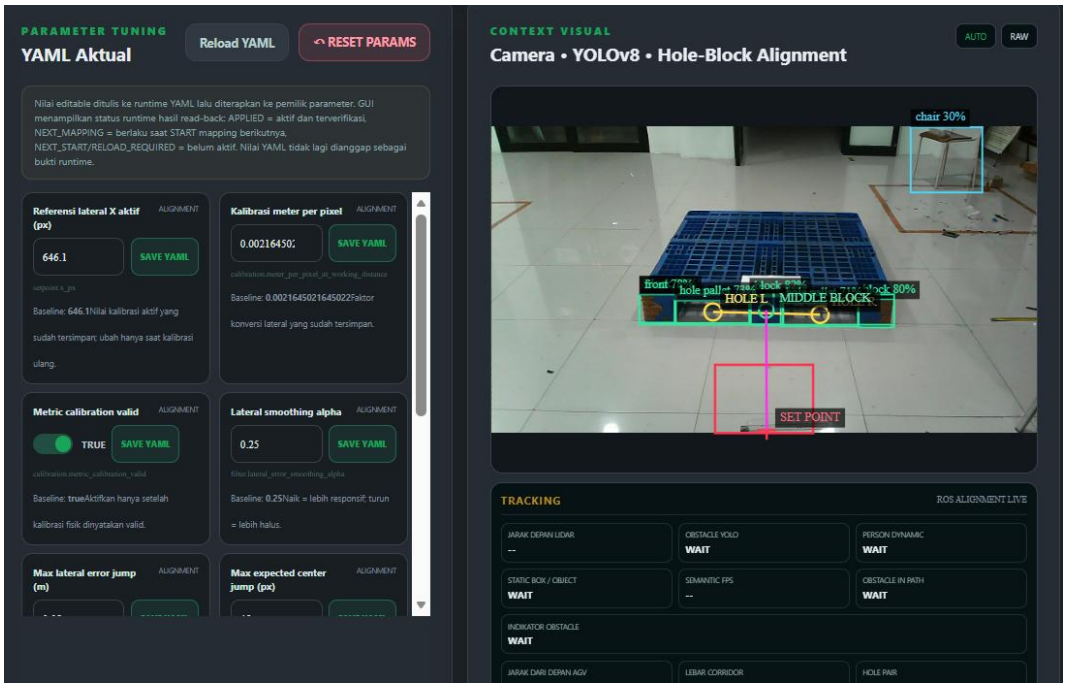


Nilai MAE menggambarkan rata-rata penyimpangan absolut, sedangkan error maksimum menunjukkan kondisi terburuk pada titik uji.Hasil ini menunjukkan bahwa estimasi yaw dapat mengikuti perubahan orientasi, tetapi akurasinya belum seragam pada seluruh sudut.Informasi yaw tetap dapat digunakan sebagai masukan alignment dengan mempertimbangkan toleransi dan filtering yang diterapkan pada sistem.

4.4.2. Pengujian Error Lateral Visual

Pengujian lateral dilakukan pada setpoint −10 cm, −5 cm, 0 cm, +5 cm, dan +10 cm. Hasil perception dibandingkan dengan setpoint aktual untuk memperoleh error dan error absolut. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian.

Tampilan antarmuka pengujian error lateral visual ditunjukkan pada Gambar 4.14. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian.



Gambar 4.14 Tampilan Antarmuka Pengujian Error Lateral Visual

Sumber: Dokumentasi hasil pengujian penulis.

Gambar 4.14 menunjukkan antarmuka pengujian yang mencatat setpoint aktual dan hasil perception. Data tersebut menjadi dasar penyusunan Tabel 4.8. Antarmuka digunakan untuk memastikan parameter pengujian dan keluaran sistem dapat dipantau pada kondisi yang sama saat data direkam. Evaluasi kuantitatif tetap mengacu pada tabel hasil pengujian, sehingga gambar ini diposisikan sebagai dokumentasi pendukung terhadap data numerik.

Setpoint dalam centimeter digunakan sebagai ground truth pengujian. Nilai perception pada Tabel 4.8 merupakan hasil yang telah digunakan pada evaluasi

metrik lateral. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian.

