

SISTEM KONTROL



Mardlijah
Ainun Kusnul Khotimah
Belgis Ainatul Iza
Chairul Imron
Tahiyatul Asfihani

SISTEM KONTROL

Penulis

Mardlijah — Email: mardlijah@its.ac.id

Ainun Kusnul Khotimah — Email: ainun1123@gmail.com

Belgis Ainatul Iza — Email: belgisainatul@gmail.com

Chairul Imron — Email: cha_imron15@its.ac.id

Tahiyatul Asfihani — Email: t_asfihani@its.ac.id

Alamat: Departemen Matematika

Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Sukolilo Surabaya, 60111
Indonesia

ISBN:

Editor:

Kistosil Fahim

Penyunting:

Aminatu Zuhriah

Desain Sampul dan Tata Letak:

Achmet Usman Ali

Penerbit:

CV. Nemanasi Sains

Redaksi dan Distributor Tunggal:

CV. Nemanasi Sains

Perum Bumi Wonorejo Asri 1/25 Blok B2 No. 15,
Desa/Kelurahan Wonorejo, Kec. Rungkut,
Kota Surabaya, Provinsi Jawa Timur, Kode Pos 60296
Indonesia

Cetakan Pertama, April 2025

133 halaman, 21 x 29, 7 cm

Copyright © CV. Nemanasi Sains, 2025

KATA PENGANTAR

Dengan kerendahan hati, penulis mengucapkan syukur kepada Allah SWT karena atas hidayah, ridha serta segala limpahan rakhmatNya penulis telah selesai menyusun buku ini dengan judul SISTEM KONTROL, yang dapat digunakan bagi mahasiswa di Program Studi Matematika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Buku ini membahas secara singkat dan praktis mengenai dasar teori serta penerapan SISTEM KONTROL agar dapat dengan mudah dipahami oleh pembaca. Dan untuk contoh penerapan pada setiap bab diawali dengan penyelesaian secara manual yang menggunakan formula yang ada, kemudian dilanjutkan dalam bentuk susunan bahasa pemrograman MATLAB.

Terima kasih penulis ucapkan kepada rekan-rekan yang telah memberi dukungan dalam penyelesaian buku ini. Penulis berharap buku ini akan banyak bermanfaat bagi pembaca. Akhirnya agar untuk lebih sempurna isi buku ini dalam edisi-edisi mendatang, segala saran dan masukan dari para pembaca sangat penulis harapkan.

Surabaya, Desember 2023

Mardlijah
Ainun Kusnul Khotimah
Belgis Ainatul Iza
Chairul Imron
Tahiyatul Asfihani

DAFTAR ISI

COVER	1
KATA PENGANTAR	1
DAFTAR ISI	iv
BAB 1 PENGANTAR SISTEM KONTROL.....	1
1.1 Pengertian Sistem	1
1.2 Keterkaitan antara Sistem dan Kontrol	2
1.3 Sejarah Perkembangan Sistem Kontrol.....	3
1.4 Istilah-Istilah dalam Sistem Kontrol	14
1.5 Sistem dan Model	18
1.6 Sistem Kalang Terbuka dan Kalang Tertutup.....	20
1.7 Elemen-elemen Dasar dari Sistem Kalang Terbuka	21
1.8 Elemen-elemen Dasar dari Sistem Kalang Tertutup	22
1.9 Keunggulan dan Kelemahan dari Sistem Kendali Kalang Tertutup dibandingkan dengan Sistem Kendali Kalang Terbuka	24
BAB 2 SISTEM DAN KARAKTERISTIKNYA.....	25
2.1 Kestabilan.....	25
2.1.1 Metode Eigen Value	25
2.1.2 Metode Routh	26
2.1.3 Metode Lyapunov	27
2.1.4 Metode Linierisasi.....	29

