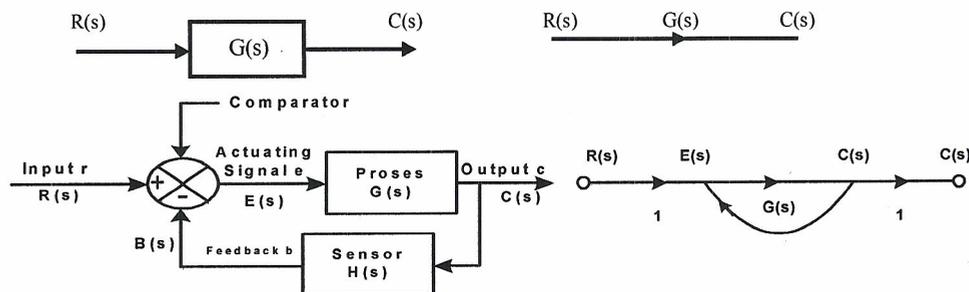


**BAB IV**  
**KARAKTERISTIK UMPAN BALIK DAN ELEMEN KENDALINYA**

**1. Sistem Umpan-Balik dan Tanpa Umpan-Balik.**

Di dalam teknik kendali otomatis faktor umpan-balik memegang peran yang sangat penting, karena dengan cukup meyakinkan telah mampu menggantikan tugas operator secara otomatis. Sistem kendali loop terbuka (tanpa umpan-balik) sebagaimana ditunjukkan melalui diagram blok pada Gambar IV.1a., dioperasikan secara langsung oleh sinyal tunggal dari masukannya. Di dalam sistem ini tidak terdapat piranti koreksi keluaran dan tidak dilengkapi komponen mekanik untuk memperbaiki atau mengkompensasi karakteristik sistem, manakala terjadi penyimpangan penampilan operasi dari komponen pendukung sistem tersebut.

Di pihak lain, sistem kendali loop tertutup (berumpan-balik) sebagaimana ditunjukkan melalui diagram blok dan grafik aliran sinyal pada Gambar IV.1.b, diaktifkan oleh dua buah sinyal yaitu sinyal masukan dan sinyal umpan-balik yang berasal dari keluaran sistem. Sinyal umpan-balik memberikan aksi, mekanisme korelasi secara mandiri di dalam pengendalian sistem sebagaimana akan dijelaskan berikut ini.



**Gambar IV . 1 . (a) Sistem Loop terbuka (non-feedback).**  
**(b) Sistem Loop tertutup (feedback).**

Sinyal keluaran  $c$  diukur oleh sensor  $H(s)$ , yang menghasilkan sinyal umpan-balik  $b$ . Komparator membandingkan sinyal umpan-balik  $b$  ini dengan sinyal masukan (referensi)  $r$ , dan membangkitkan sinyal aksi  $e$ , yang merupakan

hasil ukur antara r dan b. Sinyal aksi ini untuk menjalankan proses  $G(s)$  guna mendapatkan keluaran c yang diharapkan setelah melalui reduksi kesalahan e.

Umpan-balik yang diartikan sebagai pengaturan atau pengendalian otomatis yang dapat diterapkan di dalam berbagai sistem. Sebagai contoh pengendalian temperatur suatu ruangan yang harus terjaga konstan. Jika pengaruh suhu luar dimungkinkan lebih dari satu variabel demikian pula suhu dari dalam ruangan itu sendiri, maka sistem pengendali temperatur ini akan lebih kompleks dari pada yang ditunjukkan oleh Gambar IV. 1.b.

## 2. Reduksi Variasi Parameter Memakai Umpan-Balik.

Salah satu tujuan utama dari pemakaian umpan-balik di dalam sistem kendali adalah untuk memperkecil atau mengurangi variasi parameter yang mengganggu sensitivitas sistem tersebut. Parameter-parameter suatu sistem selalu berselang-seling dengan waktu sehingga dapat mengganggu atau merubah karakteristik sistem tersebut, sebagai misal temperatur ambang yang tidak tetap dan sebagainya. Secara konseptual, sensitivitas adalah ukuran ketepatan umpan-balik di dalam mengurangi pengaruh semua variasi dalam penampilan sistem.

Secara kuantitatif, sensitivitas untuk loop terbuka adalah  $C(s) = G(s) R(s)$ . Katakanlah bahwa variasi parameter  $G(s)$  berubah menjadi  $[G(s) + \Delta G(s)]$ , dimana  $|G(s)| \gg |\Delta G(s)|$ . Keluaran dari sistem loop terbuka kemudian berubah menjadi :

$$C(s) + \Delta C(s) = [G(s) + \Delta G(s)] R(s) \dots\dots\dots (IV-1)$$

Demikian pula halnya untuk sistem loop tertutup, keluarannya adalah :

$$C(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} R(s) ; \text{ akan berubah menjadi :}$$

$$C(s) + \Delta C(s) = \frac{G(s) + \Delta G(s)}{1 + G(s)H(s) + \Delta G(s)H(s)} R(s)$$

Variasi  $\Delta G(s)$  yang terjadi pada  $G(s)$  merupakan jalur fungsi alih arah maju. Mengingat  $|G(s)| \gg |\Delta G(s)|$ , maka variasi pada keluarannya dapat ditulis :

$$\Delta C(s) \approx \frac{\Delta G(s)}{1 + G(s)H(s)} R(s) \dots\dots\dots (IV-2)$$

Dari persamaan (IV-1) dan (IV-2) bila kita membandingkan perubahan pada keluaran antara sistem loop terbuka dan sistem loop tertutup terlihat bahwa perubahan keluaran pada sistem loop tertutup, secara praktis akan berkurang karena adanya faktor pembagi  $[1 + G(s)H(s)]$  yang nilainya lebih besar dari satu.

