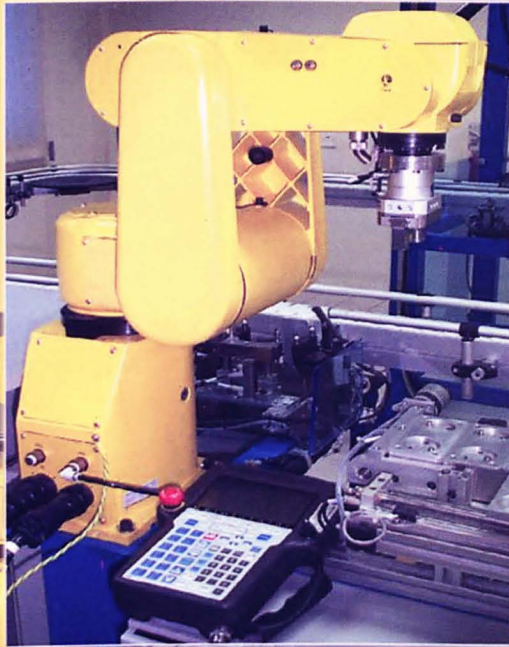


# PRINSIP KEJURUTERAAN KAWALAN

SAZALI YAACOB



Universiti Malaysia Sabah  
Beg Berkunci 2073  
88999 Kota Kinabalu  
<http://www.ums.edu.my>



**ULANGTAHUN ke-10**  
*Universiti Berinovatif*  
1994 - 2004

**UNIVERSITI MALAYSIA SABAH**

PRINSIP  
KEJURUTERAAN  
KAWALAN

Sazali Yaacob

Universiti Malaysia Sabah  
Beg Berkunci 2073  
88999 Kota Kinabalu

© Universiti Malaysia Sabah, 2004.

**Semua hak terpelihara.**

**Tiada mana-mana bahagian daripada penerbitan ini boleh disimpan atau diterbitkan semula atau dikeluarkan-ulang dalam sebarang bentuk dengan apa cara sekalipun samaada secara elektronik, mekanikal, fotokopi, rakaman digital, tanpa terlebih mendapatkan keizinan bertulis daripada Penerbit Universiti Malaysia Sabah. Pemberian hak terbitannya tertakluk kepada bayaran royalti atau honorarium.**

Perpustakaan Negara Malaysia Data Pengkatalogan Penerbitan

Sazali Yaacob

Prinsip kejuruteraan kawalan / Sazali Yaacob.

Mengandungi indeks

Bibliografi: ms. 385

ISBN 983 - 2369 - 07 - X

1. Automatic control. 2. Structural control (Engineering).

3. Control theory. I. Judul.

629.8

Pereka Letak Halaman: Kuani Kiasun

Pereka Kulit Buku: Jupili Selamat

Penyemak Prof Teks: Mazlina Mamat

Editor: Saidatul Normis Haji Mahali

Ketua Unit Penerbitan: Abdul Manaf Saad

Muka Taip Teks: Times New Roman

Saiz taip Teks dan Leading: 11/13 poin

Dicetak oleh: Utusan Kinabalu Sdn. Bhd (23539-X)

No. 3A Lorong Dewan

Peti Surat 11056

88811 Kota Kinabalu, Sabah.

No. Telefon 088-257400

No. Telefaks 088-252658

# KANDUNGAN

SENARAI GAMBARAJAH	viii
SENARAI JADUAL	xiv
SENARAI FOTO	xvi
PRAKATA	xvii

## 1 PENGENALAN KEPADA SISTEM KAWALAN

1.0	Objektif	1
1.1	Pengenalan	1
1.2	Takrifan	4
1.3	Sistem Kawalan Gelung Buka	9
1.4	Sistem Kawalan Gelung Tertutup	11
1.5	Kawalan Jujukan	13
1.6	Kawalan Proses	16
1.7	Kawalan Servo	17
1.8	Gambarajah Blok	19
1.9	Struktur Sistem Kawalan	24
1.10	Model	24
1.11	Analisa	29
1.12	Rekabentuk	30
1.13	Faedah dan Keburukan Suapbalik	31
1.14	Latihan	36

