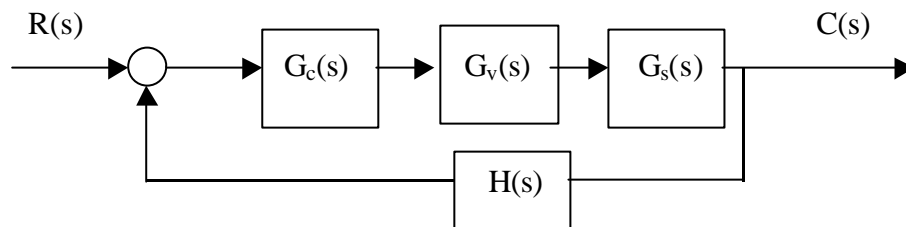

BAB 6

DISAIN LUP TUNGGAL KONTROL BERUMPAN-BALIK

6.1 KESTABILAN LUP KONTROL

6.1.1 Persamaan Karakteristik



Gambar 6.1 Lup kontrol berumpan-balik

Persamaan fungsi alihnya:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_v(s)G_s(s)}{1 + G_c(s)G_v(s)G_s(s)H(s)}$$

Dari persamaan fungsi alih di atas, persamaan karakteristik lupnya :

$$1 + G_c(s)G_v(s)G_s(s)H(s) = 0$$

Jika diuraikan dalam bentuk polinomial, maka:

$$a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + a_{n-2} s^{n-2} + \dots + a_1 s + a_0 = 0$$

dengan $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ adalah koefisien variabel persamaan karakteristik.

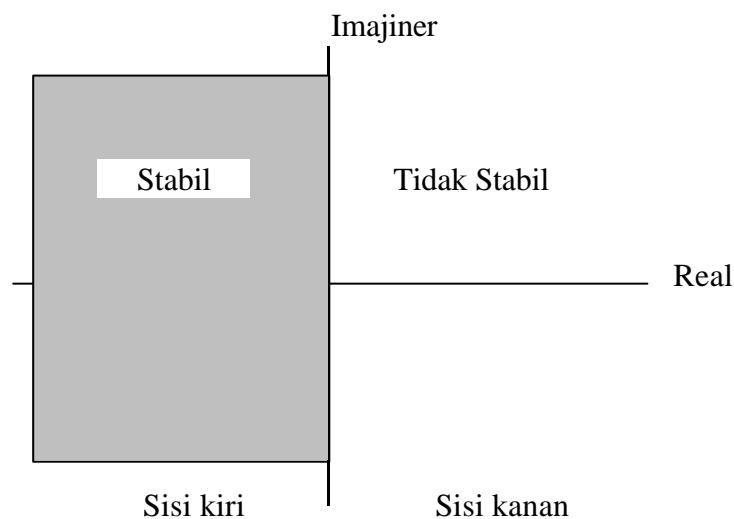
Agar sistem stabil, maka eigenvalue-nya harus negatif. Untuk mendapatkannya biasanya menggunakan metode Newton plus Nested Multiplication. Hanya saja,

metode ini sulit jika a_0 mengandung harga yang belum diketahui, misalnya jika $G_c = K_c$.

6.1.2 Kriteria Kestabilan

Sistem disebut stabil: keluaran sistem menuju harga tertentu/terbatas (tidak harus nol) bila waktunya naik hingga tak berhingga.

Agar lup kontrol berumpan-balik stabil, semua akar-akar persamaan karakteristiknya harus bilangan real negatif atau bilangan kompleks dengan bagian realnya negatif (lihat Gambar 6.2).



Gambar 6.2 Daerah stabil dan tidak stabil pada bidang s

6.1.3 Routh Test

Routh test: prosedur untuk menentukan berapa banyak akar-akar polinomial mempunyai bagian positif *tanpa* harus menemukan akar-akar secara nyata dengan teknik iteratif.

