

SISTEM KENDALI UMPAN-BALIK (FEEDBACK CONTROL) MENGGUNAKAN TEKNIK PENGENDALIAN PID (PROPORSIONAL-INTEGRAL-DERIVATIF)

A.Y. Erwin Dodu¹

¹Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Tadulako

Jl. Sukarno-Hatta Palu, Indonesia 94118, Tlp. 085241263284

Abstrak

Umpan-balik merupakan mekanisme pengaturan terhadap suatu sistem fisik yang dilakukan sedemikian rupa sehingga mekanisme ini berusaha untuk mempertahankan keadaan tertentu dari sistem yang dikendalikan. Umpan-balik bekerja dengan cara mengukur keadaan aktual sistem fisik dan menentukan sejauh mana keadaan tersebut menyimpang dari keadaan yang diinginkan. Hasil pengukuran ini kemudian digunakan untuk menghasilkan sinyal kendali yang akan dipakai untuk membawa sistem ke keadaan yang diinginkan. Salah satu teknik pengendalian umpan-balik yang cukup banyak digunakan dewasa ini adalah teknik pengendalian PID.

Kata-Kata Kunci: sistem kendali umpan-balik, pengendalian PID.

I. PENDAHULUAN

Penerapan sistem kendali umpan-balik saat ini cukup luas ditemui pada dunia keteknikan. Beberapa contoh aplikasinya adalah pada sensor pengukuran suhu dan kelembaban ruangan, pengendalian kecepatan mobil secara otomatis, penyedia daya dengan respon yang cepat, penguat operasional, mikroskop gaya atom, jam atomik dan lain sebagainya. Sistem ini cenderung menjaga hubungan yang telah ditentukan antara keluaran dan masukan acuan dengan membandingkannya dan menggunakan selisihnya sebagai alat pengendalian. Sistem kendali umpan-balik tidak hanya ditemukan pada bidang teknik, tetapi dapat dijumpai juga pada berbagai bidang non-teknik seperti ekonomi dan biologi. Sebagai contoh organisme manusia, pada satu segi, mirip dengan '*plant*' kimia yang kompleks dengan bermacam-macam unit operasi. Pengendalian proses dari jaringan transportasi dan reaksi kimia ini memerlukan lup pengendalian. Sesungguhnya organisme manusia adalah sebuah sistem kendali umpan-balik yang sangat kompleks.

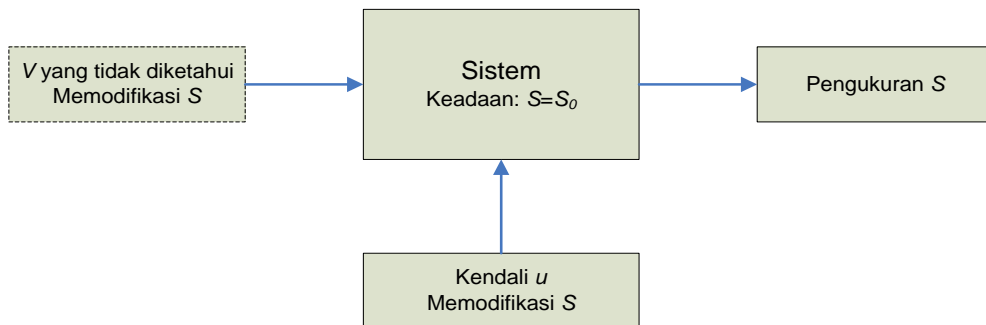
Sistem kendali umpan-balik merupakan sistem kendali lup tertutup, dimana sinyal kesalahan penggerak yang merupakan selisih antara sinyal masukan dan sinyal umpan-balik (yang dapat berupa sinyal keluaran atau suatu fungsi sinyal keluaran dan turunannya) diumpangkan ke pengendali untuk memperkecil kesalahan dan membuat keluaran sistem mendekati harga yang diinginkan.

