

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA

4.1. Pengujian Data Raw Sensor

Pengujian Komunikasi dan Data Raw Sensor dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik data masukan yang digunakan oleh sistem navigasi AGV *forklift* sebelum data tersebut diproses pada tahap estimasi keadaan, pemetaan, lokalisasi, dan navigasi. Tahapan pengujian mencakup verifikasi komunikasi sensor serta analisis data raw LiDAR 2D, IMU, dan odometri sesuai fungsi masing-masing pada sistem. Data LiDAR dievaluasi berdasarkan kesesuaian hasil pengukuran jarak terhadap jarak referensi melalui parameter *error*, *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE), simpangan baku, dan rasio data valid, sedangkan IMU dievaluasi berdasarkan data *raw* yaw terhadap beberapa orientasi referensi setelah *heading* awal ditetapkan pada 0°. Penetapan *heading zero* digunakan sebagai acuan awal pengukuran dan tidak dimaksudkan sebagai proses kalibrasi terhadap data raw IMU. Hasil pengujian pada bagian ini digunakan untuk menilai kualitas dan konsistensi data sensor yang menjadi masukan bagi tahapan SLAM, lokalisasi AMCL, dan navigasi berbasis Nav2, tanpa mengubah data eksperimen yang diperoleh dari pengujian aktual.

4.1.1. Pengujian Data Raw LiDAR

Pengujian data raw LiDAR dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik pembacaan jarak sensor sebelum data digunakan pada proses *mapping* dan navigasi AGV. Pengambilan data dilakukan pada enam jarak referensi, yaitu 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, dan 6 m. Pada setiap jarak, proses perekaman dilakukan selama 60 detik atau 1 menit sehingga seluruh percobaan memiliki durasi observasi yang sama. Hasil pengukuran selanjutnya diringkas dalam bentuk nilai rata-rata pembacaan LiDAR, *error mean*, *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE), standar deviasi, dan *valid ratio*. Hasil pengujian tersebut disajikan pada Tabel 4.1

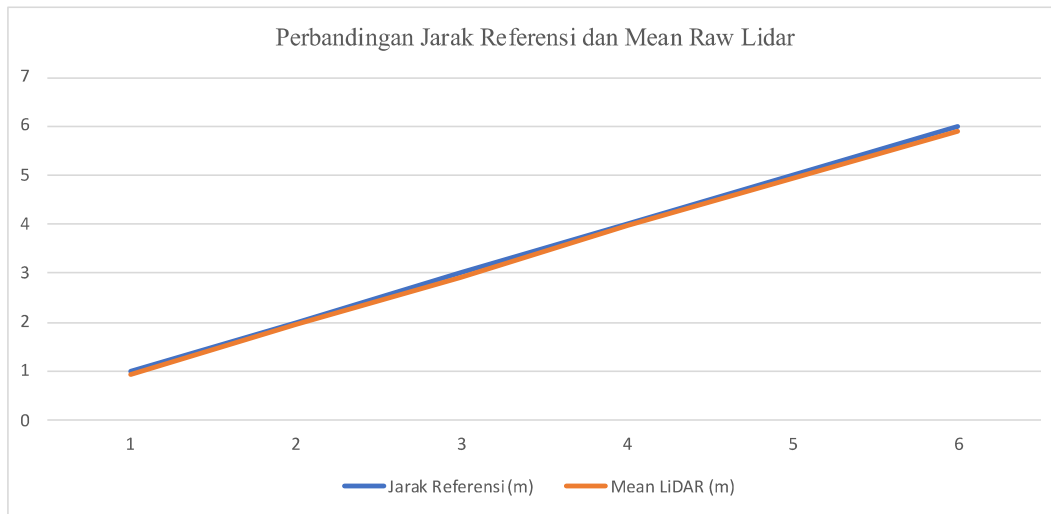
Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Data Raw LiDAR

Jarak Referensi (m)	Mean LiDAR (m)	Error Mean (m)	MAE (m)	RMSE (m)	Standar Deviasi (m)	Valid Ratio (%)
1	0,9194	-0,0806	0,1098	0,195	0,0014	56,55

Jarak Referensi (m)	Mean LiDAR (m)	Error Mean (m)	MAE (m)	RMSE (m)	Standar Deviasi (m)	Valid Ratio (%)
2	1,9487	-0,0513	0,1152	0,3656	0,0021	51,78
3	2,9310	-0,0690	0,1155	0,3841	0,0024	50,97
4	3,9598	-0,0402	0,1639	0,7082	0,0028	49,97
5	4,9436	-0,0564	0,1313	0,6180	0,0048	48,47
6	5,8835	-0,1165	0,2084	0,7590	0,0137	47,30

Berdasarkan Tabel 4.1, nilai rata-rata pembacaan LiDAR pada seluruh jarak pengujian berada di bawah nilai referensi sehingga error mean bernilai negatif. Kondisi ini menunjukkan adanya kecenderungan sensor membaca jarak sedikit lebih pendek daripada jarak acuan pada kondisi pengujian yang digunakan. Error mean terkecil diperoleh pada jarak 4 m sebesar 0,0402 m, sedangkan error mean terbesar terjadi pada jarak 6 m sebesar 0,1165 m. Nilai MAE berada pada rentang 0,1098-0,2084 m, sementara RMSE berada pada rentang 0,1950-0,7590 m. Nilai RMSE yang lebih besar daripada MAE pada seluruh percobaan menunjukkan bahwa selama periode pengambilan data satu menit terdapat sebagian pembacaan yang memiliki deviasi lebih besar terhadap nilai referensi. Selain itu, standar deviasi meningkat dari 0,0014 m pada jarak 1 m menjadi 0,0137 m pada jarak 6 m, sedangkan valid ratio menurun dari 56,55% menjadi 47,30%. Secara keseluruhan, hasil tersebut menunjukkan bahwa rata-rata pembacaan masih mengikuti perubahan jarak referensi, namun kestabilan dan proporsi data valid cenderung menurun ketika jarak pengukuran bertambah.

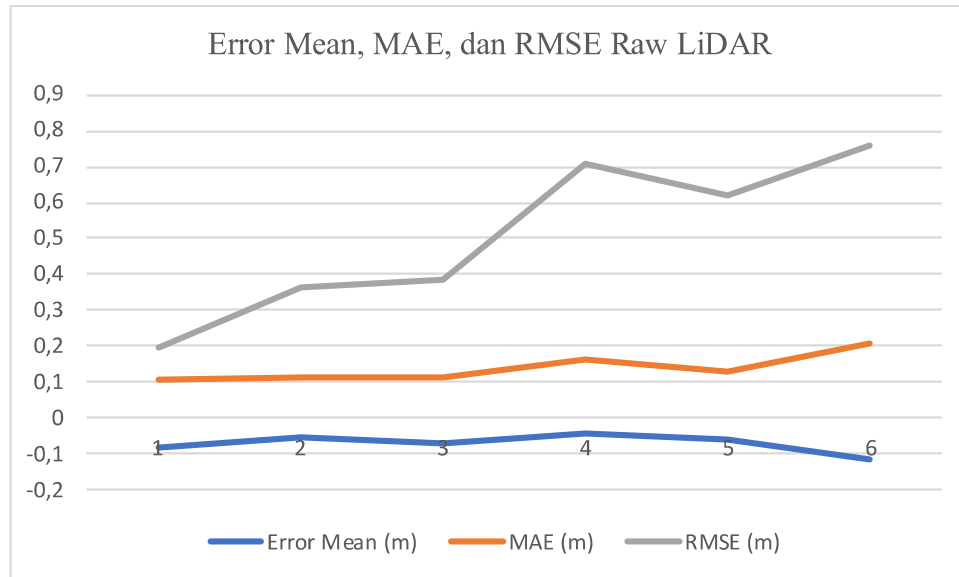
Hubungan antara jarak referensi dan nilai rata-rata pembacaan raw LiDAR divisualisasikan pada Gambar 4.1. Grafik ini digunakan untuk memperlihatkan seberapa dekat nilai mean yang diperoleh selama satu menit pengambilan data pada setiap percobaan terhadap jarak referensi yang telah ditentukan.