Batasan tentang sensitivitas dapat digunakan untuk menguraikan variasi relatif semua fungsi alih  $T(s) = C(s) / R(s)$  terhadap variasi  $G(s)$  yang didefinisikan sebagai :

$$\text{Sensitivitas} = \frac{\text{Persentase perubahan } T(s)}{\text{Persentase perubahan } G(s)}$$

Untuk pertambahan variasi yang kecil pada  $G(s)$ , sensitivitas dapat ditulis dalam bentuk kualitatif sebagai :

$$S_G^T = \frac{\delta T / T}{\delta G / G}$$

dimana  $S_G^T$  menyatakan sensitivitas dari fungsi alih (T) dengan memperhatikan proses (G).

Berkenaan dengan definisi di atas, maka sensitivitas dari sistem loop tertutup dapat ditulis :

$$S_G^T = \frac{\delta T}{\delta G} \times \frac{G}{T} = \frac{(1+GH) - GH}{(1+GH)^2} \times \frac{G}{G/(1+GH)} = \frac{1}{1+GH} \dots\dots (IV-3)$$

Demikian halnya sensitivitas untuk sistem loop terbuka adalah :

$$S_G^T = \frac{\delta T}{\delta G} \times \frac{G}{T} - 1, \text{ (dalam hal ini } T = G)$$

Dengan demikian, sensitivitas dari suatu sistem loop tertutup dengan memperhatikan variasi dalam G, adalah dikurangi oleh faktor  $(1 + GH)$ , sedang bila dibandingkan dengan memperhatikan H, sensor umpan-baliknya didapat :

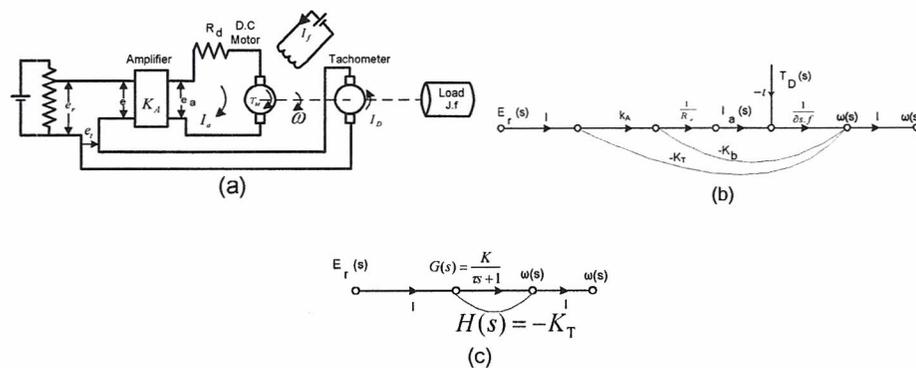
$$S_H^T = \frac{\delta T}{\delta H} \times \frac{H}{T} = G \left[ \frac{-G}{(1+GH)^2} \right] \frac{H}{G/(1+GH)} = \frac{-GH}{1+GH} \dots\dots (IV-4)$$

Persamaan di atas menunjukkan bahwa untuk harga GH yang besar terutama harga H, maka sensitivitas umpan-balik dari sistem akan mendekati satu. Dengan demikian dengan berubahnya harga H dapat mempengaruhi keluaran sistem secara langsung. Oleh sebab itu penerapan elemen umpan-balik ini sangat besar

manfaatnya di dalam mempertahankan kesetabilan sistem tanpa mengubah atau mengatur komponen yang ada di dalamnya.

Pemakaian umpan-balik dalam suatu sistem kendali sungguh mengagumkan, karena variasi parameter yang dapat mengganggu sensitivitas sistem dapat dikurangi. Untuk mencapai tingkat akurasi yang tinggi dari sistem loop tertutup, komponen  $G(s)$  dipilih yang memiliki spesifikasi setepat mungkin agar tujuan sistem dicapai optimum. Namun demikian komponen sensor umpan-balik  $H(s)$  pun perlu diseleksi dengan cermat.  $G(s)$  dibuat menyerupai elemen daya dan  $H(s)$  dibuat menyerupai elemen pengukur yang beroperasi pada tingkat daya rendah, maka pemilihan akurasi untuk  $H(s)$  jauh lebih mahal daripada  $G(s)$ . Misalnya biaya tersebut dikarenakan adanya tuntutan sensitivitas sistem yang tinggi dengan menyertakan sistem umpan-balik dan sistem penguatan khusus. Pada sistem loop terbuka memiliki faktor penguatan  $G(s)$ , sedang pada sistem loop tertutup adalah  $G(s) [1 + G(s) H(s)]$ . Oleh sebab itu dengan menggunakan umpan-balik penguatan sistem akan berkurang dengan faktor yang sama dan sensitivitas sistem terbebas dari variasi parameter yang mengganggunya.