II. SISTEM KENDALI UMPAN-BALIK

II.1. Sistem

Suatu sistem sederhana dicirikan oleh sebuah variabel tunggal S . Pada kondisi normal, sistem mempunyai nilai keadaan tunak $S=S_0$ yang bisa bervariasi sepanjang waktu diakibatkan

adanya variasi lingkungan sekitar v yang tidak terukur dan tidak terduga. Suatu hal yang bisa dilakukan adalah mengadakan pengukuran keadaan (*state*) S sistem serta melakukan pemodifikasian keadaan tersebut dengan menggunakan input kendali u . Kesimpulannya, sebuah sistem sederhana mempunyai bentuk fungsi $S(u,v;t)$. Akan dibuat asumsi akhir bahwa S adalah suatu fungsi monotonik dengan u berada di persekitaran S_0 (yaitu bahwa grafik S vs u tidak mempunyai suatu maksima atau minima dan bahwa dS/du bisa selalu positif atau selalu negatif). Gambar 1 menunjukkan suatu skema konsep hubungan antara sistem, variabel u dan v , dan pengukuran keadaan sistem S .



Gambar 1. Skema konsep sistem

II.2. Tujuan

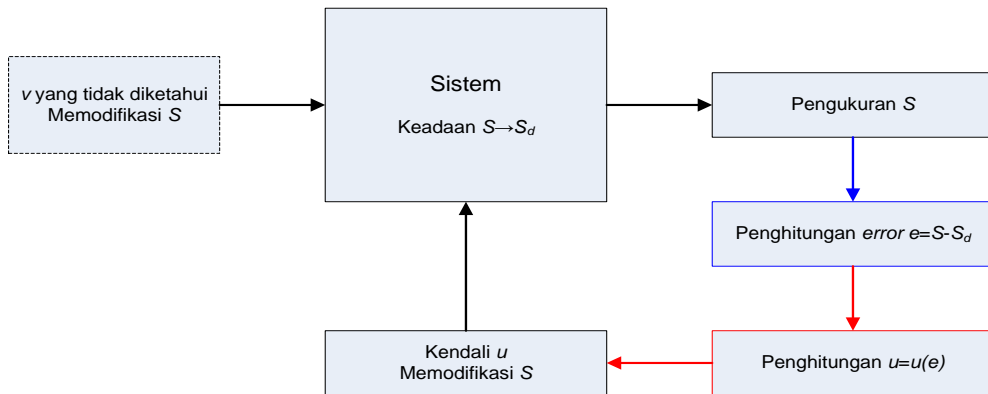
Tujuan pengendalian umpan-balik adalah mensestabilkan atau mengunci keadaan sistem ke nilai yang diinginkan $S=S_d$ dan tetap mempertahankan nilai tersebut tanpa membiarkannya berubah terhadap waktu meskipun terdapat variasi pada variabel lingkungan v .

II.3. Model Kendali Umpan-Balik

Keadaan sistem S akan diset atau dikunci ke $S=S_d$ dengan prosedur sebagai berikut:

1. Ukur keadaan S dari sistem.
2. Tentukan sejauh mana sistem menyimpang dari *set point* yang diinginkan dengan mendefinisikan variabel *error*, $e = S - S_d$.
3. Hitung nilai sinyal kendali *trial* $u = u(e)$.
4. Umpankan kembali sinyal kendali $u(e)$ yang telah dihitung ke masukan kendali sistem.
5. Keadaan sistem berubah sebagai tanggapan terhadap perubahan nilai kendali.
6. Kembali ke langkah 1.

Gambar 2 menunjukkan skema konseptual sistem dengan lup umpan-balik. Jika siklus prosedur kendali umpan-balik diulang terus-menerus dengan penghitungan nilai kendali $u(e)$ yang tepat maka sistem akan konvergen ke keadaan $S=S_d$ dan tetap berada pada keadaan tersebut meskipun terdapat perubahan dari variabel lain yang seharusnya mempengaruhi nilai keadaan S .