## 2 PEMODELAN SISTEM

2.0	Objektif	39
2.1	Pengenalan	39
2.2	Jelmaan Laplace	40
2.3	Penyelesaian Persamaan Kebezaan	46
2.4	Rangkap Pindah Pembolehubah Kompleks	48
2.5	Fungsi-fungsi Rasional: Kutub dan Sifar	51
2.6	Graf Aliran Isyarat	61
2.7	Sistem Anjakan Mekanikal	71
2.8	Sistem Putaran Mekanikal	73

## SENARAI GAMBARAJAH

1.1: Sistem kawalan suhu bilik	6
1.2: Penjana isyarat kawalan bagi sistem kawalan suhu	7
1.3: Gambarajah blok asas bagi satu sistem kawalan	8
1.4: Sistem kawalan suap balik	9
1.5: Gambarajah skematik sistem kawalan bagi meja pusing	10
1.6: Gambarajah blok gelung buka bagi meja pusing	10
1.7: Gambarajah skematik bagi sistem gelung untuk sistem kawalan meja pusing	12
1.8: Gambarajah blok sistem kawalan gelung tertutup meja pusing	12
1.9: Proses pembuatan bagi pembungkusan barang	14
1.10: Simpang empat bagi kawalan lalu lintas	14
1.11: Carta aliran bagi proses pencucian baju	15
1.12: Gambarajah blok asas	19
1.13: Gambarajah blok bagi perbandingan	20
1.14: Dua blok yang disambung secara kasked	20
1.15: Gambarajah blok asas sistem kawalan gelung tertutup	21
1.16: Dua blok yang disambung sambung secara kasked	22
1.17: Carta aliran sistem kawalan	24
1.18: Sistem jisim-pegas	27
1.19: Gambarajah blok sistem kawalan digit	31
1.20: Sistem kawalan suap balik	31
1.21: Sistem gelung tertutup	32
2.1: Kedudukan sifar dan kutub bagi rangkap pindah	49
2.2: Bentuk model graf aliran isyarat	61
2.3: Gambarajah blok sistem gelung tertutup	62
2.4: Perwakilan graf aliran isyarat blok sistem gelung tertutup	62
2.5: Sambungan kasked	63
2.6: Ringkasan sambungan kasked	63
2.7: Sambungan selari	63
2.8: Sistem anjakan mekanikal	72
2.9: Sistem putaran mekanikal	74
2.10: Litar RLC	75
2.11: Gambarajah skematik sistem bendalir	77

2.12: Gambarajah blok sistem bendalir	81
2.13: Gambarajah skematik sistem servo mekanisma	83
3.1: Tetingkap permulaan <i>MATLAB</i>	97
3.2: Contoh plot graf nilai y lawan nilai x dengan menggunakan <i>MATLAB</i>	112
3.3: Plot dua graf menggunakan <i>MATLAB</i>	113
3.4: Plot empat graf menggunakan <i>MATLAB</i>	114
3.5: Plot graf analisa simbolik menggunakan <i>MATLAB</i>	116
3.6: Sambutan unit langkah	122
3.7: Sambutan unit langkah bagi dua rangkap pindah	123
3.8: Kerahan memulakan <i>Simulink</i>	124
3.9: Tetingkap permulaan <i>Simulink</i>	125
3.10: Blok-blok masukan <i>Simulink</i>	126
3.11: Blok-blok keluaran <i>Simulink</i>	127
3.12: Blok-blok diskrit <i>Simulink</i>	128
3.13: Blok-blok lurus <i>Simulink</i>	129
3.14: Blok-blok sambungan <i>Simulink</i>	130
3.15: Simulasi sambutan blok dengan menggunakan <i>Simulink</i>	130
3.16: Sambutan langkah blok-blok lurus <i>Simulink</i>	131
4.1: Sambutan masa tertib pertama bagi masukan unit langkah	138
4.2: Kedudukan kutub pada satah-s	147
4.3: Sambutan masa tertib kedua bagi masukan unit langkah untuk kes kurang redam	148
4.4: Kedudukan kutub pada satah-s	149
4.5: Spesifikasi sambutan masa tertib kedua untuk masukan unit langkah bagi kes kurang redam	151
4.6: Sambutan masa tertib kedua untuk masukan unit langkah bagi kes lebih redam	154
4.7: Sambutan masa tertib kedua untuk masukan unit langkah bagi kes redaman genting	155
4.8: Sambutan masa tertib kedua untuk masukan unit langkah bagi kes tanpa redaman	157
4.9: Sambutan masa tertib kedua sebagai fungsi nisbah redaman	158
4.10: Pergerakan kutub hakiki secara mendatar	159