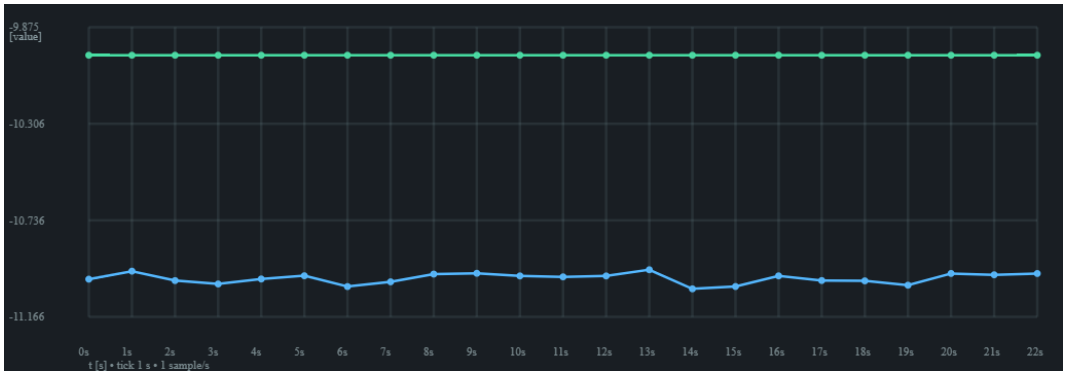
Tabel 4.8 Hasil Pengujian Error Lateral Visual

Set Point Aktual (cm)	Hasil Perception (cm)	Error (cm)	|Error| (cm)
0	0.987	0.987	0.987
5	7.47	2.47	2.47
10	13.216	3.216	3.216
-5	-4.716	0.284	0.284
-10	-10.996	-0.996	0.996

Sumber: Hasil pengujian dan pengolahan data penulis.

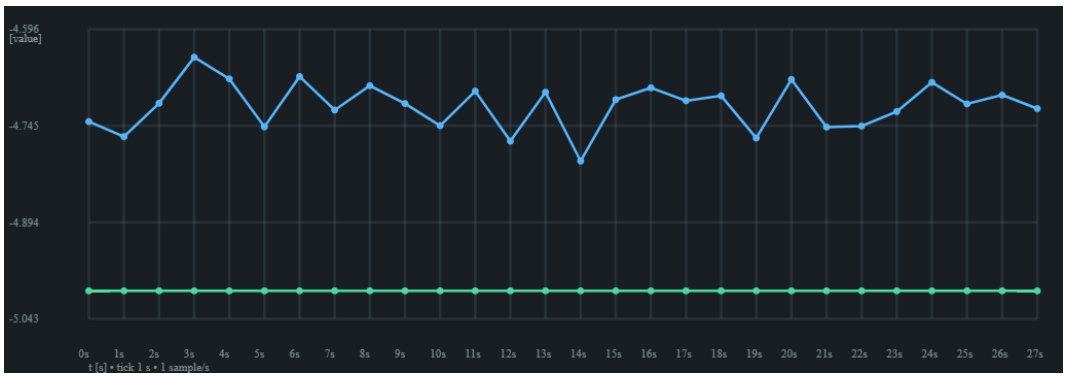
Berdasarkan Tabel 4.8, error berada pada rentang −0,996 cm hingga 3,216 cm. Dari lima titik pengujian diperoleh MAE 1,591 cm dan RMSE 1,923 cm. Data pada tabel menjadi dasar pembahasan kuantitatif pada subbab ini. Perbandingan dilakukan hanya pada parameter dan kondisi yang diuji, sehingga hasil digunakan untuk menjelaskan kecenderungan sistem tanpa memperluas kesimpulan di luar rentang pengujian yang tersedia.

Error positif terbesar terjadi pada setpoint +10 cm sebesar 3,216 cm, sedangkan error negatif terjadi pada setpoint −10 cm sebesar −0,996 cm. Hasil ini menunjukkan adanya bias yang tidak simetris terhadap kedua arah lateral. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian.