2.1.5 Metode Input-Output	30
2.2 Keterkontrolan	30
2.3 Keteramatman.....	31
BAB 3 KONTROL UMPAN BALIK (<i>FEEDBACK CONTROL</i>)	33
3.1 Sistem Kontrol Kendali Umpan Balik.....	33
3.2 Contoh Penerapan Sistem Kontrol Umpan Balik.....	36
BAB 4 SISTEM KONTROL KONVENTIONAL PID	41
4.1 Sistem Kontrol PID.....	41
4.1.1 Kontrol Proporsional (K _p)	42
4.1.2 Kontrol Integratif (K _i)	43
4.1.3 Kontrol Derivatif (K _d)	44
4..2 Contoh Penerapan Sistem Kontrol PID.....	46
BAB 5 SISTEM KONTROL SLIDING MODE (<i>SLIDING MODE CONTROL</i>)	49
5.1 Sistem Kontrol Sliding Mode	49
5.1.1 Fungsi Switching.....	49
5.1.2 Kondisi sliding.....	50
5.1.3 Perancangan Sistem Kontrol Sliding Mode	51
5.1.4 Kondisi Chattering	54
5.1.5 SMC dengan Boundary Layer (BL).....	55
5.2 Contoh Penerapan Sistem Kontrol Sliding Mode	57
BAB 6 SISTEM KONTROL LOGIKA FUZZY (<i>FUZZY LOGIC CONTROL</i>)	69
6.1 Sistem Kontrol Logika Fuzzy (<i>Fuzzy Logic Control</i>)	69
6.1.1 Himpunan Fuzzy.....	69
6.1.2 Fungsi Keanggotaan (<i>Membership Function</i>).....	71
6.1.3 Penentuan Aturan Fuzzy	72
6.1.4 Struktur Pengendali Fuzzy.....	73
6.1.5 Aturan Dasar Logika Fuzzy sebagai Sistem Kontrol	74
6.2 Contoh Penerapan Sistem Kontrol Logika Samar (<i>Fuzzy Logic Control</i>).....	75
BAB 7 SISTEM KONTROL FUZZY SLIDING MODE (<i>FUZZY SLIDING MODE CONTROL</i>)	85
7.1 Sistem Kontrol Fuzzy Sliding Mode	85
7.1.1 Skema Dasar Pengendali FSMC	85

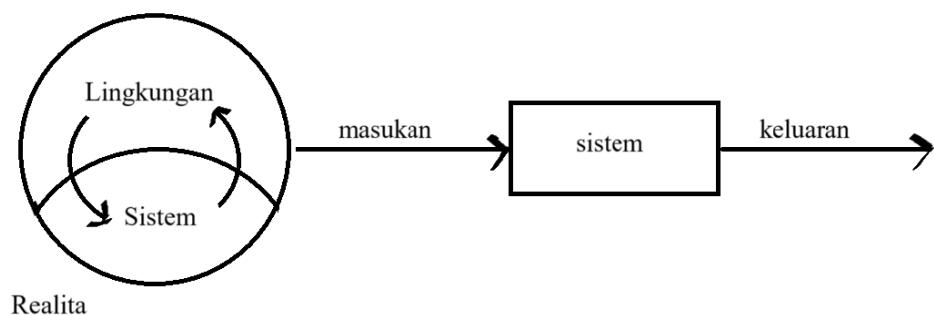
7.1.2 Perancangan Pengendali FSMC	86
7.2 Contoh Penerapan Sistem Kontrol Fuzzy Sliding Mode	87
BAB 8 SISTEM KONTROL FUZZY-PID	95
8.1 Dasar Teori Sistem Kontrol Fuzzy-PID.....	95
8.2 Contoh Penerapan Sistem Kontrol Fuzzy-PID.....	96
BAB 9 KONTROL OPTIMAL (<i>OPTIMAL CONTROL</i>).....	103
9.1 Pontryagin Maximum Principle.....	103
9.1.1 Dasar Teori Pontryagin Maximum Principle	103
9.1.2 Contoh Penerapan Pontryagin Maximum Principle	104
9.2 Sistem Kontrol LQR (<i>Linier Quadratic Regulator</i>)	112
9.2.1 Dasar Teori Sistem Kontrol LQR (<i>Linier Quadratic Regulator</i>)	113
9.2.2 Contoh penerapan Sistem Kontrol LQR.....	119
9.3 Sistem Kontrol LQG (<i>Linier Quadratic Gaussian</i>).....	122
9.3.1 Dasar Teori Sistem Kontrol LQG (<i>Linier Quadratic Gaussian</i>).....	123
9.3.2 Contoh Penerapan Sistem Kontrol LQG (<i>Linier Quadratic Gaussian</i>).....	125
DAFTAR PUSTAKA	132

BAB 1 PENGANTAR SISTEM KONTROL

Sebelum mempelajari lebih jauh tentang pengendalian perlu dipahami pengertian tentang “sistem” dan “sistem kontrol”. Sebuah sistem dapat digambarkan sebagai sebuah “kotak-hitam” yang mempunyai sebuah masukan dan sebuah keluaran. Di dalam kotak-hitam tersebut tidak diperhatikan apa yang ada di dalamnya tetapi bagaimanakah hubungan antara masukan dan keluaran. Jika keluaran dikendalikan dengan cara menetapkan nilai tertentu atau berubah menjadi nilai tertentu, maka hal tersebut dinamakan sistem kontrol atau sistem kendali.

