

## DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL .....	i
KATA PENGANTAR .....	ii
DAFTAR ISI .....	iii
BAB I. PENGANTAR SISTEM KENDALI	
1. Pendahuluan .....	1
2. Kendali Loop Tertutup Dan Loop Terbuka .....	2
3. Sistem Kendali Automatik .....	6
4. Sistem Servomekanik .....	8
5. Beberapa Contoh Ilustrasi Sistem Kendali .....	10
6. beberapa Istilah Dalam Sistem Kendali .....	18
BAB II. RAGAM PENGUAT DALAM SISTEM KENDALI	
1. Penguat Operasi .....	22
2. Penguat Thyristor (SCR) .....	27
3. Penguat Magnetik .....	34
4. Penguat Putaran .....	41
5. Amplidyne dan Metadyne .....	41
BAB III. MODEL MATEMATIK SISTEM FISIK	
1. Deskripsi Karakteristik Sistem Fisik .....	46
2. Persamaan Diferensial Sistem Fisik .....	48
3. Fungsi Alih .....	63
4. Aljabar Diagram Blok .....	78
5. Grafik Aliran Sinyal .....	85
BAB IV. KARAKTERISTIK UMPAN BALIK DAN ELEMEN KENDALINYA	
1. Sistem Umpan-Balik dan Tanpa Umpan-Balik .....	98
2. Reduksi Variasi Parameter Memakai Umpan-Balik .....	99
3. Pemakaian Umpan-Balik Pengendalian Sistem Dinamik .....	102

	4.	Pengendalian Sinyal Gangguan Memakai Umpan-balik .....	104
	5.	Umpan-Balik Regeneratif .....	101
<b>BAB</b>	<b>V</b>	<b>ANALISIS RESPON WAKTU (TRANSIENT)</b>	
	1.	Pengantar .....	115
	2.	Sinyal-sinyal Uji Standar .....	116
	3.	Respon Waktu Sistem Orde Pertama .....	119
	4.	Respon Waktu Sistem Orde Kedua .....	121
	5.	Kesalahan Kondisi Tunak dan Konstanta Kesalahannya .....	133
	6.	Tipe-tipe sistem kendali berumpan balik .....	135
	7.	Spesifikasi Rancangan Sistem Orde Kedua .....	138
	8.	Kompensasi Derivatif Kesalahan .....	139
	9.	Kompensasi Derivatif Keluaran .....	141
	10.	Kompensasi Integral Kesalahan .....	143
	11.	Contoh-contoh Ilustratif .....	145
<b>BAB</b>	<b>VI.</b>	<b>PENGENDALI POSISI SISTEM SERVO</b>	
	1.	Sinkro Sebagai Detektor Kesalahan Posisi Poros .....	153
	2.	Motor Servo Berukuran Kecil dan Motor Penggerak Lainnya ..	154
	3.	Sistem Servo Torsi Terkendali Sederhana .....	156
	4.	Roda gerigi pemindah mekanik (Gearing) .....	159
	5.	Redaman Umpan Balik Kecepatan .....	161
	6.	Mendeteksi Kesalahan Dengan Sinkro .....	161
	7.	Penundaan Kecepatan (Velocity Lag) .....	164
	8.	Efek Torsi Beban Pada Sistem Servo Sederhana .....	167
	9.	Pengendali Kecepatan Sederhana Model “Velodyne“ .....	167
<b>BAB</b>	<b>VII.</b>	<b>KONSEP KESTABILAN DAN KRITERIANYA</b>	
	1.	Konsep Kestabilan .....	172
	2.	Kriteria Stabilitas Hurwitz .....	177
	3.	Kriteria Kestabilan Routh .....	178
	4.	Kasus Khusus .....	181
	5.	Aplikasi Kriteria Kestabilan Routh Pada Sistem Linear Berumpan-Balik .....	184

6. Analisis Kestabilan Relatif .....	185
DAFTAR PUSTAKA .....	189

# BAB I

## PENGANTAR SISTEM KENDALI

### 1. Pendahuluan

Seiring dengan perkembangan ilmu dan teknologi dewasa ini sistem kendali manual maupun otomatis memiliki peran yang sangat penting. Peranan sistem kendali otomatis adalah paling menonjol dalam berbagai keperluan hajat manusia atau bangsa yang telah maju peradabannya. Contoh konkrit dapat kita temui pada pengendalian pesawat ruang angkasa, peluru kendali, sistem pengemudi pesawat, satelit, dan sebagainya. Sementara di industri diperlukan untuk pengendalian mesin-mesin produksi bidang manufaktur dan pengendalian proses seperti tekanan, temperatur, aliran, gesekan, kelembaban, dan sebagainya.

Kemajuan sistem kendali automatic dalam bentuk teori maupun praktik akan memberikan kemudahan dalam mendapatkan unjuk kerja sistem dinamik, mempertinggi kualitas, menurunkan biaya produksi dan penghematan energi. Tingkat kemajuan ini dicapai tidak secara tiba-tiba, melainkan melalui sejarah perkembangan yang cukup panjang. Tepatnya adalah sejak ditemukannya governor sentrifugal sebagai pengendalian kecepatan mesin uap yang dibuat oleh James Watt pada abad ke-18. Pada tahun 1922, Minorsky membuat alat kendali otomatis untuk pengemudian kapal dan menunjukkan cara menentukan kestabilan dari persamaan diferensial yang melukiskan sistem. Pada tahun 1932, Nyquist mengembangkan suatu prosedur yang relative sederhana untuk menentukan kestabilan loop tertutup. Pada tahun 1934, Hazen memperkenalkan servomekanik untuk sistem kendali posisi. Pada tahun 1940 hingga 1950 kendali linier berumpan balik dan metode tempat kedudukan akar dalam desain sistem kendali.

Metode respon frekuensi dan tempat kedudukan akar yang merupakan inti teori sistem kendali klasik, akan mendasari pembahasan sistem yang stabil yang memenuhi persyaratan unjuk kerja untuk sembarang sistem pengendalian. Sejak akhir tahun 1950, penekanan desain sistem kendali telah beralih kesalah satu dari beberapa sistem yang bekerja menjadi desain satu sistem optimal. Teori klasik



yang membahas sistem satu masukan satu keluaran, semenjak tahun 1960 sudah tidak dapat digunakan untuk sistem multi masukan dan multi keluaran. Dengan kata lain bahwa sistem kendali multi masukan-multi keluaran menjadi semakin kompleks, sehingga pemecahannya memerlukan banyak persamaan. Lebih jauh dari itu, logis bila memerlukan peralatan Bantu yang memadai seperti penggunaan komputer analog maupun digital secara langsung. Semenjak itu pulalah sistem kendali modern dikembangkan guna mengatasi kompleksitas yang dijumpai pada berbagai sistem pengendalian yang menuntut ketelitian tinggi dan cepat dengan hasil akhir (output) optimal. Oleh sebab itu wajar bila suatu industri besar dan modern sangat memerlukan tenaga ahli dalam perencanaan sistem kendali dan teknisi profesional sebagai operator dari berbagai disiplin ilmu yang saling terkait.