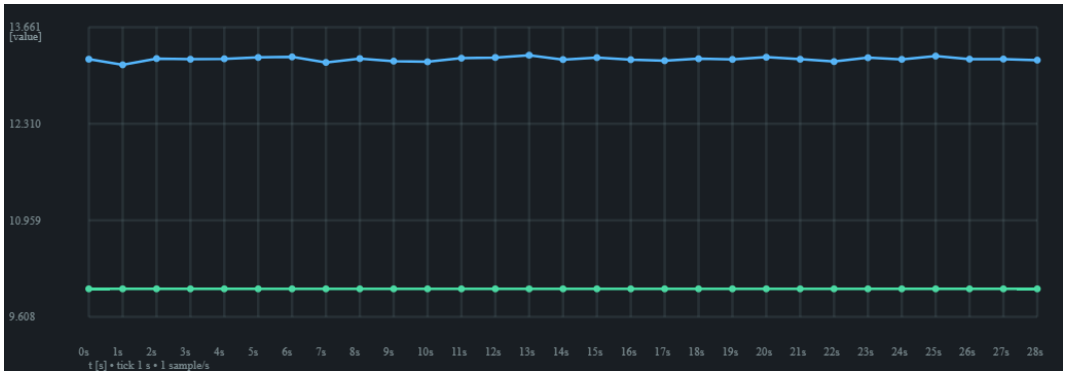
Gambar 4.15 Hubungan Offset Lateral Aktual terhadap Error Pixel
Sumber: Hasil pengujian dan pengolahan data penulis.

Gambar 4.15 menunjukkan hubungan antara offset aktual dan error pada domain piksel. Keluaran berubah mengikuti perpindahan target, namun respons tidak sepenuhnya simetris terhadap titik referensi. Pola pada gambar dibandingkan dengan error terukur pada Tabel 4.8 serta nilai MAE dan RMSE. Dengan pendekatan tersebut, kecenderungan visual digunakan untuk menjelaskan data, sedangkan penilaian akurasi tetap didasarkan pada hasil numerik dalam rentang setpoint yang diuji.



Gambar 4.16 Hubungan Offset Lateral Aktual terhadap Error Ternormalisasi
Sumber: Hasil pengujian dan pengolahan data penulis.

Gambar 4.16 menunjukkan error lateral setelah normalisasi. Normalisasi mengubah skala keluaran, tetapi tidak menghilangkan pola residual error yang terlihat pada data pengujian. Pola pada gambar dibandingkan dengan error terukur pada Tabel 4.8 serta nilai MAE dan RMSE. Dengan pendekatan tersebut, kecenderungan visual digunakan untuk menjelaskan data, sedangkan penilaian akurasi tetap didasarkan pada hasil numerik dalam rentang setpoint yang diuji.



Gambar 4.17 Grafik Data Error Lateral Visual selama Pengujian
Sumber: Hasil pengujian dan pengolahan data penulis.

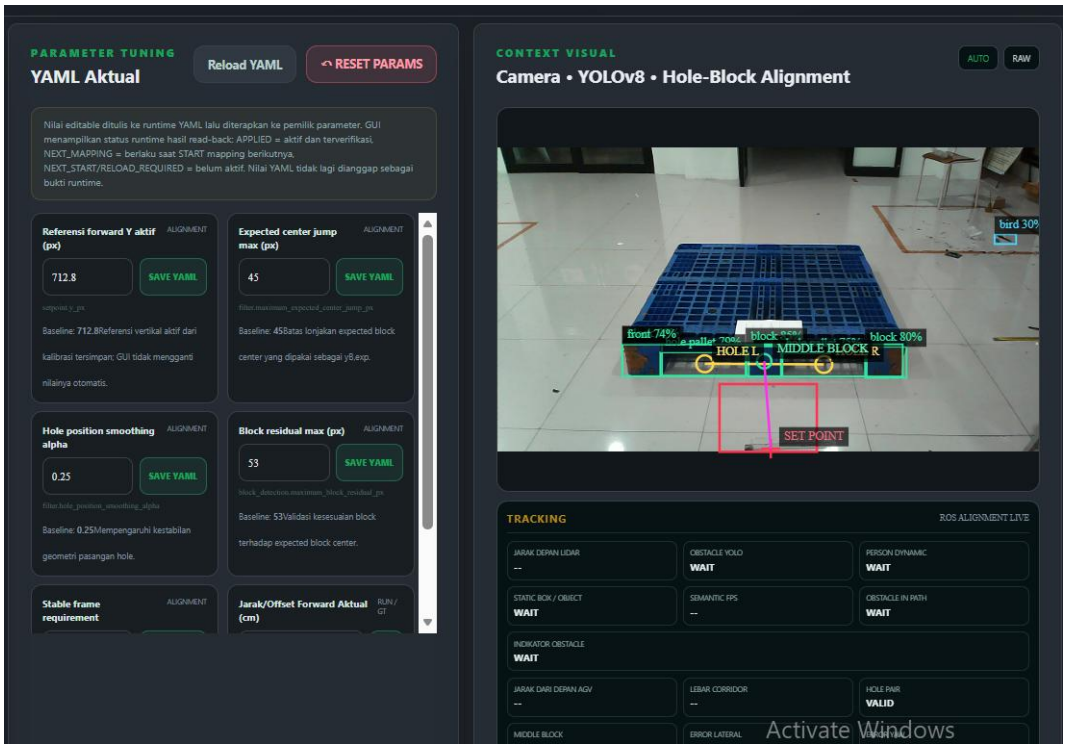
Gambar 4.17 menunjukkan fluktuasi error lateral selama pengambilan data. Karena error tidak konstan pada setiap sampel, evaluasi lateral menggunakan data terukur dan metrik agregat, bukan satu frame. Pola pada gambar dibandingkan dengan error terukur pada Tabel 4.8 serta nilai MAE dan RMSE. Dengan pendekatan tersebut, kecenderungan visual digunakan untuk menjelaskan data, sedangkan penilaian akurasi tetap didasarkan pada hasil numerik dalam rentang setpoint yang diuji.

