

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, pembuatan, serta pengujian prototipe sistem Anti-Tilt spreader berbasis kendali PID dan aplikasi Blynk pada prototipe Automated RTG Crane, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Modifikasi mekanis berupa konfigurasi empat titik tali pada spreader, yang menggantikan konfigurasi dua titik tali sebelumnya, berhasil diimplementasikan dengan dukungan penambahan satu modul driver motor L298N untuk mengendalikan motor pulley kedua secara independen.
2. Hasil pengujian baseline tanpa kendali PID menunjukkan kemiringan spreader mencapai nilai puncak (peak) sebesar $18,00^\circ$ dan RMS sebesar $5,213^\circ$, nilai yang hampir setara dengan kemiringan pada sistem prototipe sebelumnya ($\pm 18,47^\circ$). Kesamaan ini membuktikan bahwa penambahan motor pulley kedua saja, tanpa disertai kendali otomatis, tidak cukup untuk mengatasi permasalahan kemiringan spreader.
3. Melalui proses tuning parameter PID secara bertahap dan sistematis (K_p , dilanjutkan K_i , kemudian K_d), diperoleh parameter optimal $K_p=12$, $K_i=0,5$, dan $K_d=0,2$. Penerapan parameter ini berhasil menurunkan kemiringan spreader secara signifikan, dari peak $18,00^\circ$ menjadi $1,31^\circ$ (penurunan sebesar 93%) dan RMS dari $5,213^\circ$ menjadi $0,461^\circ$ (penurunan sebesar 91%), sekaligus mengoreksi bias kemiringan sistematis yang sebelumnya konsisten mengarah ke satu sisi.
4. Pengujian kecepatan respon menunjukkan bahwa penambahan kendali PID Anti-Tilt tidak menurunkan performa kecepatan operasional sistem. Pada mode manual, kecepatan trolley meningkat 55,7% dan spreader meningkat 19,3% dibandingkan sistem prototipe sebelumnya. Pada mode otomatis, sistem menyelesaikan satu siklus kerja penempatan kontainer 33–37% lebih cepat secara konsisten pada seluruh sembilan titik koordinat blok (A–I), membuktikan

bahwa peningkatan kestabilan spreader dicapai tanpa mengorbankan efisiensi waktu operasional.

6.2 Saran

Dalam pengembangan lebih lanjut terhadap prototipe ini, beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Pengujian kendali PID Anti-Tilt sebaiknya dilakukan dengan variasi beban kontainer yang berbeda-beda (bukan hanya satu kondisi beban tetap), guna mengevaluasi ketahanan dan konsistensi parameter PID yang telah diperoleh terhadap perubahan massa muatan pada kondisi operasional yang lebih beragam.
2. Perlu dilakukan pengujian ulang parameter PID final ($K_p=12$, $K_i=0,5$, $K_d=0,2$) dengan jumlah pengulangan yang lebih banyak untuk memperkuat data konsistensi (repeatability), mengingat pada penelitian ini pengujian ulang secara lengkap baru dilakukan pada tahap awal tuning.
3. Pengembangan metode auto-tuning PID, seperti metode Ziegler-Nichols atau pendekatan berbasis algoritma optimasi, dapat dipertimbangkan pada penelitian selanjutnya agar proses penentuan parameter K_p , K_i , dan K_d tidak lagi dilakukan secara manual dan berulang.
4. Penambahan limit switch atau sensor deteksi objek di bawah *spreader*, guna untuk mencegah potensi pembacaan *encoder* yang tidak tepat sehingga mengakibatkan kontainer tidak dapat diangkat sempurna.
5. Antarmuka aplikasi Blynk IoT dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan tampilan grafis nilai sudut kemiringan spreader secara real-time pada dashboard, sehingga operator dapat memantau kinerja sistem Anti-Tilt secara visual tanpa perlu mengakses Serial Monitor.
6. Pengujian konektivitas Wi-Fi dan aplikasi Blynk IoT pada kondisi lapangan yang lebih menyerupai lingkungan pelabuhan sesungguhnya (area terbuka, jarak lebih jauh, serta potensi gangguan sinyal) perlu dilakukan untuk memastikan keandalan sistem kendali jarak jauh di luar kondisi pengujian dalam ruangan.