4.11: Sambutan masa untuk kutub hakiki yang bergerak secara mendatar	160
4.12: Pergerakan kutub pada paksi khayalan secara menegak	161
4.13: Sambutan masa untuk kutub pada paksikhayalan yang bergerak secara menegak	162
4.14: Pergerakan kutub pada paksi khayalan secara menegak	163
4.15: Sambutan masa bagi pergerakan kutub pada paksi khayalan secara menegak	163
4.16: Pergerakan kutub hakiki secara pepenjuru	164
4.17: Sambutan masa bagi pasangan kutub konjugat kompleks yang bergerak secara pepenjuru	165
4.18: Sambutan masa bagi rangkap pindah dengan kesan kutub perusa	166
4.19: Kestabilan sistem pada satah-s	174
4.20: Gambarajah blok pemampas dan pengawal	184
5.1: Gambarajah blok bagi satu gelung tertutup mudah	206
5.2: Magnitud sifar, $n_1, \dots, n_n$ dan kutub $m_1, \dots, m_m$ , daripada titik uji s	210
5.3: Sudut sifar, $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ , dan kutub, $\theta_1, \dots, \theta_m$ , daripada titik uji s	212
5.4: Kedudukan kutub-kutub hakiki	213
5.5: Kedudukan satu pasang kutub kompleks dan konjugetnya	214
5.6: Gambarajah blok mudah sistem gelung tertutup	214
5.7: Kedudukan kutub-kutub gelung tertutup pada satah s untuk $0 < K < 100$	220
5.8: Londa kutub-kutub gelung tertutup pada satah-s untuk $0 < K < \infty$	221
5.9: Kedudukan kutub dan sifar gelung buka pada paksi hakiki	222
5.10: Taburan gandaan K terhadap kedudukan kutub pada paksi hakiki	223
5.11: Penentuan sudut penolakan bagi kutub kompleks $K$	229
5.12: Londa punca bagi rangkap pindah $G_o(s) = \frac{7.5K}{s(s+1)(s+2)}$	233
5.13: Londa punca bagi rangkap pindah $G_o(s) = \frac{7.5K}{s(s^2+8s+15)}$	237
5.14: Magnitud sifar dan kutub daripada titik uji	239
5.15: Pembatalan sifar-kutub	241
5.16: Bentuk pemampas sistem kawalan	243
5.17: Penentuan sifar dan kutub bagi pemampas mengekor	244