1.1 Pengertian Sistem

Pada bagian ini dijelaskan tentang pengertian sistem secara umum, dari pengertian tersebut diharapkan bisa memberikan gambaran terkait makna sistem tersebut dari konteks yang diberikan. Beberapa contoh diberikan untuk menjelaskan pengertian tersebut. Untuk memper mudah dalam memahami pengertian sistem diberikan ilustrasi dalam Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Pengertian Sistem

Gambar 1.1 menunjukkan bahwa sistem merupakan bagian dari realitas yang kita anggap sebagai satu kesatuan yang terpisah dalam realitas tersebut. Realitas yang ada di luar sistem disebut lingkungan (sekitar sistem). Interaksi yang terjadi diantara sistem dan lingkungan diwujudkan melalui besaran, fungsi waktu seringkali dinamakan sebagai masukan (input) dan keluaran (output). Sistem dipengaruhi lingkungan melalui masukan dan sistem

BAB 2 SISTEM DAN KARAKTERISTIKNYA

Bab ini memberikan gambaran tentang analisis kestabilan sistem kontrol dengan menggunakan berbagai metoda. Selain itu dibahas pula konsep keterkontrolan dan keteramatian yang diperkenalkan oleh Kalman. Konsep tersebut memegang peranan penting dalam pengontrolan optimal dari sistem multivariabel.

2.1 Kestabilan

Ada beberapa konsep stabilitas persamaan diferensial. Mereka dapat dibedakan menurut stabilitas yang berhubungan dengan sistem otonom (terkait dengan vektor keadaan) dan stabilitas yang terkait dengan sistem dengan masukan dan keluaran (di mana stabilitas didefinisikan dalam bentuk masukan dan keluaran ini). Metode analisis kestabilan yang akan dibahas pada subbab ini adalah metode nilai eigen, metode Routh, metode Lyapunov, metode linierisasi serta metode input-output. Kelima metode tersebut dapat digunakan untuk analisis kestabilan dari suatu sistem *linier time invariant* (LTI).

2.1.1 Metode Eigen Value

Definisi 2.1 Diberikan sebuah fungsi diferensial orde pertama $\dot{x} = f(x)$, memiliki penyelesaian, dengan kondisi awal $x(0) = x_0$, dinyatakan dengan $x(t, x_0)$. Vektor x yang memenuhi $f(x) = 0$ disebut titik kesetimbangan. Suatu titik kesetimbangan x disebut stabil jika untuk setiap $\varepsilon > 0$ terdapat $\delta > 0$. Jika $\|x_0 - \bar{x}\| < \delta$, kemudian $\|x(t, x_0) - \bar{x}\| < \varepsilon$ untuk semua $t \geq 0$. Titik kesetimbangan x dapat dikatakan stabil asimtotik. Dan terlebih lagi terdapat $\delta_1 > 0$ sehingga $\lim_{t \rightarrow \infty} \|x(t, x_0) - \bar{x}\| = 0$ asalkan $\|x_0 - \bar{x}\| < \delta_1$. Titik kesetimbangan x adalah tidak stabil jika itu tidak stabil.

Berdasarkan definisi di atas, secara intuitif, kestabilan bermakna suatu sistem tetap berada di sekitar titik kesetimbangan, kestabilan asimtotik berarti sistem menyatu dengan titik

BAB 3 KONTROL UMPAN BALIK (*FEEDBACK CONTROL*)

Pada bagian ini, kita membahas tentang metode desain umpan balik untuk sistem linier. Perancangan sistem kendali ini melibatkan 3 langkah. Langkah pertama adalah merancang hukum pengendalian umpan balik ruang keadaan. Pada Langkah ini diasumsikan bahwa semua state tersedia untuk tujuan umpan balik. Secara umum, hal ini mungkin terjadi. Asumsi bahwa semua state tersedia memungkinkan kita untuk melanjutkan perancangan hukum pengendalian umpan balik ruang keadaan. Langkah kedua melibatkan desain penduga, hal ini disebut sebagai pengamat vektor keadaan. Estimator harus menggunakan masukan dan keluaran dari pembangkit yang akan dikontrol untuk menghasilkan perkiraan keadaan pembangkit. Langkah terakhir dari proses ini adalah menggabungkan dua Langkah pertama dalam hukum kontrol yang dirancang pada Langkah pertama, gunakan estimasi keadaan sebenarnya. Hasil dari Langkah ini gabungan dari pengontrol-estimator kompensator. Diskusi pertama yang akan kita bahas adalah masalah perancangan hukum kendali umpan balik pada sistem linier. Pada bagian berikut ini disajikan metode untuk membuat estimator dan gabungan kompensator pengontrol-estimator.