Gambar 2. Skema konsep sistem dengan lup umpan-balik

III. KENDALI UMPAN-BALIK PID

Jenis kendali stabilisasi umpan-balik, $u(e)$, yang paling terkenal adalah umpan-balik bati (*gain*) Proporsional-Integral-Derivatif (PID). PID merupakan teknik pengendalian yang sangat efektif dan mudah diimplementasikan. Ekspresi untuk $u(e)$ hanya tergantung pada sinyal *error* $e=S-S_d$ yaitu:

$$u(e;t) = g_P e(t) + g_I \int_0^t e(t) dt + g_D \frac{d}{dt} e(t) \tag{1}$$

dengan g_P , g_I dan g_D berturut-turut adalah bati proporsional, integral dan derivatif. g_P , g_I dan g_D ini tidak mempunyai satuan yang sama. Untuk menyederhanakan analisis maka dibuat asumsi bahwa g_P tidak berdimensi sehingga $u(e)$ mempunyai satuan yang sama dengan S .

III.1. Evolusi Waktu Sistem dengan Kendali Umpan-Balik

Sekarang akan dilakukan perhitungan evolusi waktu sistem dibawah pengaruh umpan-balik. Tanpa umpan-balik, sistem akan tetap pada keadaan S_0 :

$$S_{\text{tanpa umpan-balik}}(t) = S_0 \tag{2}$$

Dengan kehadiran umpan-balik, keadaan sistem pada waktu $t+\Delta t$ (langkah 5) tergantung pada keadaan sistem tanpa umpan-balik, S_0 , yang telah dimodifikasi oleh variabel masukan kendali $u(e)$. Kemudian dilakukan asumsi penyederhanaan berikut bahwa variabel masukan kendali, $u(e)$, “mengendalikan” atau memodifikasi keadaan sistem S melalui proses penjumlahan. Dalam kasus ini, variabel keadaan sistem S mempunyai persamaan berikut:

$$S(t + \Delta t) = S_0 + u(e;t) \tag{3}$$

Persamaan ini dapat diubah ke persamaan integro-diferensial jika dianggap bahwa sistem mempunyai suatu karakteristik waktu respon τ kecil. Pada kasus ini, persamaan (3) menjadi:

$$S(t) + \tau \frac{d}{dt} S(t) = S_0 + g_P e(t) + g_I \int_0^t e(t) dt + g_D \frac{d}{dt} e(t) \tag{4}$$

III.2. Kasus Khusus: Umpan-Balik Bati Proporsional Murni

Terdapat suatu kasus khusus dimana hanya ada umpan-balik bati proporsional murni ($g_I = 0$ dan $g_D = 0$). Kasus ini akan dianalisis sebab merupakan dasar untuk umpan-balik penguat operasional (op-amp) dan juga merupakan bentuk sederhana dari teknik umpan-balik. Untuk $g_I = 0$ dan $g_D = 0$, persamaan (4) menjadi:

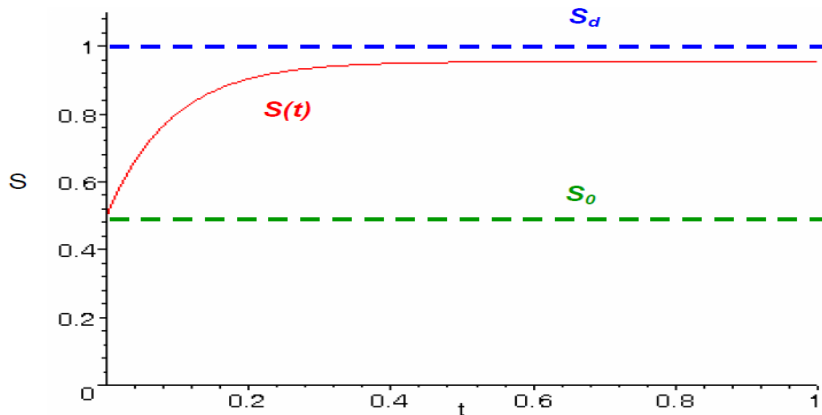
$$S(t) + \tau \frac{d}{dt} S(t) = S_0 + g_p e(t) \tag{5}$$

Persamaan diferensial orde ke-1 di atas dapat diselesaikan dengan mengaggap kondisi awal $S(t = 0) = S_0$. Setelah melakukan sedikit pengintegrasian dan menerapkan operasi aljabar akan didapatkan penyelesaian berikut:

$$S(t) = \left(S_0 - \frac{S_0 - g_p S_d}{1 - g_p} \right) e^{-\left(\frac{1 - g_p}{\tau}\right)t} + \frac{S_0 - g_p S_d}{1 - g_p} \tag{6}$$

Persamaan (6) menunjukkan bahwa sistem akan konvergen ke keadaan $S = (S_0 - g_p S_d) / (1 - g_p)$ bila kendali umpan-balik diterapkan sepanjang eksponen eksponensial negatif ($g_p < 1$). Selain dari itu, S akan divergen. Diketahui bahwa $g_p < 0$ berhubungan dengan umpan-balik negatif.