Sebagai contoh tentang sensitivitas suatu sistem, akan dijelaskan melalui diagram skema sistem kendali kecepatan seperti Gb.IV.2.a, yang mana sistem dapat dioperasikan dalam modus loop terbuka maupun loop tertutup. Adapun grafik aliran sinyal sistem tersebut seperti Gb.IV.2.b.



**Gambar IV.2.** Sistem kendali kecepatan (a), Grafik aliran sinyalnya (b), dan Grafik aliran sinyal tereduksi (c).

Grafik aliran sinyal tereduksi dengan  $T_D = 0$  dari sistem tersebut sebagaimana ditunjukkan pada Gb.IV.2c.dimana :

$$K = \frac{K_A K_T}{R_a + K_T K_b} \quad \text{dan} \quad T = \frac{R_a J}{R_a f + K_T K_b}$$

Konstanta variasi  $K$  untuk sensitivitas operasi modus loop terbuka besarnya adalah satu, sedang sensitivitas untuk modus loop tertutup dapat dievaluasi melalui grafik aliran sinyal Gb.IV.2.c, yaitu :

$$T(s) = \frac{K}{Ts + (1 + KK_T)}$$

$$S_G^T = \frac{\delta T}{\delta K} \times \frac{K}{T} = \frac{s + 1/T}{s + \left(\frac{1 + KK_T}{T}\right)} \dots \dots \dots \text{(IV-5)}$$

Formulasi persamaan (IV-5) dapat juga diperoleh dengan mensubstitusikan  $G(s) = K/(Ts + 1)$  dan  $H(s) = KK_T$  pada persamaan (IV-3).

Untuk pemakaian sistem ini, kita dapat menetapkan harga  $1/T = 0,10$  dan  $(1 + KK_T)/T = 10$ . Jadi dari persamaan (IV-5) kita peroleh :

$$S_K^T = \frac{s + 0,10}{s + 10}$$

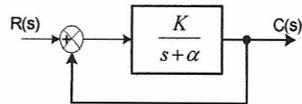
Dari uraian di atas dapat dipahami bahwa sensitivitas adalah merupakan fungsi dari  $s$  yang harus dievaluasi pada setiap perubahan frekuensi. Pada frekuensi tertentu, misalnya  $s = j\omega = j1$ , besar sensitivitas sistemnya adalah :

$$|S_K^T| = 0,10$$

Jadi sensitivitas dari sistem kendali kecepatan loop tertutup pada frekuensi tertentu tadi berkurang oleh sebuah faktor 0,10 atau 10% bila dibandingkan dengan yang dimiliki oleh sistem loop terbuka.

### 3. Pemakaian Umpan-Balik Pengendalian Sistem Dinamik.

Perhatikanlah diagram blok dasar suatu sistem seperti ditunjukkan pada Gb.IV.3. Fungsi alih loop terbuka dari sistem tersebut adalah :  $G(s) = \frac{K}{s + a}$ , yang mana mempunyai pole nyata pada bidang datar  $s$  sebesar  $s = -\alpha$ .



Evaluasi respons dari sistem terhadap unit impulse masukan (untuk unit impuls  $R(s) = 1$ ), keluaran untuk sistem tanpa umpan-balik adalah :

**Gambar.IV.3. Sistem upan-balik sederhana.**

$$C(s) = \frac{K}{s + a}, \text{ dan untuk sistem berumpan-balik adalah}$$

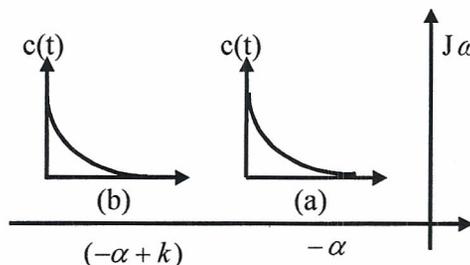
$$C(s) = \frac{K}{s + a + K}$$

Dengan mencari transformasi Laplace (inverse) dari persamaan di atas, didapat

$$c(t) = Ke^{-at} \text{ (untuk sistem tanpa umpan-balik) } \dots\dots\dots \text{ (IV-6)}$$

$$= Ke^{-(k+a)t} \text{ (untuk sistem pakai umpan - balik) } \dots\dots\dots \text{ (IV-7)}$$

Respons-respons di atas dapat digambarkan grafiknya seperti Gambar IV.4.



**Gambar IV.4 Respon impuls dari sistem gambar**

Respon impuls untuk sistem tempat umpan-balik dengan lokasi pole di titik  $s = - a$  ditunjukkan pada Gb.VI.4.a. Respons aslinya berbentuk eksponensial menurun atau mundur dengan tatapan waktu sebesar  $\tau = RC$ . Untuk harga  $K$  yang positif, dengan adanya umpan-balik ini akan menggeser pole lebih negatif lagi hingga mencapai  $s = - (\alpha+K)$  sehingga tatapan waktunya berkurang sebesar  $1/(k+\alpha)$ . Demikian halnya  $K$  akan menaikkan dinamika sistem secara menerus hingga menjadi lebih cepat, sebagai contoh menurunnya respon transient yang lebih cepat seperti pada Gb.VI.4.b.

