



Dasar Sistem Kendali



Faizal Arya Samman

Faizal Arya Samman
Universitas Hasanuddin

Dasar Sistem Kendali



Lembaga Sains, Teknologi dan Seni
(Institute of Sciences, Technologies and Arts – IESTA)

Dasar Sistem Kendali

Penulis:
Faizal Arya Samman.

ISBN: **978-602-72676-6-4.**

Editor:
Faizal Arya Samman

Desain Kover:
TRENSILICA

Penerbit:
Lembaga Sains, Teknologi dan Seni
(Institute of Sciences, Technologies and Arts – IESTA)

Alamat Penerbit:
Jl. KH. Wahid Hasyim No. 246
Sungguminasa 92111
Kec. Somba Opu, Kab. Gowa, Prov. Sulawesi Selatan

Distributor Utama:
PT. Minasa Elektro-Sains Teknologi
Jl. KH. Wahid Hasyim No. 246
Sungguminasa 92111
Kec. Somba Opu, Kab. Gowa, Prov. Sulawesi Selatan

Cetakan Pertama: Agustus 2016

Hak Cipta © 2016 pada Faizal Arya Samman

Hak Cipta dilindungi oleh Undang-undang.

Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronis maupun mekanis, termasuk memfotocopy, merekam atau dengan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari penerbit.

Buku Teks ini dicetak di Makassar, Indonesia.

Tebal isi halaman utama: 315 hlm.

Buku ini selayaknya dikutip dengan petikan sebagai berikut:

Faizal Arya Samman. “Dasar Sistem Kendali”, Buku Teks, *Lembaga Sains, Teknologi dan Seni (Institute of Sciences, Technologies and Arts – IESTA)*, 2016.

Kata Pengantar

Sistem kendali merupakan salah satu materi yang hadir dalam setiap kurikulum pendidikan teknik elektro. Sistem kendali hampir ditemukan di setiap bidang mulai dari industri sampai pada kehidupan sehari-hari. Oleh karena itu, materi ini sangat penting bagi pembaca yang bergelut di bidang teknik elektro dalam rangka membangun kompetensinya dalam menguasai ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang teknik elektro.

Buku Teks ini dibuat sebagai bahan acuan belajar bagi para pembaca yang mempelajari topik Sistem Kendali di perguruan tinggi, termasuk bagi para staf pengajar yang bergelut di bidang Teknik Elektro dan mengampu matakuliah yang terkait dengan prinsip dasar sistem kendali. Buku Teks ini merupakan rangkuman dari bahan-bahan kuliah yang telah diajarkan oleh Penulis sejak Tahun 2004 hingga saat ini.

Buku Teks ini diawali dengan pengantar mengenai definisi, diagram umum, aplikasi dan metode-metode yang digunakan dalam menganalisa sistem-sistem kendali (**Bab 1**). Domain aplikasi sistem kendali baik dalam industri maupun dalam kehidupan sehari-hari dibahas pada **Bab 2**. Selanjutnya, **Bab 3** membahas tentang diagram umum dan komponen-komponen yang digunakan dalam sistem kendali secara umum, misalnya sensor, aktuator, unit pengendali, unit pengkondisi isyarat, serta plant atau kendalian yang akan dikendalikan. **Bab 4** membahas tentang jenis-jenis masalah yang ditemukan dalam sistem kendali, serta gambaran dasar tentang teknik-teknik yang digunakan untuk memecahkan masalah-masalah tersebut.

Setelah membahas tentang pemahaman mendasar mengenai sistem kendali, selanjutnya kita akan masuk ke topik yang terkait dengan landasan matematika untuk menganalisa sistem-sistem kendali. **Bab 5** membahas tentang bagaimana mengubah model fisik sebuah sistem ke dalam bentuk model persamaan diferensial. Model matematis dalam bentuk persamaan diferensial tersebut selanjutnya diubah ke dalam bentuk fungsi alih dengan memanfaatkan

metode tranformasi Laplace (**Bab 6**). Model-model fungsi alih dari setiap komponen sistem kendali dapat disusun dalam sebuah diagram yang biasa disebut sebagai diagram kotak. **Bab 7** membahas tentang teknik-teknik dasar untuk mengubah diagram kotak sebuah sistem kendali ke dalam bentuk fungsi alih sistem secara umum. **Bab 8** membahas teknik lain yang digunakan untuk mendapatkan fungsi alih sebuah sistem kendali dengan memanfaatkan teknik aljabar graf aliran isyarat (*signal flow graph*).

Setelah memperoleh model fungsi alih dari sebuah sistem kendali, maka selanjutnya sistem kendali tersebut dapat dianalisa tingkat kestabilannya, sebagaimana dibahas pada **Bab 9**, tanggapan sistem kendali dalam domain waktu terhadap isyarat nasukan (**Bab 10**), serta tanggapan yang frekuensinya diubah-ubah (**Bab 11**). Bab terakhir, yaitu **Bab 12**, akan membahas mengenai analisis tempat kedudukan akar sebuah sistem kendali.