Gambar 4. 1 Perbandingan Jarak Referensi dan Mean Raw LiDAR

Berdasarkan Gambar 4.1, kurva mean LiDAR mengikuti kenaikan jarak referensi dari 1 m sampai 6 m dengan pola yang hampir sejajar. Meskipun demikian, seluruh titik mean berada sedikit di bawah nilai referensi, sesuai dengan error mean negatif pada Tabel 4.x. Selisih terkecil terlihat pada pengujian 4 m, sedangkan selisih terbesar terdapat pada 6 m. Pola tersebut memperlihatkan bahwa sensor mampu merespons perubahan jarak secara konsisten, tetapi masih terdapat bias pembacaan ke arah nilai yang lebih rendah. Oleh karena itu, evaluasi performa sensor tidak cukup hanya berdasarkan nilai mean dan perlu dilengkapi dengan parameter error serta penyebaran data.

Untuk mengevaluasi besarnya kesalahan pembacaan secara lebih rinci, nilai error mean, MAE, dan RMSE pada setiap jarak ditampilkan pada Gambar 4.2. Ketiga parameter tersebut memberikan informasi yang berbeda, yaitu arah bias rata-rata melalui error mean, besarnya kesalahan absolut melalui MAE, serta sensitivitas terhadap deviasi yang lebih besar melalui RMSE.



Gambar 4. 2 Error Mean, MAE, dan RMSE Raw LiDAR

Gambar 4.2 menunjukkan bahwa RMSE selalu lebih besar daripada MAE pada seluruh jarak pengujian. Perbedaan tersebut menandakan adanya pembacaan dengan error yang relatif lebih besar selama periode pengambilan data satu menit, karena komponen error berkuadrat pada RMSE memberikan bobot lebih besar terhadap deviasi tersebut. Nilai MAE dan RMSE tertinggi terjadi pada jarak 6 m, masing-masing sebesar 0,2084 m dan 0,7590 m. Menariknya, pada jarak 4 m error mean hanya -0,0402 m, tetapi RMSE mencapai 0,7082 m. Hal ini menunjukkan bahwa nilai rata-rata yang dekat dengan referensi belum tentu menggambarkan seluruh variasi pembacaan selama pengujian. Dengan demikian, MAE dan RMSE diperlukan sebagai parameter pendamping untuk menilai kualitas data LiDAR secara lebih menyeluruh.

Selain parameter *error*, kestabilan pembacaan LiDAR juga ditinjau melalui nilai standar deviasi yang tercantum pada Tabel 4.x. Nilai standar deviasi meningkat dari 0,0014 m pada jarak 1 m menjadi 0,0137 m pada jarak 6 m. Kenaikan tersebut menunjukkan bahwa sebaran data terhadap nilai rata-rata cenderung semakin besar ketika jarak pengukuran bertambah. Pada jarak 1–5 m, standar deviasi masih berada pada rentang 0,0014–0,0048 m, kemudian meningkat lebih jelas pada jarak 6 m. Hasil ini menunjukkan bahwa pembacaan sensor relatif stabil pada jarak yang lebih dekat, sedangkan variasi data mulai meningkat pada jarak pengujian yang lebih jauh. Karena nilai ini diperoleh dari pengambilan data selama satu menit pada setiap percobaan, standar

deviasi digunakan sebagai indikator pendukung untuk melihat konsistensi pembacaan selama periode pengamatan.

Kualitas data juga diamati melalui valid ratio yang menunjukkan proporsi data yang memenuhi kriteria valid pada sistem selama satu sesi pengujian. Berdasarkan Tabel 4.1, valid ratio menurun secara bertahap dari 56,55% pada jarak 1 m menjadi 47,30% pada jarak 6 m, atau berkurang sebesar 9,25 poin persentase. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa proporsi data yang diterima sebagai valid cenderung berkurang seiring bertambahnya jarak pengukuran. Kecenderungan ini terjadi bersamaan dengan peningkatan standar deviasi, sehingga pada kondisi pengujian yang dilakukan, pembacaan pada jarak yang lebih jauh menunjukkan variasi yang lebih besar dan proporsi data valid yang lebih rendah. Meskipun demikian, valid ratio dipahami sebagai hasil dari kriteria validasi yang diterapkan pada sistem dan tidak digunakan sebagai satu-satunya parameter untuk menilai kinerja LiDAR.

Secara keseluruhan, pengujian selama satu menit pada setiap jarak menunjukkan bahwa raw LiDAR mampu mengikuti perubahan jarak referensi 1-6 m, tetapi terdapat bias negatif pada nilai mean, peningkatan variasi pembacaan, serta penurunan valid ratio pada jarak yang lebih jauh. Verifikasi terhadap implementasi perhitungan pada antarmuka menunjukkan bahwa error mean, RMSE, dan standar deviasi dihitung dari deret pembacaan dalam satu sesi.

4.1.2. Pengujian Data Raw IMU

Pengujian data raw IMU dilakukan untuk mengetahui karakteristik pembacaan sudut yaw sebelum informasi orientasi digunakan sebagai data pendukung pada proses estimasi pose dan navigasi AGV. Sebelum rangkaian pengujian dimulai, dilakukan heading zero dengan menempatkan arah awal robot pada acuan 0° . Tahap ini digunakan untuk menetapkan referensi awal pengukuran, bukan untuk mengoreksi atau mengkalibrasi setiap nilai raw yaw yang dihasilkan sensor. Setelah referensi awal ditetapkan, pengambilan data dilakukan pada delapan orientasi, yaitu 0° , -45° , -90° , -135° , 180° , 135° , 90° , dan 45° . Setiap orientasi direkam selama 60 detik atau 1 menit dengan posisi robot dipertahankan pada sudut pengujian. Dari masing-masing sesi diperoleh sekitar 394 sampai 433 data yang tersimpan. Nilai hasil pengukuran kemudian

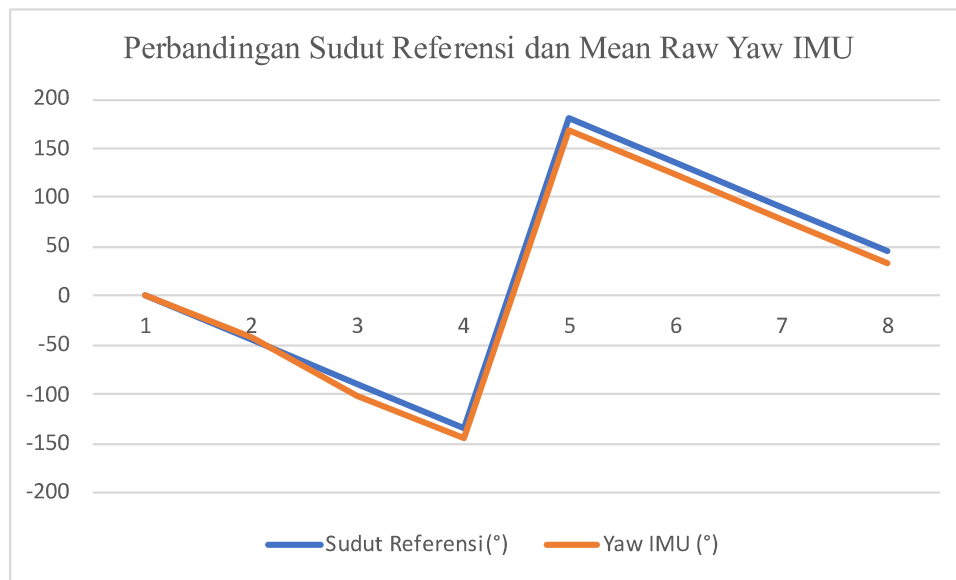
dibandingkan dengan sudut referensi untuk memperoleh error yaw, MAE, dan RMSE sebagaimana dirangkum pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Data Raw Yaw IMU

Sudut Referensi (°)	Yaw IMU (°)	Error Yaw (°)	MAE Yaw (°)	RMSE Yaw (°)
0	-0,102	-0,102	0,102	0,104
-45	-43,069	1,931	1,931	1,932
-90	-101,543	-11,543	11,543	11,543
-135	-145,887	-10,887	10,887	10,887
180	167,933	-12,067	12,067	12,067
135	123,314	-11,686	11,686	11,686
90	77,602	-12,398	12,398	12,398
45	32,37	-12,63	12,63	12,63