Dari contoh di atas dapat disimpulkan bahwa umpan-balik mengendalikan dinamika sistem dengan mengatur lokasi dari polenya. Perlu pula dicatat bahwa

umpan-balik disini dapat menjelaskan beberapa kemungkinan tentang ketidakstabilan sistem. Dalam hal ini yaitu sistem loop tertutup biasa saja tidak stabil walaupun pada loop terbuka stabil.

Satu contoh lagi yaitu sistem kendali kecepatan seperti ditunjukkan pada Gb.VI.2.a. Katakan sistem dimaksud mempunyai langkah input  $E_r(s) = A/s$ , dimana  $A$  adalah suatu konstanta. Respons keluaran sistem tersebut seperti grafik

$$\begin{aligned}\omega(s) &= \frac{KA/\tau}{s(s+1/\tau)} \quad (\text{untuk operasi loop terbuka, } Kt = 0) \\ &= \frac{KA/\tau}{s(s + \frac{1+KK_T}{\tau})} \quad (\text{untuk operasi loop tertutup})\end{aligned}$$

Dengan mencari transformasi Laplace persamaan di atas, didapat.

$$\omega(t) = KA(1 - e^{-t/\tau}) \quad (\text{untuk operasi loop tertutup}) \dots \dots \dots (IV-8)$$

$$= \frac{KA}{1+KK_T} (1 - e^{-t/\tau_c}) \quad (\text{untuk operasi loop tertutup}) \dots \dots \dots (IV-9)$$

dimana  $\tau_c = \tau/(1+KK_T) =$  tetapan waktu sistem loop tertutup.

Dari persamaan di atas tampak bahwa tetapan waktu ( $\tau$ ) untuk loop terbuka cukup besar, respon transient kecil, dan hanya ada satu pilihan untuk mengganti motor dengan motor lain yang memiliki tetapan waktu kecil.

Untuk selanjutnya persyaratan modus loop tertutup yang memiliki tetapan waktu yang lebih rendah ( $\tau_c$ ) dengan mudah dapat diatur dengan memilih dan menetapkan harga  $KK_T$  yang paling cocok. Pengurangan tetapan waktu yang berlebihan atau tak terbatas pasti tidak dapat dilakukan.

Dari ilustrasi di atas dapat disimpulkan bahwa pemakaian umpan-balik pada pengendalian sistem dinamik adalah cara yang terbaik.

#### 4. Pengendalian Sinyal Gangguan Memakai Umpan-balik

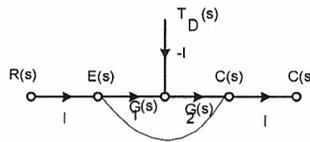
Gambar VI.5 menunjukkan grafik aliran sinyal dari sistem loop tertutup dengan sinyal gangguan  $T_D$  pada jalur arah maju.

Rasio antara keluaran  $C(s)$  dengan sinyal gangguan  $T_D(s)$  jika  $R(s) = 0$ , dapat ditemukan dengan menggunakan formulasi grafik aliran sinyal dengan hasil:

$$\frac{C_D(s)}{T_D(s)} = \frac{-G_2(s)}{1+G_1(s)+G_2(s)H(s)} \dots\dots\dots (IV-10)$$

Jika  $[G_1G_2H(s)] \gg 1$  melebihi range kerja s, maka persamaan (IV-10) berubah menjadi  $\frac{C_D(s)}{T_D(s)} = \frac{-1}{G_1(s)H(s)}$

Dari persamaan di atas akan terlihat bahwa jika  $G_1(s)$  dibuat cukup besar, maka efek gangguannya dapat dikurangi dengan umpan-baliknya.



**Gambar IV.5. Sistem loop ter tutup dengan sinyal gangguan.**

Kini kita bahas mengenai efek gangguan torsi beban dari sistem kendali kecepatan sebagaimana ditunjukkan pada Gb.VI.1.a. Dimisalkan torsi beban berupa sinyal langkah yaitu  $T_D(s) = A/s$ , diman A sebuah konstanta.

Dengan mengacu pada grafik aliran sinyal sebagaimana ditunjukkan pada Gb.VI.2.b. perubahan kecepatan akibat torsi beban  $[E_1(s)=0]$ , adalah :

$$\omega_D(s) = \frac{-A}{s \left( Js + f + \frac{K_T K_B}{Ra} \right)} \quad (\text{untuk operasi loop terbuka } Kt = 0) \dots\dots (IV-11)$$

$$= \frac{-A}{s [Js + f + \frac{K_m}{Ra} (K_A K_T + K_b)]} \quad (\text{untuk operasi loop tertutup}) \dots\dots (IV-12)$$

Kesalahan kecepatan tunak (steady state) akibat beban terpasang dirumuskan sebagai:

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} \omega_D(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \omega_D(s) \dots\dots\dots (IV-13)$$

Dengan memakai persamaan (VI-11), kesalahan kecepatan tunak untuk loop tertutup akan didapat:

$$e_{ss} (OL) = \frac{-AR_a}{R_a + K_m K_b} \dots\dots\dots (IV-14)$$

dan

$$e_{ss} (OL) = \frac{-ARa}{R_a f + K_m (K_A K_m + K_b)} \dots\dots\dots (IV-15)$$

Rasio antara kesalahan kecepatan keluaran tunak dengan torsi beban pada loop terbuka dan loop tertutup didapat dari persamaan (VI-14) dan (VI-15), yaitu :

$$\frac{e_{ss}(CL)}{e_{ss}(OL)} = \frac{R_a f + K_T K_b}{R_a f + K_m (K_b K_A + K_T)}$$

Faktor  $K_m K_A K_b$  pada penyebut merupakan efek gangguan pada respons loop tertutup yang keberadaannya masih dapat dipertimbangkan daripada yang terjadi pada loop terbuka.

