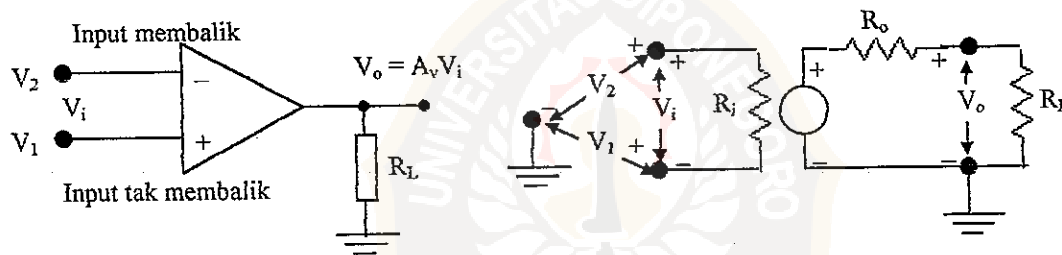


BAB II

DASAR TEORI

2.1. Penguat Operasional Dasar

Penguat operasional (*operational amplifier*, op-amp) adalah suatu penguat gandengan langsung dan bati (*gain*) tinggi yang dilengkapi dengan umpan balik untuk mengendalikan karakteristik tanggapannya secara menyeluruh. Penggunaan op-amp mempunyai keuntungan yang dimiliki suatu rangkaian terpadu monolitik yaitu : ukuran kecil, keandalan tinggi, hemat biaya, stabil terhadap perubahan suhu dan mempunyai penyimpangan tegangan serta offset arus yang rendah.



Gambar 2.1 Penguat operasional dasar

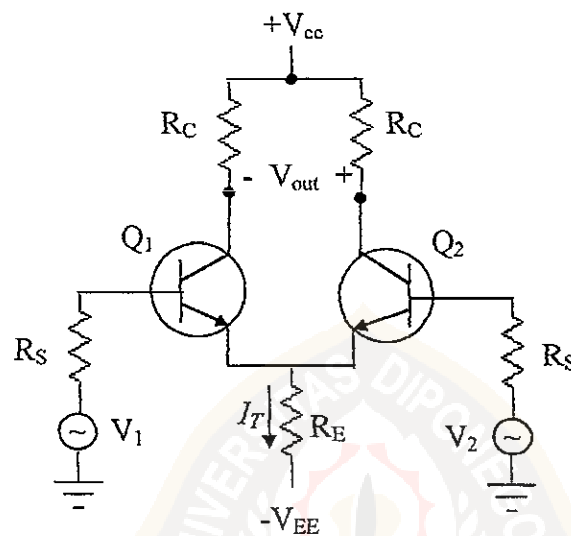
Suatu op-amp ideal mempunyai karakteristik-karakteristik sebagai berikut :

(Millman,1993)

1. hambatan input $R_i = \infty$
2. hambatan output $R_o = 0$
3. bati tegangan $A_v = \infty$
4. lebar pita $= \infty$
5. keseimbangan sempurna : $V_o = 0$ bila $V_1 = V_2$
6. karakteristik tidak berubah terhadap suhu.

2.1.1. Penguat Diferensial

Penguat diferensial banyak sekali dipakai dalam IC linier. Sebuah penguat diferensial tidak menggunakan kapasitor kopling atau *by pass*, semua yang diperlukan adalah resistor dan transistor, keduanya mudah diintegrasikan dalam sebuah *chip*.



Gambar 2.2 Penguat diferensial

Gambar 2.2 menunjukkan bentuk dasar dari penguat diferensial. Ada dua sinyal input dan satu sinyal output. Sinyal output adalah tegangan antara kolektor-kolektor. Secara ideal rangkaian tersebut simetris, tiap paruhan identik dengan paruhan lainnya. Penguat diferensial terdiri dari sepasang transistor yang identik yang dihubungkan ke resistor emitor bersama. Arus yang melalui resistor bersama dikenal sebagai arus ekor (*tail current*) atau I_T .

Penguat diferensial dalam gambar 2.2 menggunakan bias emiter dan puncak dari resistor emitor adalah mendekati titik tanah. Karena pertanahan hampir seluruh tegangan catu V_{EE} muncul antara R_E , maka arus ekor dc adalah

$$I_T \cong \frac{V_{EE}}{R_E} \quad (2.1)$$

Jika kedua transistor identik, arus ekor terbagi sama di antaranya, yaitu arus emiter dc dalam tiap transistor adalah setengah dari arus ekor.

$$I_E = \frac{I_T}{2} \quad (2.2)$$

dan secara pendekatan I_C sama dengan I_E :

$$I_C \cong I_E \quad (2.3)$$

Dalam gambar tegangan dc dari kolektor Q_1 ke tanah sama dengan tegangan catu V_{CC} dikurangi penurunan tegangan pada resistor kolektor, yaitu :

$$V_{C1} = V_{CC} - I_C R_C \quad (2.4)$$

Demikian juga tegangan dc dari kolektor Q_2 ke tanah adalah

$$V_{C2} = V_{CC} - I_C R_C \quad (2.5)$$

Jika resistor dari transistor dan kolektor identik, V_{C1} sama dengan V_{C2} , jadi di antara kolektor tidak ada tegangan atau tegangan output dc adalah nol.

Dalam penguat diferensial pada gambar 2.2, tegangan output dapat menggerakkan tingkat lainnya, sebuah penguat diferensial. V_1 yang bekerja sendiri menimbulkan tegangan output positif, sehingga V_1 disebut input *non-inverting*. Sedangkan V_2 positif yang bekerja sendiri menimbulkan tegangan output negatif, sehingga disebut input *inverting*.