Langkah-langkahnya:

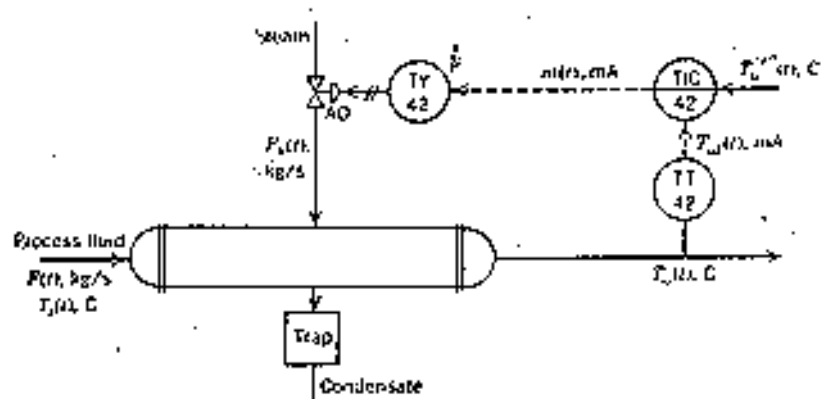
1. Membuat array
2. Kolompaling kiri harus bertanda sama

a_n	a_{n-2}	a_{n-4}	a_1	0
a_{n-1}	a_{n-3}	a_{n-5}	a_0	0
b_1	b_2	b_3	0	0
c_1	c_2	c_3	0	0

$$b_1 = \frac{a_{n-1}a_{n-2} - a_n a_{n-3}}{a_{n-1}} \quad b_2 = \frac{a_{n-1}a_{n-4} - a_n a_{n-5}}{a_{n-1}}$$

$$c_1 = \frac{b_1 a_{n-3} - a_{n-1} b_2}{b_1} \quad c_2 = \frac{b_1 a_{n-5} - a_{n-1} b_3}{b_1}$$

Contoh: Cari harga ultimate gain sistem di bawah ini.



Gambar 6.3 Sistem kontrol HE

Exchanger: $G_s(s) = \frac{50}{30s + 1} C / (kg / s)$

Sensor-transmitter: range yang dikalibrasi 50 – 150 C dan konstanta waktunya 10 s.

$$Gain = \frac{100\%}{(250 - 50)C} = 1,0\% / C$$

$$H(s) = \frac{1,0}{10s + 1} \% / C$$

Catatan: di sini digunakan ; untuk sinyal elektronik, 100% = 16 mA dan untuk sinyal pneumatik, 100% = 12 psi.

Control valve: kapasitas maksimum 1,6 kg/s steam, karakteristik linear, dan konstanta waktu 3 s. Dengan menganggap PD konstan:

$$\text{Gain} = \frac{1,6(\text{kg/s})}{100\%} = 0,016 (\text{kg/s})/\%$$

$$G_v(s) = \frac{0,016}{3s+1} (\text{kg/s})/\%$$

Kontroler: proporsional $G_c(s) = K_c \text{ \%/\%}$

JAWAB:

$$1 + H(s) G_s(s) G_v(s) G_c(s) = 0$$

$$1 + \frac{1}{10s+1} \cdot \frac{50}{30s+1} \cdot \frac{0,016}{3s+1} \cdot K_c = 0$$

Diatur lagi:

$$(10s+1)(30s+1)(3s+1) + 0,80K_c = 0$$

$$900s^3 + 420s^2 + 43s + (1 + 0,80 K_c) = 0$$

900	43	0
420	$1 + 0,80 K_c$	0
b_1	0	0
$1 + 0,80 K_c$	0	0

dengan:

$$b_1 = \frac{420 \cdot 43 - 900(1 + 0,08K_c)}{420} = \frac{17160 - 720K_c}{420}$$

$$b_1 \geq 0 \text{ atau } 17160 - 720K_c \geq 0 \quad K_c \leq 23,8$$

$$1 + 0,8K_c \geq 0 \text{ atau } 0,8K_c \geq -1 \quad K_c \geq -1,25$$

Nilai K_c terendah: negatif. Ini tidak berarti karena gain negatif berarti kontroler mempunyai kesalahan aksi. Batas teratas gain kontroler merupakan ultimate gain:

$$K_{cu} = 23,8 \text{ \%/\%}$$

Ini berarti perubahan gain pada kontroler tidak boleh lebih besar dari 23,8 atau mengurangi PB di bawah 4,2 % (100/23,8).