Penulis berharap bahwa Buku Teks ini dapat memberikan manfaat kepada para pembaca, terutama agar mereka dapat belajar mandiri dan termotivasi untuk belajar lebih tekun. Tentu saja Buku Teks ini masih sangat jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik, saran perbaikan dan komentar dari pembaca akan kami terima dengan tangan terbuka.

Gowa/Makassar, 22 Agustus 2016

Penulis,

Faizal Arya Samman

Daftar Isi

Kata Pengantar	vii
Daftar Tabel	xvi
Daftar Gambar	xxiii
Daftar Kode Program	xxv
1 Pengantar Sistem Kendali	1
1.1 Definisi Sistem Kendali	4
1.2 Diagram Umum dan Komponen-komponen Sistem Kendali . . .	5
1.2.1 Kendalian	5
1.2.2 Sensor	5
1.2.3 Pengkondisi Sinyal (<i>Signal Conditioner</i>)	6
1.2.4 Aktuator	6
1.2.5 Unit Pengendali (Kontroler Unit)	6
1.3 Jenis-jenis Masalah dalam Sistem Kendali	7
1.3.1 Masalah Penjajakan (Tracking)	7
1.3.2 Masalah Perbaikan Kestabilan	7
1.3.3 Masalah Perbaikan Kinerja	7
1.3.4 Masalah Penghapusan Gangguan	8
1.4 Metode Perancangan Sistem Kendali	8
1.4.1 Metode Kendali Konvensional PID	9
1.4.2 Metode Kendali Adaptif (<i>Adaptive Control</i>)	10
1.4.3 Metode Kendali Tegar (<i>Robust Control</i>)	11
1.4.4 Metode Kendali Logika Samar (<i>Fuzzy Logic Control</i>) . .	11
1.4.5 Metode Kendali berbasis Jaringan Syaraf Tiruan (<i>Artificial Neuro-Control</i>)	12
1.5 Aplikasi Sistem Kendali	12

1.6	Metode-metode Analisis Sistem Kendali	16
1.6.1	Analisis Kestabilan	17
1.6.2	Analisis Domain Waktu	17
1.6.3	Analisis Domain Frekuensi	17
1.6.4	Analisis Tempat Kedudukan Akar	18
1.7	Soal-soal Latihan	18
1.8	Rangkuman	18
	Daftar Pustaka	19
2	Sistem Kendali dalam Industri dan Kehidupan Sehari-hari	21
2.1	Sistem Kendali dalam Industri Manufaktur	23
2.2	Sistem Kendali dalam Industri Pengolahan	24
2.3	Sistem Kendali dalam Dunia Otomotif	24
2.4	Sistem Kendali pada Pesawat Terbang	25
2.5	Sistem Kendali dalam Bidang Pembangkitan Tenaga Listrik	25
2.5.1	Pembangkit Listrik Tenaga Air	26
2.5.2	Pembangkit Listrik Tenaga Uap	28
2.5.3	Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir	28
2.6	Soal-soal Latihan	29
2.7	Rangkuman	33
3	Diagram Umum dan Komponen-komponen Sistem Kendali	35
3.1	Diagram dan Komponen-Komponen Sistem Kendali	39
3.2	Unit Pengendali (Controller Unit)	40
3.2.1	Penguat Operasional	40
3.2.2	Mikrokontroler	42
3.2.3	Mikrokomputer Tersemit	43
3.2.4	Digital Signal Processor (DSP)	45
3.2.5	Complex Programmable Logic Device (CPLD)	45
3.2.6	Field Programmable Gate Array (FPGA)	46
3.2.7	Sistem-on-Chip (SoC)	49
3.3	Kendalian	49
3.4	Sensor	51
3.4.1	Sensor Kecepatan	51
3.4.2	Sensor Tekanan	52
3.4.3	Sensor Getaran	53
3.4.4	Sensor Suhu (Temperatur)	54
3.4.5	Sensor Arus dan Tegangan	55
3.5	Pengkondisi Sinyal (<i>Signal Conditioner</i>)	55
3.5.1	Konverter Analog-ke-Digital	55

3.5.2	Konverter Digital-ke-Analog	56
3.5.3	Penguat Daya	56
3.5.4	Penguat Tegangan	56
3.5.5	Penguat Instrumentasi	57
3.6	Aktuator	57
3.7	Unit Otomasi dan Instrumen Monitoring	58
3.8	Contoh-contoh Soal dan Penyelesaiannya	60
3.9	Soal-soal Latihan	61
3.10	Rangkuman	61
	Daftar Pustaka	61
4	Masalah-masalah Kendali dan Prinsip Dasar Penyelesaiannya	63
4.1	Masalah Penjajakan (Tracking)	65
4.2	Masalah Perbaikan Kestabilan	66
4.3	Masalah Perbaikan Kinerja	68
4.4	Masalah Penghapusan Gangguan	69
4.5	Masalah Servo	71
4.6	Contoh-contoh Soal dan Penyelesaiannya	72
4.7	Rangkuman	74
4.8	Soal-soal Latihan	74
	Daftar Pustaka	75
5	Persamaan Diferensial dan Model Matematis Sistem Fisik	77
5.1	Persamaan Diferensial Ordiner Linier	80
5.1.1	Persamaan Diferensial Orde-Satu	82
5.1.2	Persamaan Diferensial Orde-Dua	83
5.1.3	Persamaan Diferensial Orde-Banyak	84
5.1.4	Persamaan Diferensial Sistem Fisik	84
5.2	Persamaan Diferensial Sistem Elektrik	84
5.2.1	Persamaan Diferensial Sistem Elektrik LRC Seri	86
5.2.2	Persamaan Diferensial Sistem Elektrik LRC Paralel	87
5.3	Persamaan Diferensial Sistem Mekanik	89
5.3.1	Persamaan Diferensial Gerak Translasi Sistem Mekanik	90
5.3.2	Persamaan Diferensial Gerak Rotasi Sistem Mekanik	93
5.4	Persamaan Diferensial Sistem Elektromekanik	96
5.5	Persamaan Diferensial Sistem Termal	99
5.6	Analogi Sistem Elektrik dan Mekanik	101
5.6.1	Analogi Tegangan–Gaya	102
5.6.2	Analogi Arus–Gaya	103
5.7	Contoh-contoh Soal dan Penyelesaiannya	106