3.1 Sistem Kontrol Umpan Balik

Hukum kendali umpan balik keadaan linier untuk model sistem disajikan pada persamaan berikut (Subiono, 2013)

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.1)$$

Umpan balik untuk semua variable keadaan pada sistem tersebut mempunyai bentuk sebagai berikut:

$$u = -Kx \quad (3.2)$$

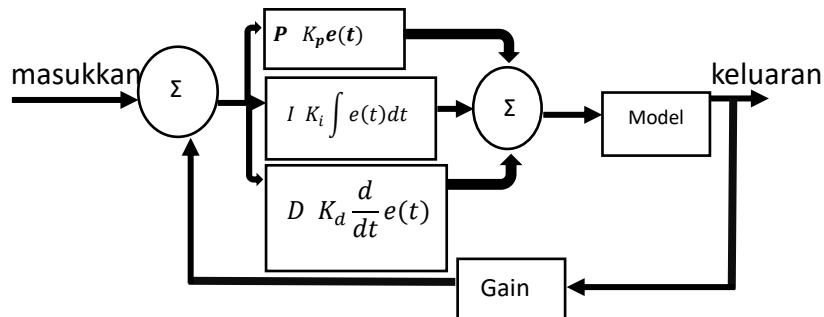
BAB 4 SISTEM KONTROL KONVENTIONAL PID

Sistem kontrol berumpan balik merupakan sistem kontrol yang cenderung menjaga hubungan yang telah ditentukan antara keluaran dan masukan acuan dengan membandingkannya dan menggunakan selisihnya sebagai alat pengontrolan. Salah satunya adalah *Proportional-Integral-Derivative Controller* atau yang lebih dikenal dengan system kendali PID.

4.1 Sistem Kontrol PID

Sistem kendali PID dirancang untuk *Single Input-Single Output* (SISO) sehingga nilai terbaik dari setiap parameter dapat dicari satu per-satu. Selanjutnya, efek umpan balik sistem kendali PID terhadap gerak sistem diperoleh dengan cara memvariasi *gain*, frekuensi *cut-off*, saturasi gaya, serta menahan sinyal terhadap trayektori acuan dan *platform* kondisi awal (Ogata, 1997).

Diagram blok sistem kendali PID ditampilkan pada gambar di bawah ini :



Gambar 4.1 Diagram blok sistem kendali PID (Ogata, 1997)

Adapun persamaan matematika sistem kendali PID adalah

$$mv(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (4.1)$$

dengan

$$K_i = K_p \times \frac{1}{T_i} \quad \text{dan} \quad K_d = K_p \times T_d \quad (4.2)$$

BAB 5 SISTEM KONTROL SLIDING MODE (*SLIDING MODE CONTROL*)

Sliding Mode Control merupakan suatu bentuk pendekatan *robust* yang penting, karena SMC adalah metode pengendalian yang bekerja secara *robust*, baik untuk sistem linear maupun non-linear, yang memiliki ketidakpastian model ataupun parameter, untuk menjaga agar sistem terkendali atau stabil, SMC memakai metode kestabilan yang mirip Lyapunov.

5.1 Sistem Kontrol Sliding Mode

Dalam penerapan sistem kontrol Sliding Mode (SMC), beberapa hal yang perlu diperhatikan adalah fungsi switching, kondisi sliding, perancangan sistem kontrol Sliding Mode, kondisi chattering dan boundary layer. Adapun penjelasan masing-masing poin di atas akan dijelaskan sebagai berikut (R. I. Rizan, 2008).