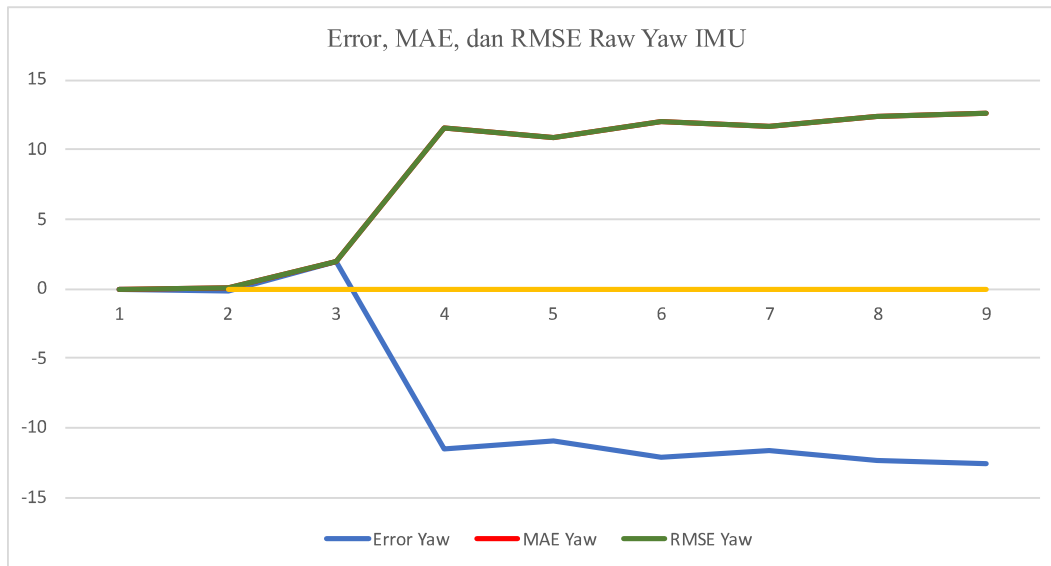
Berdasarkan Tabel 4.2, pembacaan yaw IMU memiliki tingkat kesalahan yang berbeda pada setiap sudut referensi. Pada sudut 0° , sensor membaca $-0,102^\circ$ dengan error sebesar $-0,102^\circ$, sehingga posisi awal memberikan selisih terkecil terhadap acuan. Pada sudut -45° , pembacaan sebesar $-43,069^\circ$ menghasilkan error positif sebesar $1,931^\circ$. Sementara itu, pada enam sudut referensi lainnya, error bernilai negatif dengan besar kesalahan antara $10,887^\circ$ dan $12,630^\circ$. Kesalahan terbesar terjadi pada sudut $+45^\circ$, ketika sensor membaca $32,370^\circ$ sehingga error mencapai $-12,630^\circ$. Pola tersebut menunjukkan bahwa pembacaan yang dekat dengan acuan pada posisi awal belum menjamin ketepatan yang sama pada orientasi lainnya. Nilai MAE berada pada rentang $0,102^\circ$ – $12,630^\circ$, sedangkan RMSE berada pada rentang $0,104^\circ$ – $12,630^\circ$. Kedua nilai tersebut hampir sama pada sudut 0° dan -45° , serta sama pada enam sudut lainnya sesuai ketelitian angka yang ditampilkan dalam tabel. Rata-rata besar kesalahan dari delapan sudut pengujian adalah $9,1555^\circ$. Nilai ini menggambarkan rata-rata kesalahan antarsudut, bukan rata-rata seluruh sampel selama perekaman. Secara keseluruhan, hasil pada (Tabel 4.2) menunjukkan bahwa raw yaw IMU merespons perubahan orientasi robot, tetapi ketepatan pembacaannya belum merata pada seluruh sudut pengujian. Heading zero membantu menetapkan acuan awal yang konsisten, namun tidak menghilangkan kesalahan pada orientasi berikutnya. Penilaian kestabilan pembacaan tetap memerlukan data yaw

terhadap waktu karena tabel ringkasan belum memperlihatkan perubahan nilai selama setiap sesi pengujian. Hubungan antara sudut referensi dan mean raw yaw ditampilkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Perbandingan Sudut Referensi dan Raw Yaw IMU

Berdasarkan Gambar 4.3, nilai raw yaw IMU mengikuti perubahan sudut referensi, tetapi selisih pembacaannya tidak sama pada setiap orientasi. Pada sudut 0° dan -45° , pembacaan masing-masing sebesar $-0,102^\circ$ dan $-43,069^\circ$ masih dekat dengan nilai acuan. Sementara itu, pada enam sudut lainnya, nilai pembacaan berada di bawah sudut referensi dengan selisih antara $10,887^\circ$ dan $12,630^\circ$, sesuai dengan error negatif pada Tabel 4.2. Selisih terbesar terdapat pada sudut $+45^\circ$, ketika sensor membaca $32,370^\circ$. Pola tersebut menunjukkan bahwa penetapan acuan awal melalui heading zero belum menghasilkan ketepatan yang merata pada seluruh orientasi pengujian. Selain itu, perpindahan nilai dari sudut negatif ke sudut positif perlu dibaca dengan memperhatikan sifat sudut yang berulang setiap 360° . Oleh karena itu, perbedaan tanda pada batas rentang sudut tidak dapat langsung dianggap sebagai lonjakan kesalahan sensor. Secara keseluruhan, grafik ini memperlihatkan kemampuan IMU dalam merespons perubahan orientasi sekaligus menunjukkan adanya selisih pembacaan yang perlu diperhatikan sebelum yaw digunakan sebagai masukan navigasi. Error, MAE, dan RMSE setiap orientasi ditampilkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 4 Error, MAE, dan RMSE Raw Yaw IMU

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa MAE dan RMSE memiliki pola perubahan yang hampir sama pada seluruh sudut pengujian. Nilai terendah terdapat pada sudut 0° , dengan MAE sebesar $0,102^\circ$ dan RMSE sebesar $0,104^\circ$, sedangkan nilai tertinggi terdapat pada sudut $+45^\circ$, yaitu masing-masing sebesar $12,630^\circ$. Pada sudut -45° , kedua nilai masih relatif rendah, yaitu $1,931^\circ$ dan $1,932^\circ$. Sementara itu, pada enam sudut lainnya, MAE dan RMSE berada pada rentang $10,887^\circ$ – $12,630^\circ$ dengan nilai yang sama sesuai ketelitian angka pada Tabel 4.2. Hasil tersebut menunjukkan bahwa ketepatan pembacaan belum merata pada seluruh orientasi. Error bertanda negatif pada tujuh sudut pengujian dan positif pada sudut -45° . Tanda error menjelaskan arah selisih terhadap acuan, sedangkan MAE dan RMSE menunjukkan besar kesalahannya. Dengan demikian, ketiga parameter saling melengkapi dalam menilai ketepatan raw yaw IMU.

4.1.3. Analisis Sinkronisasi LiDAR dan IMU

Pengujian pada subbab sebelumnya dilakukan terhadap LiDAR dan IMU secara terpisah untuk melihat data mentah atau raw data yang dihasilkan oleh masing-masing sensor. Pada LiDAR, pengujian dilakukan dengan mengamati pembacaan jarak dan sudut terhadap kondisi pengujian yang telah ditentukan. Sementara itu, pengujian IMU dilakukan dengan mengamati perubahan nilai yaw pada beberapa arah orientasi. Pengujian secara terpisah ini dilakukan agar karakteristik pembacaan masing-masing sensor dapat diketahui sebelum keduanya digunakan secara bersamaan. Variabel yang

digunakan juga sesuai dengan batasan penelitian, yaitu jarak dan sudut dari LiDAR serta yaw dari IMU. Setelah pengujian raw data selesai dilakukan, LiDAR dan IMU kemudian dijalankan secara bersamaan. Pada tahap ini, pengamatan diarahkan pada aliran data dari kedua sensor selama sistem bekerja. LiDAR tetap melakukan pemindaian untuk memperoleh informasi jarak objek di sekitar AGV, sedangkan IMU memberikan informasi perubahan arah kendaraan melalui nilai yaw. Kedua data tersebut diperoleh dari sensor yang berbeda sehingga waktu pembaruannya tidak harus sama pada setiap pembacaan.