- 6.1: Rajah blok mudah 258
- 6.2: Kertas graf bagi plot Bode untuk magnitud logaritma 10,  $LM$ , dan sudut fasa,  $\Phi$ , lawan frekuensi,  $\omega$ , dalam skala logaritma 10. 267
- 6.3: Plot Bode untuk magnitud logaritma 10,  $LM$ , dan sudut fasa,  $\Phi$  lawan frekuensi,  $\omega$ , dalam skala logaritma 10 bagi gandaan  $K$  268
- 6.4: Plot Bode untuk magnitud logaritma 10,  $LM$ , dan sudut fasa,  $\Phi$ , lawan frekuensi,  $\omega$ , dalam skala logaritma 10 bagi gandaan  $K=200$  269
- 6.5: Plot Bode untuk magnitud logaritma 10,  $LM$ , dan sudut fasa,  $\Phi$ , lawan frekuensi,  $\omega$ , dalam skala logaritma 10 bagi kutub pada asalan 272
- 6.6: Plot Bode untuk magnitud logaritma 10,  $LM$ , dan sudut fasa,  $\Phi$ , lawan frekuensi,  $\omega$ , dalam skala logaritma 10 bagi kutub pada asalan  $1/s$  dengan menggunakan *MATLAB* 273
- 6.7: Penghampiran asimtot plot Bode bagi kutub hakiki  $G(s) = \frac{1}{s+1}$  dengan menggunakan *MATLAB* 275
- 6.8: Penghampiran asimtot dan sebenar plot Bode bagi kutub hakiki  $G(s) = \frac{1}{s+1}$  dengan menggunakan *MATLAB* 277
- 6.9: Satu kecerunan plot Bode bagi magnitud logaritma 10,  $LM$ , lawan frekuensi dalam skala logaritma 10  $\log \omega$  282
- 6.10: Satu kecerunan plot Bode bagi sudut fasa,  $\Phi$ , lawan frekuensi dalam skala logaritma 10,  $\log \omega$  283
- 6.11: Plot Bode bagi rangkap pindah  $G_o(s) = \frac{5000(s+4)}{s(s+10)(s+200)}$  dengan penghampiran asimtot 285
- 6.12: Plot Bode bagi rangkap pindah  $G_o(s) = \frac{5000(s+4)}{s(s+10)(s+200)}$  286
- 6.13: Plot Bode dengan penghampiran asimtot untuk magnitud logaritma 10,  $LM$ , dan sudut fasa,  $\Phi$ , lawan frekuensi,  $\omega$ , dalam skala logaritma 10 bagi rangkap pindah  $G_o(s) = \frac{5000(s+4)}{s(s+10)(s+200)}$  289
- 6.14: Plot Bode untuk magnitud logaritma 10,  $LM$ , dan sudut fasa,  $\Phi$ , lawan frekuensi,  $\omega$ , dalam skala logaritma 10 bagi rangkap pindah  $G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$  290

6.15: Plot Bode bagi rangkap pindah	$G_o(s) = \frac{860}{s(s+150)(s^2 + 30s + 400)}$	
dengan penghampiran asimtot		296
6.16: Plot Bode bagi rangkap pindah	$G_o(s) = \frac{860}{s(s+150)(s^2 + 30s + 400)}$	297
6.17: Plot Bode bagi rangkap pindah jenis 0		305
6.18: Plot Bode bagi rangkap pindah jenis 1		307
6.19: Plot Nyquist bagi rangkap pindah	$G(s) = \frac{5}{0.25s + 1}$	314
6.20: Plot Nyquist bagi rangkap pindah	$G(s) = \frac{1}{(2s+1)(s^2 + s + 1)}$	318
6.21: Pemetaan rangkap pindah	$G(s)H(s) = \frac{1}{(s+2)}$	321
6.22: Pemetaan rangkap pindah $G(s)H(s) = (s - z)$ daripada satah- $GH$ kepada satah- $F$ untuk kontor A tidak mengelilingi sebarang sifar		322
6.23: Pemetaan rangkap pindah $G(s)H(s) = (s - z)$ daripada satah- $GH$ kepada satah- $F$ untuk kontor A mengelilingi sifar		322
6.24: Pemetaan rangkap pindah $G(s)H(s) = \frac{1}{(s - p_j)}$ daripada satah- $GH$ kepada satah- $F$ untuk kontor A tidak mengelilingi sebarang kutub		323
6.25: Pemetaan rangkap pindah $G(s)H(s) = \frac{1}{(s - p_j)}$ daripada satah- $GH$ kepada satah- $F$ untuk kontor A mengelilingi kutub		324
6.26: Pemetaan rangkap pindah $G(s)H(s) = \frac{(s - z_i)}{(s - p_j)}$		324
6.27: Plot Nyquist untuk julat frekuensi $0 < \omega < \infty$ pada satah- $s$		327
6.28: Plot Nyquist un julat frekuensi $-0 < \omega < \infty$ pada satah- $s$		327
6.29: Laluan Nyquist pada satah- $s$		328
6.30: Plot Nyquist untuk julat frekuensi $-\infty < \omega < \infty$ pada satah- $F$		328
6.31: Plot Nyquist untuk julat frekuensi $-\infty < \omega < \infty$ pada satah- $GH$		329
6.32: Laluan Nyquist dengan mengambil kira sifar dan kutub pada paksi khayalan		331
6.33: Laluan Nyquist bagi sifar di orijin		332