5.1.1 Fungsi Switching

Pandang suatu sistem dinamis :

$$x^{(n)}(t) = f(x, t) + b(x, t) \cdot u + d(t) \quad (5.1)$$

dimana u control input, x merupakan vektor keadaan, $f(x, t)$ dan $b(x, t)$ berupa fungsi terbatas, $d(t)$ adalah gangguan eksternal. Jika x_d adalah x yang diinginkan, maka tracking error-nya dapat dinyatakan dengan :

$$e(t) = x(t) - x_d(t) \quad (5.2)$$

Permukaan $S(x, t)$ di dalam ruang keadaan R^n yang disebut juga fungsi *switching* memenuhi persamaan :

$$S(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{(n-1)} e = \sum_{k=0}^{n-1} k \binom{n-1}{k} \lambda^k e^{(n-1-k)} \quad (5.3)$$

dengan λ suatu konstanta positif. Fungsi *switching* ini digunakan untuk menentukan besarnya nilai u agar memenuhi kondisi *sliding*. Persamaan (5.3) dapat dianggap sebagai rantai dari $n-1$ buah filter tingkat satu dengan skalar S sebagai input dan tracking error e

BAB 6 SISTEM KONTROL LOGIKA FUZZY (*FUZZY LOGIC CONTROL*)

Fuzzy logic control (FLC) merupakan penerapan teori himpunan fuzzy pada bidang pengendalian sistem. Teori himpunan fuzzy pertama kali dikenalkan oleh Zadeh (1965) dan Goguen (1967, 1969) dengan menunjukkan cara untuk memperluas konsep himpunan klasik dan pernyataan yang mencakup kefuzzyan. Pengendali fuzzy (*fuzzy controller*) umumnya bekerja secara *heuristic (trial and error)* dan berdasarkan pengalaman manusia.

6.1 Sistem Kontrol Logika Fuzzy (*Fuzzy Logic Control*)

Sebelum merancang sistem kontrol logika fuzzy, perlu dipahami teori-teori dasar mengenai logika fuzzy, diantaranya adalah himpunan fuzzy, fungsi keanggotaan, penentuan aturan fuzzy, struktur pengendali fuzzy dan aturan dasar logika fuzzy yang akan dijelaskan pada subbab berikut (R. I. Rizan, 2008).

6.1.1 Himpunan Fuzzy

Dalam teori himpunan fuzzy, himpunan klasik disebut himpunan *crisp* untuk membedakannya dari himpunan fuzzy (Palm, 1997). Ambil C sebagai himpunan *crisp* dan F sebagai himpunan fuzzy yang didefinisikan pada domain D dengan $d \in D$.

Definisi 1.1 *Fungsi* $\mu_C: \mapsto [0,1]$ *adalah fungsi karakteristik dari himpunan crisp C jika dan hanya jika untuk setiap d*

$$\mu_C(d) = \begin{cases} 1 & \text{jika } d \in C \\ 0 & \text{jika } d \notin C \end{cases} \quad (6.1)$$

Fungsi karakteristik dari sebuah himpunan *crisp* yang dinyatakan oleh persamaan (6.1) ditunjukkan oleh Gambar 6.1.

BAB 7 SISTEM KONTROL FUZZY SLIDING MODE (*FUZZY SLIDING MODE CONTROL*)

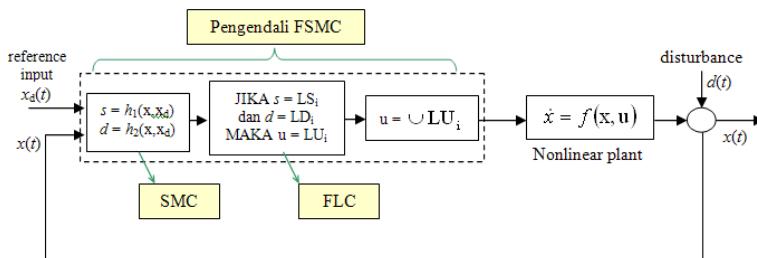
Untuk memperbaiki performansi sistem SMC, dilakukan modifikasi pada *Sliding Mode Control* (SMC) dengan menggunakan *Fuzzy Logic Control* (FLC). Modifikasi ini umumnya disebut sebagai *Fuzzy Sliding Mode Control* (FSMC) atau *Sliding Mode Fuzzy Logic Control* (SMFLC). Penggabungan dua metode ini dapat dilakukan karena kesamaan antara metode SMC dan FLC, yaitu mempunyai sifat diagonalitas (Palm, 1997).

7.1 Sistem Kontrol Fuzzy Sliding Mode

Pada subbab ini akan dijelaskan mengenai skema dasar sistem kontrol *fuzzy sliding mode* dimana pada skema tersebut disusun dengan menggunakan dua sistem kontrol yaitu SMC dan FLC. Setelah dijelaskan mengenai skema dasar maka akan dilanjutkan dengan perancangan sistem kontrol FSMC.

7.1.1 Skema Dasar Pengendali FSMC

Suatu pengendali FSMC memiliki skema dasar pada seperti pada Gambar 7.1. Skema tersebut juga menunjukkan sistem lup tertutup seperti pada Gambar 7.1.



