

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Sistem Kontrol

Sistem kontrol merupakan komponen penting dalam perkembangan teknologi modern, mulai dari otomasi industri hingga robotika. Sistem ini berfungsi dalam mengatur dan menstabilkan perilaku dinamis berdasarkan masukan yang diberikan. Sistem kontrol dibedakan menjadi dua, yaitu sistem kontrol terbuka dan sistem kontrol tertutup. Sistem kontrol terbuka tidak menggunakan umpan balik dalam pengoperasiannya, sehingga kesalahan yang terjadi tidak bisa diperbaiki secara otomatis. Sebaliknya, sistem kontrol tertutup menggunakan umpan balik untuk mengontrol keluaran dengan membandingkan sinyal keluaran dengan sinyal masukan yang diinginkan, sehingga kesalahan dapat diperbaiki secara otomatis. Dalam konteks pendidikan, pengajar sistem kendali memegang peran kunci dalam membekali mahasiswa dengan konsep dasar dan keterampilan praktis dalam mengendalikan sistem dinamis. Pemahaman tentang dasar – dasar sistem kontrol seperti kestabilan, respons waktu, dan metode pengendalian menjadi fundamental bagi teknik yang mempelajari mata kuliah dasar sistem kontrol.

### 2.2 Kontrol PID (Proportional-Integral-Derivative)

Kontrol PID digunakan untuk mengontrol sudut pelat berdasarkan posisi bola, sehingga sistem berguna untuk menjaga bola pada jalur yang diinginkan. Kontrol PID adalah metode pengendalian yang menggunakan tiga parameter, yaitu **Proportional (P)**, **Integral (I)**, dan **Derivative (D)**. Kombinasi dari ketiga parameter ini membantu mengoptimalkan respon sistem dengan mengurangi kesalahan yang terjadi antara nilai keluaran dan nilai setpoint. Secara umum, kontrol PID diformulasikan sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Di mana:

- $u(t)$  adalah sinyal kendali.
- $e(t)$  adalah sinyal error, yaitu selisih antara setpoint dan keluaran sistem.
- $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  adalah konstanta gain untuk komponen proportional, integral, dan derivative.

Fungsi dari masing-masing komponen PID adalah sebagai berikut:

- **Proportional (P):** Menghasilkan koreksi yang sebanding dengan besar error. Jika error besar, koreksi juga akan besar.
- **Integral (I):** Menghitung akumulasi error dari waktu ke waktu, sehingga memberikan koreksi yang bertujuan menghilangkan error jangka panjang.
- **Derivative (D):** Memberikan koreksi berdasarkan kecepatan perubahan error, sehingga membantu mengurangi overshoot dan meningkatkan stabilitas sistem.

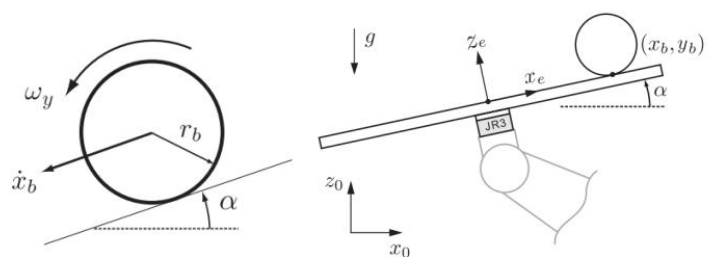
### 2.3 Sistem *Ball on Plate*

Sistem *Ball on Plate* adalah sistem dinamis di mana sebuah bola ditempatkan di atas pelat, dan pelat tersebut dapat dimiringkan secara dua dimensi (sumbu x dan y) untuk mengendalikan posisi bola. Sistem ini merupakan analogi dari banyak aplikasi nyata, seperti kontrol posisi, stabilisasi robot, dan aplikasi kontrol keseimbangan lainnya.

Pada sistem ini, sensor digunakan untuk mendeteksi posisi bola, sementara aktuator (biasanya motor servo atau aktuator linier) mengontrol kemiringan pelat. Pelat dikendalikan dengan mengatur sudut kemiringannya di sepanjang dua sumbu (x dan y), yang memengaruhi gerakan bola pada permukaan pelat. Tujuan dari sistem ini adalah untuk menjaga bola tetap berada pada titik tengah atau memindahkannya sesuai dengan posisi yang diinginkan dengan cara mengontrol kemiringan pelat dalam dua derajat kebebasan (dof x dan y).