- 6.34: Plot Nyquist bagi rangkap pindah  $G(s)H(s) = \frac{10}{s(s+1)}$  334
- 6.35: Jidar gandaan bagi sistem yang stabil dalam plot Nyquist 336
- 6.36: Jidar fasa bagi sistem yang stabil dalam plot Nyquist 337
- 6.37: Jidar gandaan fasa bagi sistem yang tak stabil dalam plot Nyquist 338
- 6.38: Plot Nyquist bagi  $G_{OL}(s) = \frac{5K}{(s+3)(s^2+4s+7)}$  untuk  $K = 8$  rangkap pindah 341
- 6.39: Plot Nyquist bagi rangkap pindah  $G_{OL}(s) = \frac{5K}{(s+3)(s^2+4s+7)}$  untuk  $K = 10$  dan  $K = 30$  343
- 6.40: Jidar gandaan dan jidar fasa bagi sistem yang stabil dalam plot Bode 344
- 6.41: Jidar gandaan dan jidar fasa bagi sistem yang tak stabil dalam plot Bode 345
- 6.42: Plot Bode bagi rangkap pindah  $G(s) = \frac{K}{s(s+2)(s+40)}$  untuk  $K=96$  dengan penghampiran asimtot  $K$  350
- 6.43: Plot Bode bagi rangkap pindah  $G(s) = \frac{K}{s(s+2)(s+40)}$  untuk  $K=96$  351
- 6.44: Plot Bode bagi pelarasan gandaan  $2 \times 10^4$  353
- 6.45: Plot Bode bagi rangkap pindah  $\frac{2 \times 10^4}{s(s+10)(s+500)}$  dengan penghampiran asimtot  $2 \times 10^4$  358
- 6.46: Plot Bode bagi rangkap pindah  $\frac{2 \times 10^4}{s(s+10)(s+500)}$  selepas pelarasan gandaan 359
- 6.47: Plot Bode bagi pemampas mengekor dengan penghampiran asimtot 360
- 6.48: Plot Bode sebenar bagi pemampas mengekor  $\alpha = 2$  dan  $5$ ,  $T = 0.1$  361
- 6.49: Plot Bode bagi rangkap pindaah  $\frac{2KG_c}{s(s+1)(s+5)(s+20)}$  untuk  $G_c(s) = 1$  dan  $K=50$  dengan penghampiran asimtot 368
- 6.50: Plot Bode bagi rangkap pindah  $\frac{1000}{s(s+1)(s+5)(s+20)}$  dan tanpa pemampas mengekor dengan penghampiran asimtot 369
- 6.51: Plot Bode bagi rangkap pindah  $\frac{2KG_c}{s(s+1)(s+5)(s+20)}$  dan pemampas mengekor 371

6.52: Plot Bode bagi pemampas mendulu dengan penghampiran asimtot	373
6.53: Plot Bode sebenar bagi pemampas mendulu $\beta = 0.2$ dan $0.5, T = 0.1$	374

## SENARAI JADUAL

2.1: Jadual Jelmaan Laplace	43
4.1: Jadual Routh	169
4.2: Jadual ralat keadaan mantap	183
5.1: Nilai kutub-kutub gelung tertutup untuk $0 < K < 100$	219
5.2: Jumlah sudut pada titik dari sifar dan kutub gelung buka	222
6.1: Jadual frekuensi, $\omega$ , lawan magnitud logaritma 10, <i>LM</i> , untuk setiap dekad bagi julat $1-10^3$ rad.s <sup>-1</sup> bagi rangkap pindah $G(s) = 1/s$	270
6.2: Jadual frekuensi, $\omega$ , lawan magnitud logaritma 10, <i>LM</i> , untuk setiap dekad bagi julat $1-10^3$ rad.s <sup>-1</sup> bagi rangkap pindah $G(s) = 1/s$	270
6.3: Jadual frekuensi, $\omega$ , lawan magnitud logaritma 10, <i>LM</i> , untuk setiap oktav bagi julat $1-2^3$ rad.s <sup>-1</sup> bagi rangkap pindah $G(s) = 1/s$	271
6.4: Jadual Frekuensi, $\omega$ , lawan magnitud logaritma 10, <i>LM</i> , untuk setiap dekad bagi julat $10-10^7$ rad.s <sup>-1</sup> bagi rangkap pindah $G(s) = \frac{1}{s+1}$	275
6.5: Kecerunan bagi magnitud logaritma 10, <i>LM</i> , terhadap frekuensi, $\omega$ , bagi rangkap pindah $G_o(s) = \frac{5000(s+4)}{s(s+10)(s+200)}$	280
6.6: Kecerunan bagi sudut fasa, $\Phi$ , terhadap frekuensi, $\omega$ , bagi rangkap pindah $G_o(s) = \frac{5000(s+4)}{s(s+10)(s+200)}$	281