Gambar 3 menunjukkan tanggapan sistem untuk bati tanpa dimensi $g_p = -10$ serta nilai keadaan $S_0 = 0,5$ dan $S_d = 1$ dengan waktu diukur dalam satuan τ (waktu tanggapan karakteristik sistem).



Gambar 3. Tanggapan sistem dengan kendali umpan-balik bati proporsional murni dan parameter $g_p = -10$, $S_0 = 0,5$ dan $S_d = 1$. Waktu diukur dalam satuan τ .

Dari gambar 3 terlihat jelas bahwa sistem tidak dapat dibuat konvergen ke keadaan yang diinginkan $S = S_d$ yaitu bahwa secara relatif sistem tidak mencapai nilai keadaan tunak dengan cepat. Jika diterapkan nilai umpan-balik negatif maka berdasarkan persamaan (6) sistem akan konvergen ke nilai keadaan tunak (*steady state*) S_{ss}

$$S_{ss} = \frac{S_0 - g_p S_d}{1 - g_p} \tag{7}$$

Persamaan (7) mengindikasikan bahwa sistem bisa dibuat konvergen ke nilai keadaan tunak S_{ss} yang secara bertahap akan mendekati $S = S_d$ bila batinya dinaikkan. Kenyataannya untuk bati proporsional yang tidak terhingga ($g_p \rightarrow \infty$), sistem akan konvergen ke $S_{ss} = S_d$. Keadaan ini merupakan batas operasi umpan-balik penguat operasional.

III.3. Penyelesaian Untuk Kendali Umpan-Balik PI (Proporsional-Integral)

Sebagian besar pengendali umpan-balik PID biasanya hanya berupa pengendali PI (terdiri dari bati proporsional dan integral tanpa bati derivatif) dan selanjutnya untuk penyederhanaan, persamaan (4) dapat ditulis tanpa menyertakan bati derivatif berikut:

$$S(t) + \tau \frac{d}{dt} S(t) = S_0 + g_p e(t) + g_I \int_0^t e(t) dt \tag{8}$$

Suatu persamaan integral-diferensial seperti persamaan (8) dapat diubah menjadi persamaan diferensial linear orde ke-2 koefisien konstan dengan mendiferensialkan persamaan tersebut terhadap waktu sehingga didapatkan:

$$\frac{d}{dt} S + \tau \frac{d^2}{dt^2} S = g_p \frac{d}{dt} S + g_I S - g_I S_d \tag{9}$$

dimana telah dilakukan substitusi $e(t) = S - S_d$. Setelah menggabungkan bagian yang sama maka persamaan (9) menjadi:

$$\tau \frac{d^2}{dt^2} S + (1 - g_p) \frac{d}{dt} S - g_I S = -g_I S_d \tag{10}$$

Persamaan (10) merupakan suatu persamaan diferensial orde ke-2 tidak homogen koefisien konstan. Penyelesaian lengkap untuk persamaan (7) diberikan oleh:

$$S(t) = A_+ e^{\lambda_+ t} + A_- e^{\lambda_- t} + S_d \tag{11}$$

$$\lambda_{\pm} = \frac{(g_p - 1) \pm \sqrt{(g_p - 1)^2 + 4g_I \tau}}{2\tau} \tag{11a}$$

Dua bagian pertama dari persamaan (11) menggambarkan penyelesaian homogen terhadap persamaan (10) sedangkan bagian ketiga merupakan penyelesaian tidak homogen (tidak tergantung pada syarat awal). A_+ dan A_- merupakan konstanta yang ditentukan dari syarat-syarat awal.