5.8	Pedoman dan Strategi Menjawab Soal	110
5.9	Rangkuman	111
5.10	Soal-soal Latihan	114
	Daftar Pustaka	116
6	Transformasi Laplace, Fungsi Alih dan Persamaan Karakteristik	117
6.1	Transformasi Laplace	119
6.1.1	Sifat-sifat dasar Transformasi Laplace	119
6.1.2	Transformasi Laplace Persamaan Diferensial	120
6.1.3	Transformasi Laplace Persamaan Integral	121
6.1.4	Teorema Penting Lain dari Transformasi Laplace	122
6.2	Fungsi Alih	123
6.3	Persamaan Karakteristik	124
6.4	Transformasi Laplace Fungsi-fungsi Penting Lain	126
6.5	Contoh-contoh Soal dan Penyelesaiannya	127
6.6	Pedoman dan Strategi Menjawab Soal	128
6.7	Rangkuman	129
6.8	Soal-soal Latihan	129
7	Aljabar Diagram Kotak dan Fungsi Alih	131
7.1	Pengantar Diagram Kotak	133
7.2	Aljabar Diagram Kotak	135
7.2.1	Perubahan/Pertukaran Posisi Isyarat Terjumlah	136
7.2.2	Perubahan/Pertukaran Posisi Titik Simpul Cabang	136
7.2.3	Perubahan/Penyederhanaan Model Sistem Bersusun Seri	136
7.2.4	Perubahan Model Sistem Bercabang dan Tergabung Kembali	137
7.2.5	Perpindahan/Pertukaran Posisi Titik Simpul Cabang dan Model Sistem	137
7.2.6	Perpindahan/Pertukaran Posisi Titik Simpul Operator Aritmatika dan Model Sistem	138
7.2.7	Perubahan Model Sistem Umpanbalik	138
7.2.8	Perpindahan/Pertukaran Titik Simpul Cabang dan Simpul Operator Aritmatika	139
7.3	Contoh-contoh Soal dan Penyelesaiannya	139
7.4	Pedoman dan Strategi Menjawab Soal	145
7.5	Rangkuman	146
7.6	Soal-soal Latihan	146
	Daftar Pustaka	147

8	Aljabar Graf Aliran Isyarat dan Fungsi Alih	149
8.1	Graf Aliran Isyarat	151
8.1.1	Transformasi dari Diagram Kotak	152
8.1.2	Istilah-istilah dalam Graf Aliran Isyarat	152
8.1.3	Aljabar Graf Aliran Isyarat	155
8.2	Formula Gain Mason	155
8.3	Contoh-contoh Soal dan Penyelesaiannya	158
8.4	Pedoman dan Strategi Menjawab Soal	162
8.5	Rangkuman	164
8.6	Soal-soal Latihan	164
	Daftar Pustaka	165
9	Analisis Kestabilan Berdasarkan Persamaan Karakteristik	167
9.1	Kondisi dan Definisi Stabil serta Manfaat Analisis Kestabilan	170
9.1.1	Visualisasi Kondisi Kestabilan	170
9.1.2	Definisi Stabil	171
9.1.3	Mengapa diperlukan Analisis Kestabilan	172
9.2	Persamaan Karakteristik, Pole-pole dan Bidang Kompleks	174
9.3	Tabulasi Routh dan Teorema Hurwitz untuk Analisis Kestabilan	178
9.3.1	Sifat-sifat Umum Polinomial	178
9.3.2	Tabulasi Routh	180
9.3.3	Kriteria Kestabilan Routh-Hurwitz	181
9.4	Contoh-contoh Soal dan Penyelesaiannya	190
9.5	Menentukan Akar Persamaan Karakteristik Menggunakan Scilab	192
9.6	Pedoman dan Strategi Menjawab Soal	194
9.7	Rangkuman	194
9.8	Soal-soal Latihan	195
	Daftar Pustaka	195
10	Analisis Tanggapan Waktu	197
10.1	Transformasi Laplace Isyarat Masukan	201
10.1.1	Sinyal (Isyarat) Masukan Impulsa (Denyut)	202
10.1.2	Sinyal (Isyarat) Masukan Undak	202
10.1.3	Sinyal (Isyarat) Masukan Ramp	202
10.2	Tanggapan Keadaan Peralihan	203
10.2.1	Tanggapan Peralihan Sistem Orde-Satu	205
10.2.1.1	Tanggapan Undak Satuan	205
10.2.1.2	Tanggapan Undak Satuan Untuk Model Den- gan Parameter Konstanta Waktu	206
10.2.2	Tanggapan Peralihan Sistem Orde-Dua	208