- 6.7: Frekuensi,  $\omega$ , lawan magnitud logaritma 10,  $LM$ , untuk setiap dekad bagi julat  $10\text{-}10^4 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$  bagi rangkap pindah  $G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$  288
- 6.8: Kecerunan bagi magnitud logaritma 10,  $LM$ , terhadap frekuensi,  $\omega$ , bagi rangkap pindah  $G_o(s) = \frac{860}{s(s+150)(s^2 + 30s + 400)}$  293
- 6.9: Kecerunan bagi sudut fasa,  $\Phi$ , terhadap frekuensi,  $\omega$ , bagi rangkap pindah  $G_o(s) = \frac{860}{s(s+150)(s^2 + 30s + 400)}$  294
- 6.10: Kecerunan bagi magnitud logaritma 10, terhadap frekuensi,  $\omega$ , bagi rangkap pindah  $G(s) = \frac{K}{s(s+2)(s+40)}$  untuk  $K = 96$  347
- 6.11: Kecerunan bagi sudut fasa,  $\Phi$ , terhadap frekuensi,  $\omega$ , bagi rangkap pindah  $G(s) = \frac{K}{s(s+2)(s+40)}$  untuk  $K = 96$  348
- 6.12: Kecerunan bagi magnitud logaritma 10,  $LM$ , terhadap frekuensi  $\omega$ , bagi rangkap pindah  $\frac{2 \times 10^4}{s(s+10)(s+500)}$  355
- 6.13: Kecerunan bagi sudut fasa,  $\Phi$ , terhadap frekuensi,  $\omega$ , bagi rangkap pindah  $\frac{2 \times 10^4}{s(s+10)(s+500)}$  356
- 6.14: Kecerunan bagi sudut fasa  $\Phi$ , terhadap frekuensi,  $\omega$ , bagi rangkap pindah  $\frac{2KG_c}{s(s+1)(s+5)(s+20)}$  untuk  $G_c(s) = 1$  dan  $K = 50$  366

## SENARAI FOTO

1.1: Kawalan semasa mengayuh basikal	2
1.2: Bebola tangki tandas	3
1.3: Pelancaran roket	3
1.4: Tombol pengawal	4
1.5: Sistem PLC (Programmable Logic Controller)	4
1.6: Suis SPDT (Single Pole Double Throw)	5
1.7: Sistem kawalan pembuatan menggunakan robot	5
1.8: Transduser termokapel	6
1.9: Sistem pemutar rekod	9
1.10: Meter Tako	11
1.11: Sistem kawalan proses	16
1.12: Sistem kawalan proses untuk pengajaran di makmal	17
1.13: Sistem kawalan peluru berpandu	18
1.14: Sistem kawalan servo untuk pengajaran di makmal	18

## PRAKATA

Kejuruteraan Kawalan merupakan subjek wajib bagi pelajar Kejuruteraan Elektrik, Mekanikal dan Kimia. Aplikasi dalam bidang ini boleh dicerapi dalam pelbagai sektor seperti pembuatan, perkilangan, penerbangan, perubatan dan sebagainya. Bidang Kejuruteraan Kawalan amat luas, untuk membincangkan semua aspek berhubungnya adalah sukar dalam satu buku. Bagi peringkat permulaan, pelajar-pelajar perlulah memahami prinsip-prinsip asas yang berhubung dengan pengenalan, pemodelan, analisa dan rekabentuk kepada sistem kawalan. Oleh itu, buku Prinsip Kawalan Kejuruteraan ini ditulis dengan tujuan untuk mendedahkan kepada pelajar-pelajar berhubung perkara ini. Buku ini adalah koleksi nota-nota kuliah yang diajar oleh saya kepada pelajar-pelajar Jabatan Kejuruteraan Elektrik, Universiti Malaya dari 1987 hingga 1998; dan Program Kejuruteraan Elektrik dan Elektronik; dan Program Kejuruteraan Mekanikal di Sekolah Kejuruteraan dan Teknologi Maklumat, Universiti Malaysia Sabah semenjak 1998. Buku ini boleh digunakan sebagai teks utama untuk kursus Kejuruteraan Kawalan pada peringkat Diploma dan Sarjana Muda Kejuruteraan.