Sistem *Ball on Plate* dapat dianggap sebagai sistem kendali multivariabel karena ada dua variabel keluaran yang harus dikendalikan (koordinat x dan y dari posisi bola), dengan dua variabel masukan (sudut kemiringan pelat pada sumbu x dan y). Dalam penelitian ini, sistem *Ball on Plate* akan digunakan sebagai media pembelajaran untuk memahami konsep kontrol PID dalam pengaturan posisi dinamis dan memberikan pengalaman langsung dalam tuning dan pengujian pengontrol PID. Dengan demikian, *Ball on Plate* dapat meningkatkan pemahaman dan keterampilan mahasiswa dalam menerapkan teori sistem kontrol pada aplikasi dunia nyata.

Pada bagian sistem ini akan dijelaskan bagaimana model dinamik dari sistem *Ball-on-Plate*. Asumsi yang digunakan antaranya adalah tidak ada *slip* pada bola, bentuk bola simetris sempurna, tidak ada gesekan, dan bola selalu menyentuh papan setiap saat [6]. Adapun diagram gaya dinamik pada sistem *Ball-on-Plate* dapat dilihat pada Gambar 3.3



**Gambar 2.1 Ilustrasi Sistem *Ball-on-Plate***

Berdasarkan pendekatan *Euler-Lagrange*, persamaan dinamik dari sistem *Ball-on-Plate* berbentuk nonlinier dapat didefinisikan berbagai berikut [7]:

$$\left(m_b + \frac{I_b}{r_b^2}\right) \ddot{x}_b - m_b(x_b \dot{\alpha}^2 + y_b \dot{\alpha} \dot{\beta}) + m_b g \sin \alpha = 0 \quad (1)$$

$$\left(m_b + \frac{I_b}{r_b^2}\right) \ddot{y}_b - m_b(y_b \dot{\beta}^2 + x_b \dot{\alpha} \dot{\beta}) + m_b g \sin \alpha = 0 \quad (2)$$

Dimana  $m_b$  adalah massa bola,  $r_b$  adalah jari-jari bola,  $I_b$  adalah momen inersia bola,  $x_b$  dan  $y_b$  adalah posisi koordinat bola,  $\alpha$  dan  $\beta$  adalah kemiringan *plate* pada

sumbu X dan Y, serta  $g$  adalah percepatan gravitasi. Dengan mengasumsikan momen inersia dari sebuah bola  $I_b = \frac{2}{5}m_b r_b^2$ , maka persamaan (1) dan (2) dapat ditulis

$$m_b \left[ \frac{5}{7} \ddot{x}_b - (x_b \dot{\alpha}^2 + y_b \dot{\alpha} \dot{\beta}) + g \sin \alpha \right] = 0 \quad (3)$$

$$m_b \left[ \frac{5}{7} \ddot{y}_b - (y_b \dot{\alpha}^2 + x_b \dot{\alpha} \dot{\beta}) + g \sin \beta \right] = 0 \quad (4)$$

Persamaan (3) dan (4) dapat dilinerisasi dengan mengasumsikan sudut kemiringan *plate* yang kecil, sehingga  $\sin \alpha \cong \alpha$  dan  $\sin \beta \cong \beta$ . Selain itu, kita dapat mengasumsikan kecepatan sudut  $\dot{\alpha}$  dan  $\dot{\beta}$  yang sangat kecil, sehingga  $\dot{\alpha}^2 \cong 0$ ,  $\dot{\beta}^2 \cong 0$ , dan  $\dot{\alpha} \dot{\beta} \cong 0$ . Dengan demikian diperoleh model linier dari sistem *ball-on-plate* sebagai berikut

$$\frac{5}{7} \ddot{x}_b + g \alpha = 0 \quad (5)$$

$$\frac{5}{7} \ddot{y}_b + g \beta = 0 \quad (6)$$

Dalam bentuk fungsi alih dengan masukan  $\alpha$  dan  $\beta$  serta keluaran berupa koordinat X dan Y, persamaan (5) dan (6) dapat ditulis

$$\frac{X_b}{\alpha} = \frac{g}{\frac{5}{7}s^2} \quad (7)$$

$$\frac{Y_b}{\beta} = \frac{g}{\frac{5}{7}s^2} \quad (8)$$

#### 2.4 *Image Processing* dalam Deteksi Posisi Bola

Dalam implementasi modern sistem Ball on Plate, sering kali digunakan teknik *image processing* untuk mendeteksi posisi bola di atas pelat. Teknologi ini memanfaatkan kamera sebagai sensor visual yang dapat mendeteksi posisi bola berdasarkan warna, bentuk, atau fitur lainnya. Setelah posisi bola terdeteksi, informasi tersebut digunakan sebagai input dalam sistem kontrol PID untuk menggerakkan pelat yang dinamakan umpan balik.