Materi sistem kendali yang akan disajikan disini penekanannya pada teori klasik, yaitu sistem satu masukan-satu keluaran berumpan-balik maupun tanpa umpan-balik. Namun demikian sistem kendali multi masukan-multi keluaran yang melibatkan peralatan mikroprosesor/mikrokomputer pun akan disajikan pula dengan porsi yang relative sedikit. Dengan demikian materi sistem kendali yang disajikan di sini sebagian besar berfokus pada sistem loop tertutup (closed-loop system).

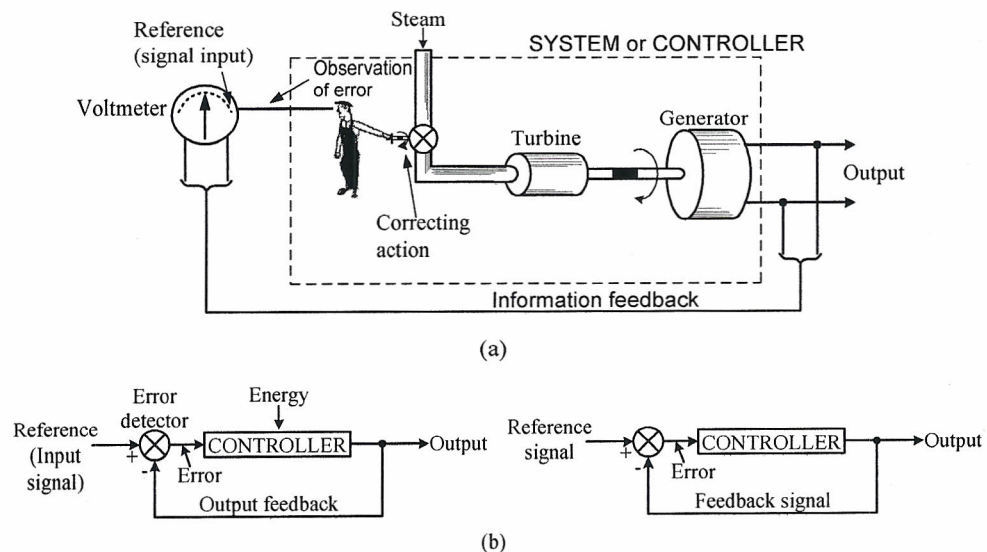
## **2. Kendali Loop Tertutup Dan Loop Terbuka**

### **a. Sistem Kendali Loop Tertutup.**

Sistem kendali loop tertutup (closed-loop control system) adalah sitem kendali yang sinyal keluarannya mempunyai pengaruh langsung terhadap aksi pengendaliannya. Dengan kata lain sistem kendali loop tertutup adalah sistem kendali berumpan-balik. Sinyal kesalahan penggerak, yang merupakan selisih antara sinyal masukan dan sinyal umpan-balik (yang dapat berupa sinyal keluaran atau suatu fungsi sinyal keluaran dan turunannya), diumpankan ke elemen kendali untuk memperkecil kesalahan dan membuat agar keluaran sistem mendekati harga yang diinginkan. Hal ini berarti bahwa pemakaian aksi umpan-balik pada loop tertutup bertujuan untuk memperkecil kesalahan sistem.

Diagram yang menyatakan hubungan antara masukan dan keluaran dari suatu sistem loop tertutup ditunjukkan pada Gambar I. 1a. Sementara untuk memahami konsep sistem kendali loop tertutup, perhatikan sistem pengaturan tegangan keluaran generator dc dengan penggerak mula turbin uap sebagaimana ditunjukkan pada Gambar I. 1b.

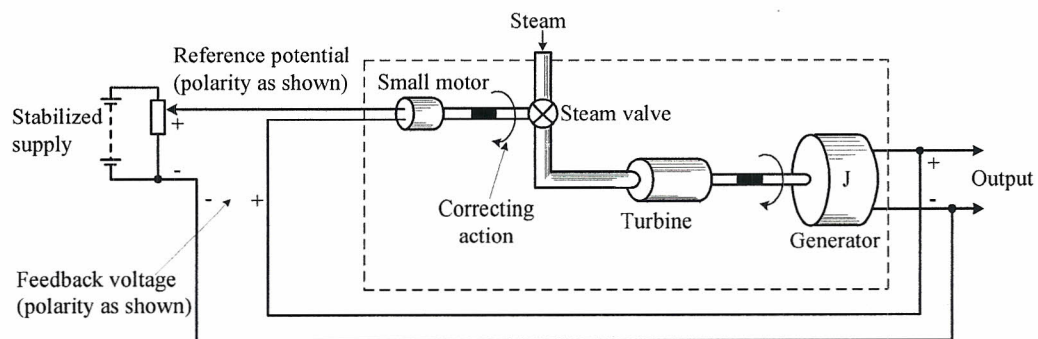
Melalui observasi mata terhadap voltmeter yang terpasang pada terminal keluaran generator, operator dengan cepat mengetahui penyimpangan (kesalahan) jarum penunjuk tegangan dari tegangan kerja yang diharapkan dan secepat itu pulalah ia harus segera bertindak untuk mengatasi pada kedudukan normalnya. Walaupun operator harus berusaha membuat penyimpangan atau kesalahan jarum penunjuk voltmeter sekecil mungkin bahkan nol, dengan memutar handle katup pengatur catu uap ke kanan atau ke kiri tergantung arah simpangan jarum penunjuk yang sesekali lebih besar atau lebih kecil dari tegangan yang ditetapkan. Mengingat balikan keluaran (tegangan generator dc) selalu dibandingkan dengan masukan acuan dan aksi pengendalian terjadi melalui aksi operator, maka sistem ini disebut sistem kendali manual berumpan-balik (manual feedback control system) atau sistem kendali manual loop tertutup (manual closed-loop control system).



**Gambar I. 1. Sistem kendali berumpan-balik dari sebuah PLTU (a) dan diagram blok sistem loop tertutup (b)**

Seandainya elemen kendali otomatis digunakan untuk menggantikan operator manusia seperti ditunjukkan pada Gambar I. 2, sistem kendali tersebut menjadi otomatis, yang biasa disebut sistem kendali otomatis berumpan-balik atau sistem kendali otomatis loop tertutup. Posisi katup pengatur laju aliran uap (elemen kendali) otomatis akan mengatur tekanan aliran uap guna memperoleh putaran turbin dan poros generator sehingga didapat tegangan keluaran yang diharapkan. Tegangan keluaran generator yang sebenarnya diukur dengan menggunakan voltmeter untuk dibandingkan dengan tegangan yang telah ditetapkan (sinyal referensi) sehingga dihasilkan sinyal kesalahan penggerak. Sinyal kesalahan yang dihasilkan elemen kendali otomatis diperkuat, dan keluaran elemen kendali dikirim ke motor kecil mengubah posisi katup aliran uap pengatur putaran turbin dan poros generator untuk mengoreksi tegangan keluaran yang sebenarnya. Jika tidak terdapat penyimpangan atau kesalahan tegangan, maka tidak terjadi perubahan posisi katup pengatur aliran uap.