10.2.3	Spesifikasi Domain Waktu Sistem Orde-Dua	210
10.2.3.1	Riak Maksimum (<i>maximum overshoot</i>)	211
10.2.3.2	Waktu Tunda (<i>delay time</i>)	212
10.2.3.3	Waktu Bangkit (<i>rise time</i>)	213
10.2.3.4	Waktu Mantap (<i>settling time</i>)	213
10.3	Menggambar Kurva Tanggapan Waktu Peralihan Menggunakan Scilab	214
10.4	Tanggapan Keadaan Mantap	219
10.4.1	Tanggapan Keadaan Mantap Isyarat Keluaran	220
10.4.2	Tanggapan Keadaan Mantap Isyarat Kesalahan	222
10.5	Contoh-contoh Soal dan Penyelesaiannya	223
10.6	Pedoman dan Strategi Menjawab Soal	226
10.7	Rangkuman	227
10.8	Soal-soal Latihan	227
	Daftar Pustaka	228
11	Analisis Tanggapan Frekuensi	229
11.1	Kriteria Kestabilan Nyquist	233
11.1.1	Teknik Menggambar Diagram Nyquist	233
11.1.2	Kriteria Kestabilan Nyquist	236
11.1.3	Kriteria Kestabilan Untuk Sistem Fasa-minimum dan Fasa-non-minimum	238
11.1.4	Kriteria Kestabilan Nyquist Untuk Sistem Fasa-minimum	240
11.1.5	Analisis Tingkat Kestabilan Relatif dengan Diagram Nyquist	240
11.1.5.1	Margin Gain dan Persilangan Fasa	240
11.1.5.2	Margin Fasa dan Persilangan Gain	241
11.2	Menggambar Kurva Nyquist Menggunakan Scilab	243
11.3	Analisis Kestabilan dengan Diagram Bode	247
11.3.1	Teknik Menggambar Diagram Bode	247
11.3.2	Analisis Tingkat Kestabilan Relatif dengan Diagram Bode	250
11.3.2.1	Margin Gain dan Persilangan Fasa	250
11.4	Menggambar Kurva Bode Menggunakan Scilab	252
11.5	Spesifikasi Domain Frekuensi Untuk Sistem Orde-Dua	254
11.5.1	Frekuensi resonan (<i>Resonant frequency</i>): ω_r	255
11.5.2	Puncak resonan (<i>Resonant Peak</i>): M_r	255
11.5.3	Lebar Pita (<i>Bandwidth</i>): BW	255
11.6	Contoh-contoh Soal dan Penyelesaiannya	257
11.7	Pedoman dan Strategi Menjawab Soal	261
11.8	Rangkuman	262

11.9 Soal-soal Latihan	264
Daftar Pustaka	269
12 Analisis Tempat Kedudukan Akar	271
12.1 Parameter Dinamis dalam Persamaan Karakteristik	274
12.2 Formulasi Awal Sebelum Analisis	275
12.3 Istilah-istilah Penting dalam Analisis Tempat Kedudukan Akar	277
12.3.1 Pole dan Zero Fungsi Alih Daur Terbuka	277
12.3.2 Garis dan sudut Asimtot serta Titik Perpotongannya	278
12.3.3 Titik Break-away dan Break-in	279
12.3.4 Sudut Berangkat dan Sudut Tiba	281
12.4 Aturan-aturan Untuk Menggambar Tempat Kedudukan Akar	283
12.5 Kondisi Magnitudo dan Fasa dari Tempat Kedudukan Akar	285
12.6 Tipikal Tempat Kedudukan Akar	285
12.6.1 Tempat Kedudukan Akar Sistem Orde-Satu	286
12.6.2 Tempat Kedudukan Akar Sistem Orde-Dua	286
12.6.3 Tempat Kedudukan Akar Sistem Orde-Tiga	287
12.7 Menggambar Tempat Kedudukan Akar menggunakan Scilab	291
12.8 Contoh-contoh Soal dan Penyelesaiannya	295
12.9 Pedoman dan Strategi Menjawab Soal	301
12.10Rangkuman	302
12.11Soal-soal Latihan	302
Daftar Pustaka	303
Daftar Pustaka	304
Daftar Indeks	307
Senarai (Glosarium)	312