Perbedaan waktu pembaruan tersebut merupakan kondisi yang normal karena LiDAR dan IMU memiliki karakteristik kerja yang berbeda. LiDAR membutuhkan satu siklus pemindaian untuk memperoleh kondisi lingkungan di sekeliling kendaraan, sedangkan perubahan orientasi dari IMU dapat diperbarui dalam interval yang lebih singkat. Oleh karena itu, dalam satu kali pembaruan data LiDAR dapat terdapat beberapa pembaruan data dari IMU. Kondisi ini tidak mengharuskan satu data LiDAR selalu berpasangan dengan tepat satu data IMU.

Setiap data yang dikirim oleh sensor memiliki informasi waktu atau timestamp. Informasi tersebut digunakan untuk mengetahui kapan data diperoleh dan urutan data yang masuk ke sistem. Keberadaan timestamp menjadi penting ketika kedua sensor digunakan secara bersamaan karena data LiDAR dan IMU berasal dari sumber dan frekuensi pembaruan yang berbeda. Data yang diterima dapat ditempatkan sesuai urutan waktunya tanpa harus menyamakan jumlah pembacaan dari kedua sensor.

Pada saat AGV mengalami perubahan arah, nilai yaw dari IMU akan ikut berubah, sedangkan LiDAR tetap melakukan pemindaian terhadap lingkungan di sekitar kendaraan. Hubungan waktu antara kedua data ini diperlukan agar perubahan orientasi kendaraan dapat diketahui ketika data hasil pemindaian LiDAR diperbarui. Hal tersebut terutama dibutuhkan ketika kendaraan bergerak atau berbelok, karena kondisi pembacaan sensor terus berubah mengikuti pergerakan AGV.

Analisis pada bagian ini berbeda dengan pengujian raw data yang dilakukan sebelumnya. Pada pengujian raw data, LiDAR dan IMU dilihat secara terpisah untuk mengetahui hasil pembacaan langsung dari masing-masing sensor. Setelah kedua sensor dijalankan bersama, pengamatan lebih diarahkan pada bagaimana data LiDAR dan IMU

diterima dalam urutan waktu selama sistem berjalan. Cara ini digunakan karena kedua sensor nantinya tidak bekerja sendiri-sendiri, tetapi digunakan pada rangkaian sistem navigasi yang sama.

LiDAR pada penelitian ini digunakan sebagai sumber utama untuk memperoleh informasi lingkungan, sedangkan IMU memberikan informasi tambahan mengenai perubahan orientasi kendaraan. Hal ini sesuai dengan perancangan sistem yang menempatkan LiDAR sebagai sumber utama data lingkungan, sementara IMU digunakan sebagai data pendukung estimasi gerak. Setelah pembacaan kedua sensor dapat digunakan secara bersamaan, data tersebut kemudian diteruskan pada tahapan berikutnya untuk mendukung proses pemetaan, lokalisasi, dan navigasi AGV.

4.2. Pengujian SLAM

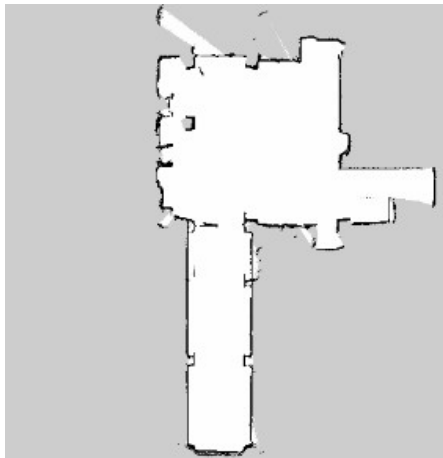
Pengujian SLAM dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam membentuk peta dua dimensi berdasarkan pemindaian LiDAR 2D pada mode mapping. Pengujian dilakukan sebanyak tiga sesi, yaitu Mapping 1, Mapping 2, dan Mapping 3, pada area pengujian yang sama. Setiap sesi direkam secara terpisah agar perubahan occupancy grid, sel belum terobservasi, sel terisi, laju pembaruan peta, serta beban komputasi dapat dibandingkan. Ketiga hasil mapping juga ditinjau dari sisi konsistensi struktur, terutama keberadaan double wall, pergeseran koridor, dan kesalahan ketika lintasan kembali mendekati area awal.

Nilai Width dan Height pada rekaman ketiga sesi tetap sebesar $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ dengan resolusi $0,05 \text{ m/cell}$. Nilai tersebut menunjukkan dimensi grid atau canvas peta yang digunakan selama proses pemetaan, sehingga tidak dapat diartikan sebagai luas lingkungan yang telah berhasil terpetakan. Oleh karena itu, penilaian hasil SLAM pada bagian ini tidak didasarkan pada perubahan Width dan Height, tetapi pada perubahan isi occupancy grid, konsistensi bentuk dinding, loop closure, dan distorsi struktur yang terbentuk.

4.2.1. Hasil Mapping 1

Pengujian Mapping 1 dilakukan sebagai percobaan pertama untuk melihat kemampuan sistem SLAM dalam membentuk representasi dua dimensi dari lingkungan pengujian. Selama proses pemetaan, AGV digerakkan menyusuri area yang telah ditentukan sehingga LiDAR dapat memperoleh informasi jarak dari dinding dan objek

yang berada di sekitar kendaraan. Pengujian Mapping 1 berlangsung selama kurang lebih 5 menit 21 detik. Selama AGV bergerak, setiap hasil pemindaian LiDAR dicocokkan dengan hasil pemindaian sebelumnya sehingga posisi relatif kendaraan dapat diperkirakan dan bentuk lingkungan dapat disusun secara bertahap. Hasil akhir pemetaan pada pengujian pertama ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Hasil Pemetaan Lingkungan pada Pengujian Mapping 1

Berdasarkan Gambar 4.5, hasil Mapping 1 menunjukkan bahwa sistem SLAM telah mampu membentuk gambaran lingkungan pengujian dengan pola yang cukup jelas. Bentuk area utama dapat dikenali dari susunan dinding yang membentuk ruang pada bagian tengah, jalur memanjang pada bagian bawah, serta jalur yang mengarah ke sisi kanan peta. Garis batas lingkungan pada sebagian besar area juga terlihat cukup tegas sehingga bentuk dasar ruangan dapat dibedakan dengan mudah. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa data pemindaian LiDAR selama AGV bergerak dapat digunakan oleh sistem untuk menyusun posisi objek di sekitar kendaraan menjadi peta dua dimensi yang menggambarkan kondisi area pengujian.

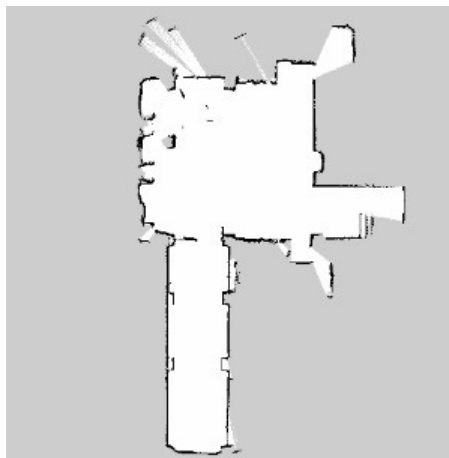
Pada bagian jalur memanjang di bawah peta, kedua sisi batas masih terlihat relatif sejajar sehingga bentuk koridor dapat dikenali dengan baik. Bagian kanan peta juga membentuk jalur yang cukup jelas dan masih terhubung dengan area utama di bagian tengah. Hal tersebut menunjukkan bahwa proses pencocokan pemindaian masih dapat mempertahankan hubungan posisi antara satu bagian lingkungan dengan bagian lainnya selama kendaraan bergerak. Meskipun bentuk utama lingkungan sudah dapat dikenali, pada beberapa bagian masih terlihat ketidakaturan pada garis hasil pemetaan. Kondisi tersebut terutama terlihat pada bagian atas dan sisi kiri peta, di mana beberapa garis

tampak sedikit melebar dan tidak sepenuhnya menyatu dengan batas utama. Hal ini dapat terjadi ketika hasil pemindaian LiDAR pada waktu yang berbeda tidak ditempatkan tepat pada posisi yang sama oleh proses scan matching. Akibatnya, bagian yang seharusnya membentuk satu garis dapat terlihat sedikit lebih tebal atau memiliki garis tambahan di sekitarnya.