Sistem kendali manual berumpan-balik dan sistem kendali otomatis berumpan-balik tersebut di atas memiliki prinsip kerja yang sama. Garis pandang mata operator analog dengan detektor kesalahan, otaknya analog dengan elemen kendali otomatis dan tangannya analog dengan aktuator.



**Gambar I. 2. Pengatur tegangan sederhana**

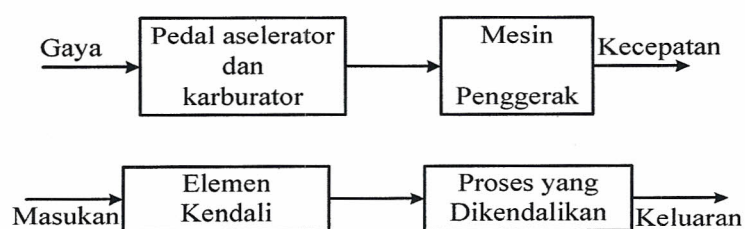
Pengendalian suatu sistem yang kompleks dengan operator manusia sungguh tidak efektif, karena terdapat beberapa timbal-balik antara beberapa variable. Kita ketahui bahwa, dalam sistem yang sederhanapun sistem kendali



otomatis dapat menghilangkan setiap kesalahan operasi yang disebabkan oleh manusia. Dengan kata lain bila memerlukan pengendalian presisi tinggi, pengendalian sistem harus otomatis. Beberapa contoh antara lain semua sistem servomekanisme, sistem pengendali proses, pemanas air otomatis, almari es, sistem pemanas ruangan otomatis dengan termostatik, dan sebagainya.

#### b. Sistem Kendali Loop Terbuka.

Sistem kendali loop terbuka (open-loop control system) adalah sistem kendali yang sinyal keluarannya tidak berpengaruh terhadap aksi pengendaliannya. Dalam hal ini sinyal keluaran tidak diukur atau diumpan-balikan untuk dibandingkan dengan sinyal masukannya. Gambar I. 3. menunjukkan hubungan masukan-keluaran suatu sistem kendali loop terbuka. Sebuah contoh praktis adalah mesin cuci (washing machine). Sejak perendaman, pencucian dan pembilasan pada mesin cuci ini tidak mengukur sinyal keluaran, misalnya kebersihan pakaian yang dicuci. Contoh lain yaitu pengendalian atau pengaturan lampu lalu-lintas yang operasinya juga berdasarkan basis waktu. Pada sistem ini tidak memperhitungkan perubahan arus lalu-lintas yang terjadi pada setiap persimpangan jalan. Tepatnya adalah kendaraan yang dapat lewat saat lampu hijau menyala tidak harus sama dengan banyaknya kendaraan yang masuk atau antri pada ruas jalan yang bersangkutan, karena dibatasi oleh waktu nyala lampu yang sudah ditetapkan.



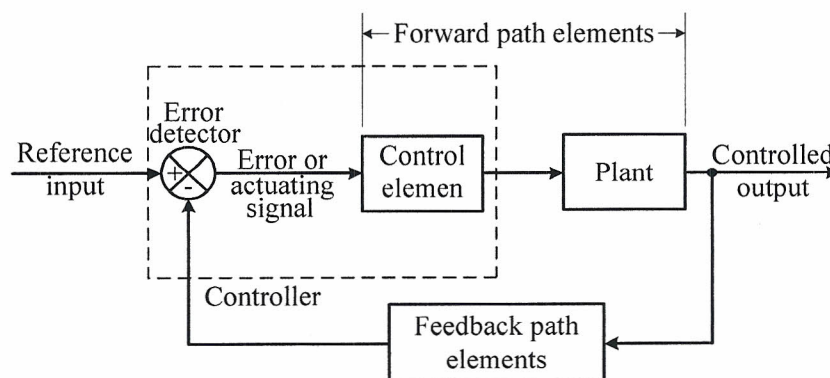
**Gambar I. 3. Diagram blok sistem kendali loop terbuka.**

Jadi pada sistem kendali loop terbuka, keluaran tidak dibandingkan dengan masukan acuannya. Oleh sebab itu, untuk setiap masukan acuan terdapat suatu kondisi operasi yang tetap. Perlu diketahui bahwa sistem kendali loop terbuka harus dikalibrasi dengan hati-hati, agar ketelitian sistem tetap terjaga dan

berfungsi dengan baik. Dengan adanya gangguan (disturbances), sistem kendali loop terbuka tidak dapat bekerja seperti yang diharapkan. Kendali loop terbuka dapat digunakan dalam praktek hanya jika hubungan masukan dan keluaran diketahui dan jika tidak terdapat gangguan internal maupun gangguan eksternal. Dengan demikian jelas bahwa sistem semacam ini bukan sistem kendali berumpan-balik. Demikian pula bahwa setiap sistem kendali yang bekerja berdasar basis waktu adalah sistem loop terbuka.

### 3. Sistem Kendali Automatik

Diagram blok umum dari sistem kendali otomatis ditunjukkan pada Gambar I.4. Detektor kesalahan akan membandingkan sinyal yang diperoleh melalui elemen umpan-balik sebagai fungsi dari respons keluaran dengan sinyal referensi masukannya. Perbedaan antara sinyal referensi masukan dan sinyal keluaran ini disebut sinyal kesalahan atau sinyal penggerak, yang akan mengaktifkan elemen kendali. Selanjutnya elemen kendali ini akan memperkuat sinyal kesalahan guna mengurangi kesalahan yang terjadi untuk kembali ke kondisi sistem seperti semula (kondisi normal).



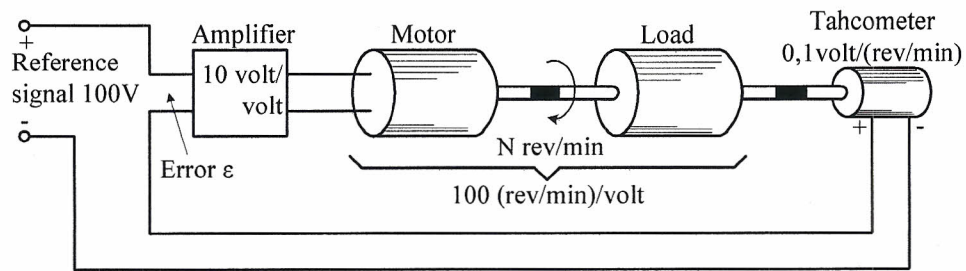
**Gambar I. 4. Diagram blok umum sistem kendali Automatik.**

Untuk lebih memudahkan pemahaman mengenai interaksi yang terjadi pada sistem kendali otomatis ini ada baiknya kita bahas sebuah contoh pengendalian kecepatan motor dc sederhana seperti ditunjukkan pada Gambar I.5.

