

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem navigasi *Automated Guided Vehicle (AGV) forklift* berbasis LiDAR yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem SLAM berbasis LiDAR 2D menggunakan Hector SLAM dapat digunakan untuk melakukan pemetaan lingkungan indoor pada AGV forklift. Sistem menghasilkan occupancy grid map dengan resolusi 0,05 m per sel. Berdasarkan tiga pengujian pemetaan, Mapping 1 menghasilkan error loop closure sebesar 0,109 m, error yaw closure sebesar $0,62^\circ$, dan pergeseran koridor sebesar 0,109 m. Nilai tersebut merupakan hasil terkecil dibandingkan Mapping 2 dan Mapping 3, sehingga Mapping 1 digunakan sebagai peta acuan untuk proses lokalisasi dan navigasi. Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa perubahan estimasi posisi dan orientasi selama proses pemetaan dapat menyebabkan pergeseran dan penebalan struktur pada peta.
2. Sistem lokalisasi AMCL pada peta hasil SLAM mampu memberikan estimasi posisi dan orientasi AGV secara stabil pada kondisi pengujian. Pengujian pada lima titik referensi menghasilkan error posisi sebesar 0,125–0,144 m dengan MAE dan RMSE posisi sebesar 0,131 m. Pada pengukuran orientasi diperoleh MAE sebesar $2,49^\circ$ dan RMSE sebesar $2,82^\circ$, sedangkan simpangan posisi σ_{xy} berada pada rentang 0,008–0,011 m. Pada pengujian konvergensi, metode known pose menghasilkan waktu konvergensi rata-rata 2,4 s, sedangkan global localization menghasilkan rata-rata 9,6 s. Seluruh percobaan pada kedua metode berhasil mencapai kondisi konvergen dengan nilai kovarians berada di bawah batas kesiapan lokalisasi yang digunakan pada sistem.
3. Sistem navigasi global berbasis Nav2 SmacPlannerHybrid mampu membentuk jalur dari posisi awal menuju titik tujuan dengan mempertimbangkan bentuk lintasan dan batas gerak AGV. Berdasarkan lima skenario pengujian, panjang jalur yang dihasilkan berada pada rentang 3,63–4,65 m dengan waktu perencanaan 71–84 ms dan rata-rata 78,4 ms. Dari 15 pengulangan pengujian diperoleh 14 keberhasilan pembentukan jalur atau sebesar 93,33%. Pada tahap validasi, konfigurasi `minimum_turning_radius`

sebesar 2,75 m menghasilkan radius jalur sebesar 2,75–2,81 m. Namun, pada pengujian variasi start-goal masih diperoleh nilai radius 0,60–0,87 m, sehingga metode perhitungan radius belok masih perlu diseragamkan. Pengujian yang dilakukan juga belum memuat segmen mundur serta belum mencatat waktu navigasi AGV secara end-to-end, sehingga evaluasi MPPI dalam mengikuti jalur sampai mencapai goal masih memerlukan pengujian lanjutan.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan keterbatasan yang ditemukan selama pengujian, terdapat beberapa saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya, yaitu sebagai berikut:

1. Sistem pemetaan dapat dikembangkan agar mampu memperbarui peta secara berkelanjutan ketika terjadi perubahan susunan rak dan area penyimpanan. Penelitian dapat difokuskan pada kemampuan membedakan perubahan lingkungan yang menetap dan halangan sementara, serta mempertahankan ketepatan lokalisasi pada berbagai sesi operasi.
2. Perencanaan jalur dapat dikembangkan dengan mempertimbangkan berat muatan, posisi pusat massa, dan karakteristik gerak AGV forklift. Pengembangan ini dapat diarahkan untuk menentukan lintasan dan kecepatan yang sesuai agar kestabilan kendaraan tetap terjaga selama berbelok maupun melakukan manuver maju dan mundur.
3. Sistem navigasi dapat dikembangkan untuk mengoordinasikan beberapa AGV forklift yang bekerja dalam satu lingkungan gudang. Penelitian dapat mencakup pembagian tugas, pengaturan prioritas lintasan, serta penyelesaian kondisi saling menghalangi pada lorong sempit dan persimpangan.