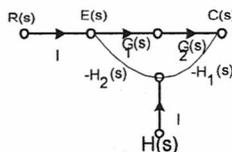
Dari analisis di atas tampak bahwa pemakaian umpan-balik dapat mengurangi adanya efek gangguan dan sinyal desau pada jalur arah maju dari loop umpan-balik. Umpan-balik dapat pula diartikan seperangkat elemen tambahan yang disebut pengukur sensor H yang dapat membangkitkan desau. Selanjutnya efek desau pada penampilan sistem akan dibicarakan berikut ini.

Gambar IV.b menunjukkan grafik aliran sinyal suatu sistem dengan sinyal desau  $N(s)$  pada jalur umpan-balik. Dengan menggunakan formulasi penguatan untuk grafik aliran sinyal diperoleh hasil sebagai berikut:

$$\frac{C(s)}{N(s)} \Big|_{R(s)=0} = \frac{C_n(s)}{N(s)} = \frac{-G_1(s)H_2(s)H_1(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H_1(s)H_2(s)}$$

Untuk harga penguatan loop yang besar ( $G_1 G_2 H_1 H_2 (s) \gg 1$ ), persamaan di atas dapat disederhanakan menjadi :

$$\frac{C(s)}{N(s)} = \frac{1}{H_1(s)}$$



**Gambar IV.6. Sistem loop tertutup dengan pengukuran desau**

Oleh sebab itu efek desau pada keluarannya dapat ditulis

$$C_n(s) = - \frac{N(s)}{H_1(s)} \dots\dots\dots (IV-16)$$

Jadi untuk penampilan sistem-sistem yang optimum, pengukur sensor  $H_1(s)$  harus didisain maksimum, yang ekivalen dengan rasio maksimum antara sinyal/desau dari sensornya.

Sensor umpan-balik harus memiliki variasi parameter yang rendah agar sensitivitas maksimum ( $S_H^T \approx 1$ ) dicapai. Demikian pula rasio sinyal/desau untuk sensornya harus tinggi. Biasanya hal tersebut mudah didisain dan dirakit dengan menyiapkan komponen yang spesifik dan murah, karena elemen umpan-balik ini akan dipakai untuk operasi daya kecil.

Kesimpulan umum dari pemakaian umpan-balik sebagaimana dijelaskan di atas antara lain ialah sensitivitas sistem terjaga dari gangguan, respons transient meningkat, dan sinyal gangguan pada sistem dapat diminimisir.

Berikut ini akan dikemukakan mengenai pemakaian umpan-balik pada sistem kendali temperatur sebagaimana diilustrasikan pada Gb.IV.7. Pada sistem tersebut diharapkan dihasilkan aliran cairan panas yang ajeg dengan temperatur terkendali.

Temperatur cairan yang mengalir diatur secara otomatis oleh sensor umpan-balik (sebut ia thermocouple) yang mana tegangan keluaran yang dihasilkan ( $e_t$ ) ini harus dikurangkan dari tegangan kesalahan  $e$ , atau  $e = e_r - e_t$ . Besar tegangan kesalahan  $e$  ini akan mengatur arus elemen pemanas  $i_c$  (masukan panas untuk cairan) melalui penyearah gelombang penuh berupa SCR.

Untuk mengurangi kompleksitas dari sistem tersebut, beberapa asumsi penyederhanaan penting dapat ditulis sebagai berikut :

- (i) Jumlah cairan pada saluran masukan dan keluaran yang melalui tanki adalah sama, oleh karenanya tinggi permukaan cairan dalam tanki selama operasi tetap konstan.
- (ii) Cairan dalam tanki terisolasi dengan baik, sehingga temperatur cairan yang keluar melalui saluran keluaran dapat dinyatakan bertemperatur  $\theta$ .

- (iii) Isolasi disekitar dinding tanki dijamin baik, sehingga tidak dipengaruhi suhu luar (rugi temperatur = 0). Demikian juga tak ada suhu yang tersimpan di dalam dinding tanki.
- (iv) Operasi dari rangkaian SCR adalah linear, dalam hal ini  $i_c = K_s e$  dimana  $K_s$  adalah penguatan rangkaian dalam satuan A/V.

Persamaan kesetimbangan antara cairan yang masuk dan yang keluar ini adalah : Jumlah panas yang dihasilkan oleh elemen pemanas = jumlah panas yang tersimpan dalam tanki + jumlah panas yang dipindahkan oleh cairan yang mengalir keluar.