Nilai MAE dan RMSE menunjukkan bahwa koreksi lateral masih memiliki residual error pada rentang setpoint yang diuji. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian. Hasil lateral selanjutnya digunakan sebagai salah satu masukan pada pengujian respons docking. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian.

4.4.3. Pengujian Error Forward

Pengujian error forward mengevaluasi hubungan antara perubahan posisi longitudinal aktual dan perubahan koordinat vertikal fitur alignment pada citra. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian. Pada pengujian ini, referensi vertikal yang digunakan pada data Tabel 4.9 adalah $y_{f,ref}$ = 715,05 px. Error forward visual dihitung dari selisih antara referensi tersebut dan koordinat $y_{B,exp}$. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian.

Tampilan antarmuka pengujian error forward ditunjukkan pada Gambar 4.18. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian.



Gambar 4.18 Tampilan Antarmuka Pengujian Error Forward

Sumber: Dokumentasi hasil pengujian penulis.

Gambar 4.18 menunjukkan antarmuka pengujian yang menampilkan posisi fitur vertikal dan nilai referensi forward. Data tersebut digunakan untuk menyusun Tabel 4.9. Antarmuka digunakan untuk memastikan parameter pengujian dan keluaran sistem dapat dipantau pada kondisi yang sama saat data direkam. Evaluasi kuantitatif tetap mengacu pada tabel hasil pengujian, sehingga gambar ini diposisikan sebagai dokumentasi pendukung terhadap data numerik.

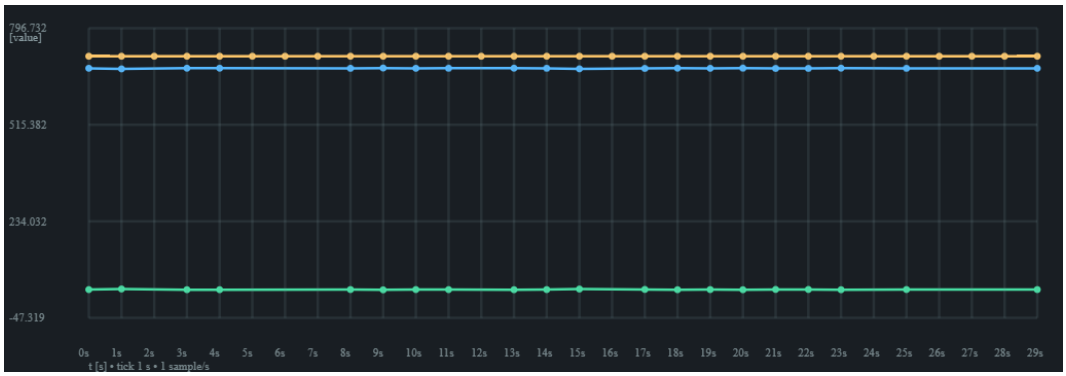
Tabel 4.9 Hasil Pengujian Kondisi Error Forward

No.	Jarak/Offset Aktual	yB,exp (px)	yf,ref (px)	Error Forward (px)	Error Absolut (px)	Status
1	50	656.92	715.05	58.129	58.129	Valid
2	70	633.98	715.05	81.069	81.069	Valid
3	100	609.33	715.05	105.718	105.718	Valid

Sumber: Hasil pengujian dan pengolahan data penulis.