• **Pengaruh Parameter Lup pada Ultimate Gain**

- Gain pada sensor-transmitter diperbesar: 2,0 %/C
 $K_{cu} = 11,9 \%$ (setengah K_{cu} asal)
- Konstanta waktu sensor-transmitter dipercepat: 5 s
 $K_{cu} = 25,7 \%$
- Konstanta waktu exchanger diperlambat: 20 s
 $K_{cu} = 18,7 \%$

6.1.4 Metode Substitusi Langsung

Metode ini didasarkan pada kenyataan bahwa jika akar-akar persamaan karakteristik sangat kontinyus dengan parameter-parameter lup, maka titik di mana lup menjadi tidak stabil (paling sedikit satu dan biasanya dua akar) harus terletak pada aksis imajiner dari daerah kompleks, yakni, di sana harus ada akar imajiner murni. Pada titik ini lup dikatakan berada pada stabil secara marjinal (lihat Gambar 6.3) dan keluaran lupnya:

$$C(s) = \frac{b_1s + b_2}{s^2 + \omega_u^2} + (other_terms)$$

$$c \quad 1 \sin(\omega_u T + q) + (other\ terms)$$

1 = amplitudo gelombang sinus (konstan)

ω_u = frekuensi gelombang sinus

q = sudut fasa gelombang sinus

Pada titik stabilitas marjinal persamaan karakteristik harus mempunyai sepasang akar imajiner murni:

$$r_{1,2} = \pm i\omega_u$$

$$\omega_u = \frac{2p}{T_u}, \text{ dengan } T_u = \text{ultimate period}$$

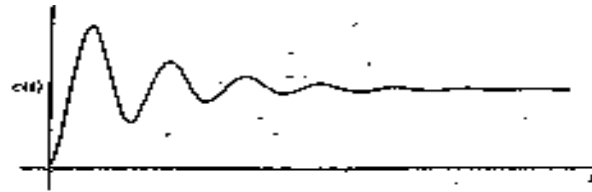


Figure 6-9a. Response of stable system.

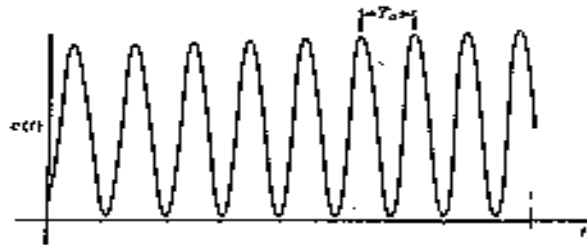


Figure 6-9b. Response of marginally stable system with ultimate period T .

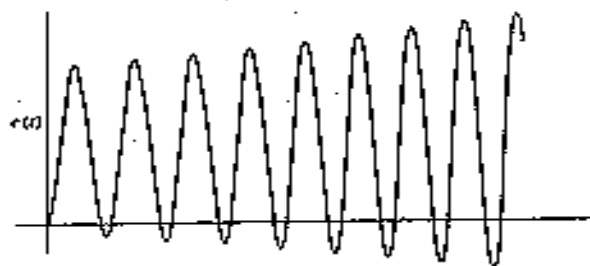


Figure 6-9c. Response of unstable system.

Gambar 6.4 Respon sistem stabil, stabil marjinal dan tidak stabil

Metode substistusi langsung: mensubstitutsikan $s = i\omega_u$ pada persamaan karakteristik.

Contoh:

Tentukan ultimate gain dan frekuensi kontroler suhu pada contoh sebelumnya dengan substitusi langsung.

JAWAB:

$$900s^3 + 420s^2 + 43s + (1 + 0,80 K_c) = 0$$

Substitutsikan $s = i\omega_u$ dan $K_c = K_{cu}$

$$900i^3 \omega_u^3 + 420 i^2 \omega_u^2 + 43 i\omega_u + (1 + 0,80 K_{cu}) = 0$$

$$i^2 = -1:$$

$$(-420\omega_u^2 + 1 + 0,80 K_{cu}) + i(-900\omega_u^3 + 43\omega_u) = 0 + 0i$$

$$-420\omega_u^2 + 1 + 0,80 K_{cu} = 0$$

$$-900\mathbf{w}_u^3 + 43\mathbf{w}_u = 0$$

untuk $\mathbf{w}_u = 0$ $K_{cu} = -1,25 \text{ \%/\%}$

untuk $\mathbf{w}_u = 0,2186$ $K_{cu} = 23,8 \text{ \%/\%}$ dan $T_u = 28,7 \text{ s}$

Hasil metode substitusi langsung untuk kasus-kasus di atas dapat dilihat pada Tabel 6.1.