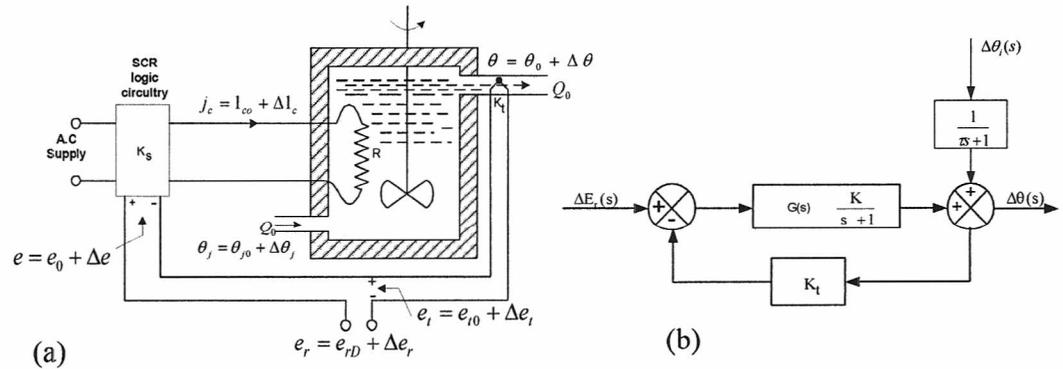
Penyataan tersebut secara matematik dapat ditulis :

$$i_c^2 R = MC \frac{d\theta}{dt} Q_o \sigma C (\theta - \theta_i) \dots \dots \dots (IV-17)$$

- dimana M = Masa cairan dalam tanki
- C = Panas spesifik cairan
- $\sigma$  = Kerapatan aliran
- $Q_o$  = Volume aliran cairan
- $\theta_i$  = Temperatur cairan yang mengalir
- R = Tahanan elemen pemanas

Dengan mensubtitusikan semua variabel operasional di atas, termasuk harga pengurangnya, maka persamaan (IV-17) dapat ditulis sebagai :

$$K_s^2 (e_0^2 + 2e_0 \Delta e) R = MC d\Delta\theta/dt + Q_o \sigma C (\theta_0 - \theta_{i0}) + Q_o \sigma C (\Delta\theta - \Delta\theta_i) \dots \dots \dots (IV-18)$$



Gambar.IV.7 Sistem kendali temperatur (a), dan Diagram blok sistemnya (b)

Pada persamaan yang ditulis di atas semua harga pengurangannya telah diasumsikan bahwa  $(\Delta e)^2 \approx 0$ . Adapun untuk operasi kondisi tunak dengan harga pengurang = 0, akan diperoleh persamaan :

$$K_s^2 e_0^2 = Q_0 \sigma C (\theta_0 - \theta_{i0}) \dots \dots \dots (IV-19)$$

Dengan mengurangkan persamaan (IV-19) dari (IV-18), akan didapat persamaan baru yang menyatakan harga pengurangan disekitar daerah operasi sistem sebagai;

$$2 K_s^2 e_0 R \Delta e = MC (d\Delta \theta / dt) + Q_0 \sigma C (\Delta \theta - \Delta \theta_i) \dots \dots \dots (IV-20)$$

Adapun kesalahan pengurangan dinyatakan dengan :

$$\Delta e = \Delta e_r - \Delta e_i \dots \dots \dots (IV-21)$$

dimana

$$\Delta e_i = K_i \Delta \theta \dots \dots \dots (IV-22)$$

$K_i$  adalah konstanta dari sensor temperatur.

Dengan mencari transformasi Laplace dari persamaan (IV-20), (IV-21) dan (IV-22) serta menyusunnya kembali, didapat :

$$\Delta \theta (s) = \frac{K \Delta E(s)}{\tau s + 1} + \frac{\Delta \theta_i(s)}{\tau s + 1} \dots \dots \dots (IV-23)$$

$$\Delta E (s) = \Delta E_r (s) - \Delta E_i (s) \dots \dots \dots (IV-24)$$

$$\Delta E_i (s) = K_i \Delta \theta (s) \dots \dots \dots (IV-25)$$

dimana

$$K = \frac{2K_s^2 e_0 R}{Q_0 \sigma C} \text{ dan } \tau = \frac{M}{Q_0 \sigma}$$

Dari persamaan (IV-23), (IV-24) dan (IV-25), kita dapat menggambarkan diagram blok sistemnya seperti Gb.IV.7.b, dimana fungsi alih untuk loop tertutup tersebut adalah :

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1}$$

dan  $\Delta \theta_i(s)$  adalah perubahan temperatur yang terjadi pada cairan yang mengalir yang dikategorikan sebagai gangguan masukan sistem, yakni  $1/( \tau s + 1)$ .

