

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada perkembangan teknologi otomatisasi saat ini, kemampuan suatu sistem untuk menjaga keseimbangan secara otomatis menjadi salah satu aspek penting dalam berbagai aplikasi, seperti sistem penyeimbang roket hingga robot beroda dua untuk kebutuhan logistik. Salah satu model yang sering digunakan untuk mempelajari dan menguji kemampuan tersebut adalah *linier inverted pendulum* atau bandul terbalik. Sistem ini banyak digunakan dalam bidang teknik kendali karena memiliki karakteristik yang tidak stabil, bersifat *non-linear*, serta membutuhkan kontroler yang cepat dan akurat agar dapat tetap berada pada posisi seimbang (Donatoni et al., 2024).

Dalam implementasi aktual pada perangkat keras, salah satu tantangan utama berasal dari ketelitian pembacaan sensor umpan balik. *Rotary encoder* tipe *incremental* atau *quadrature* menghasilkan dua sinyal keluaran, yaitu *channel A* dan *channel B*, yang memiliki perbedaan fase. Perbedaan fase antara kedua *channel* tersebut digunakan untuk menentukan arah pergerakan, sedangkan jumlah pulsa yang terdeteksi digunakan untuk menentukan perubahan posisi sudut. Oleh karena itu, proses pembacaan dan pengolahan sinyal *encoder* perlu dilakukan secara tepat agar informasi posisi yang digunakan sebagai umpan balik sistem kendali dapat merepresentasikan pergerakan aktual pendulum (Pop, 2022).

Di sisi aktuator, pengoperasian motor *stepper* pada sistem kendali cepat membutuhkan kendali frekuensi dan akselerasi pulsa yang sangat presisi. Pembangkitan pulsa motor yang tidak teratur dapat menyebabkan fenomena hilangnya *step* (*missed steps*), terjadinya getaran berlebih, hingga keterlambatan respons mekanis (*lag*). Penggunaan *library* khusus seperti *AccelStepper* menjadi krusial dalam mengelola akselerasi, deselerasi, serta pembatasan kecepatan maksimum *stepper motor* secara *non-blocking*. Pemanfaatan *library* ini memungkinkan pergerakan motor berjalan secara halus tanpa menghentikan proses komputasi utama (Proctor & Shackleford, 2001).

Selain kendala pewaktuan komputasi, sistem fisis *linier inverted pendulum*

juga memiliki hambatan berupa gesekan statis rel (*stiction*) dan kelonggaran mekanis (*backlash*). Kondisi ini menyebabkan motor stepper membutuhkan jeda/penyesuaian waktu tunda khusus saat merespons pembalikan arah atau perubahan sinyal kendali, agar gaya inersia tidak merusak traksi pergerakan kereta (Zahari, 2022a).

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini menerapkan struktur kendali *proportional-integral-derivative* (PID) yang diintegrasikan dengan pembacaan *rotary encoder* berbasis interupsi eksternal serta manajemen kendali pergerakan *stepper motor* berbasis *library AccelStepper*. Pembacaan sudut pendulum dilakukan secara *real-time* via *hardware interrupt*, sementara sinyal kontrol PID dikonversi menjadi perintah kecepatan (*speed*) yang dieksekusi secara efisien oleh *library AccelStepper*. Struktur ini dirancang untuk mengurangi *jitter*, mencegah hilangnya *step* pada motor, serta menjaga keseimbangan *linier inverted pendulum* secara presisi dan stabil pada posisi tegak (0°).

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

- 1) Bagaimana cara membaca sudut kemiringan pendulum secara cepat dan tepat?
- 2) Bagaimana cara mengatur gerakan *stepper motor* pendorong *cart* agar bisa bergerak responsif?
- 3) Bagaimana cara menentukan angka kontrol PID yang pas agar alat bisa otomatis mengoreksi gerakan dan menjaga pendulum tetap berdiri seimbang?

1.3 Batasan Masalah

Agar ruang lingkup penelitian tidak terlalu luas, batasan masalah yang diterapkan adalah sebagai berikut:

- 1) Pengambilan data posisi sudut pendulum hanya menggunakan 1 (satu) buah *rotary encoder* tipe *quadrature* (PPR=400) yang dipasang pada poros rotasi pendulum (pembacaan 1 sumbu).
- 2) Algoritma kendali yang diimplementasikan berfokus pada *proportional-integral-derivative* (PID) yang dilengkapi dengan fitur statis *output* tertunda (*Static Output Delay*).

- 3) Pengujian dilakukan pada permukaan yang rata dan stabil (*indoor*) dengan asumsi tidak ada gangguan eksternal yang ekstrem seperti angin kencang atau getaran lantai yang besar.
- 4) Kontrol stabilitas hanya bekerja efektif pada rentang sudut kemiringan sempit di sekitar titik setimbang (asumsi linieritas pada daerah *error* kemiringan kecil).

1.4 Tujuan dan Manfaat

1.4.1 Tujuan

Tujuan proyek akhir ini adalah untuk merancang dan mengimplementasikan sistem kendali *linier inverted pendulum* yang mampu mempertahankan stabilitas posisi tegak lurus (0°) secara mandiri (*self-balancing*) melalui integrasi sensor sudut dan algoritma kendali PID.

1.4.2 Manfaat

Proyek akhir ini akan memberikan manfaat mencakup pengembangan kompetensi teknis dalam mengimplementasikan sensor *rotary encoder* dan *tuning* PID pada sistem fisik yang tidak stabil, yang memberikan pengalaman praktis lebih mendalam dibandingkan sekadar simulasi teoritis. Secara akademis, purwarupa ini berfungsi sebagai referensi teknis dan alat peraga laboratorium yang edukatif untuk mendemonstrasikan kontrol sistem *non-linear* menggunakan komponen berbiaya rendah namun tetap memiliki akurasi yang andal. Dalam skala yang lebih luas, proyek ini membuktikan pentingnya pemrosesan sinyal digital untuk menjaga integritas data instrumentasi di lingkungan industri yang penuh gangguan, sekaligus menjadi landasan bagi pengembangan teknologi masa depan seperti robotika penyeimbang, sistem navigasi roket, hingga kendaraan otonom.