Tabel 6.1 Pengaruh Perubahan Parameter

No	KASUS	K_{cu}	\mathbf{w}_u , rad/s	T_u , s
1	Basis	23,8	0,2186	28,7
2	$H(s) = \frac{2}{10s + 1}$	11,9	0,2186	28,7
3	$H(s) = \frac{1}{5s + 1}$	25,7	0,2906	21,6
4	$G_s(s) = \frac{50}{20s + 1}$	18,7	0,2345	26,8

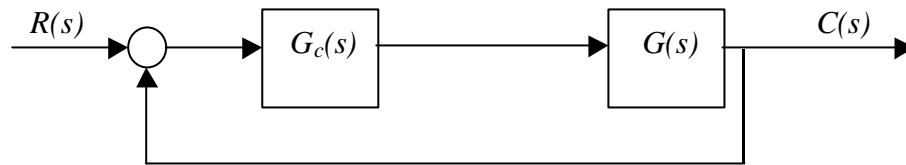
6.1.5 Pengaruh Dead-time

Routh test dan substitusi langsung tidak bisa digunakan untuk blok pada lup yang mengandung dead-time. Ini karena dead-time menambahkan fungsi eksponensial variabel s pada persamaan karakteristik.

Aproksimasi Pade:
$$e^{-t_0 s} = \frac{1 - \frac{1}{2}t_0 s}{1 + \frac{1}{2}t_0 s}$$

Aproksimasi yang lebih akurat ada, tapi lebih kompleks untuk dipraktikkan.

Contoh:



Gambar 6.5 Diagram Blok contoh ini

$$G(s) = \frac{Ke^{-t_0s}}{ts+1}$$

Tentukan ultimate gain dan frekuensi lup sebagai fungsi parameter proses jika kontrolernya proporsional: $G_c(s) = K_c$.

JAWAB:

Persamaan karakteristik: $1 + G_c(s)G(s) = 0$

$$1 + \frac{KK_c e^{-t_0s}}{ts+1} = 0$$

Substitusi aproksimasi Pade:

$$1 + \frac{KK_c(1 - \frac{1}{2}t_0s)}{(ts+1)(1 + \frac{1}{2}t_0s)} = 0$$

Penghilangan fraksi:

$$t^2s^2 + (t_0 - ct_0)s + 1 + KK_c = 0$$

Substitusi: $s = i\omega_u$

$$t^2\omega_u^2 + (t_0 - ct_0)i\omega_u + 1 + KK_c = 0$$

$$(-t\omega_u^2 + 1 + KK_c) + i(t_0 - ct_0)\omega_u = 0$$

Pengaturan kembali:

$$(KK_c)_u = 1 + 2\left(\frac{t}{t_0}\right)$$

$$\omega_u = \frac{2}{t_0} \sqrt{\frac{t_0}{t} + 1}$$

Rangkuman pengaruh variasi parameter lup secara umum:

1. Stabilitas mengadakan batasan pada gain lup keseluruhan, sedemikian rupa hingga kenaikan gain control valve, transmitter, atau proses, menghasilkan penurunan pada gain kontroler ultimate.
2. Kenaikan dead-time atau konstanta waktu non-dominan (lebih kecil) dari lup menghasilkan penurunan gain lup ultimate dan frekuensi ultimate.
3. Kenaikan pada konstanta waktu dominan (lebih besar) dari lup menghasilkan kenaikan pada gain lup ultimate dan penurunan pada frekuensi ultimate lup.

6.2 TUNING KONTROLER BERUMPAN-BALIK

TUNING: prosedur menyetel parameter kontroler berumpun-balik untuk mendapatkan respon lup tertutup yang ditentukan.

Perbandingan: menyetel TV. Makin banyak parameter yang disetel, makin sulit.

- ❖ Tuning P/I saja ⇒ volume
- ❖ Tuning PI ⇒ kontras dan terang pada BW TV
- ❖ Tuning PID ⇒ intensitas sinar hijau, merah, dan biru

6.2.1 Quarter Decay Ratio Response by Ultimate Gain

Pelopor: Ziegler dan Nichols (1942) ⇒ disebut pula metode Ziegler-Nichols (ZN-method).

Ada 2 tahap:

1. Menentukan karakteristik dinamik lup kontrol.
2. Mengestimasi parameter kontroler yang disetel yang menghasilkan respon yang diinginkan untuk karakteristik dinamik yang ditentukan pada tahap pertama.