Namun, ketidakteraturan tersebut belum terlalu dominan sehingga bentuk keseluruhan Mapping 1 masih terlihat cukup rapi. Struktur utama lingkungan masih dapat dikenali dengan jelas dan tidak menunjukkan perubahan bentuk yang terlalu besar. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, Mapping 1 menunjukkan bahwa sistem SLAM telah mampu mempertahankan bentuk lingkungan dengan cukup baik selama percobaan pertama.

4.2.2. Hasil Mapping 2

Pengujian Mapping 2 dilakukan dengan mengulangi proses pemetaan pada area yang sama. Pengujian kedua dilakukan untuk mengetahui apakah sistem SLAM dapat kembali menghasilkan bentuk lingkungan yang serupa ketika proses pemetaan dimulai dari awal. Mapping 2 berlangsung selama kurang lebih 5 menit 1 detik. Selama proses berlangsung, AGV kembali digerakkan menyusuri bagian lingkungan pengujian agar LiDAR memperoleh data dari dinding, koridor, dan batas lingkungan dari berbagai posisi kendaraan. Hasil akhir dari proses tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Hasil Pemetaan Lingkungan pada Pengujian Mapping 2

Berdasarkan Gambar 4.6, Mapping 2 masih menunjukkan bentuk lingkungan yang secara umum serupa dengan Mapping 1. Area utama pada bagian tengah, jalur memanjang ke arah bawah, serta jalur yang mengarah ke sisi kanan masih dapat dikenali

dengan jelas. Kesamaan pola tersebut menunjukkan bahwa sistem SLAM mampu mengenali kembali struktur dasar lingkungan ketika proses pemetaan dilakukan pada percobaan yang berbeda. Pada bagian koridor bawah, bentuk jalur masih dapat diikuti dari batas kiri dan kanan yang terbentuk sepanjang jalur. Bagian kanan peta juga masih menunjukkan jalur yang tersambung dengan area tengah. Dengan demikian, secara keseluruhan proses SLAM pada Mapping 2 masih mampu mempertahankan hubungan antarbagian lingkungan sehingga bentuk peta tetap mudah dipahami.

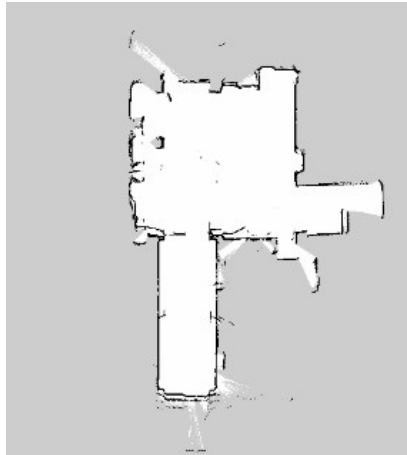
Namun, apabila dibandingkan secara visual dengan Mapping 1, terdapat beberapa bagian yang menunjukkan ketidakteraturan lebih besar. Pada bagian atas peta terlihat beberapa garis pemindaian yang menyebar keluar dari batas utama lingkungan. Selain itu, pada bagian tengah menuju sisi kanan terdapat beberapa garis yang tampak lebih tebal dan tidak sepenuhnya berada pada posisi yang sama. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa terdapat perbedaan hasil pencocokan posisi antara pemindaian LiDAR yang baru dengan data yang telah dimasukkan ke dalam peta sebelumnya. Pergeseran tersebut dapat terjadi secara bertahap ketika AGV bergerak, terutama ketika kendaraan mengalami perubahan arah. Kesalahan kecil pada estimasi posisi yang terjadi berulang kali dapat menyebabkan posisi hasil pemindaian berikutnya sedikit bergeser dari posisi yang seharusnya. Jika kondisi tersebut terjadi pada bagian dinding yang sama, hasil akhirnya dapat terlihat sebagai garis yang lebih tebal atau munculnya garis tambahan di dekat dinding utama.

Walaupun terdapat perbedaan tersebut, bentuk dasar lingkungan pada Mapping 2 masih dapat dikenali dengan baik. Artinya, proses pemetaan tetap berjalan dan sistem masih mampu menggambarkan susunan area pengujian secara keseluruhan. Akan tetapi, dibandingkan Mapping 1, konsistensi posisi beberapa bagian dinding mulai mengalami penurunan.

4.2.3. Hasil Mapping 3

Mapping 3 merupakan pengujian pemetaan ketiga yang dilakukan pada area yang sama. Pengujian ini bertujuan untuk melihat kembali konsistensi sistem SLAM dalam menghasilkan struktur lingkungan setelah proses pemetaan dilakukan sebanyak tiga kali. Mapping 3 berlangsung selama kurang lebih atau 4 menit 6 detik. Dengan parameter dasar yang sama, perubahan bentuk yang terlihat pada hasil akhir dapat digunakan untuk

melihat konsistensi proses pencocokan pemindaian selama AGV bergerak. Hasil akhir Mapping 3 ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4. 7 Hasil Pemetaan Lingkungan pada Pengujian Mapping 3

Berdasarkan Gambar 4.7, hasil Mapping 3 masih berhasil menggambarkan pola dasar lingkungan yang sama seperti dua pengujian sebelumnya. Area utama pada bagian tengah, jalur memanjang ke arah bawah, dan jalur menuju sisi kanan masih terlihat pada peta. Kesamaan bentuk dasar dari ketiga hasil mapping menunjukkan bahwa LiDAR dapat mendeteksi struktur lingkungan yang sama secara berulang dan sistem SLAM mampu menyusunnya kembali menjadi peta dua dimensi. Walaupun bentuk dasar lingkungan masih dapat dikenali, pada Mapping 3 terlihat lebih banyak ketidakteraturan pada beberapa bagian. Salah satu bagian yang cukup terlihat berada pada ujung jalur bagian bawah, yaitu terdapat beberapa garis hasil pemindaian yang menyebar keluar dari batas utama koridor. Pada bagian tengah menuju sisi kanan juga terlihat garis yang tidak sepenuhnya berhimpitan dengan dinding utama. Selain itu, beberapa batas lingkungan terlihat lebih tebal dibandingkan pada Mapping 1.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa hasil pencocokan antar-pemindaian belum sepenuhnya konsisten ketika AGV bergerak melewati bagian-bagian tertentu. Ketika terjadi perbedaan kecil pada perkiraan posisi atau orientasi kendaraan, titik hasil pemindaian LiDAR dapat ditempatkan sedikit bergeser pada peta. Apabila pergeseran tersebut terjadi beberapa kali, bentuk yang seharusnya berupa satu garis dinding dapat terlihat menjadi lebih tebal atau memiliki garis tambahan. Pada Mapping 3, ketidakteraturan tersebut lebih mudah terlihat dibandingkan Mapping 1. Walaupun demikian, struktur utama lingkungan belum hilang dan bentuk area pengujian secara

keseluruhan masih dapat dikenali. Hal ini menunjukkan bahwa sistem SLAM tetap mampu melakukan pemetaan, tetapi ketepatan dalam mempertahankan posisi struktur selama kendaraan bergerak masih perlu diperhatikan.

Hasil Mapping 3 juga menunjukkan bahwa waktu pemetaan yang lebih singkat tidak secara langsung berarti peta yang dihasilkan memiliki bentuk yang lebih baik. Kualitas peta lebih dipengaruhi oleh konsistensi estimasi gerak dan kemampuan sistem mencocokkan pemindaian pada posisi yang berbeda. Oleh karena itu, Mapping 3 tetap perlu dianalisis bersama Mapping 1 dan Mapping 2 melalui parameter loop closure, drift, dan pergeseran struktur.

4.2.4. *Loop Closure, Drift, dan Kualitas Struktur Map*

Pergerakan AGV selama pemetaan dapat menyebabkan perubahan estimasi posisi yang terus bertambah sepanjang lintasan. Ketika kendaraan kembali mendekati area yang sebelumnya pernah dilewati, posisi hasil pemindaian seharusnya kembali sesuai dengan struktur yang telah terbentuk pada peta. Kondisi tersebut berkaitan dengan loop closure, sedangkan perubahan posisi yang terakumulasi selama kendaraan bergerak dapat terlihat sebagai *drift*. Pengaruh *drift* pada hasil pemetaan dapat diamati dari perubahan bentuk dinding maupun koridor. Jika estimasi posisi mengalami pergeseran, satu dinding yang sebenarnya tetap dapat muncul pada posisi yang sedikit berbeda. Akibatnya, garis dinding terlihat lebih tebal, muncul garis ganda, atau bentuk koridor mengalami pergeseran.