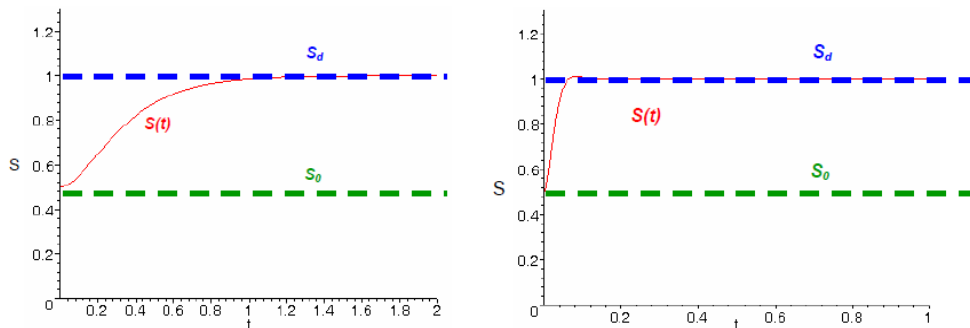
Persamaan (11) menunjukkan bahwa sistem akan konvergen ke keadaan $S = S_d$ bila kendali umpan-balik diterapkan sepanjang λ_+ dan λ_- negatif (umpan-balik negatif). Jika diterapkan sebaliknya maka S akan divergen (hasilnya berlawanan dengan jika diterapkan umpan-balik).

Jika dipilih $S(t=0) = S_0$ dan $dS(t=0)/dt = 0$ pada syarat awal maka dengan menerapkan penyelesaian aljabar dapat dihitung konstanta A_+ dan A_- sebagai berikut:

$$A_+ = - \left(\frac{\lambda_-}{\lambda_- - \lambda_+} \right) (S_d - S_0) \tag{12a}$$

$$A_- = \left(\frac{\lambda_+}{\lambda_- - \lambda_+} \right) (S_d - S_0) \tag{12b}$$

Pada gambar 4 tingkah laku sistem dibawah kendali umpan-balik PI digambarkan untuk beberapa konfigurasi parameter yang berbeda.



Gambar 4. Evolusi waktu suatu sistem buatan dengan kendali umpan-balik PI untuk $S_0 = 0,5$ dan $S_d = 1$. Untuk gambar di sebelah kiri, parameter batinya adalah $g_p = -10$, $g_I = -30$ sedangkan untuk gambar di sebelah kanan parameter batinya adalah $g_p = -100$, $g_I = -4000$. *Overshoot* kecil pada gambar di sebelah kiri diakibatkan oleh bagian imajiner kecil dalam persamaan eksponen eksponensial (11a).

Kegunaan utama dari bati integral adalah memberikan bati DC (0 Hz) tidak terHINGGA yang menjamin $S_{ss} = S_d$ seperti terlihat pada gambar 4. Gambar 4 juga menunjukkan bahwa semakin besar bati maka semakin cepat waktu koreksi lup kendali umpan-balik.

IV. KESIMPULAN

Kendali umpan-balik merupakan sistem pengendalian yang bisa digunakan untuk memperbaiki performansi suatu sistem dinamis karena terdapat mekanisme umpan-balik dari kondisi aktual (keluaran sistem) ke keadaan yang diinginkan (masukan sistem) sehingga didapatkan *error* yang bisa digunakan untuk mengarahkan kondisi aktual menuju ke keadaan yang diinginkan. Penggunaan PID pada sistem kendali umpan-balik akan semakin mempercepat waktu tanggapan sistem.

V. DAFTAR PUSTAKA

1. Dorf, R.,C., Bishop, R.,H., 2001, "*Modern Control System*", Prentice-Hall International, edisi ke-9, New Jersey.
2. Franklin, G.,F., Powell, J.,D., 1980, "*Digital Control of Dynamic System*", Addison-Wesley Publishing Company.
3. Kirk, D.,E., 1970, "*Optimal Control Theory An Introduction*", Prentice-Hall Inc., New Jersey.
4. Ogata, K., 1993, "*Teknik Kontrol Automatik (Sistem Pengaturan)*", Penerbit Erlangga, cetakan ke-5, Jakarta.