Daftar Pustaka

- [Astrom and Wittenmark, 1995] Astrom, K. J. and Wittenmark, B. (1995). “*Adaptive Control, 2nded.*”. Addison Wesley.
- [Biehl and Mayer, 2007] Biehl, S. and Mayer, D. (2007). “Dynamic Characterisation of Piezo resistive Sensor Systems for Adaptronic Devices”. In *Proc. of the IEEE Intl. Symp. on Industrial Electronics (ISIE07)*, pages 1482–1484.
- [Brown and Harris, 1994] Brown, M. and Harris, C. (1994). “*Neurofuzzy Adaptive Medelling and Control*”. Prentice-Hall International Series in Systems and Control Engineering. Prentice-Hall.
- [Dorf and Bishop, 2001] Dorf, R. C. and Bishop, R. H. (2001). “*Modern Control Systems*”, 9th Edition. Prentice-Hall, New Jersey.
- [Driels, 1996] Driels, M. (1996). “*Linear Control Sytems Engineering*”. McGraw-Hill, International Editions.
- [Elliot, 2001] Elliot, S. (2001). *Signal Processing for Active Control*. Academic Press, London.
- [Erdogan et al., 2010] Erdogan, G., Alexander, L., and Rajamani, R. (2010). “Adaptive Vibration Cancellation for Tire-Road Friction Coefficient Estimation on Winter Maintenance Vehicles”. *IEEE Trans. Control Systems Technology*, 18(5):1023–1032.
- [Fei, 2010] Fei, J. (2010). “Robust adaptive vibration tracking control for a micro-electro-mechanical systems vibratory gyroscope with bound estimation”. *IET Control Theory and Applications*, 4(6):1019–1026.
- [Franklin et al., 1994] Franklin, G. F., Powell, J. D., and Emami-Naeni, A. (1994). “*Feedback Control of Dynamics Systems*”, 7th Edition. Addison-Wesley.

- [Grossard et al., 2009] Grossard, M., Rotinat-Libersa, C., Chaillet, N., and Boukallel, M. (2009). “Mechanical and Control-Oriented Design of a Monolithic Piezoelectric Microgripper Using a New Topological Optimization Method”. *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, 14(1):32–45.
- [Hu, 2008] Hu, Q. (2008). “Adaptive output feedback sliding-mode manoeuvring and vibration control of flexible spacecraft with input saturation”. *IET Control Theory and Applications*, 2(6):467–478.
- [Isermann et al., 1992] Isermann, R., Lachman, K.-H., and Matko, D. (1992). “*Adaptive Control Systems*”. Prentice-Hall.
- [Kuo, 1995] Kuo, B. C. (1995). “*Automatic Control Systems*”, 7th Edition. Prentice-Hall, New Jersey.
- [Landau, 1999] Landau, I. D. (1999). “From Robust control to adaptive control”. *Elsevier J., Control Engineering Practice*, 7(9):1113–1124.
- [Leland, 2003] Leland, R. P. (2003). “Adaptive Mode Tuning for Vibrational Gyroscopes”. *IEEE Trans. Control Systems Technology*, 11(2):242–247.
- [Ma and Ghasemi-Nejhad, 2008] Ma, K. and Ghasemi-Nejhad, M. N. (2008). “Adaptive Control of Flexible Active Composite Manipulators Driven by Piezoelectric Patches and Active Struts With Dead Zones”. *IEEE Trans. Control Systems Technology*, 16(5):897–907.
- [Ogata, 1994] Ogata, K. (1994). “*Modern Control Engineering*”. Prentice-Hall.
- [Orlowska-Kowalska et al., 2010] Orlowska-Kowalska, T., Dybkowski, M., and Szabat, K. (2010). “Adaptive Sliding-Mode Neuro-Fuzzy Control of the Two-Mass Induction Motor Drive without Mechanical Sensors”. *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 57(2):553–564.
- [Philips and Harbor, 1996] Philips, C. L. and Harbor, R. D. (1996). “*Feedback Control Systems*”, 3rd Edition. Prentice-Hall, New Jersey.
- [Phillips and Nagle, 1995] Phillips, C. L. and Nagle, H. T. (1995). “*Digital Control System Analysis and Design*”. Prentice-Hall.

Daftar Index

A

active acoustic control	69
active noise control	69
active vibration control	69
ADC	55
Akar Persamaan Karakteristik	176
Akar-akar polinomial	188
Aktuator	6, 57
Algoritma Kendali	40
Algoritma Penalaan	40
Aljabar Diagram Kotak	131, 135
Aljabar Graf Aliran Isyarat	155
Aljabar Graf Aliran Sinyal	149
Analisis	
Tanggapan Frekuensi	235
Tanggapan Waktu	197
Tempat Kedudukan Akar	278
Analisis Bidang Fasa	17
Analisis Kestabilan	167
Analisis Sistem Kendali	16
Analisis Tempat Kedudukan Akar	277
Analog-to-Digital Converter	55
Analogi	
Arus-Gaya	104
Tegangan-Gaya	102
Analogi sistem elektrik-mekanik	102
Anti-derau	69
Aplikasi Sistem Kendali	12, 21
ARM Cortex	49
Arus listrik cabang	86
Audio unit	69

B

back electromotive force	98
Bahasa Assembly	42
Bahasa C/C++	42
Bahasa Deskripsi Perangkat Keras ..	45
Bahasa HDL	45
Bahasa Level Tinggi	43
Bahasa Mesin	42
Bahasa Pemrograman	
Assembly	45
C/C++	45
Bahasa Python	43
Bandwidth	261
Beban berubah	74
Belitan Medan	97
Belitan Rotor	97
Belitan Stator	97
Benda Rigid	53
Bidang Kompleks	175, 178, 179, 188