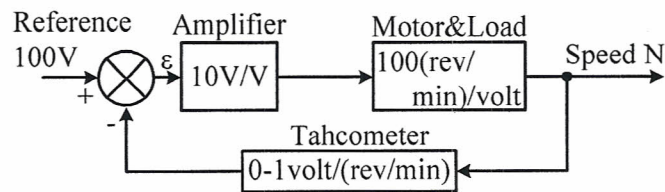
Motor dc dan beban adalah proses yang dikendalikan, dalam hal ini kecepatan putar poros (N). Kecepatan putar poros ini diraba/dideteksi oleh



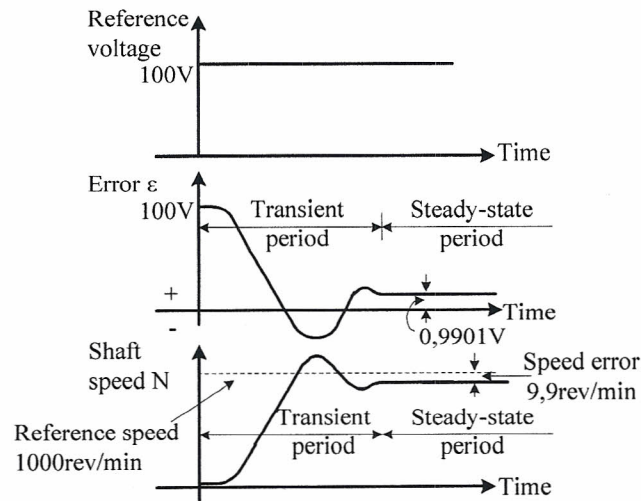
tachogenerator yang terpasang seporos dengan motor dan bebannya. Tegangan yang dikeluarkan merupakan tegangan umpan-balik ( $V_f = k_T N$ ), guna dibandingkan dengan tegangan referensi masukan ( $V_r$ ). Perbedaan dari kedua besaran inilah yang disebut tegangan kesalahan ( $\varepsilon = V_r - V_f$ ), yang selanjutnya siap untuk dikuatkan oleh elemen kendalinya guna mereduksi kesalahan yang terjadi pada proses yang dikendalikan (keluaran).



(a)



(b)



(c)

**Gambar I.5.** Sistem kendali loop tertutup sederhana (a), Diagram blok (b), dan respons sistem (c).

Dimisalkan kecepatan putaran tetapnya ( $N$ ) = ~~1000~~ rpm dan tegangan referensi masukan ( $V_r$ ) = 100 volt. Seandainya konstanta tachogenerator  $k_T = 0,1$  volt/rpm, maka tegangan kesalahan  $\varepsilon = V_r - V_f = V_r - k_T N$ , atau  $\varepsilon = 100 \text{ V} - 10 \text{ V} = 90 \text{ V}$ . Apabila beban berkurang kecepatan putar poros bertambah, demikian pula  $V_f$  akan naik, sedang  $\varepsilon$  akan berkurang akibatnya  $I_f$  turun. Akhirnya kecepatan putaran normal kembali.

**Contoh:**

Dari Gambar I. 5. a, dimisalkan tegangan referensi masukan = 100 V, konstanta tachogenerator = 0,1 V/rpm, elemen penguat = 10 V/V, dan kecepatan putaran motor = 100 rpm/V. Hitunglah tegangan kesalahan dan yang sebenarnya serta gambarlah respons sistem tersebut.

Penyelesaiannya: Untuk memudahkan analisis perhatikan Gambar I. 5. b.

$$\varepsilon = V_r - V_f = 100 - (0,1N) \text{ Volt}$$

$$V_{o.Amp} = k_A \times \varepsilon = 10 \text{ V}$$

$$N = V_{o.Amp} \times k_N = 10 \text{ V} \times 100 \text{ rpm/V}$$

$$= 1000 \varepsilon \text{ rpm}$$

Jadi tegangan kesalahannya :

$$\varepsilon = 100 - 0,1 \times 1000 \varepsilon = 100 - 100 \varepsilon$$

$$101 \varepsilon = 100 \text{ atau } \varepsilon = 0,9901 \text{ V}$$

Kecepatan putaran motor yang sebenarnya :

$$N = 1000 \varepsilon = 1000 \times 0,9901$$

$$= 990,1 \text{ rpm}$$

Adapun respons sistem tersebut seperti pada Gambar. I. 5. c.

#### 4. Sistem Servomekanik

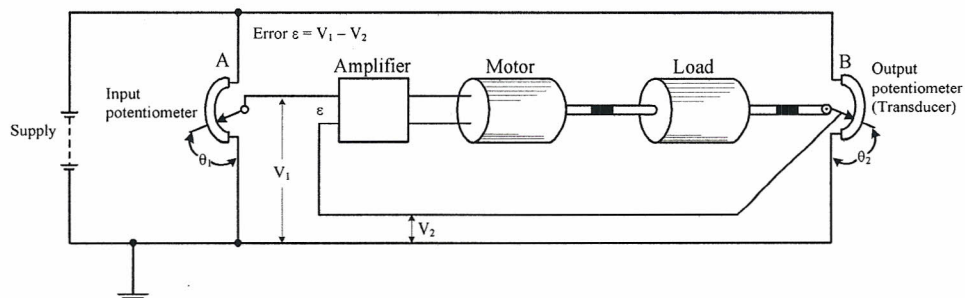
Pengendalian sistem servomekanik (modular servo system), pada dasarnya masih merupakan konsep sistem kendali berumpan-balik, dimana variabel yang dikendalikan mekanisme posisi atau derivatif waktu dari posisi seperti kecepatan dan percepatan.

Pengendalian sistem servo berupa posisi poros motor dan beban umumnya direduksi melalui gerigi mekanik seperti ditunjukkan pada Gambar I. 6. Posisi

poros keluaran yang dikendalikan ( $\theta_o$ ) dan posisi poros referensi masukan ( $\theta_i$ ) diukur dan dibandingkan menggunakan sepasang potensiometer. Tegangan kesalahan yang terjadi selalu sebanding dengan kesalahan posisi sudut putarnya  $\theta_e = \theta_i - \theta_o$ . Tegangan kesalahan ( $V_e = K_p \theta_e$ ) dikuatkan guna mengendalikan arus medan ( $I_f$ ) generator dc yang disiapkan untuk mencatu tegangan motor penggeraknya.

Untuk memahami operasi dari sistem tersebut katakanlah  $K_p = 100$  V/rad, posisi poros keluarannya = 0,5 rad. Dari kondisi seperti ini “Slider” potensiometer keluaran (B) bertegangan +50 V, sementara “Slider” potensiometer masukan (A) kebetulan diset pada +50 V juga. Ini berarti tidak ada sinyal penggerak ( $V_e = 0$ ). Oleh karena itu torsi keluaran motor akan nol dan beban tetap diam pada posisi 0,5 rad.

Sekarang, katakanlah posisi beban baru dikehendaki pada 0,6 rad. Dalam hal ini potensiometer keluaran (B) sesaat itu pula tetap pada posisinya semula, yaitu +50 V. Dari kondisi baru ini terjadi kesalahan tegangan sebesar +10 V, yang selanjutnya tegangan kesalahan tersebut siap dikuatkan oleh amplifier guna mencatu motor servo yang membangkitkan torsi keluaran untuk mengembalikan beban ke posisinya semula. Torsi-meter hanya akan berubah bila sinyal penggerak berubah menjadi nol, yaitu bila lengan potensiometer B dan beban berubah posisi dengan kedudukan 0,6 rad atau posisi +60 Volt.



