

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Implementasi perangkat keras dan perangkat lunak sistem kendali PID berbasis IMU dengan antarmuka sinyal EOG pada kursi roda listrik telah berhasil direalisasikan dan berjalan secara terintegrasi sebagaimana diuraikan pada Sub-bab 4.1. Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data pada Bab IV, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Parameter PID hasil tuning pada Sub-bab 4.2.1, yaitu $K_p = 2,0$, $K_i = 0,7$, dan $K_d = 0,05$, berhasil diterapkan pada seluruh pengujian loop ω_y . Pada pengujian dengan variasi beban tanpa beban, 40 kg, 50 kg, dan 60 kg pada lintasan bersudut 15° , sistem mampu mengembalikan nilai ω_y mendekati setpoint $0^\circ/s$ setelah mengalami gangguan akibat tanjakan. Nilai *settling time* berada pada rentang 2,674 s hingga 3,693 s untuk seluruh kondisi pengujian. Hasil ini menunjukkan bahwa pengendali PID mampu menjalankan fungsi *disturbance rejection* terhadap gangguan rotasional pitch sesuai dengan tujuan penelitian.
2. Parameter PID hasil tuning pada Sub-bab 4.2.2, yaitu $K_p = 20$, $K_i = 1$, dan $K_d = 2$, berhasil diterapkan pada seluruh pengujian loop α_x . Pengujian pada variasi sudut lintasan 0° , 5° , dan 15° menunjukkan bahwa performa sistem tidak meningkat ataupun menurun secara linier terhadap bertambahnya sudut kemiringan. Performa terbaik diperoleh pada sudut 0° , diikuti sudut 15° , sedangkan sudut 5° memberikan performa terendah berdasarkan nilai RMS α_x , SSE α_x , dan *Mean* α_x . Hasil tersebut menunjukkan bahwa karakteristik respon α_x lebih dipengaruhi oleh pola gangguan gravitasi yang bekerja pada sistem daripada besar sudut kemiringan itu sendiri.
3. Berdasarkan perbandingan antara kondisi tanpa PID dan dengan PID pada lintasan bersudut 15° , penggunaan kendali PID terbukti meningkatkan performa sistem. Pada variabel ω_y , kendali PID mampu menurunkan *Peak* ω_y sebesar 41,0%, RMS ω_y sebesar 26,7%, dan SSE ω_y sebesar 87,3%. Sementara itu, pada variabel α_x terjadi penurunan *Peak* α_x sebesar 64,0%, RMS α_x sebesar 76,5%, *Standard Deviation* α_x sebesar 31,3%, SSE α_x sebesar 62,1%, serta mendekatkan *Mean* α_x menuju titik nol sebesar 70,0%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kendali PID efektif dalam meredam gangguan transien dan mengurangi fluktuasi respon sistem dibandingkan kondisi tanpa pengendali.
4. Variasi beban memberikan pengaruh terhadap respon ω_y , namun hubungan yang diperoleh bersifat tidak linier. Nilai *Peak* ω_y dan RMS ω_y menurun dari kondisi tanpa beban hingga beban 50 kg, kemudian kembali

meningkat pada beban 60 kg. Sebaliknya, *Rise Time* dan *Settling Time* menunjukkan kecenderungan meningkat hingga beban 50 kg sebelum kembali menurun pada beban 60 kg. Hasil ini menunjukkan adanya kompromi (*trade-off*) antara kemampuan sistem dalam meredam amplitudo gangguan dan kecepatan mencapai kondisi tunak. Dengan demikian, parameter PID dengan *fixed gain* belum mampu memberikan performa yang konsisten pada seluruh variasi beban.

5. Variasi sudut lintasan juga memengaruhi respon α_x . Berdasarkan seluruh parameter evaluasi, yaitu *Peak α_x* , *RMS α_x* , *Standard Deviation α_x* , dan *SSE α_x* , performa terbaik diperoleh pada sudut 0° , diikuti sudut 15° , sedangkan sudut 5° memberikan performa terendah. Selain itu, *Mean α_x* menunjukkan kecenderungan bergeser ke arah negatif seiring bertambahnya sudut kemiringan yang mengindikasikan adanya bias percepatan longitudinal terhadap setpoint pada kondisi tanjakan. Karena penelitian ini hanya mengevaluasi respon α_x tanpa mengukur keluaran pengendali maupun torsi motor secara langsung, interpretasi tersebut terbatas pada perilaku sistem yang diamati selama pengujian.
6. Secara keseluruhan, sistem kendali PID yang dirancang mampu mempertahankan kestabilan operasi pada seluruh kombinasi variasi beban dan sudut lintasan yang diuji tanpa menunjukkan respon yang divergen. Ketiga tujuan penelitian, yaitu menganalisis respon ω_y terhadap variasi beban, menganalisis respon α_x terhadap variasi sudut lintasan, serta mengevaluasi efektivitas kendali PID dibandingkan kondisi tanpa PID, telah tercapai berdasarkan hasil pengujian yang diperoleh. Namun demikian, pola respon yang tidak linier pada variasi beban maupun sudut lintasan menunjukkan bahwa penggunaan PID dengan *fixed gain* masih memiliki keterbatasan dalam mempertahankan performa yang optimal pada seluruh kondisi operasi.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan keterbatasan sistem yang telah diidentifikasi, beberapa saran berikut diajukan untuk pengembangan dan penyempurnaan sistem di masa mendatang.

1. Penelitian lanjutan perlu mengkaji penerapan mekanisme *anti-windup* (seperti *back-calculation* atau *conditional integration*) pada komponen integral PID loop α_x untuk mengevaluasi apakah mekanisme tersebut dapat mengurangi *bias* percepatan longitudinal yang teridentifikasi melalui nilai *Mean α_x* negatif pada sudut 5° ($-0,03985 \text{ m/s}^2$) dan sudut 15° ($-0,0445 \text{ m/s}^2$). Mengingat penelitian ini tidak mengukur keluaran internal aksi integral secara langsung, evaluasi lanjutan diperlukan untuk membuktikan apakah *bias* tersebut memang berasal dari akumulasi aksi integral atau faktor lain pada sistem.

2. Pendekatan *adaptive PID* atau *gain-scheduling* direkomendasikan untuk mengatasi pola performa yang tidak monoton pada loop α_x terhadap variasi sudut tanjakan, serta pola tidak linier pada loop ω_y terhadap variasi beban. Dengan penyesuaian *gain* secara dinamis berdasarkan kondisi operasi yang terdeteksi, konsistensi performa *disturbance rejection* diharapkan dapat ditingkatkan di seluruh rentang sudut dan beban operasi, mengingat parameter PID dengan *gain* tetap (*fixed-gain*) pada penelitian ini belum memberikan performa yang optimal secara konsisten.
3. Pengujian lanjutan dengan jumlah trial yang lebih banyak dari tiga kali pengujian per kondisi yang digunakan pada penelitian ini perlu dilakukan untuk meningkatkan kekuatan statistik hasil penelitian. Jumlah trial yang lebih representatif akan memungkinkan pengujian signifikansi secara formal, seperti analisis ANOVA, untuk membuktikan perbedaan performa antar-kondisi secara statistik.
4. Penelitian lanjutan perlu mengkaji lebih dalam karakteristik pola gangguan pada rentang sudut di sekitar 5° dengan menambah jumlah titik sudut yang diuji, mengingat sudut 5° secara konsisten menghasilkan performa *disturbance rejection* terlemah pada seluruh parameter α_x meskipun bukan sudut kemiringan terbesar yang diujikan dalam penelitian ini.