Berdasarkan Tabel 4.9, error forward meningkat dari 58,129 px pada offset 50 menjadi 81,069 px pada offset 70 dan 105,718 px pada offset 100. Seluruh data berstatus valid. Data pada tabel menjadi dasar pembahasan kuantitatif pada subbab ini. Perbandingan dilakukan hanya pada parameter dan kondisi yang diuji, sehingga hasil digunakan untuk menjelaskan kecenderungan sistem tanpa memperluas kesimpulan di luar rentang pengujian yang tersedia.

Hubungan ini menunjukkan perubahan monoton antara offset longitudinal dan error forward pada tiga titik yang diuji. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian. Hubungan tersebut divisualisasikan pada Gambar 4.19. Pembahasan difokuskan pada selisih antara nilai acuan dan keluaran perception serta pada metrik error yang dihitung dari data pengujian.



Gambar 4.19 Grafik Data Error Forward selama Pengujian
Sumber: Hasil pengujian dan pengolahan data penulis.

Gambar 4.19 menunjukkan kecenderungan linear yang kuat antara offset aktual dan error forward. Regresi pada tiga titik menghasilkan R^2 sekitar 0,991; nilai ini dibatasi pada rentang dan jumlah titik pengujian yang digunakan. Pola tersebut dibandingkan dengan data pada Tabel 4.9 untuk menilai konsistensi perubahan error terhadap offset longitudinal. Kesimpulan dibatasi pada tiga titik pengujian yang tersedia dan tidak digunakan untuk menggeneralisasi karakteristik sistem di luar rentang tersebut.

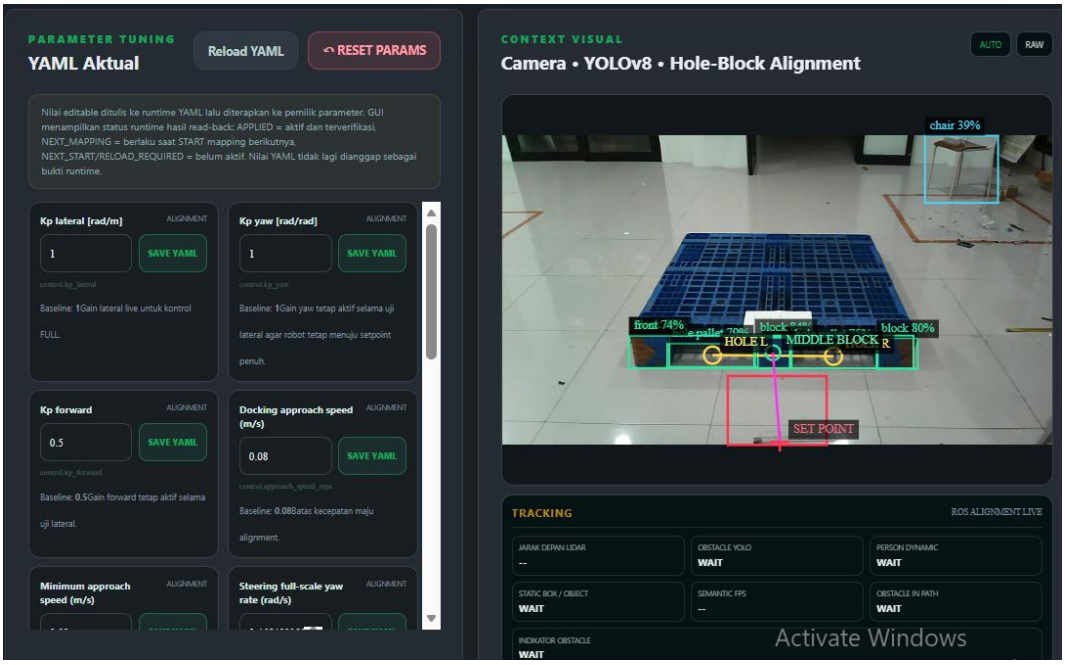
4.5 **Pengujian Respons Sistem Kendali Docking**

Pengujian ini mengevaluasi respons sistem ketika error lateral, yaw, dan forward digunakan secara bersamaan selama proses pendekatan dan penyelarasan AGV terhadap pallet. Data direkam setiap 1 detik selama 34 detik untuk membandingkan perubahan error, keluaran kontrol, dan status sistem.