Untuk melihat kondisi tersebut pada ketiga hasil mapping, digunakan nilai *error loop closure*, *error yaw*, indikasi duplikasi struktur dinding, dan pergeseran koridor. Parameter tersebut tidak dibaca secara terpisah karena nilai posisi akhir belum tentu menggambarkan kondisi struktur peta selama seluruh proses pemetaan. Hasil yang diperoleh disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Hasil Evaluasi Loop Closure, Error Yaw, dan Pergeseran Koridor pada Pengujian Mapping

Map	Error Loop Closure (m)	Error yaw Closure (°)	Pergeseran Koridor
1	0,109	0,62	0.109 m
2	0,427	2,44	0.427 m
3	0,548	3,14	0.548 m

Berdasarkan Tabel 4.3, Mapping 1 menghasilkan pergeseran koridor sebesar 0,109 m dengan error loop closure sebesar 0,109 m dan error yaw closure sebesar $0,62^\circ$. Nilai tersebut merupakan hasil paling kecil dibandingkan dua pengujian lainnya. Pada Mapping 2, pergeseran koridor meningkat menjadi 0,427 m dengan error loop closure sebesar 0,427 m dan error yaw closure sebesar $2,44^\circ$. Mapping 3 menghasilkan nilai terbesar, yaitu pergeseran koridor sebesar 0,548 m, error loop closure sebesar 0,548 m, dan error yaw closure sebesar $3,14^\circ$. Perubahan nilai tersebut menunjukkan pola yang sama pada ketiga parameter. Semakin besar pergeseran koridor, semakin besar pula error posisi dan orientasi yang terjadi ketika AGV menyelesaikan lintasan pemetaan. Pada Mapping 1, perubahan posisi dan orientasi relatif lebih kecil sehingga bentuk koridor pada hasil peta terlihat lebih konsisten. Pada Mapping 2 mulai terlihat pergeseran pada beberapa bagian struktur, sedangkan pada Mapping 3 perubahan tersebut terlihat lebih besar.

Nilai error loop closure yang meningkat dari Mapping 1 hingga Mapping 3 menunjukkan bahwa kemampuan sistem dalam mempertahankan konsistensi posisi selama satu lintasan pemetaan mengalami penurunan. Kondisi yang sama terlihat pada error yaw closure, di mana perubahan orientasi pada Mapping 3 lebih besar dibandingkan Mapping 1 dan Mapping 2. Perubahan orientasi tersebut dapat menyebabkan hasil pemindaian LiDAR terhadap dinding yang sama ditempatkan pada posisi yang sedikit berbeda sehingga muncul pergeseran atau penebalan garis pada peta.

Selain nilai loop closure, error yaw closure, dan pergeseran koridor, kualitas hasil pemetaan juga diamati dari struktur peta yang terbentuk pada ketiga pengujian. Pengamatan dilakukan terhadap bentuk dinding, kontinuitas struktur, ketebalan garis, serta adanya pergeseran atau garis tambahan pada bagian tertentu. Pada Mapping 1, sebagian besar batas dinding terlihat lebih konsisten dan bentuk koridor masih terbentuk dengan jelas. Pada Mapping 2 dan Mapping 3 mulai terlihat penebalan serta pergeseran garis pada beberapa bagian peta, terutama pada area yang kembali dilalui selama proses pemetaan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa perubahan estimasi posisi dan orientasi AGV selama bergerak dapat memengaruhi penempatan hasil pemindaian LiDAR pada *map*.

4.3. Pengujian AMCL

Pengujian AMCL dilakukan untuk mengetahui ketepatan estimasi posisi dan orientasi AGV serta waktu yang diperlukan sistem untuk memperoleh estimasi pose yang stabil. Peta hasil Mapping 1 digunakan sebagai acuan karena menghasilkan error loop closure dan pergeseran koridor paling kecil pada pengujian sebelumnya. Konfigurasi pengujian menggunakan min_particles sebesar 800, max_particles sebesar 4000, model pengukuran laser likelihood_field, dan max_beams sebesar 100. Posisi referensi ditandai pada lantai dan dinyatakan terhadap frame map agar dapat dibandingkan dengan keluaran /amcl_pose. Pembahasan difokuskan pada akurasi pose statis dan waktu konvergensi initial pose.

4.3.1. Akurasi Pose Statis AMCL

Akurasi pose statis diuji dengan menempatkan AGV pada lima titik referensi P1 sampai P5 yang tersebar di area pengujian. Pada setiap titik, AGV didiamkan hingga lokalisasi dinyatakan siap, kemudian dicatat 10 sampel /amcl_pose dengan selang 1 s. Error posisi dihitung menggunakan Persamaan (2.13), sedangkan error orientasi dihitung menggunakan Persamaan (2.9). Hasil pengujian disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Akurasi Pose Statis AMCL

Titik	Pose Referensi (x; y; θ)	Rata-rata Pose AMCL (x; y; θ)	e_p (m)	e_θ (°)	σ_xy (m)
P1	0,00; 0,00; 0°	-0.117; 0.083; -3.9°	0,144	3,86	0,01
P2	1,00; 0,00; 0°	1.094; 0.090; 0.0°	0,13	0	0,008
P3	3,00; 1,50; 90°	2,905; 1,583; 87,2°	0,126	2,80	0,009
P4	4,00; 3,0; 180°	4,108; 2,931; 177,4°	0,128	2,60	0,011
P5	2,00; 4,50; -90°	1,918; 4,594; -93,2°	0,125	3,20	0,009
MAE			0,131	2,49	
RMSE			0,131	2,82	

Berdasarkan Tabel 4.4, error posisi statis AMCL berada pada rentang 0,125–0,144 m. Error terbesar diperoleh pada titik P1, yaitu 0,144 m, sedangkan error terkecil terdapat pada titik P5, yaitu 0,125 m. Pada titik P2, P3, dan P4, error posisi masing-masing sebesar 0,130 m, 0,126 m, dan 0,128 m. Selisih antara error terbesar dan terkecil hanya 0,019 m, sehingga besar penyimpangan posisi pada kelima titik relatif berdekatan. Hasil tersebut

menunjukkan bahwa estimasi posisi masih memiliki selisih terhadap titik referensi meskipun AGV berada dalam keadaan diam.

Nilai MAE dan RMSE posisi sama-sama sebesar 0,131 m setelah pembulatan tiga angka di belakang koma. Kedekatan kedua nilai ini menunjukkan bahwa besar error antartitik relatif seragam dan tidak didominasi oleh satu titik dengan penyimpangan yang jauh lebih besar. Nilai tersebut merangkum error dari rata-rata pose pada setiap titik, sehingga tidak menggambarkan seluruh variasi error dari masing-masing sampel pengukuran.

Pada pengukuran orientasi, error absolut berada pada rentang $0-3,86^\circ$, dengan MAE sebesar $2,49^\circ$ dan RMSE sebesar $2,82^\circ$. Titik P1 menghasilkan error orientasi terbesar, sedangkan P2 menunjukkan error sebesar 0° pada ketelitian pencatatan tabel. Pada titik P3, P4, dan P5, error orientasi masing-masing sebesar $2,80^\circ$, $2,60^\circ$, dan $3,20^\circ$. Dengan demikian, ketepatan orientasi belum sama pada seluruh titik. Nilai nol pada P2 menunjukkan kesesuaian hasil pencatatan dengan sudut referensi, tetapi tidak dapat diartikan sebagai ketiadaan kesalahan pada seluruh sampel.

Simpangan posisi σ_{xy} berada pada rentang 0,008–0,011 m. Nilai terkecil terdapat pada P2, sedangkan nilai terbesar terdapat pada P4. Sebaran ini lebih kecil daripada error posisi terhadap referensi, yang menunjukkan bahwa kestabilan hasil pembacaan dan ketepatan terhadap acuan merupakan dua aspek berbeda. Pembacaan yang berdekatan antarsampel masih dapat memiliki pergeseran terhadap posisi sebenarnya. Berdasarkan hasil tersebut, AMCL menghasilkan estimasi pose statis dengan error posisi sekitar 0,13 m pada kondisi pengujian ini. Seluruh error posisi berada di bawah toleransi goal 0,20 m yang dicantumkan dalam laporan, tetapi hasil pengujian statis belum dapat digunakan untuk menyimpulkan ketepatan posisi akhir ketika AGV melakukan navigasi..