Karakteristik dinamik dari proses:

- Ultimate gain
- Ultimate period

Langkah-langkah eksperimennya:

1. Set kontroler agar hanya P saja (meng-off-kan integral, atau set t_I pada harga maksimum/minimum, dan t_D nol).
2. Set otomatis, naikkan PB sampai terjadi amplitudo yang tetap. Catat harga PB (K_{cu}). Tahap ini harus dilakukan pada inkremen gain yang berlainan, menabrak sistem dengan mengaplikasikan perubahan set point yang kecil pada tiap gain yang diset. Kenaikan gain seharusnya lebih kecil sehingga K_{cu} dapat diperoleh.
3. Dari catatan waktu variabel yang dikontrol, periode osilasi diukur dan dicatat sebagai T_u .

Rumus ZN-method bisa dilihat pada Tabel 6.2.

Tabel 6.2 Rumus Quarter Decay Tuning

Tipe Kontroler	Proportional gain, K_c	Integral time, t_I	Derivative time, t_D
Proporsional saja	$K_c/2$	-	-
Proporsional-Integral	$K_c/2,2$	$T_u/1,2$	-
Proporsional-Integral-Derivatif	$K_c/1,7$	$T_u/2$	$T_u/8$

Perubahan step pada set point tidak disukai karena menyebabkan overshoot 50%. Biasanya perubahan dilakukan pada disturbance karena bisa mencegah deviasi awal yang besar dari set point tanpa osilasi.

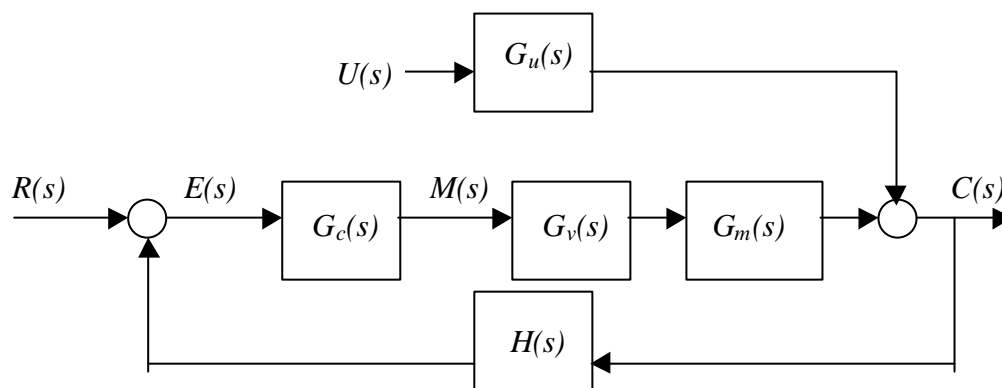
Kesulitan: perolehan parameter yang disetel tidak unik (tunggal), kecuali untuk kasus kontroler P. Pada kasus kontroler PI, tiap harga t_I akan diperoleh harga gain yang akan menghasilkan quarter decay ratio response. Begitu pula untuk kasus kontroler PID.

Penyetelan dengan ZN-method hitungan lapangan bola yang menghasilkan respon cepat untuk kebanyakan lup industri.

6.2.2 Karakterisasi Proses

ZN-method adalah satu-satunya yang mengkarakterisasi proses dengan menggunakan ultimate gain dan ultimate period. Metode lainnya menggunakan model orde-satu (atau orde-dua) yang sederhana dengan dead-time.

Langkah-langkahnya:



Gambar 6.6 Diagram blok lup berumpan-balik

$R(s)$ TL sinyal set point

$M(s)$ TL sinyal keluaran kontroler

$C(s)$ TL sinyal keluaran transmitter

$E(s)$ TL sinyal error

$U(s)$ TL sinyal disturbance

$G_c(s)$ fungsi alih kontroler

$G_v(s)$ fungsi alih control valve

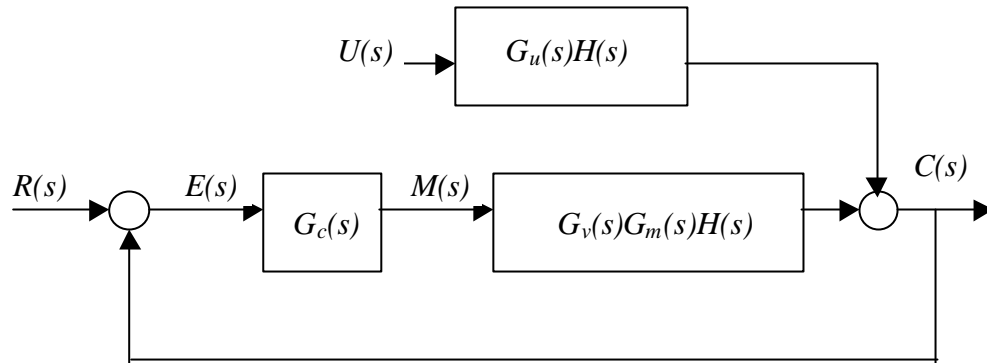
$G_m(s)$ fungsi alih proses antara cont. & man. variable

$G_u(s)$ fungsi alih proses antara cont. var. & disturbance

$H(s)$ fungsi alih sensor-transmitter

Bentuk sederhana: penggabungan fungsi alih control valve, proses dan sensor-transmitter dalam satu blok. Ini jelas tidak tepat, tapi secara praktek perlu.

Keuntungan: bentuk sederhana menyoroti dua sinyal yang biasanya diobservasi dan dicatat



Gambar 6.7 Diagram blok hasil penyederhanaan

Dua model yang digunakan untuk mengkarakterisasi proses:

Model First-Order Plus Dead-Time (FOPDT)

$$G(s) = \frac{Ke^{-t_0s}}{ts + 1}$$

Model Second-Order Plus Dead-Time (SOPDT)

$$G(s) = \frac{Ke^{-t_0s}}{(t_1s + 1)(t_2s + 1)}$$

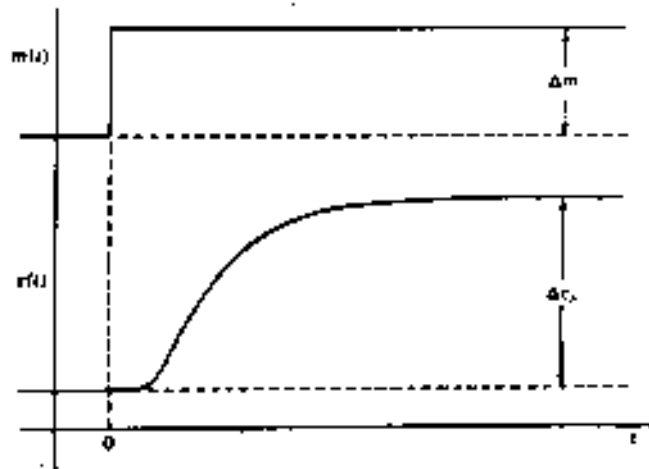
$$G(s) = \frac{Ke^{-t_0s}}{t^2s^2 + 2xts + 1}$$

6.2.3 Process Step Testing

Prosedur:

1. Kontroler disetel manual, perubahan step yang cukup besar pada sinyal keluaran kontroler $m(t)$ (MV-manipulated variable) dilakukan.
2. Respon sinyal keluaran transmitter $c(t)$ dicatat pada (kertas) recorder. Hasil plot $c(t)$ terhadap waktu (disebut *process reaction curve*, Gambar 6.8) harus meliputi seluruh test dari awal hingga mencapai kestabilan baru.

Yang menjadi pertanyaan: apakah tidak ada gangguan selama test berlangsung?

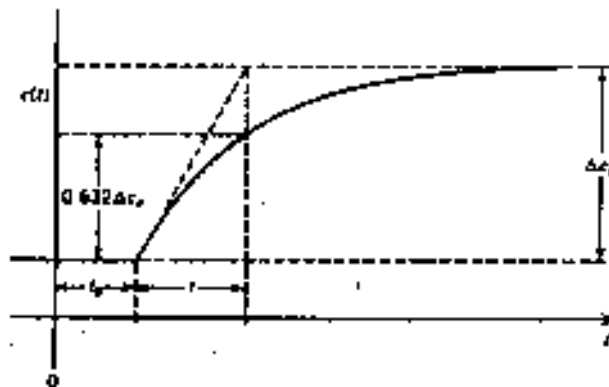


Gambar 6.8

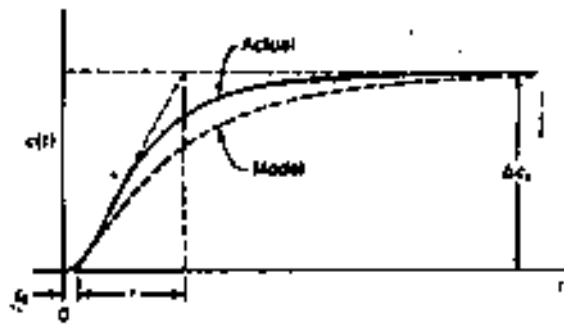
$$K = \frac{\Delta c_s}{\Delta m}$$

Untuk mencari t_0 dan t ada 3 metode:

Fit 1. Untuk garis perubahan maksimum memotong harga awal $t = t_0$ dan harga akhir $t = t_0 + t$ (Gambar 6.9). Modelnya ternyata tidak pas benar (lihat Gambar 6.10a).

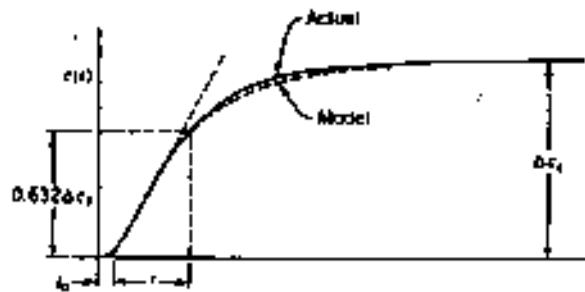


Gambar 6.9



Gambar 6.10a

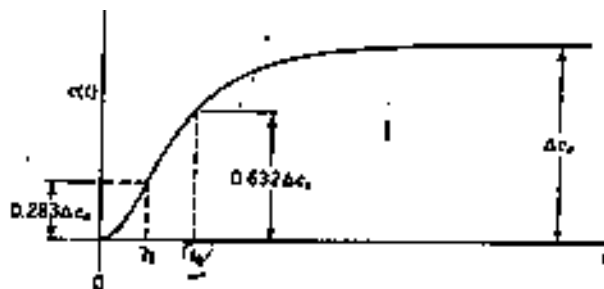
Fit 2. Seperti Fit 1, hanya t didasarkan pada $0,632\Delta c_s$ (lihat Gambar 6.10b).



Gambar 6.10b

Fit 3. Mencari t_1 pada $0,283\Delta c_s$ dan t_2 pada $0,632\Delta c_s$, sehingga didapat:

$$t = 3/2 (t_2 - t_1) \text{ dan } t_0 = t_2 - t$$



Gambar 6.10c

Perkiraan kasar untuk aproksimasi pertama :

Jika satu konstanta waktu model orde-tinggi lebih besar dari pada lainnya, maka konstanta waktu efektif FOPDT sama dengan konstanta waktu terlama/terbesar. Dead-time efektifnya adalah jumlah seluruh konstanta waktu yang lebih kecil plus dead-time model orde-tinggi.

Contoh:

Perkirakan parameter-parameter FOPDT untuk lup kontrol suhu dari HE pada Gambar 6.3. Kombinasi fungsi alih untuk control valve, exchanger, dan sensor-transmitter:

$$G(s) = \frac{1}{10s+1} \cdot \frac{50}{30s+1} \cdot \frac{0,016}{3s+1}$$

$$K = 0,8$$

JAWAB:

Asumsi: 30 detik adalah konstanta waktu yang lebih besar dari pada kedua lainnya, sehingga:

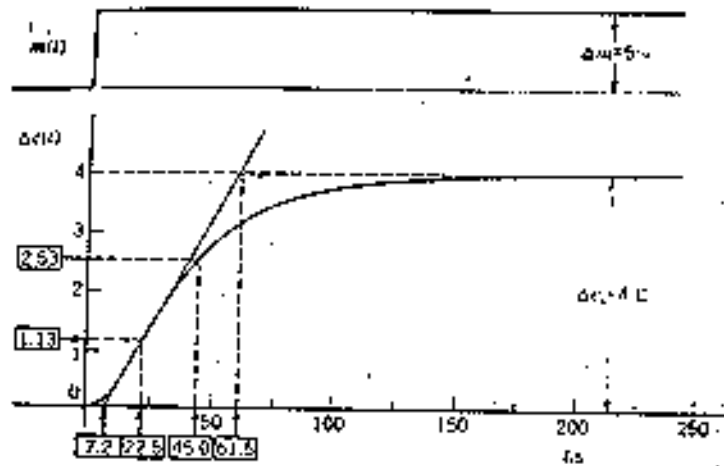
$$t = 30 \text{ detik}$$

$$t_0 = 10 + 3 = 13 \text{ detik}$$

Perkiraan kasar:

$$G(s) = \frac{0,8e^{-13s}}{30s+1} \quad (\text{Model A})$$

Gambar 6.11 adalah hasil simulasi tiga lag orde-satu pada komputer analog desktop.