**Gambar I. 6. Pengendalian posisi sistem servo sederhana.**

Aplikasi pengendalian posisi sistem servo sebagaimana dijelaskan di atas banyak dijumpai di sembarang industri. Sasaran aplikasi tersebut antara lain pada pengendalian posisi mesin perkakas, tekanan/tarikan konstan penggulung plat

baja, pengendalian ketebalan lembaran metal, sistem gerakan radar, sistem peluncur peluru kendali, pengatur arah laju kapal api, dan lain sebagainya.

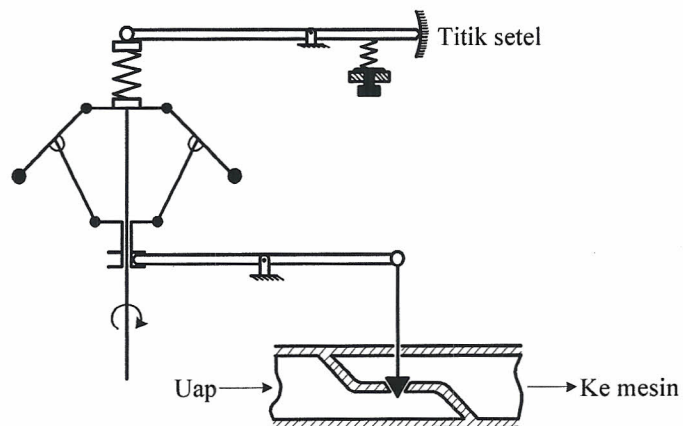
## 5. Beberapa Contoh Ilustrasi Sistem Kendali

### a. Sistem kendali kecepatan gerak mesin

Prinsip dasar dari Governor James Watt untuk mesin uap dilukiskan dengan diagram skematik pada Gambar I. 7. Besarnya laju aliran uap yang masuk ke silinder mesin diatur sesuai dengan selisih antara kecepatan mesin yang diinginkan dan kecepatan mesin yang sebenarnya.

Urutan langkah dari aksi pengendalian dapat dinyatakan sebagai berikut: Masukan acuan (titik setel) diset sesuai dengan kecepatan yang diinginkan. Jika kecepatan yang terjadi turun di bawah harga yang diinginkan, maka gaya sentrifugal dari governor kecepatan mengecil, menyebabkan katup pengontrol bergerak ke atas, mencatu uap yang lebih banyak sehingga kecepatan mesin membesar sampai dicapai harga yang diinginkan.

Sebaliknya, jika kecepatan mesin melebihi harga yang diinginkan, maka gaya sentrifugal dari governor kecepatan membesar, menyebabkan katup pengontrol bergerak ke bawah. Hal ini akan memperkecil catu uap sehingga kecepatan mesin mengecil sampai mencapai harga yang diinginkan.

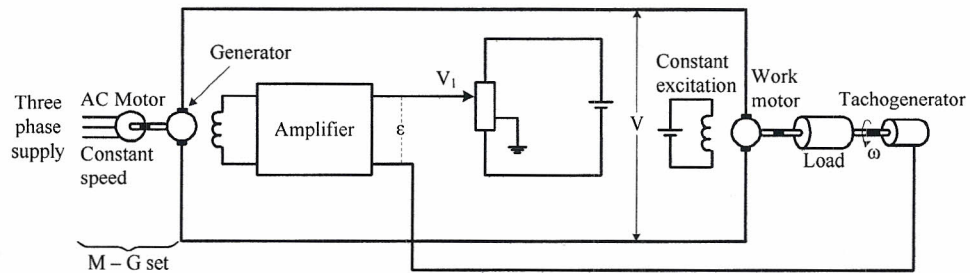


Gambar I. 7. Sistem kendali kecepatan gerak mesin



**b. Sistem kendali kecepatan metode Ward-Leonard.**

Sistem ini terdiri dari motor 3 fase berkecepatan konstan yang berfungsi sebagai penggerak mula sebuah generator dc (motor-generator set) guna mencatu daya motor pengatur kecepatan (work motor). Susunan sistem tersebut dalam bentuk loop tertutup ditunjukkan pada Gambar I. 8. berikut ini.



**Gambar I. 8. Sistem kendali kecepatan loop-tertutup Ward-Leonard**

Motor induksi 3 fase memutar generator dengan kecepatan konstan, sehingga tegangan armatur generator  $V$  akan sebanding dengan fluksi medannya dimana  $V = 0$  atau  $\Phi = \text{tak terhingga}$ , dengan kata lain tegangan naik fluksinya turun. Putaran fluksi yang terjadi sangat tergantung pada tegangan kesalahan pada terminal masukan amplifier. Untuk pendekatan yang pertama kita abaikan dulu efek beban dan efek jenuh, sehingga tegangan armatur generator:

$$V \sim \epsilon \dots\dots\dots (I-1)$$

Mengingat eksitasi dari motor yang dikendalikan konstan, maka fluksinya juga konstan, dalam hal ini:

$$\omega \sim V \dots\dots\dots (I-2)$$

Kombinasi kedua persamaan di atas akan menunjukkan bahwa

$$\omega \sim \epsilon \dots\dots\dots (I-3)$$

Untuk membalik arah putaran poros motor yang dikendalikan cukup dengan menukar polaritas tegangan referensi kecepatan  $V_1$ . Penukaran polaritas tegangan dan arus yang dibangkitkan akan menyebabkan terjadinya pembalikan torsi motor yang dikendalikan (work motor).

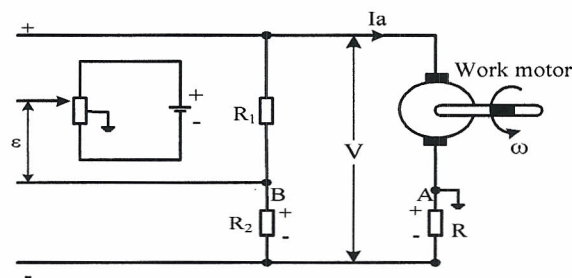
Dari Gambar I. 8, kecepatan putaran poros diukur dengan tachogenerator, sementara dari persamaan (I-2), tegangan armature dapat digunakan sebagai sinyal kecepatan asalkan arus bebannya kecil. Untuk arus beban yang besar, akan



berakibat tegangan drop  $I_a R_a$  (persamaan I-2) menjadi tidak akurat. Guna mendapatkan pengendalian kecepatan yang akurat, tegangan umpan-balik harus proporsional dengan ggl lawan motor  $E = (V - I_a R_a)$ . Cara mengatasi tegangan drop pada armature ialah melalui rangkaian kompensator sebagaimana ditunjukkan pada Gambar I. 9.

Beda potensial pada R adalah  $I_a R$ , dan tegangan di titik  $B = \frac{R_2 V}{R_1 + R_2} - I_a R$ , yang

memiliki kesamaan bentuk dengan persamaan untuk menghitung besarnya ggl lawan motor. Dengan memilih harga komponen yang tepat, tegangan antara A dan B akan proporsional dengan ggl lawan tadi. Di dalam prakteknya tahanan R ini tidak selalu digunakan sebagai pembeda potensial antar kutub motor yang dikendalikan.