4.5.1. Pengujian Respons Sistem pada Proses Alignment dan Docking

Pengujian dilakukan sebagai satu rangkaian terintegrasi, sehingga ketiga error diamati secara bersamaan dan tidak diperlakukan sebagai tiga pengujian kontrol yang terpisah. Evaluasi dilakukan berdasarkan perubahan error, keluaran kontrol, dan status sistem yang tercatat selama durasi pengujian. Parameter yang dicatat meliputi error lateral, error yaw, error forward, keluaran proporsional lateral dan yaw, serta status sistem dari t=0 s sampai t=33 s. Evaluasi dilakukan berdasarkan perubahan error, keluaran kontrol, dan status sistem yang tercatat selama durasi pengujian.

Tampilan antarmuka pengujian respons sistem docking ditunjukkan pada Gambar 4.20. Evaluasi dilakukan berdasarkan perubahan error, keluaran kontrol, dan status sistem yang tercatat selama durasi pengujian.



Gambar 4.20 Tampilan Antarmuka Pengujian Respons Sistem Docking

Sumber: Dokumentasi hasil pengujian penulis.

Gambar 4.20 menunjukkan antarmuka pemantauan docking yang menggabungkan keluaran perception, keluaran kontrol, dan status validasi. Data numeriknya disajikan pada Tabel 4.10. Antarmuka digunakan untuk memastikan parameter pengujian dan keluaran sistem dapat dipantau pada kondisi yang sama saat data direkam. Evaluasi kuantitatif tetap mengacu pada tabel hasil pengujian, sehingga gambar ini diposisikan sebagai dokumentasi pendukung terhadap data numerik.

Tabel 4.10 Data Hasil Pengujian Respons Sistem pada Proses Docking

t [s]	Error Lateral (cm)	Error Yaw (deg)	Error Forward (cm)	P Lateral	P Yaw	Status
0	-3.775	-25.383	54.431	0	0	NOT STABLE
1	-3.764	-24.636	54.345	-0.0376	-0.43	NOT STABLE
2	--	--	--	0	0	LOCKING HOLE PAIR
3	-3.764	-18.943	53.127	-0.0376	-0.3306	BLOCK GEOMETRY MISMATCH
4	-2.709	-20.468	48.704	-0.0271	-0.3572	NOT STABLE
5	-2.34	-14.762	47.862	-0.0234	-0.2576	NOT STABLE
6	-1.891	-22.45	45.754	-0.0189	-0.3918	NOT STABLE
7	-1.252	-19.829	44.204	-0.0125	-0.3461	NOT STABLE
8	-0.867	-29.639	42.833	-0.0087	-0.5173	NOT STABLE
9	0.179	-25.22	38.586	0.0018	-0.4402	NOT STABLE
10	1.48	-22.621	35.037	0.0148	-0.3948	NOT STABLE
11	2.192	-31.45	29.692	0.0219	-0.5489	NOT STABLE
12	3.398	-30.225	25.414	0.034	-0.5275	NOT STABLE
13	3.777	-28.755	23.127	0.0378	-0.5019	NOT STABLE
14	3.753	-28.604	21.763	0.0375	-0.4992	NOT STABLE
15	4.058	-29.153	22.63	0.0406	-0.5088	HOLES LOST
16	4.383	-20.61	20.195	0.0438	-0.3597	NOT STABLE
17	4.551	-7.311	15.92	0.0455	-0.1276	NOT STABLE
18	4.938	-14.919	14.192	0.0494	-0.2604	NOT STABLE
19	4.87	-12.542	12.971	0.0487	-0.2189	BLOCK GEOMETRY MISMATCH
20	4.914	-9.768	12.167	0.0491	-0.1705	NOT STABLE
21	4.945	-10.243	12.258	0.0494	-0.1788	NOT STABLE
22	--	--	--	0	0	LOCKING HOLE PAIR