Gambar 6.11 Kurva reaksi proses

Process gain:
$$K = \frac{\Delta c}{\Delta m} = \frac{4C}{5\%} \cdot \frac{100\%}{(150-50)C} = 0,80\% / \%$$

Fit 1:

$$t_0 = 7,2 \text{ s} \qquad t_3 = 61,3 \text{ s}$$

$$t = 61,5 - 7,2 = 54,3$$

$$G(s) = \frac{0,8e^{-7,2s}}{54,3s+1} \qquad \text{(Model B)}$$

Fit 2:

$$t_0 = 7,2 \text{ s}$$

Pada $Dc(t) = 0,632(4C) = 2,53C$ $t_2 = 45 \text{ s}$

$$t = 45 - 7,2 = 37,8 \text{ s}$$

$$G(s) = \frac{0,8e^{-7,2s}}{37,8s+1} \qquad \text{(Model C)}$$

Fit 3:

Pada $Dc(t) = 0,283(4C) = 1,13C$ $t_1 = 22,5 \text{ s}$

$$t = 3/2(t_2 - t_1) = 3/2(45 - 22,5) = 33,8 \text{ s}$$

$$t_0 = 45 - 33,8 = 11,2 \text{ s}$$

$$G(s) = \frac{0,8e^{-11,2s}}{33,8s+1} \qquad \text{(Model D)}$$

Model	A(kasar)	B(Fit 1)	C(Fit 2)	D(Fit 3)
t_0 , detik	13,0	7,2	7,2	11,2
t , detik	30,0	54,3	37,8	33,8
t_0/t	0,433	0,133	0,190	0,331

6.2. 4 Quarter Decay Ratio Response (lihat Tabel 6.3)

Tabel 6.3 Tuning formulas

Type Kontroler		K_c	t_i	t_D
Proportional only	P	$\frac{1}{K} \left(\frac{t_0}{t} \right)^{-1}$	-	-
Proportional-integral	PI	$\frac{0.9}{K} \left(\frac{t_0}{t} \right)^{-1}$	$3,33t_0$	-
Proportional-integral-derivative	PID	$\frac{1,2}{K} \left(\frac{t_0}{t} \right)^{-1}$	$2t_0$	$1/2t_0$

Contoh:

Dari contoh di atas bandingkan harga parameter tuning menggunakan Tabel 6.1 dan Tabel 6.2. Harga-harga berikut ini bisa digunakan:

$$K_{cu} = 23,8 \%, T_u = 28,7 s$$

$$K = 0,8 \%, t_0 = 7,2 s \text{ dan } t = 54,3 s \text{ (Fit 1)}$$

JAWAB:

On-line Tuning (Tabel 6.1)	Process Reaction Curve (Tabel 6.2)
Proporsional saja $K_c = 23,8 / 2,2 = 10,8 \text{ \%/\%}$	$K_c = \frac{1}{0,8} \left(\frac{7,2}{54,3} \right)^{-1} = 9,4\% / \%$
Proporsional-integral $K_c = 23,8 / 2,2 = 10,8 \text{ \%/\%}$ $t_I = 28,7 / 1,2 = 23,9 \text{ detik}$	$K_c = \frac{0,9}{0,8} \left(\frac{7,2}{54,3} \right)^{-1} = 8,5\% / \%$ $t_I = 3,33 (7,2) = 24,0 \text{ detik}$
Proporsional-integral-derivatif $K_c = 23,8 / 1,7 = 14 \text{ \%/\%}$ $t_I = 28,7 / 2 = 14,3 \text{ detik}$ $t_D = 28,7 / 8 = 3,6 \text{ detik}$	$K_c = \frac{1,2}{0,8} \left(\frac{7,2}{54,3} \right)^{-1} = 11,3\% / \%$ $t_I = 2,0 (7,2) = 14,4 \text{ detik}$ $t_D = 0,5 (7,2) = 3,6 \text{ detik}$