C

Central Processing Unit	45
Closed Loop	86, 175
Complex Programmable Logic Device	45
complex programmable logic device .	57
Configuration Data Stream	47
Continuous-time model	81
Continuous-time System	123
Control unit	69
CPLD	45, 46, 59
CPU	45
Critically-damped	210

D	
DAC	56
Damping Ratio	210
Daur	154
Daur Bersentuhan	155
Daur Individu	156, 157
Daur Tidak Bersentuhan	155
DCS	59
Definisi Sistem Kendali	4
Delay time	211
Delta-Sigma Modulation	56
Denominator	175
Describing Function	17
Design Reuse	49
Detak Frekuensi	43
Determinan Graf	156, 157
Determinan Matriks	181, 182
Diagram Bode .. 236, 237, 253, 258, 259	
Diagram Kotak	131, 133, 156
Diagram Nyquist	236, 237, 239
Diagram SFG	151
Diagram Umum Sistem Kendali .. 5, 35	
Differential Equation	84, 89, 95, 98
Linear	82
NonLinear	82
Time-Invariant	82
Time-Varying	82
digital controller unit	40
Digital Signal Processor	45
Digital-to-Analog Converter	56
Directed Line	133
Discrete-time model	81
Distributed Control System	59
DSP	45, 59
Dual-Inline-Package	41
E	
EEPROM	42, 47
Elektrik	84
LRC Paralel	87
LRC Seri	86
Elektromekanika	95
Embedded Microcontroller	44
Embedded Microprocessor	42, 43
EMF balik	98
Enkoder Optik	52
F	
Faktor Redaman	69
Field Programmable Gate Array	46
field programmable gate array	57
Flipflop Tipe D	47
Flux Magnetik Silang	105
Formula Gain Mason	153, 156
Forward Path	153
Forward Path Gain	154
FPGA	46, 59
SmartFusion	47
Frekuensi Natural	261
Frekuensi Natural Tak Teredam	231
Frekuensi Persilangan Fasa	246, 256
Frekuensi Persilangan Gain	247, 257
Frekuensi Resonan	261
Fungsi Alih	123, 131, 149, 161
Daur Terbuka	240, 258
Daur Tertutup	175, 259
Fungsi Alih Laplace	134
Fungsi Analitik	123
G	
Gain Daur	154
Gain Jalur Forward	154
Gain Kombinasi	158
Gain Kombinasi-2	157
Gain Kombinasi-3	157
Gain Kombinasi-4	158
Garis Berarah	133
Gaya Dorong Translasi	91
Gaya Gerak Listrik Balik	96
Gaya Gerak Translasi	92
Gaya Gesek Viskos	90
Gaya Pegas	90
Gaya Putar	93
Gaya Torsional	94
Gelombang Akustik	69

Gerak Rotasi	89	J	Jalur Forward	153
Gerak Translasi	89, 102	Jembatan Wheatstone	54	
GGL balik	98	Jenis-jenis Masalah Kendali	7, 63	
Graf Aliran Isyarat	151	K	Kaidah Ekuivalen	136, 140, 142–144, 146
Istilah-istilah	152	Kaidah Kesepadanan	136	
Kaidah Aljabar	155	Kapasitor	41	
Transformasi	152	Keadaan Transien	210	
Graf Sebab-Akibat	152	Kedudukan Akar	278	
Grid	73	Kemasan Piranti	41	
Gyroscope	51	Kendali Adaptive	10, 71	
H		Kendali berbasis Jaringan Syaraf Tiruan	66	
Hall-Effect	55	Kendali Logika Samar	11, 12, 66	
Hard Real-Time	47	Kendali Tegar	11, 68, 69	
Hardware Description Language	45	Kendali Waktu-Nyata	47	
Heat Transfer	98	Kendalian	5, 49	
Hubung-Singkat	57	Kestabilan Relatif	236, 239	
Hukum		Kode Biner	42	
Kesetimbangan Gaya	111	Koefisien Polinomial	179	
Kirchhoff Arus	110	Kokpit pesawat	69	
Kirchhoff Tegangan	98, 110, 111	Komponen Sistem Kendali	39	
Konservasi Energi	99	Komponen-komponen Sistem Kendali	5, 35	
Konservasi Energi Kalor	111	Konduksi	98	
Hukum Gaya Newton	90, 93	Konstanta Inersia	93	
Hukum Kirchhoff	86, 88	Konstanta Massa	90	
Arus	104	Kontroler PID	68, 69	
Tegangan	88	Konveksi	98	
Human Operator	72	Konveyor	50	
I		Kriteria Kestabilan Nyquist	236, 239, 242	
Identifikasi Sistem	82	Kriteria Kestabilan Routh-Hurwitz	180, 182	
Impulse	202	Kurva Fasa	239	
Individual Looping	157	Kurva Magnitudo	238	
Industri Kimia	58	Kurva Melingkupi	243	
Industri Pengolahan	58	L		
Inersia Massa	93	Lebar Pita	261	
Insensitivitas	40	LED	52	
Instrumen Monitoring	58			
Instrumentation Amplifier	57			
Intellectual Property	49			
Inverter DC/AC	73			
IP	49			