Gambar 7.1 Skema dasar pengendali FSMC pada suatu sistem lup tertutup

Dari skema lup tertutup pada Gambar 7.1 tampak bahwa sistem pengendali FSMC tersusun oleh dua macam pengendali, yaitu pengendali SMC dan FLC. Pengendali SMC tidak bekerja secara penuh sebagaimana pengendali SMC murni atau SMCBL. Namun, setelah melalui beberapa tahapan akan diproses dengan pengendali FLC. Masukan pada pengendali fuzzy

BAB 8 SISTEM KONTROL FUZZY-PID

Untuk memperbaiki performansi sistem PID, dilakukan modifikasi pada *Proportional-Integral-Derivative Controller* (PID) dengan menggunakan *Fuzzy Logic Control* (FLC). Modifikasi ini umumnya disebut sebagai kontrol *Hybrid Fuzzy-PID*.

8.1 Dasar Teori Sistem Kontrol Fuzzy-PID

Untuk mengatasi masalah yang ada pada kestabilan dari plant dan untuk memperbaiki sistem dari kendali PID, digunakan metode kontrol *Hybrid Fuzzy-PID*. Metode ini merupakan mekanisme kontrol cerdas yang mengkombinasikan kontrol proporsional, integral, dan derivatif konvensional yang didapat dari kontrol PID dengan nilai keluaran yang dihasilkan dari kontrol cerdas *Fuzzy Logic*. Pemakaian kontrol PID konvensional yang dikombinasikan dengan sistem kontrol *Fuzzy Logic* diharapkan dapat menghasilkan respon yang cepat dan mengakibatkan kendali autonomous yang cepat dalam mempertahankan keseimbangan. Kedua output dari masing-masing kontrol ini akan dikombinasikan kemudian hasil dari kombinasi akan menjadi nilai kecepatan pada masing-masing rotor.

Desain kontrol *Fuzzy-PID* adalah hybrid controller, menggunakan gain PID dengan tujuan untuk mendapatkan respon nonlinier. *Fuzzy-PID* menggunakan dua input, eror (e) dan turunannya (δe), dan memberikan dua output, K_{pf} , K_{if} dan K_{df} yang ditentukan oleh himpunan aturan fuzzy (M. Rabah, 2018).

Output kontrol *Fuzzy-PID* (K_{pf} , K_{if} dan K_{df}) digunakan untuk menentukan gain K_p , K_i dan K_d dari kontroller PID yang ditunjukkan pada persamaan berikut dimana $e(t)$ adalah eror dan $y(t)$ adalah output sistem (M. Rabah, 2018).

$$y(t) = (K_p + K_{pf})e(t) + (K_i + K_{if}) \int_0^t e(\tau) d\tau + (K_d + K_{df}) \frac{de(t)}{dt}$$

Gambar di bawah ini menunjukkan struktur dasar dari kontrol *Fuzzy-PID* (M. Rabah, 2018).

BAB 9 KONTROL OPTIMAL (*OPTIMAL CONTROL*)

Kontrol optimal merupakan suatu metode standar yang digunakan untuk menyelesaikan masalah optimasi dari suatu sistem dinamik kontinu. Pada bab ini, kontrol optimal yang akan dibahas adalah *Pontryagin Maximum Principle*, *Linier Quadratic Regulator* (LQR) dan *Linier Quadratic Gaussian* (LQG).

9.1 Pontryagin Maximum Principle

Metode *Pontryagin Maximum Principle* merupakan salah satu cara dalam menyelesaikan masalah kendali optimal dengan kendala yang terbatas. Metode ini digunakan untuk memperoleh kendali terbaik pada sistem dinamik dari state awal hingga akhir, yaitu dengan memaksimumkan fungsi objektif. Permasalah ini telah dikembangkan oleh L.S. Pontryagin dan rekan kerjanya pada tahun 1950 yang diaplikasikan untuk semua masalah kalkulus variasi. Oleh karena itu, prinsip ini disebut sebagai Pontryagin Maximum Principle.

9.1.1 Dasar Teori Pontryagin Maximum Principle

Prinsip *Pontryagin Maximum Principle* menyatakan secara informal bahwa persamaan Hamiltonian akan dimaksimalkan sepanjang U yang merupakan himpunan kendali yang mungkin. Dengan memperhatikan persamaan keadaan dan fungsi tujuan yang telah diberikan, langkah dalam menyelesaikan masalah kendali optimal adalah sebagai berikut (E. A. Irhami, 2017):

1. Langkah 1

Bentuk fungsi Hamiltonian (H) sebagai berikut:

$$H(x(t), u(t), \lambda(t), t) = V(x(t), u(t), \lambda(t), t) + \lambda'(t)f(x(t), u(t), t)$$

dimana ('') merupakan transpose.