Teknik deteksi yang digunakan yaitu menggunakan masking untuk memisahkan warna dari latar belakang. Untuk prosesnya dimulai dengan mengubah gambar ke format HSV untuk memudahkan isolasi warna tertentu dari bola. Setelah itu, dilakukan thresholding untuk membuat masker yang memisahkan bola dari latar belakang berdasarkan warna yang terdeteksi. Masker tersebut kemudian diolah untuk menemukan kontur atau titik pusat bola. Deteksi bola dilakukan dengan mengidentifikasi area yang sesuai dengan ukuran dan bentuk bola dari hasil masking tersebut.

## 2.5 Pengujian Sistem Kontrol

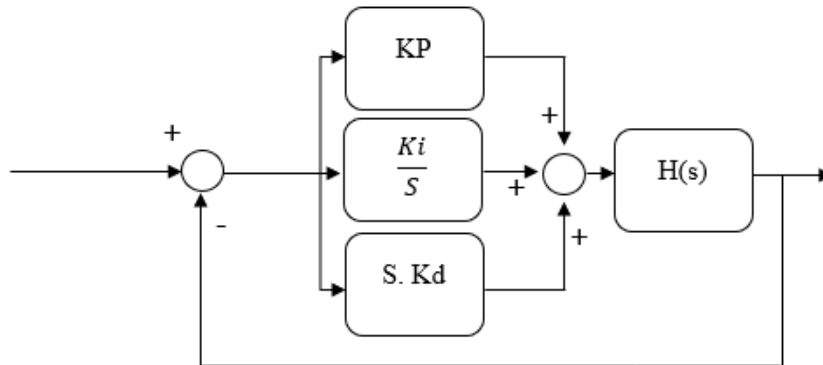
Dalam dunia pendidikan, pengujian sistem kontrol dengan model Ball on Plate memberikan banyak manfaat. Selain memberikan pemahaman praktis mengenai teori kontrol, model ini juga memperkenalkan mahasiswa kepada konsep *tuning* kontrol PID secara real-time. Tuning PID adalah proses menyesuaikan parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  agar sistem dapat mencapai performa yang optimal. Terdapat berbagai metode tuning PID, metode *trial and error* merupakan metode yang memasukkan nilai parameter pada *tunning* secara manual dan metode yang sederhana (8).

## 2.6 Metode Tuning PID

Metode tuning PID adalah proses penyesuaian parameter kontrol PID agar sistem memiliki performa yang diinginkan, seperti respon yang cepat, minim overshoot, dan pengurangan error steady-state. Salah satu metode *tunning* yang digunakan yaitu *trial and error* dengan memasukkan nilai parameter *tunning* secara manual, melalui pendekatan yang melibatkan pengujian berbagai strategi kontrol atau konfigurasi sistem secara berulang hingga hasil yang diinginkan. Pendekatan ini sering digunakan pada tahap awal pengembangan sistem untuk memahami perilaku dinamika bola diatas pelat dan respon dari sistem kontrol terhadap gangguan. Kontroler PID bekerja dengan memproses sinyal *error*  $E(s)$  yang dihasilkan dari selisih antara *setpoint* dan keluaran sistem, menggunakan tiga konstanta utama yaitu  $K_p$  (Proporsional),  $K_i$  (Integral), dan  $K_d$  (Derivatif)

$$U(s) = \left[ K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right] E(s)$$

$K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  adalah konstanta PID serta  $E(s)$  merupakan sinyal error yang dihasilkan dari selisih antara setpoint dan keluaran. Diagram blok dari pengendali PID dapat dilihat pada gambar 2.2



**Gambar 2.2 Blok Diagram Sistem Kontrol PID**

Salah satu metode *tuning* yang digunakan yaitu *trial and error* dengan memasukkan nilai parameter *tuning* secara manual, melalui pendekatan yang melibatkan pengujian berbagai strategi kontrol atau konfigurasi sistem secara berulang hingga hasil yang diinginkan. Pendekatan ini sering digunakan pada tahap awal pengembangan sistem untuk memahami perilaku dinamika bola di atas plat dan respons dari sistem kontrol terhadap gangguan.