**Gambar I. 9. Rangkaian kompensator drop tegangan armatur**

Motor yang dikendalikan dapat dihubungkan langsung seporos dengan bebannya seperti tampak pada gambar I. 8. Namun dapat pula dipasang gerigi reduksi putaran (gearbox) bila dikehendaki putaran cepat diubah ke putaran lambat, terutama untuk sistem kendali motor kecepatan tinggi dengan momen inersia rendah. Jika dikehendaki range kecepatan yang lebih lebar, prinsip dasar tadi dapat dimodifikasi dengan cara memperlemah fluksi medan motor yang dikendalikan guna mendapatkan kecepatan yang lebih tinggi.

Melihat susunan atau konstruksi sistem kendali kecepatan metode Ward-Leonard ini pada dasarnya tidak dapat dipisahkan dari prinsip pengereman terulang. Apabila sinyal referensi dikurangi tegangan generator akan turun, tetapi kecepatan motor (dan ggl lawan) untuk waktu yang pendek di dalam beban masih tersimpan energi. Untuk sesaat ggl lawan motor relative lebih tinggi dari

tegangan generator, sedang arah arus pada kedua armatur mesin dc membalik dan menyebabkan motor yang dikendalikan berubah menjadi generator yang diputar oleh energi yang tersimpan di beban. Generator dc tersebut kini beroperasi sebagai motor, memutar motor ac yang beroperasi sebagai generator dan mengembalikan daya ke sumber catu daya utama. Dengan adanya pengereman balik ini akan menghasilkan putaran motor yang tidak halus: (tersendat-sendat). Berikut ini contoh ilustrasi operasi dari pengendalian kecepatan metode Ward-Leonard.

**Contoh:**

Sistem kendali kecepatan metode Ward-Leonard sebagaimana ditunjukkan pada gambar I. 8. di muka, mempunyai konstanta-konstanta sebagai berikut:

- ❖ Generator: tahanan rangkaian medan termasuk tahanan keluaran amplifier =  $200 \Omega$ , tegangan yang dibangkitkan setiap ampere-medan = 1500 V.
- ❖ Motor yang dikendalikan: ggl lawan yang dibangkitkan setiap radian perdetik dari kecepatan putar poros = 1,5 V, torsi yang dikembangkan setiap ampere-armatur = 1,5 N-m.
- ❖ Amplifier: impedansi masukan tak terhingga, penguatan tegangan (loop terbuka) = 40 V/V.
- ❖ Tachogenerator : ggl yang dibangkitkan setiap radian perdetik kecepatan putar poros = 0,25 V.
- ❖ Tahanan total rangkaian armatur  $5 \Omega$ .
- ❖ Beban : factor gesek yang terjadi untuk sementara diabaikan.

Turunkan persamaan yang merelasikan kecepatan tunak ( steady state) motor  $\omega$  dengan tegangan referensi  $V_1$  dan torsi beban  $T$ . Dengan memakai persamaan tersebut:

- (a) Tentukan kecepatan tunak (steady state) tanpa beban jika  $V_1 = 50$  V.
- (b) Berapakah kecepatan (dan %-age penurunan kecepatannya) jika torsi beban terpasang 100 N-m dengan  $V_1 = 50$  V?
- (c) Berapakah kecepatan pada (a) dan (b) jika penguat amplifier turun menjadi 35?

**Penyelesaian:** Tegangan keluaran tachogenerator  $V_t = \omega/4$  Volt, sehingga tegangan

kesalahan tunak yang dumpkan ke masukkan amplifier  $\varepsilon = V_1 - \omega/4$  V.

Tegangan keluaran amplifier  $V_o = 40 (V_1 - \omega/4)$  V

Arus medan generator tunaknya  $I_f = \frac{40}{200} (V_1 - \omega/4)$  A

Tegangan armatur generator  $V_a = \frac{1500 \times 40}{200} (V_1 - \omega/4)$   
 $= 300 (V_1 - \omega/4)$  V ..... (I-4)

Arus armatur  $I_a = \frac{\text{Tegangan generator} - \text{ggl lawan motor}}{\text{Tahanan rangkaian armature}}$   
 $= \frac{300(V_1 - \omega/4) - 1,5\omega}{5}$  A

Torsi motor yang dikendalikan  $T = 1,5 I_a$

$= \frac{1,5}{5} [300(V_1 - \omega/4) - 1,5\omega]$  N-m ..... (I-5)

Jadi persamaan yang harus diturunkan didapat:

$$\frac{5T}{1,5} = 300V_1 - \omega(1,5 + 7,5)$$

Atau

$$\omega = 3,92 V_1 - 0,0436 T \text{ rad/detik}$$

(a) Untuk  $V_1 = 50$  V dan  $T = 0$

$$\omega = 3,92 \times 50 - 0 = 196 \text{ rad/detik}$$

(b) Untuk  $V_1 = 50$  V dan  $T = 100$  N-m

$$\omega = 196 - (0,0436 \times 100) = 192 \text{ rad/detik}$$

$$\% \text{-age penurunan kecepatan} = \frac{196 - 192}{196} = 0,0205$$

atau 2,05 %.

(c) Dengan diturunkannya penguatan menjadi 35, berdasarkan persamaan (I-4), diperoleh:

$$\text{Tegangan armatur generator } V_a = \frac{1500 \times 35}{200} \left( V_1 - \frac{\omega}{4} \right)$$

$$= 262,5 (V_1 - \omega / 4)$$

Substitusikan ke persamaan (I-5) didapat.

$$T = \frac{1,5}{5} \left[ 262,5 \left( V_1 - \frac{\omega}{4} \right) - 1,5 \omega \right]$$

$$\omega = 3,915 V_1 - 0,0497 T \text{ rad/detik}$$

Jadi untuk  $V_1 = 50 \text{ V}$  dan  $T = 0$

$$\omega = 3.915 \times 50 = 195,75 \text{ rad/detik}$$

Dari angka tersebut, kecepatan tunak tanpa beban nyaris tidak berubah setelah penguatan diturunkan 12,5 %

Untuk  $V_1 = 50 \text{ V}$  dan  $T = 100 \text{ N-m}$ , adalah:

$$\omega = 195,75 - (0,0497 \times 100) = 190,78 \text{ rad/detik}$$

$$\% \text{-age penurunan kecepatan} = \frac{195,75 - 190,78}{195,75} = 0,02 \text{ atau } 2\%.$$