2. Langkah 2

Memaksimumkan H terhadap $u(t)$ dengan cara:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial u(t)} \right) = 0$$

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Bazhanov, R. Vashcenco, and V. Rubanov, "Development of control system for a complex technological object using fuzzy behavior charts", *Heliyon*, Volume 6, Issue 2, February 2020, e03393.
- [2] A. K. Khotimah, "Desain Sistem Kendali Proporsional Integral Derivatif (Pid) Untuk Kestabilan Terbang Gerak Longitudinal Lsu – 05", laporan kerja praktik Departemen Matematika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2016.
- [3] B. A. Iza, "Perancangan Sistem Kendali *Quadcopter* Menggunakan Metode *Robust Self-Tuning Pid Controller Based On Fuzzy Logic*", Tesis Departemen Matematika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2022.
- [4] C. Kahraman, B. Oztaysi and S. C. Onar, "A Comprehensive Literature Review of 50 Years of Fuzzy Set Theory", *International Journal of Computational Intelligence Systems*, Volume 9, Issue Supplement 1, April 2016, Pages 3 - 24.
- [5] D. Rodliyah, A.S. Aisyah, dan A.A. Masroeri, "Perancangan Sistem Kendali Optimal Multivariabel Linear Quadratic Gaussian (LQG) pada Kapal FPB 38 untuk Meningkatkan Performansi Manuvering", *Semantic Scholar*, Corpus ID: 109134897, 2010.
- [6] D. W. Wardhana, "Perancangan Sistem Kontrol Pid Untuk Pengendali Sumbu Azimuth Turret Pada Turret-Gun Kaliber 20mm", Tugas Akhir Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2016.
- [7] E. A. Irhami, "Optimal Kontrol Pada Model Perpindahan Massa Lipid Kontinu Mikroalga Chlorella Vulgaris Dengan Menggunakan PMP (Pontryagin Maximal Principle)", Tugas Akhir Departemen Matematika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [8] E. Susanto, P. D. Wibawa, A. S. Wibowo, dan C. Eaputri, "Pengantar Kontrol Maju", Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom, 2015.
- [9] F. A. Samman, "Dasar Sistem Kendali", Lembaga Sains, Teknologi dan Seni, 2016.
- [10] FX. A. Setyawan, S. R. Sulistyanti, dan A. Yudamson, "Dasar Sistem Kendali", AURA, 2013.
- [11] F. N. Fajar, "Desain Dan Simulasi Sistem Kendali Linear Quadratic Gaussian (LQG) Untuk Kestabilan Gerak Pitch LSU-05", Tugas Akhir Departemen Matematika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2016.
- [12] H. Purnawan, "Desain Sistem Kendali Linear Quadratic Regulator (LQR) untuk Kestabilan Terbang LSU-05", Tugas Akhir Departemen Matematika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2015.
- [13] I.G.N.R. Usadha, "Sistem Fuzzy", Surabaya: Jurusan Matematika ITS, 2002.
- [14] K. A. Roni dan C. Cekdin, "Sistem Kendali Proses Industri", ANDI, 2020.
- [15] K. Tomsovic dan M.Y. Chow, "Control Applications". Tutorial on Fuzzy Logic Applications in Power Systems. Singapore: IEEE-PES, 2000.
- [16] M. Agustin dan M. W. Musthofa, "Analisis Kestabilan Sistem Linear Time Invariant (Studi Kasus Gerak Longitudinal Pesawat Terbang BWB AC 20.30)", *KUBIK: Jurnal Publikasi Ilmiah Matematika*, Vol. 5 No.2 Edisi November 2020.
- [17] M. Rabah, A. Rohan, Y. j. Han, and S. H. Kim, "Design of Fuzzy-PID Controller for Quadcopter Trajectory-Tracking", *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems* Vol. 18, No. 3, September 2018, pp. 204-213.