Katakanlah sinyal pengganggu  $\Delta\theta_i$  menjadi nol, perubahan temperatur cairan yang mengalir disebabkan oleh suatu pergantian langkah yang tidak diinginkan ( $\Delta E$ ) pada tegangan referensi, yaitu :

$$\begin{aligned}\Delta \theta(t) &= \lim_{t \rightarrow \infty} s \left( \lim_{s \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta E_r}{s} \right) \frac{K}{Ts + 1 + KK_t} \right) \\ &= \frac{\Delta E_r K}{1 + KK_t} \quad (\text{untuk loop tertutup}) \\ &= \Delta E_r K \quad (\text{untuk loop terbuka; } K_t = 0)\end{aligned}$$

Dari persamaan di atas dengan mudah dapat diamati bahwa perubahan temperatur cairan yang disebabkan oleh pergantian dengan faktor  $1 / (1 + KK_t)$  untuk loop tertutup.

Demikian halnya, bila referensi masukan dapat dipertahankan tetap, misal  $\Delta e_r = 0$ , pergantian langkah ( $\Delta\theta_i$ ) pada temperatur cairan akan menyebabkan perubahan temperatur keluaran, yaitu :

$$\begin{aligned}\Delta\theta(t) &= \lim_{t \rightarrow \infty} s \left( \lim_{s \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta\theta_i}{s} \right) \frac{1}{Ts + 1 + KK_t} \right) \\ &= \frac{\Delta\theta_i}{1 + KK_t} \quad (\text{loop tertutup}) \\ &= \Delta\theta_i \quad (\text{loop terbuka; } K_t = 0)\end{aligned}$$

Jadi perubahan temperatur cairan yang mengalir keluar yang disebabkan oleh perubahan temperatur cairan yang masuk ke dalam tanki dapat dikurangi pada harga yang diinginkan dengan memilih penguatan loop  $KK_t$  yang cocok. Jika ingin mengetahui panas yang hilang pada dinding tanki, kita dapat menghitungnya melalui formula tambahan, yaitu :  $A \rho (\Delta\theta - \Delta\theta_e)$  pada ruas kanan dari persamaan (IV-20), dimana  $\rho$  adalah konstanta pemindahan panas dan  $A$  adalah luas permukaan tanki. Hasilnya adalah merupakan sinyal pengganggu tambahan ( $\Delta\theta_e$ ), yang disebabkan oleh perubahan temperatur bagian dalam dari sistem  $\theta_{e0}$ .

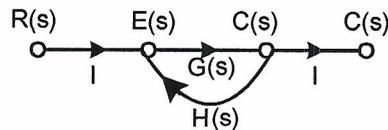
## 5. Umpan-Balik Regeneratif.

Materi yang didahulukan dalam bab ini ditekankan pada penerapan umpan-balik tipe degeneratif atau negative. Pada umpan-balik regeneratif,

keluaran diumpankan kembali dengan fungsi alih untuk umpan – balik tipe ini adalah :

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 - G(s)H(s)} \dots\dots\dots (IV-26)$$

Tanda negatif pada penyebut dari persamaan (IV-26) menyatakan ada kemungkinan penyebut berubah harga menjadi nol, manakala keluarannya tak-berhingga akibat masukan yang terlalu besar (kondisi sistem tak stabil).



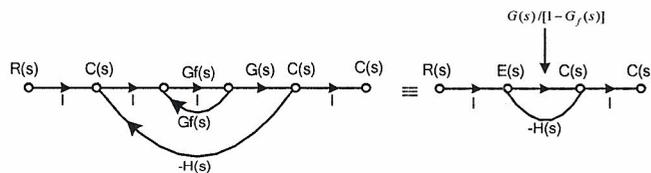
**Gambar IV.8. Sistem kendali dengan umpan balik regeneratif.**

Umpan-balik regeneratif sesekali digunakan untuk memperbesar penguatan loop dari suatu sistem umpan-balik. Gambar IV.9 berikut ini menunjukkan sebuah sistem umpan-balik yang menerapkan umpan-balik regeneratif pada loop bagian dalamnya. Grafik aliran sinyal ini dapat disederhanakan menjadi grafik loop tunggal, dengan penguatan loop sebesar :

$$\frac{-G(s)H(s)}{1 - G_f(s)}$$

Jika  $G_f(s)$  dipilih sedemikian hingga mendekati satu, maka penguatan loopnya akan sangat tinggi dan fungsi alih loop tertutupnya dapat ditulis sebagai :

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 - G_f(s) + G(s)H(s)} \approx \frac{1}{H(s)}$$

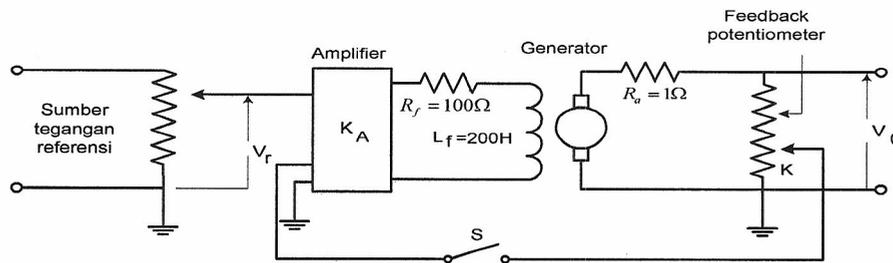


**Gambar.IV.9. Menaikan penguatan loop dengan umpan-balik regeneratif.**

Jadi untuk mendapatkan penguatan loop yang tinggi harus menerapkan umpan-balik regeneratif pada bagian dalam sistem, hanya saja fungsi alih loop tertutupnya menjadi kurang peka terhadap G(s).