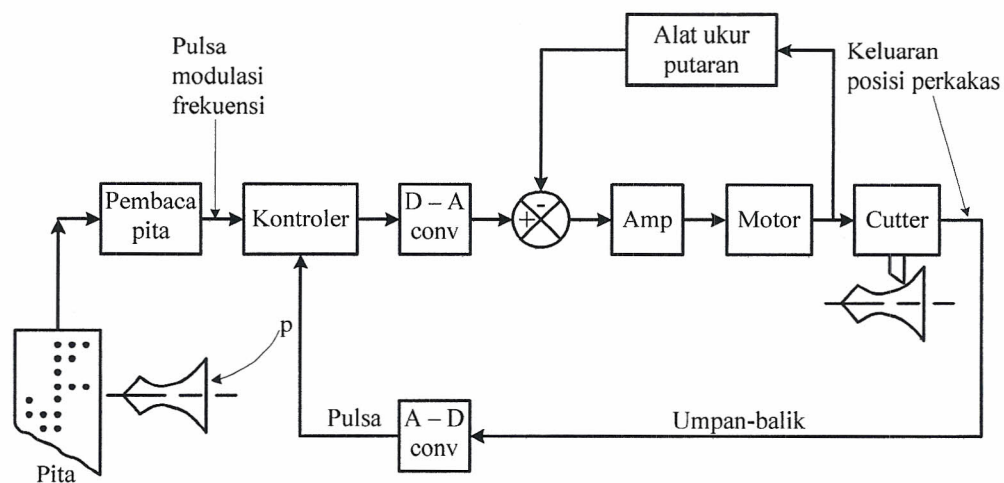
### c. Sistem Kendali Numerik

Sistem kendali numerik adalah suatu metode pengendalian gerak dari komponen mesin dengan menggunakan angka-angka. Pada kendali numerik, gerak benda kerja dapat dikendalikan dengan informasi biner yang tersimpan pada sebuah pita. Pada sistem kendali semacam itu, harga-harga numerik simbolik diubah ke dalam besaran fisik oleh sinyal listrik yang diterjemahkan ke dalam pergerakan linear atau sirkuler. Sinyal tersebut dapat berupa sinyal digital (pulsa) atau analog (tegangan yang berubah terhadap waktu).

Prinsip kerja dari sistem yang ditunjukkan pada Gambar I. 10. adalah sebagai berikut: sebuah pita disiapkan dalam bentuk biner yang menyatakan bagian "P" yang diinginkan. Untuk menjalankan sistem, pita diumpankan ke pembaca pita (sensor). Dibandingkan dengan sinyal pulsa umpan-balik. D/A konverter mengubah pulsa-pulsa tersebut menjadi sinyal analog (tegangan tertentu) kemudian memutar motor servo. Posisi pemotong (pahat) dikendalikan sesuai dengan masukan motor servo. Transduser yang dipasang pada pemotong mengubah gerakannya menjadi sinyal listrik yang selanjutnya diubah menjadi pulsa-pulsa oleh A/D konverter. Sinyal ini kemudian dibandingkan dengan sinyal



pulsa masukan. Kontroler melakukan operasi matematik untuk menghitung selisih antara sinyal-sinyal pulsa tersebut. Kelebihan dari sistem tersebut adalah dapat diproduksinya bagian-bagian mesin yang kompleks dengan toleransi yang merata pada kecepatan pengerjaan maksimum.



**Gambar I. 10. Sistem kendali numerik pada sebuah mesin.**

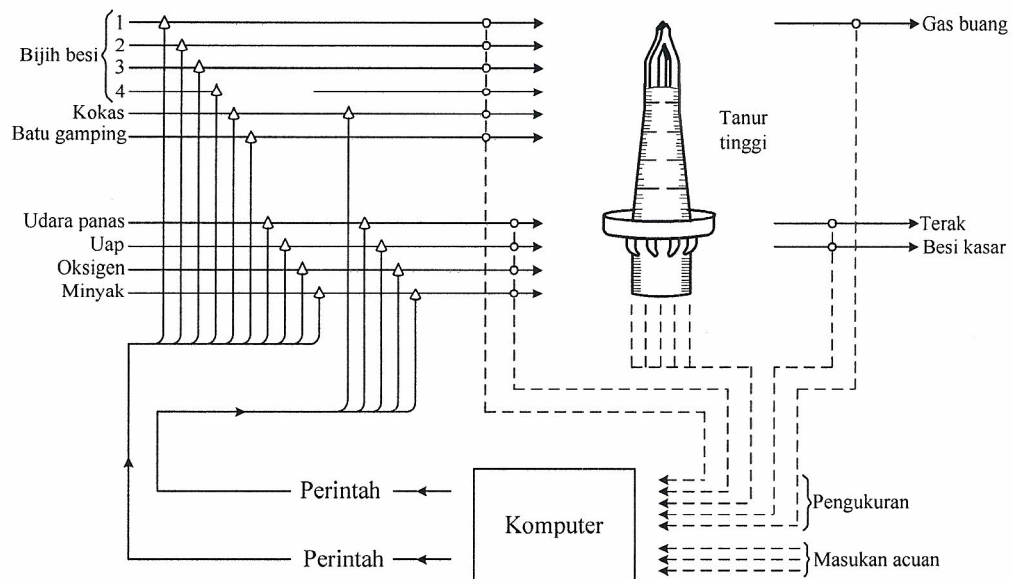
#### d. Sistem Kendali Dengan Komputer

Gambar I. 11. menunjukkan sebuah diagram skematik pengendalian tanur (dapur) tinggi berbasis komputer. Tanur tinggi adalah suatu bangunan yang besar dengan tinggi kurang lebih 30 m, untuk menghasilkan kurang lebih 4000 ton besi kasar (pig-iron) perhari melalui proses peleburan dimana operasinya harus terjaga dengan baik secara menerus. Proses kerja sistem ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

Bijih besi, kokas, dan batu kapur dimasukkan melalui puncak tanur dengan perbandingan tertentu (kurang lebih diperlukan 2 ton bijih besi, 1 ton kokas, 0,5 ton “flux”, dan 4,5 ton udara untuk menghasilkan 1 ton besi kasar). Udara, yang cukup penting dalam pross ini, dipanaskan dalam tungku pemanas dan disemburkan ke dalam tanur. Panas dalam tanur dihasilkan dari pembakaran kokas, yang dari proses pembakaran persial menghasilkan gas monoksida. Gas ini bersama kokas, mereduksi bijih besi dalam tanur menjadi metal, dan batu kapur yang bekerja sebagai “flux”, mengikat bahan kotoran (impurities) menjadi



terak. Besi yang telah mencair kemudian mengalir ke dasar tanur, sedang terak cair naik ke permukaan. Besi cair dan terak cair secara periodic dikeluarkan dari tanur melalui saluran yang tersedia.



**Gambar I. 11. Sistem kendali tanur tinggi dengan komputer.**

Mengingat jumlah karbon, mangan, silikon, sulfur, fosfor, dan sebagainya sangat bergantung pada komposisi bijih besi, kokas, dan batu kapur yang digunakan, maka cukup sulit bagi operator manusia untuk mengendalikan komposisi kimia dari besi kasar yang keluar dari tanur. Pada pengendalian tanur dengan komputer, informasi mengenai komposisi besi kasar, terak, gas buang, temperatur dan tekanan dalam tanur, maupun komposisi bijih besi, kokas dan batu kapur, diumpankan ke komputer pada selang waktu tertentu. Perhitungan-perhitungan yang kompleks untuk menentukan jumlah optimal daadari berbagai bahan dasar yang harus dimasukkan ke dalam tanur ditangani oleh komputer. Dengan demikian komposisi besi kasar yang diinginkan dapat dijaga. Juga operasi keadaan tunak (steady state) dari tanur tinggi pada kondisi yang memuaskan dapat dipertahankan.