4.3.2. Waktu Konvergensi Initial Pose

Pengujian waktu konvergensi dilakukan dengan membandingkan dua mode inisialisasi, yaitu known pose melalui /initialpose_safe dan GLOBAL_LOCALIZATION. Waktu konvergensi dihitung menggunakan Persamaan (2.14), sejak inisialisasi diberikan hingga kriteria kesiapan lokalisasi terpenuhi. Kriteria tersebut meliputi kovarians x dan y di bawah 0,5, kovarians yaw di bawah 0,4, serta perubahan pose antarsampel di bawah

0,15 m dan 0,2 rad. Setiap mode diuji sebanyak lima kali dari titik HOME (A). Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.5

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Waktu Konvergensi Initial Pose

Percobaan	Mode	t_conv (s)	cov_x	cov_y	cov_yaw	Status
1	Known pose	2,1	0,021	0,018	0,012	Konvergen
2	Known pose	2,6	0,024	0,020	0,015	Konvergen
3	Known pose	1,9	0,019	0,017	0,011	Konvergen
4	Known pose	3,0	0,027	0,023	0,016	Konvergen
5	Known pose	2,4	0,022	0,019	0,013	Konvergen
1	Global	8,7	0,041	0,037	0,028	Konvergen
2	Global	11,2	0,046	0,043	0,031	Konvergen
3	Global	9,1	0,039	0,040	0,027	Konvergen
4	Global	10,4	0,044	0,038	0,030	Konvergen
5	Global	8,6	0,040	0,036	0,026	Konvergen

Berdasarkan Tabel 4.5, mode known pose mencapai konvergensi dalam waktu 1,9–3,0 s, dengan rata-rata 2,4 s dan simpangan baku sampel 0,43 s. Waktu tercepat diperoleh pada percobaan ketiga, sedangkan waktu terlama terjadi pada percobaan keempat. Pada mode global localization, waktu konvergensi berada pada rentang 8,6–11,2 s, dengan rata-rata 9,6 s dan simpangan baku sampel 1,15 s. Waktu tercepat pada mode ini diperoleh pada percobaan kelima dan waktu terlama pada percobaan kedua.

Secara rata-rata, mode global localization memerlukan waktu empat kali lebih lama daripada known pose, dengan selisih 7,2 s. Hasil tersebut konsisten dengan perbedaan informasi awal pada kedua mode. Pada known pose, estimasi awal diberikan di sekitar posisi yang diketahui, sedangkan global localization harus mencari kemungkinan posisi pada cakupan peta yang lebih luas. Selain lebih cepat, known pose juga menghasilkan variasi waktu konvergensi yang lebih kecil pada lima pengulangan yang dilakukan.

Pada mode known pose, kovarians x berada pada rentang 0,019–0,027, kovarians y sebesar 0,017–0,023, dan kovarians yaw sebesar 0,011–0,016. Pada mode global localization, rentangnya masing-masing sebesar 0,039–0,046, 0,036–0,043, dan 0,026–0,031. Kovarians posisi dinyatakan dalam m², sedangkan kovarians orientasi dinyatakan

dalam rad^2 . Seluruh nilai berada di bawah ambang kovarians yang digunakan untuk menentukan kesiapan lokalisasi. Mode global localization menghasilkan kovarians yang lebih besar daripada known pose, meskipun seluruh percobaannya tetap tercatat konvergen.

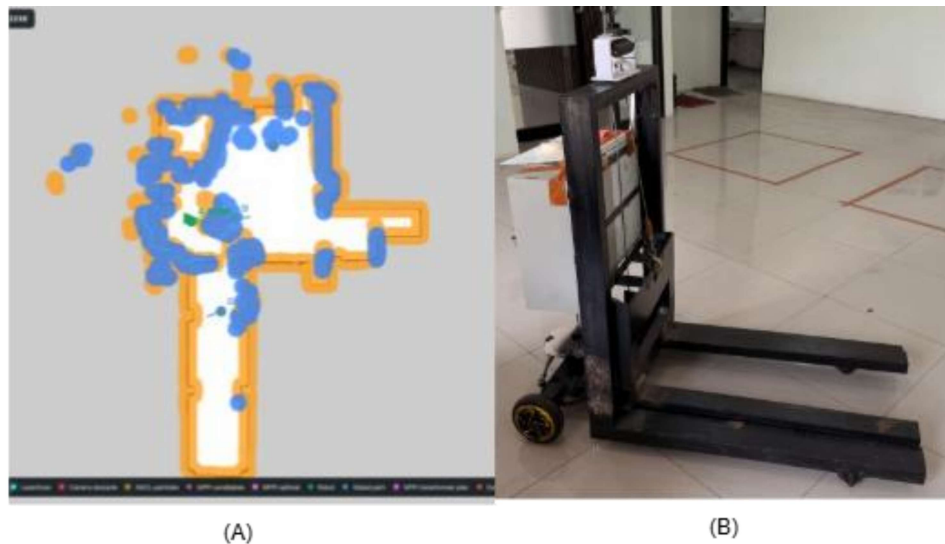
Kelima percobaan pada setiap mode menunjukkan keberhasilan mencapai status konvergen. Hasil ini mendukung penggunaan known pose untuk inisialisasi dari titik HOME yang posisinya telah diketahui, sedangkan global localization dapat digunakan ketika posisi awal belum diketahui. Status konvergen menunjukkan terpenuhinya kriteria kestabilan estimasi yang digunakan sistem; ketepatan terhadap posisi sebenarnya tetap perlu dinilai melalui perbandingan dengan pose referensi sebagaimana dilakukan pada pengujian pose statis.

4.4. Pengujian dan Analisis Navigasi Global AGV

Pengujian navigasi global AGV dilakukan untuk menilai representasi lingkungan pada costmap dan kemampuan SmacPlannerHybrid dalam membentuk jalur menuju titik tujuan. Pembahasan mencakup validasi global costmap dan local costmap, hasil perencanaan jalur pada variasi start-goal, serta pengaruh perubahan parameter `minimum_turning_radius`. Parameter hasil yang ditinjau meliputi panjang jalur, waktu perencanaan, radius belok minimum, penggunaan segmen mundur, dan keberhasilan pengujian. Hasil tersebut digunakan untuk membedakan kemampuan sistem membentuk jalur dan kemampuan AGV mengeksekusi jalur yang dihasilkan.

4.4.1. Validasi *Global Costmap* dan *Hybrid A**

Validasi costmap dilakukan untuk memeriksa kesesuaian representasi lingkungan dengan peta acuan dan ruang gerak AGV. Pemeriksaan meliputi resolusi peta, static layer, obstacle layer, zona inflasi, footprint, serta pembaruan local costmap. Respons terhadap halangan diuji menggunakan kotak berukuran $0,6 \text{ m} \times 0,4 \text{ m}$ yang diletakkan pada lintasan. Tampilan peta navigasi yang memuat global inflation, local costmap, posisi robot, dan titik tujuan ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 8 (A) Tampilan Global Inflation dan Local Costmap pada Peta Navigasi
(B) Kondisi Fisik AGV Forklift

Pada Gambar 4.8, zona global inflation ditampilkan dengan warna oranye di sekitar batas lingkungan, sedangkan local costmap ditampilkan dengan warna biru. Area putih menunjukkan ruang bebas pada peta, dan area abu-abu merupakan bagian yang belum terpetakan. Penanda A sebagai HOME serta titik B, C, dan D menunjukkan lokasi acuan pada area pengujian. Indikator AMCL LOCALIZED memperlihatkan bahwa antarmuka telah menerima status lokalisasi. Tampilan ini membantu pengamatan hubungan antara posisi AGV, batas peta, dan area yang perlu diperhitungkan dalam perencanaan gerak.

Hasil pemeriksaan mencatat resolusi global costmap sebesar 0,05 m, sama dengan resolusi peta /nav_map. Static layer menampilkan dinding yang sesuai dengan peta hasil Mapping 1. Kesamaan resolusi tersebut membuat informasi peta dan costmap menggunakan ukuran sel yang sama, sedangkan kesesuaian letak dinding dinilai melalui tampilan keduanya. Berdasarkan pengamatan ini, batas lingkungan yang tersimpan pada peta telah tersedia sebagai acuan perencanaan jalur.