Light Emitting Diode	52	operational amplifier	40
Linear Time-Invariant System	78	Optical Encoder	52
Logic Cell	46	optocoupler	57
Look-Up Table Logic	46	Orde Sistem	174
Loop	154	Over-damped	210
Loop Gain	154		
LTI	82	P	
M		Papan Cetak Elektronik	43, 66
Magnetic Flux Linkage	105	Papan Cetak Elektronika	47
Margin Fasa	247, 258	Parameter Sistem Fisik	104
Margin Gain	246, 256	Parkir Otomatis	66
Maximum Overshoot	213	PCB	47, 49
Medan Elektromagnetik	105	Pengendali	6, 40
Mekanik	89	Penggerak Daya	56
Mesin Turbojet	69	Penghapusan Gangguan	69
Metode Konvesional	68	Pengkondisi Sinyal	6, 55
Metode Lyapunov	17	Penguat Daya	56
Metode-metode Kendali	8	Penguat Instrumentasi	57
Mikrokomputer Tersemaat	43	Penguat Operasional	40
Mikrokontroler	42	Penguat Tegangan	56
mini circuit-breaker	59	AC	56
Mixer	50	DC	56
Model		Penyearah AC/DC	73
Waktu-Diskrit	81	Percepatan Angular	93
Waktu-Kontinu	81	Percepatan Translasi	90
Momen Puntir	93	Periferal	42
Motor DC Eksitasi Terpisah	97	Perpidahan Panas	98
Motor Induksi	73	Persamaan Diferensial 77, 80, 82–84, 86,	
Motor Induksi 3-Fasa	50	87	
Motor Servo DC	95	Gerak Rotasi	93
Mounting System	66	Gerak Translasi	90
Multiplekser	47	Linier Tak-Ubah Waktu	82
N		Orde-Banyak	84
Node	88	Orde-Dua	83
Noise	70	Orde-Satu	82
noise cancellation	69	Ordiner	102
Non-touching Loop	155	Ordiner Linier	78, 80
Numerator	175	Sistem Elektrik	84, 86, 87
O		Sistem Elektromekanik	95
Op-Amp 741	41	Sistem Mekanik	89
		Sistem Termal	98
		Persamaan Domain s	119

Persamaan Domain t	119	Remote Terminal Unit	59
Persamaan Karakteristik .124, 167, 175, 194		Resistor	41
Persamaan Polinomial	191	Resonant frequency	261
Persilangan Fasa	246, 256	Resonant Peak	261
Persilangan Gain	247	Riak Maksimum	213
photodetector	52	Rise time	211
photodiode	52	Robot	65
PI Controller	41	SCARA	65
Piezoelektrik	52, 53	Robot Servo	72
Piranti Elektronika	45	Robust Control	69
PLC	59	Roda Gigi	52
Komponen	59	ROM	42
Pole	285	ROM-based configuration	46
Pole-pole Daur Tertutup	175	Root Locus	278
Polinomial		Ruang kabin mobil	70
Bentuk Ekspansi	179		
Orde-Dua	178	S	
Orde-Tiga	179	SCADA	59
Sifat Umum	178	Scilab	249
Power Amplifier	56	Kurva Bode	258
Power Driver	56	Kurva Kedudukan Akar	296
Power MOSFET	56	Kurva Nyquist	249
Printed Circuit Board	47, 49, 66	Kurva Tanggapan Waktu	216
Programabilitas	40	Menghitung Akar	191
Programmable Logic Controller	59	Sensor	5, 51
PROM	42	Arus Listrik	55
Proporsional+Integral Controller	41	Getaran	53
Proses Aritmatika	135	Kecepatan	51
Puncak Resonan	261	Tegangan	55
		Tekanan	52
R		Temperatur	54
Radiasi	99	Separately Excited DC Motor	97
RAM-based configuration	46	Servo Problem	71
Ramp Function	202	Settling time	212
Rangkaian Listrik		Shock Absorber	107
RLC paralel	102	Short-Circuit	57
RLC seri	104	Sifat Polinomial	179
Rangkaian Listrik LRC	84	Signal Conditioner	6, 55
Rangkaian Terpadu	49	Signal Flow Graf	151
Rasio Redaman	210, 259, 261	Simpal	86
Rectifier	73	Simpul Operator Aritmatika	139
		Sinyal Masukan	