Buku ini dibahagikan kepada enam bab yang merangkumi terminologi-terminologi asas bagi Kejuruteraan Kawalan. Prinsip-prinsip permodelan matematik bagi pelbagai sistem kawalan turut dibincangkan. Dengan pengembangan pesat kuasa pemprosesan komputer mikro, tool untuk rekabentuk dibantu komputer (*Compter Aided Design, CAD*) juga turut berkembang. *MATLAB* merupakan *CAD-tool* yang perlu diketahui oleh semua pelajar Kejuruteraan dan ini diperkenalkan di dalam buku ini. Pengkhususan untuk membantu analisa dalam Kejuruteraan Kawalan diberikan tumpuan. Dalam menentukan hasil kajian sistem kawalan, penganalisaan yang mendalam perlu dilakukan sama ada dalam domain masa atau domain frekuensi untuk menghasilkan rekabentuk sistem kawalan yang berkesan. Bagi membantu pelajar dalam memahami sesuatu konsep, contoh-contoh turut dibincangkan.

Saya ingin merakamkan penghargaan kepada Tan Sri Profesor Datuk Seri Panglima Dr Abu Hassan Othman, Naib Canselor, Universiti Malaysia Sabah di atas dorongan yang telah diberikan. Penyediaan buku ini telah

## SENARAI FOTO

1.1: Kawalan semasa mengayuh basikal	2
1.2: Bebola tangki tandas	3
1.3: Pelancaran roket	3
1.4: Tombol pengawal	4
1.5: Sistem PLC (Programmable Logic Controller)	4
1.6: Suis SPDT (Single Pole Double Throw)	5
1.7: Sistem kawalan pembuatan menggunakan robot	5
1.8: Transduser termokapel	6
1.9: Sistem pemutar rekod	9
1.10: Meter Tako	11
1.11: Sistem kawalan proses	16
1.12: Sistem kawalan proses untuk pengajaran di makmal	17
1.13: Sistem kawalan peluru berpandu	18
1.14: Sistem kawalan servo untuk pengajaran di makmal	18



## PRAKATA

Kejuruteraan Kawalan merupakan subjek wajib bagi pelajar Kejuruteraan Elektrik, Mekanikal dan Kimia. Aplikasi dalam bidang ini boleh dicerapi dalam pelbagai sektor seperti pembuatan, perkilangan, penerbangan, perubatan dan sebagainya. Bidang Kejuruteraan Kawalan amat luas, untuk membincangkan semua aspek berhubungnya adalah sukar dalam satu buku. Bagi peringkat permulaan, pelajar-pelajar perlulah memahami prinsip-prinsip asas yang berhubung dengan pengenalan, pemodelan, analisa dan rekabentuk kepada sistem kawalan. Oleh itu, buku Prinsip Kawalan Kejuruteraan ini ditulis dengan tujuan untuk mendedahkan kepada pelajar-pelajar berhubung perkara ini. Buku ini adalah koleksi nota-nota kuliah yang diajar oleh saya kepada pelajar-pelajar Jabatan Kejuruteraan Elektrik, Universiti Malaya dari 1987 hingga 1998; dan Program Kejuruteraan Elektrik dan Elektronik; dan Program Kejuruteraan Mekanikal di Sekolah Kejuruteraan dan Teknologi Maklumat, Universiti Malaysia Sabah semenjak 1998. Buku ini boleh digunakan sebagai teks utama untuk kursus Kejuruteraan Kawalan pada peringkat Diploma dan Sarjana Muda Kejuruteraan.