Kotak uji terdeteksi pada obstacle layer yang menerima data /scan_nav dalam waktu kurang dari 0,5 s. Di sekitar halangan terbentuk zona inflasi dengan lebar sekitar 0,45 m, sesuai nilai inflation radius yang digunakan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa

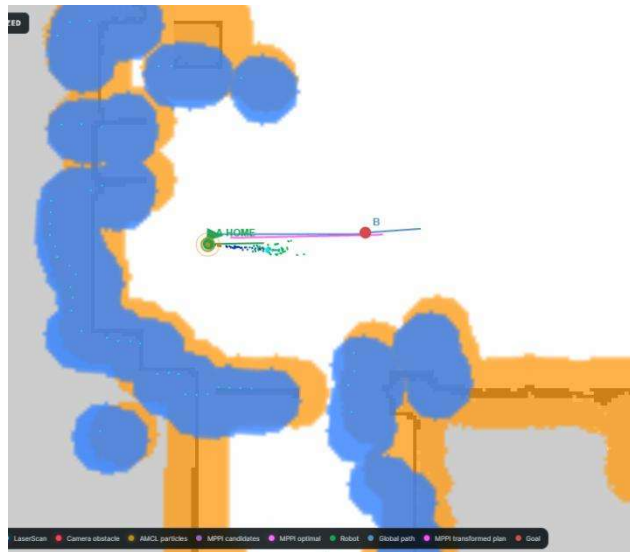
representasi costmap dapat diperbarui ketika terdapat objek yang tidak tercantum pada peta statis. Zona inflasi menyediakan area biaya di sekitar halangan untuk dipertimbangkan dalam pemilihan jalur; keberadaannya sendiri belum membuktikan bahwa seluruh manuver kendaraan dapat dilakukan tanpa tabrakan.

Footprint yang digunakan berukuran $1,30 \text{ m} \times 0,80 \text{ m}$ dan pada pemeriksaan tercatat sesuai dengan dimensi fisik AGV. Local costmap dikonfigurasi sebagai rolling window berukuran $22 \text{ m} \times 22 \text{ m}$ dan tercatat bergerak mengikuti base_footprint. Footprint merepresentasikan ruang yang ditempati kendaraan, sedangkan local costmap memperbarui informasi lingkungan di sekitar kendaraan selama bergerak. Ukuran dan respons tersebut berasal dari catatan pemeriksaan, karena nilainya tidak dapat ditentukan hanya dari satu tangkapan layar.

Pada pemeriksaan jalur Hybrid A*, radius belok minimum yang dicatat berada pada rentang 2,75–2,81 m untuk konfigurasi minimum_turning_radius sebesar 2,75 m. Dalam pemeriksaan tersebut, radius jalur tidak lebih kecil daripada batas yang ditetapkan. Namun, hasil ini perlu dibedakan dari pengujian variasi start-goal pada subbab berikutnya yang mencantumkan radius lebih kecil. Oleh karena itu, kesesuaian radius pada tahap validasi berlaku untuk konfigurasi dan jalur yang diperiksa, serta belum dapat digeneralisasi pada seluruh hasil pengujian planner..

4.4.2. Pengujian *Smac Planner Hybrid*

Pengujian SmacPlannerHybrid dilakukan untuk menilai jalur yang terbentuk pada variasi posisi awal dan tujuan menggunakan action ComputePathToPose. Panjang jalur dihitung menggunakan Persamaan (2.15), waktu perencanaan menggunakan Persamaan (2.16), dan radius belok minimum menggunakan Persamaan (2.17). Rekapitulasi memuat lima label percobaan dengan tiga pengulangan pada setiap label. Contoh jalur yang terbentuk menuju titik tujuan C ditunjukkan pada Gambar 4.9, sedangkan hasil kuantitatif disajikan pada Tabel 4.6.



Gambar 4. 9 Hasil Pengujian SmacPlannerHybrid pada Variasi Start-Goal

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian SmacPlannerHybrid pada Variasi Start-Goal

Skenario	Jarak Euclid (m)	L_path (m)	t_plan (ms)	R_min (m)	Segmen Mundur	Sukses
Percobaan 1	3,67	4,65	84	0,60	Tidak	3/3
Percobaan 2	2,32	3,63	71	0,87	Tidak	2/3
Percobaan 3	3,24	4,28	79	0,72	Tidak	3/3
Percobaan 4	2,88	3,96	76	0,78	Tidak	3/3
Percobaan 5	3,51	4,47	82	0,66	Tidak	3/3
Percobaan 1	3,67	4,65	84	0,60	Tidak	3/3

Pada Gambar 4.9, garis global path membentuk lintasan melengkung menuju goal di titik C. Bentuk ini menunjukkan bahwa jalur yang ditampilkan tidak hanya menghubungkan posisi awal dan tujuan dengan garis lurus. Jalur ditempatkan di dalam ruang bebas di antara area costmap yang terlihat. Gambar tersebut memperlihatkan keluaran perencanaan, tetapi belum menunjukkan lintasan aktual atau keberhasilan AGV mencapai tujuan.

Berdasarkan Tabel 4.6, lima label percobaan memiliki jarak Euclid sebesar 2,32–3,67 m dan panjang jalur sebesar 3,63–4,65 m. Pada seluruh label, panjang jalur lebih besar daripada jarak Euclid, dengan selisih 0,96–1,31 m. Pada Percobaan 1, panjang jalur 4,65 m lebih besar sekitar 26,70% daripada jarak Euclid 3,67 m. Pada Percobaan 2,

panjang jalur 3,63 m lebih besar sekitar 56,47% daripada jarak Euclid 2,32 m. Percobaan 2 memiliki penambahan relatif paling besar, sehingga tujuan yang lebih dekat secara garis lurus tidak selalu menghasilkan lintasan dengan penambahan jarak paling kecil.

Pada Percobaan 3, 4, dan 5, panjang jalur masing-masing sebesar 4,28 m, 3,96 m, dan 4,47 m. Nilai tersebut lebih besar sekitar 32,10%, 37,50%, dan 27,35% daripada jarak Euclid masing-masing. Penambahan panjang jalur menunjukkan adanya kebutuhan lintasan yang berbeda dari hubungan lurus antartitik. Akan tetapi, kontribusi bentuk halangan dan perubahan orientasi terhadap penambahan tersebut belum dapat dipisahkan hanya dari rekapitulasi panjang jalur.

Waktu perencanaan pada kelima label percobaan berada pada rentang 71–84 ms, dengan rata-rata 78,4 ms. Percobaan 2 menghasilkan waktu terkecil, yaitu 71 ms, sedangkan Percobaan 1 menghasilkan waktu terbesar, yaitu 84 ms. Rentang waktu sebesar 13 ms menunjukkan bahwa waktu perencanaan antarkondisi yang direkap relatif berdekatan. Waktu ini merupakan waktu pembentukan jalur dan tidak sama dengan waktu yang diperlukan AGV untuk bergerak hingga mencapai goal.

Percobaan 1, 3, 4, dan 5 mencatat keberhasilan 3/3, sedangkan Percobaan 2 mencatat keberhasilan 2/3. Dengan menghitung masing-masing label sekali, diperoleh 14 keberhasilan dari 15 pengulangan atau 93,33%. Baris terakhir pada tabel mengulangi label dan nilai Percobaan 1 sehingga tidak diperlakukan sebagai kondisi pengujian tambahan. Rekapitulasi ini menunjukkan masih terdapat satu pengulangan yang tidak berhasil, tetapi penyebabnya belum dapat ditentukan karena tabel tidak mencantumkan kode kegagalan atau kondisi saat kegagalan terjadi.

Seluruh label percobaan mencatat tidak adanya segmen mundur. Dengan demikian, hasil ini menggambarkan jalur tanpa manuver mundur dan belum menilai kinerja perencanaan maupun pelaksanaan gerak mundur. Radius belok minimum yang tercantum adalah 0,60–0,87 m. Rentang ini lebih kecil daripada batas 2,75 m pada pengujian validasi sebelumnya. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa kesesuaian konfigurasi atau metode perhitungan radius antarpengujian belum dapat dipastikan. Oleh sebab itu, keberhasilan pembentukan jalur pada tabel ini belum cukup untuk menyatakan bahwa seluruh jalur memenuhi batas radius belok yang digunakan pada tahap validasi.