Perlu diketahui bahwa pada pengendalian proses berbasis komputer seperti dijelaskan di atas diperlukan model matematik. Penurunan model matematik di

sini cukup sulit, karena factor-faktor yang mempengaruhi dinamika sistem tidak semua diketahui. Perlu diketahui pula bahwa pengukuran semua variabel yang diperlukan untuk pengendalian dengan komputer mungkin sulit atau bahkan tidak mungkin dilakukan, oleh karenanya variabel-variabel yang tidak dapat diukur harus diestimasi dengan metode statistika.

#### e. Sistem Kendali “Traffic Light”

Pengendalian lampu lalu-lintas atau “traffic light” yang dioperasikan pada basis waktu saja, ternyata hanya membentuk sebuah sistem kendali loop terbuka. Meskipun demikian, jika jumlah kendaraan yang menunggu di setiap “traffic light” pada suatu daerah yang padat arus lalu-lintasnya, pada suatu kota, diukur secara kontinyu dan informasinya dikirim ke pusat komputer yang mengendalikan sinyal-sinyal “traffic light” tersebut, maka sistem semacam ini menjadi loop tertutup.

Mobilitas lalu-lintas dalam jaringan adalah cukup kompleks, karena variasi dari volume lalu-lintas sangat bergantung pada jam dan hari dalam satu minggu, maupun pada beberapa factor yang lain. Jadi untuk mengendalikan “traffic light” secara terpusat memang cukup sulit, lebih-lebih jika volume lalu-lintas dari setiap persimpangan ruas jalan sangat heterogen. Dalam hal ini meminimumkan waktu tunggu rata-rata yang relatif proportional dengan tingkat kepadatan lalu-lintasnya merupakan suatu kendala pengendalian yang menuntut perencanaan dan pemecahan secara cermat.

### 6. Beberapa Istilah Dalam Sistem Kendali

Berikut ini dikemukakan beberapa istilah yang sering dijumpai dalam berbagai sistem pengendalian.

- 1) *Sistem* (system). Adalah kombinasi dari beberapa komponen yang bekerja bersama-sama dan melakukan sasaran tertentu baik pada gejala yang abstrak maupun dinamis untuk menyatakan sistem fisik, biologi, ekonomi, dan sebagainya.
- 2) *Proses* (process). Adalah suatu operasi yang sengaja dibuat, berlangsung secara kontinyu yang terdiri dari beberapa aksi atau perubahan yang

dikendalikan, yang diarahkan secara sistematis menuju ke suatu hasil atau keadaan akhir tertentu.

- 3) *Gangguan* (disturbances). Adalah suatu sinyal yang cenderung mempunyai pengaruh yang merugikan terhadap harga keluaran sistem. Jika gangguan itu dibangkitkan dalam sistem, disebut “internal”, sedangkan gangguan “eksternal” dibangkitkan di luar sistem dan merupakan suatu masukan.
- 4) *Keadaan tunak* (steady state). Adalah suatu proses pengendalian atau pengaturan yang untuk waktu tertentu tidak lagi mengalami perubahan harga besaran yang dikendalikan atau diatur tersebut.
- 5) *Waktu transien* (transient time). Adalah waktu yang diperlukan oleh suatu proses pengendalian atau pengaturan hingga mencapai kondisi tunak (steady state).
- 6) *Kendali berumpan-balik* (feedback control). Adalah suatu operasi yang dengan adanya beberapa gangguan, cenderung memperkecil selisih antara keluaran sistem dan masukan acuan (atau suatu keadaan yang diinginkan, yang diubah secara sembarang) dan bekerja berdasarkan selisih tersebut.
- 7) *Sistem kendali berumpan-balik* (feedback control system). Adalah sistem kendali yang cenderung menjaga hubungan yang telah ditentukan antara keluaran sistem dan masukan acuan dengan membandingkannya dan menggunakan selisihnya sebagai alat pengendalian.
- 8) *Sistem kendali servo* (servomekanisme = servomechanism). Adalah sistem kendali berumpan-balik dengan keluaran berupa posisi atau kecepatan atau percepatan poros yang terkendali secara elektronik.
- 9) *Sistem regulator automatic* (automatic regulating system). Adalah suatu sistem kendali berumpan-balik dengan masukan acuan atau keluaran yang diinginkan konstan atau berubah terhadap waktu dengan lambat dan tugas utamanya adalah menjaga keluaran yang sebenarnya pada harga yang diinginkan, dengan adanya gangguan.
- 10) *Sistem kendali proses* (process control system). Pada dasarnya adalah sistem regulator otomatis dengan keluaran berupa besaran seperti

temperatur, tekanan, aliran, tinggi muka cairan, kadar PH, dan sebagainya.

- 11) *Sistem kendali adaptif* . Adalah suatu sistem kendali yang mempunyai kemampuan beradaptasi atau mengatur diri sesuai dengan perubahan pada kondisi atau struktur yang tidak dapat diramal.
- 12) *Sistem kendali dengan penalaran* (learning control system). Adalah sistem kendali yang mempunyai kemampuan menalar selisih antara masukan dan keluaran yang cukup kompleks dan memerlukan analisis serta penyelesaian secara otomatis lagi akurat.

### **Soal-soal Latihan**

1. Dalam buku ini ada tertulis istilah sistem kendali, sistem pengendalian dan elemen kendali. Jelaskan masing-masing istilah itu secara singkat dan tepat !
2. Apa perbedaan paling prinsip antara sistem kendali loop tertutup dan loop terbuka?
3. Sebutkan beberapa keuntungan atau manfaat pemakaian jalur umpan-balik pada sistem kendali loop tertutup otomatis.
4. Pada sistem kendali kecepatan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar I. 5, hitunglah faktor penguatan amplifier jika kesalahan kecepatan yang diijinkan 50 rpm dan tegangan referensi yang digunakan 100 Volt. Sistem tersebut memiliki konstanta tachogenerator 0,1 V/rpm dan konstanta kecepatan putar poros motor dan beban 100 rpm/V.
5. Jika tegangan referensi pada soal nomor 4 dikurangi menjadi 75 Volt, analisislah apa yang akan terjadi pada kondisi yang baru ini terutama kecepatan referensi, tegangan kesalahan tunak (steady state), dan tegangan yang digunakan untuk motor.
6. Bila pengendalian posisi sistem servo seperti ditunjukkan pada Gambar I. 6 akan diubah fungsinya sebagai pengendalian kecepatan sistem servo, komponen atau elemen apa saja yang harus diganti atau ditambahkan ? Gambarlah skema rangkaian yang diminta dalam soal ini !



7. Lakukan analisis ulang yang sama seperti pada contoh soal sistem kendali kecepatan Ward-Leonard (Gambar I. 8); Semua konstanta dalam contoh tetap berlaku kecuali ggl yang dibangkitkan tachogenerator per-radian per-detik = 0,20 Volt dan transkonduktansi penguatannya = 50 V/V. selanjutnya apa komentar saudara jika transkonduktansi penguat pada sistem tersebut diturunkan menjadi 40 V/V.