### SOAL – SOAL LATIHAN

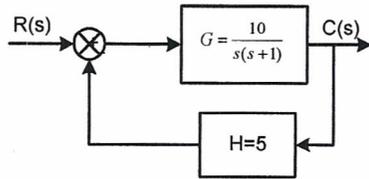
1. Sebuah pengatur tegangan sederhana (Gb.P.IV.1), pada terminal keluaran generator dipasang sebuah potensiometer untuk mendapatkan tegangan umpan-balik  $KV_o$  diman  $K$  adalah konstanta ( $K < 1$ ). Tahanan potesiometer cukup tinggi dengan maksud agar arus yang mengalir dapat diabaikan sementara. Elemen penguat mempunyai gain  $20V/V$ , penguatan generator  $50V/amp$  medan, dan tegangan referensi  $V_r = 50 V$ .



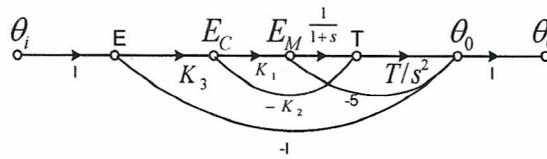
Gambar.S.IV.1.

- (a) Gambarkan diagram blok sistem tersebut manakala generator mencatu arus beban dan nyatakan fungsi alih dari masing – masing bloknnya.
- (b) Sistem tersebut dioperasikan pada loop tertutup. Tentukan harga dari  $K$  manakal terminal generator tanpa beban =  $250 V$ . perubahan apa yang terjadi pada terminal generator bila arus bebannya =  $30$  amper ? Berapa tegangan referensi harus terpasang agar tegangan terminal generator kembali =  $250 V$ ?
- (c) Sistem tersebut dioperasikan pada loop terbuka. Tentukan tegangan referensi yang diperlukan guna mendapatkan tegangan tanpa beban  $250 V$ . perubahan apa yang akan terjadi pada terminal tegangan jika arus bebannya  $30$  amper ?
- (d) Bandingkan perubahan tegangan terminal yang terjadi pada (b) dan (c) berikan komentar mengenai efek umpan-balik dalam mengcoucter perubahan tegangan terminal yang disebabkan oleh aliran arus beban.
2. Diagram blok dari sistem pengendali posisi seperti ditunjukkan pada Gb.S.IV2, tentukan sensitifitas fungsi alih ( $T$ ) untuk loop tertutup dengan memperhatikan

faktor G dan H. Jalur umpan-balik dan jalur fungsi alih masing-masing memberlakukan  $\omega = 1$  rad/detik.

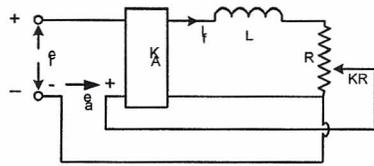


Gambar S.IV.2.

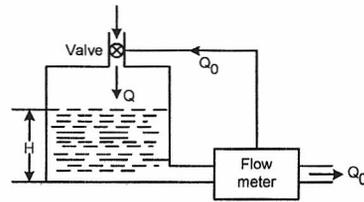


Gambar S.IV.3.

3. Operasi sebuah sistem servo grafik aliran sinyalnya dinyatakan seperti Gb.S.IV.3. Variabel T menyatakan torsi dan E menyatakan kesalahan. Tentukan :
  - (a) Seluruh sistem yang transmisi yang tergambar bila  $K_1 = 1$  dan  $K_2 = K_3 = 5$
  - (b) Sensitivitas sistem bila terjadi perubahan pada  $K_1$  untuk  $\omega = 0$ .
4. Kumparan medan sebuah servo motor dc dieksitasi secara terpisah (amplifier dc) dengan penguatan  $K_A = 90$  (lihat Gb.S.IV.4). Induktansi kumparannya = 2 H dengan tahanan 50 ohm. Hitunglah tetapan waktu kumparan medannya. Masukan amplifier diperoleh dari umpan-balik negatif setelah membandingkan tegangan masukan dan keluaran yang proposional terhadap arus medannya. Tentukan nilai konstanta umpan-balik K guna mengurangi tetapan waktu kumparan medan menjadi 4 milidetik.
5. Gambar S.IV.5 menunjukkan sistem pengatur aliran bahan bakar. Volume aliran bahan bakar ( $Q_0$ ) yang dialirkan dari dalam tanki terukur, sedangkan jumlah aliran yang masuk ( $Q$ ) ke dalam tanki bertambah sebesar K ( $Q-Q_0$ ), jika bahan bakar yang keluar dari tanki terjadi perbedaan dari yang ditetapkan ( $Q$ ). Pada kondisi tunak  $Q_0 = Q$  dengan tinggi permukaan dalam tanki = C dengan tahanan alirannya = R. Untuk penyimpangan aliran yang kecil dari kondisi tunak Q, tentukan lah fungsi alih loop tertutup sistem tersebut. Bandingkan sensitivitas fungsi alih tersebut bila terjadi perubahan R baik pakai maupun tanpa umpan-balik. Bandingkan pula tetapan waktu dari dua kondisi tadi.



Gambar S.IV.4.



Gambar S.IV.5.