Buku ini dibahagikan kepada enam bab yang merangkumi terminologi-terminologi asas bagi Kejuruteraan Kawalan. Prinsip-prinsip permodelan matematik bagi pelbagai sistem kawalan turut dibincangkan. Dengan pengembangan pesat kuasa pemprosesan komputer mikro, tool untuk rekabentuk dibantu komputer (*Compter Aided Design, CAD*) juga turut berkembang. *MATLAB* merupakan *CAD-tool* yang perlu diketahui oleh semua pelajar Kejuruteraan dan ini diperkenalkan di dalam buku ini. Pengkhususan untuk membantu analisa dalam Kejuruteraan Kawalan diberikan tumpuan. Dalam menentukan hasil kajian sistem kawalan, penganalisaan yang mendalam perlu dilakukan sama ada dalam domain masa atau domain frekuensi untuk menghasilkan rekabentuk sistem kawalan yang berkesan. Bagi membantu pelajar dalam memahami sesuatu konsep, contoh-contoh turut dibincangkan.

Saya ingin merakamkan penghargaan kepada Tan Sri Profesor Datuk Seri Panglima Dr Abu Hassan Othman, Naib Canselor, Universiti Malaysia Sabah di atas dorongan yang telah diberikan. Penyediaan buku ini telah

mendapat banyak bantuan daripada beberapa pihak. Saya amat berterima kasih kepada pelajar-pelajar pasca siswazah di bawah seliaan saya yang telah banyak memberi pandangan, semakan dan bantuan dalam menyediakan kerja-kerja simulasi dan mengambil gambar-gambar. Penghargaan kepada Dr G. Sainarayanan, Kenneth Teoh, Farrah Wong dan K. Murali amat dihargai. Begitu juga pada tutor Wan Mahani Abdullah kerana telah membantu saya dalam menyemak kandungan buku. Saya juga mengucapkan terima kasih kepada Profesor R. Nagarajan kerana banyak memberikan galakan dalam usaha-usaha awal saya untuk menyediakan buku ini.

Seterusnya saya ingin mengucapkan terima kasih kepada isteri saya, Nor Zakiah Salleh, dan anak-anak, Noor Faraeha, Mohd Ghauth, Mohd Shafiq, Muhammad Danial, Ahmad Firdaus dan Ahmad Nabil, kerana banyak bersabar dan berkorban semasa penyediaan buku ini.

Sazali Yaacob

Sekolah Kejuruteraan dan Teknologi Maklumat

Universiti Malaysia Sabah

30 Oktober 2003.

# BAB SATU

## PENGENALAN KEPADA SISTEM KAWALAN

### 1.0 OBJEKTIF

*Di dalam bab ini perkara-perkara berikut diberi tumpuan:*

- *Konsep-konsep asas dan teminologi-terminologi yang digunakan oleh jurutera kawalan akan diperkenalkan.*
- *Beberapa contoh sistem kawalan akan diberi.*
- *Untuk tujuan penganalisaan, perwakilan asas sistem kawalan dalam bentuk blok digunakan.*
- *Perbandingan pelbagai sistem kawalan dibincangkan.*

### 1.1 PENGENALAN

Perkataan kawalan sering digunakan oleh masyarakat harian bagi pelbagai tujuan atau objektif. Dengan adanya satu sistem kawalan, keupayaan dan keberkesanan sesuatu tujuan dapat dicapai. Secara mudah, untuk melakukan suatu kawalan kita perlu mempunyai tindakan dan objek. Tindakan ini pula mestilah memenuhi garis-garis panduan atau objektif yang ditetapkan.

Objektif ini boleh terdiri daripada pelbagai bentuk seperti bagi menghadkan sesuatu aktiviti harian. Kawalan harga barang, misalnya, digunakan untuk memastikan keselesaan pengguna. Di sini objektif kita adalah untuk mengawal harga barang. Untuk memastikan harga barang tidak naik, undang-undang pengguna diwartakan. Bagi pelaksanaan undang-undang ini pula, penguatkuasa daripada Kementerian Pengguna akan menjalankan rondaan dan semakan di premis-premis perniagaan. Kita sering mendengar mengenai Hari-Q. Q bermakna kualiti atau mutu. Untuk memastikan mutu sesuatu produk dalam bentuk pengurusan atau bahan pembuatan, kumpulan kawalan mutu diwujudkan. Kumpulan kawalan mutu ini mempunyai objektif yang perlu dilaksanakan terhadap organisasi atau kilang pembuatannya. Kawalan kesihatan pula dilakukan untuk mengelak