- [18] M. Vatikasari, "Desain Linear Quadratic Gaussian (LQG) Untuk Gerak Longitudinal Pesawat Tempur", Tugas Akhir Departemen Matematika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2018.
- [19] N. S. Nise, "Control System Engineering", 6th Edition, John Wiley & Sons. Inc, 2011.
- [20] Ogata dan Katsuhiko, "Teknik Kontrol Automatik Jilid 1 dan 2", Jakarta: Erlangga, 1997.
- [21] P. L. Hera1 and D. O. Morales, "Model-Based Development of Control Systems for Forestry Cranes", Journal of Control Science and Engineering, Article ID 256951, 2015.
- [22] R. I. Rizan, "Analisis dan Perancangan Sistem Pengendali Pada *Inverted Pendulum* Menggunakan Metode *Fuzzy Sliding Mode Control*", Tugas Akhir Departemen Matematika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2008.
- [23] R. Palm, D. Driankov, dan H. Hellendoorn, "Model Based Fuzzy Control: Fuzzy Gain Schedulers and Sliding Mode Fuzzy Controllers". Berlin: Springer-Verlag, 1997.
- [24] S. Bennet, "A Brief History of Automatic Control", IEEE Control Systems, 1996.
- [25] S.N. Fajar, " Desain dan Simulasi Sistem Kendali Linear Quadratic Gaussian (LQG) untuk Kestabilan Gerak Pitch LSU-05", Publikasi Online ITS (POMITS), Vol. 5. No.2, 2016.
- [26] Subiono, "Sistem Linier dan Kontrol Optimal", Departemen Matematika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2013.
- [27] T. Yulianto,"Aplikasi Metode LQR pada Kendali Attitude Rotor Spacecraft yang Berada di Sumbu Tetap", Tugas Akhir Departemen Matematika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2012.
- [28] Y. A. K. Utama, Y. Widianto, T. T. Sardjono, dan H. Kusuma, "Sistem Pengaturan Dasar", Aseni, Papua, 2018.
- [29] V. Kumar, B. C. Nakra and A. P. Mittal, "A Review on Classical and Fuzzy PID Controllers", International Journal of Intelligent Control and Systems Vol.16, September 2011, No.3, 170-181.
- [30] W. Ratnasari, "Desain Kontrol Pada Model Gerak Lateral-Direksional Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Menggunakan Output Feedback Control", Tugas Akhir Departemen Matematika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2021.
- [31] Wikipedia, "What is Sliding Mode Control", <https://www.collimator.ai/reference-guides/what-is-sliding-mode-control>, diakses pada 25 Oktober 2023.
- [32] Wikipedia, "Pontryagin Maximum Principle", https://en.wikipedia.org/wiki/Pontryagin%27s_maximum_principle, diakses pada 25 Oktober 2023.
- [33] Wikipedia, "Programmable Logic Control", https://en.wikipedia.org/wiki/Programmable_logic_controller, diakses pada 25 Oktober 2023.
- [34] Wikipedia, "Fuzzy Control System", https://en.wikipedia.org/wiki/Fuzzy_control_system, diakses pada 25 Oktober 2023.
- [35] Wikipedia, "Sliding Mode Control", https://en.wikipedia.org/wiki/Sliding_mode_control, diakses pada 25 Oktober 2023.
- [36] Zippia, "Process and Control System History", <https://www.zippia.com/process-and-control-systems-careers-2150259/history/>, diakses pada 10 September 2023.

Sistem Kontrol

Buku “Sistem Kontrol” ditulis sebagai tambahan referensi untuk mata kuliah Sistem dan Kontrol. Dalam buku ini dibahas tentang pengertian sistem kontrol, sistem dan karakterisasinya, sejarah perkembangan sistem kontrol serta beberapa metode kontrol yang banyak digunakan dalam menyelesaikan persoalan-persoalan nyata. Perkembangan sistem kontrol yang sangat pesat dan luas, sehingga buku ini hanya membahas sistem kontrol yang sudah dilakukan bersama mahasiswa bimbingan kami.

Sistem kontrol yang dibahas diantara adalah sistem kontrol umpan balik, sistem kontrol PID, sistem kontrol Sliding Mode control, sistem kontrol Fuzzy, sistem kontrol Fuzzy Sliding Mode Control, sistem kontrol Fuzzy PID, Optimal kontrol. Penerapan sistem kontrol dilakukan pada berbagai persoalan kontrol seperti inverted pendulum, pertumbuhan alga, gerak pesawat dan juga drone quad copter.

Contoh-contoh yang dibahas dalam buku ini sebagian besar merupakan topik-topik tugas akhir, tesis dan disertasi yang dilakukan oleh mahasiswa bimbingan kami sebagai hasil kerjasama antara mahasiswa dan dosen dalam pengembangan ilmu matematika terapan khususnya dalam sistem kontrol.