t [s]	Error Lateral (cm)	Error Yaw (deg)	Error Forward (cm)	P Lateral	P Yaw	Status
23	4.909	-10.341	12.169	0.0491	-0.1805	NOT STABLE
24	4.883	-10.099	12.24	0.0488	-0.1763	NOT STABLE
25	4.992	-9.493	12.119	0.0499	-0.1657	NOT STABLE
26	4.826	-11.057	12.242	0.0483	-0.193	NOT STABLE
27	4.893	-9.927	12.252	0.0489	-0.1733	NOT STABLE
28	4.879	-10.671	12.241	0.0488	-0.1862	NOT STABLE
29	4.952	-11.643	12.268	0.0495	-0.2032	NOT STABLE
30	4.902	-10.155	12.24	0.049	-0.1772	NOT STABLE
31	4.916	-9.292	12.243	0.0492	-0.1622	NOT STABLE
32	4.948	-10.432	12.236	0.0495	-0.1821	NOT STABLE
33	4.87	-9.667	12.24	0.0487	-0.1687	NOT STABLE

Sumber: Hasil pengujian dan pengolahan data penulis.

Berdasarkan Tabel 4.10, error forward berkurang dari 54,431 cm menjadi 12,240 cm selama 33 detik pencatatan, sedangkan besar error yaw berkurang dari 25,383° menjadi 9,667°. Data pada tabel menjadi dasar pembahasan kuantitatif pada subbab ini. Perbandingan dilakukan hanya pada parameter dan kondisi yang diuji, sehingga hasil digunakan untuk menjelaskan kecenderungan sistem tanpa memperluas kesimpulan di luar rentang pengujian yang tersedia.

Error lateral berubah dari −3,775 cm menjadi +4,870 cm dan melewati titik nol. Status sistem tercatat NOT STABLE sebanyak 29 sampel, LOCKING HOLE PAIR sebanyak 2 sampel, BLOCK GEOMETRY MISMATCH sebanyak 2 sampel, dan HOLES LOST sebanyak 1 sampel. Evaluasi dilakukan berdasarkan perubahan error, keluaran kontrol, dan status sistem yang tercatat selama durasi pengujian.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem menghasilkan respons pendekatan dan koreksi orientasi, tetapi kondisi alignment stabil belum tercapai pada akhir pengujian. Evaluasi dilakukan berdasarkan perubahan error, keluaran kontrol, dan status sistem yang tercatat selama durasi pengujian.

4.6.Analisis Hasil Pengujian

Pengujian deteksi menunjukkan detection rate 100% pada seluruh variasi halangan dan pallet yang diuji. Confidence berubah terhadap jarak, posisi, orientasi,

dan pencahayaan, sehingga keberhasilan deteksi dan tingkat keyakinan model perlu dibedakan dalam interpretasi hasil. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Pada pengujian error visual, yaw menghasilkan MAE 3,535° dengan error maksimum 5,841°. Lateral menghasilkan MAE 1,591 cm dan RMSE 1,923 cm, sedangkan forward menunjukkan hubungan monoton terhadap offset longitudinal dengan R^2 sekitar 0,991 pada tiga titik pengujian. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa ketiga informasi alignment dapat dihasilkan oleh sistem, namun karakteristik kesalahannya berbeda. Yaw menunjukkan bias orientasi, lateral masih memiliki residual error, dan forward hanya tervalidasi pada tiga titik dalam rentang uji. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Pada pengujian docking, error forward dan besar error yaw menurun, sedangkan error lateral melewati titik nol menuju sisi berlawanan. Perubahan ini menunjukkan adanya respons kontrol tetapi belum menunjukkan konvergensi seluruh error ke kondisi stabil. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Status akhir tetap NOT STABLE. Oleh karena itu, hasil penelitian mendukung keberhasilan integrasi perception dan kontrol, tetapi tidak digunakan untuk menyatakan bahwa docking stabil telah tercapai. Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.

Kesimpulan Bab IV dibatasi pada kondisi, jumlah titik, dan durasi pengujian yang tercatat pada tabel dan grafik.

Pembahasan disusun berdasarkan data yang tercatat pada pengujian sehingga interpretasi tetap sesuai dengan ruang lingkup penelitian.