Impulsa	202	Sistem Orde-Satu	206
Ramp	203	Tanggapan Waktu	
Undak (Step)	203	Undak Satuan	206
Sistem		Tanggapan waktu	
Elektrik	84	keadaan mantap	221
Elektromekanik	95	peralihan	204
Mekanik	89	Tekanan Fluida	52
Termal	98	Tekanan Gas	52
Sistem Audio	70	Teleoperated Robot	72
Sistem Fasa Minimum	242, 244	Tempat Kedudukan Akar	
Sistem Fisik	78	Kondisi Fasa	293
Sistem Kendali Digital	42	Kondisi Magnitudo	292
Sistem Kendali Waktu-Diskrit	39	Teorema	
Sistem Linier		Diferensiasi	122
Tak Ubah Waktu	78	Nilai Akhir	122
Sistem Linier Tak Ubah Waktu	82	Nilai Awal	122
Sistem Non Fasa Minimum	242, 244	Teredam Kritis	210
Sistem Suspensi	107, 109	Teredam Kurang	211
Sistem Suspensi Mobil	107	Teredam Lebih	210
Sistem Waktu Kontinu	123	Termal	98
SMD, piranti	66	Tidak Teredam	211
SoC	49	Titik Kritis	242
Spesifikasi Domain Waktu	211	Titik Persilangan Fasa	246, 256
Stabil		Titik Persilangan Gain	247, 257
Asimptot	176	Titik Simpul	154, 156
Marginal	177, 210, 211	Titik Simpul Cabang	136, 139
Marjinal	123	Topografi sirkuit terpadu	45
Stabil Asimptot	176	Torsi	94
Step Function	202	Torsi Gesek Viskos	94
Strain Gauge	53	Transformasi Laplace	117, 119, 202
Sumbu Imajiner	175, 188	Persamaan Diferensial	120
Sumbu Ril	175	Persamaan Integral	121
Supervisory Control and Data Acquisi- tion	59	Sifat dasar	119
Surface Mounting Device	66	Teorema Penting	122
System-on-Chip	49	Trial-and-Error	69
		Tuning Algorithm	40
T		U	
Tabulasi Routh	168, 180, 182, 183	Undak Satuan	231
Tachogenerator	51	Undamped	211
Tanggapan Peralihan		Under-damped	211
Sistem Orde-Dua	210	Unit Aritmatika	47

Unit Kendali Utama	42
Unit Otomasi	58
Unit Pengendali	40

V

Variabel Kopling	97, 98
Variabel Sistem Fisik	104
Vector Processor	45
Vektor Berarah	151
Verilog	46
Vertex	151
VHDL	46
Visualisasi Kestabilan	170

W

Waktu Bangkit	69, 211, 214
Waktu Mantap	198, 214
Waktu Nyata	43
Waktu Peralihan	198
Waktu Tunda	211, 214

Z

Zero	285
------------	-----

DASAR SISTEM KENDALI

Buku ini menyajikan prinsip-prinsip dasar analisis sistem kendali, yang dapat dijadikan sebagai bahan ajar yang digunakan dalam mata kuliah yang terkait topik sistem kendali, sekaligus sebagai buku referensi untuk memahami teknik-teknik analisis kestabilan sistem kendali. Pembahasan mengenai komponen dan arsitektur sistem kendali, masalah-masalah yang sering ditemukan dalam bidang kendali, model persamaan diferensial dan fungsi alih sistem-sistem fisik, serta teknik-teknik untuk menemukan fungsi alih sebuah diagram kotak disajikan dengan contoh-contoh soal dan penyelesaiannya yang dipaparkan secara sistematis, sederhana dan mudah dipahami.

Buku ini juga membahas beberapa teknik-teknik dasar analisis kestabilan, di antaranya adalah analisis kestabilan sistem kendali berdasarkan model persamaan karakteristiknya dengan menggunakan Teorema Routh, analisis dalam domain waktu, baik dalam keadaan peralihan maupun dalam keadaan mantap, analisis dalam domain frekuensi, baik dengan Diagram Bode maupun menggunakan Teorema Nyquist, serta analisis tempat-tempat kedudukan akar.

Pembaca akan menemukan bahwa buku ini akan menjadi sumber referensi yang sangat bermanfaat untuk membangun pondasi dasar pemahaman dalam bidang teknik kendali, sehingga pembaca dapat mengembangkan kompetensinya untuk merancang sistem kendali dan mengaplikasikan kompetensinya itu dalam dunia industri.

Tentang Penulis

Faizal Arya Samman menyelesaikan pendidikan dasar dan menengah masing-masing di SD Negeri Bontokamase Sungguminasa, SMP Negeri 1 Sungguminasa dan SMA Negeri 1 Sungguminasa (SALIS), Gowa. Kemudian, ia menyelesaikan studi Sarjana Teknik Tahun 1999 di Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, pendidikan Magister Teknik Tahun 2002 di Institut Teknologi Bandung, dan Pendidikan Doktor-Ingenieur di Technische Universität Darmstadt, Jerman Tahun 2010 dalam bidang Teknik Elektro dan Teknologi Informasi.

Sekarang ini ia bekerja sebagai staf pengajar dan peneliti di Departemen Teknik Elektro, Universitas Hasanuddin, Makassar. Bidang riset dan pengembangan yang diminatinya antara lain Jaringan on-Chip (Network-on-Chip) untuk Sistem Prosesor Multi Core, Sistem Dalam Sebuah Chip (System-On-Chip), Elektronika Daya, Sistem Kendali and Sistem Tersemaat (Embedded Systems) untuk aplikasi biomedika dan sistem pembangkitan tenaga listrik berbasis energi baru dan terbarukan.



Penerbit IESTA



Institute of Sciences, Technologies and Arts — IESTA

(Lembaga Sains Teknologi dan Seni)

Jl. KH. Wahid Hasyim No. 246

Sungguminasa 92111, INDONESIA

E-mail: iesta.ipteks@gmail.com

ISBN 978-602-72676-6-4



9 786027 267664 >



Dasar Sistem Kendali

Faizal A. Samman