Jika sebuah input diferensial V_{in} adalah perbedaan dari V_1 dan V_2 atau

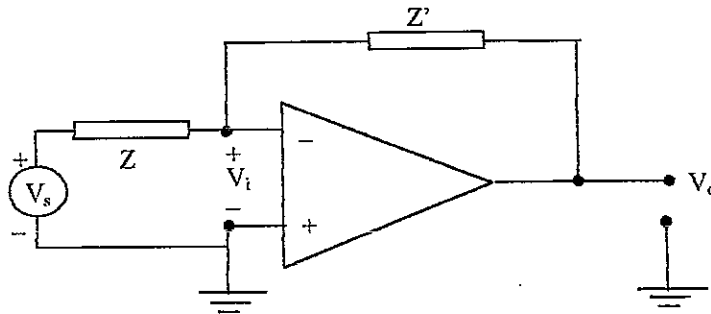
$$V_{in} = V_1 - V_2 \quad (2.6)$$

dan nilai outputnya adalah

$$V_{out} = A(V_1 - V_2) \quad (2.7)$$

(Malvino, 1994).

2.1.2. Penguat Operasional Membalik (*Inverting*)



Gambar 2.3 Op-amp membalik

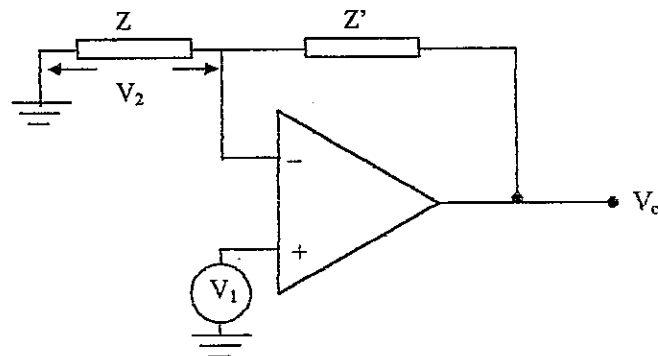
Rangkaian di atas mempunyai penguatan sebesar :

$$A = \frac{V_o}{V_s} = \frac{-IZ'}{IZ} = -\frac{Z'}{Z} \quad (2.8)$$

Tanda minus (-) dalam persamaan di atas menunjukkan bahwa bila tegangan input positif, tegangan output akan negatif dan sebaliknya. Dengan kata lain, polaritas sinyal output berlawanan dengan inputnya atau output berbeda fase sebesar 180° dengan inputnya (Howard, 1986).

Pada input penguat terdapat suatu titik tegangan tanah semu (*virtual ground*) atau suatu hubungan pendek yang berarti bahwa walaupun umpan balik dari output ke input melalui Z' berfungsi untuk mempertahankan tegangan V_i pada tingkat nol, namun sesungguhnya tidak ada arus yang mengalir ke dalam tanah tersebut (Millman, 1993).

2.1.3. Penguat Operasional Tak Membalik (*Noninverting*)



Gambar 2.4 Op-amp tak membalik

Dengan menganggap penguat operasional ideal dengan bati tak hingga, suatu hubungan singkat semu terdapat antara kedua input, karena itu perbedaan sinyal input adalah : $V_2 - V_1 = \frac{V_o}{A_v} = 0$. Maka tegangan pada input membalik akan sama dengan input tak membalik yaitu tegangan V_1 . Kemudian arus melalui Z adalah V_1/Z . Karena impedansi input penguat operasional tak hingga, arus ini akan mengalir melalui Z' sebagai tegangan output

$$V_o = V_1 + \left(\frac{V_1}{Z}\right)Z' \quad (2.9)$$

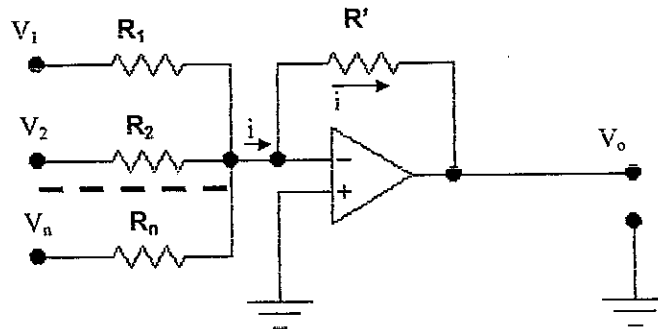
yang menghasilkan

$$A = \frac{V_o}{V_1} = 1 + \frac{Z'}{Z} \quad (2.10)$$

Karena input disuapkan ke input *noninverting* op-amp, tegangan output akan selalu sefase dengan inputnya (Smith, 1989).

2.1.4. Penguat Penjumlah (Adder)

Susunan dalam gambar 2.5 dapat digunakan untuk memperoleh output yang merupakan kombinasi linier dari sejumlah sinyal masuk.



Gambar 2.5 Rangkaian penjumlah

Karena adanya hubungan dengan tanah semu pada input op-amp, maka

$$i = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \quad (2.11)$$

dan

$$V_o = -R'i = -\left(\frac{R'}{R_1}V_1 + \frac{R'}{R_2}V_2 + \dots + \frac{R'}{R_n}V_n\right) \quad (2.12)$$

Jika $R_1 = R_2 = \dots = R_n$, maka

$$V_o = -\frac{R'}{R_1}(V_1 + V_2 + \dots + V_n) \quad (2.13)$$

Dan dengan demikian output penguat berbanding lurus dengan jumlah inputnya (Pakpahan, 1994).

2.2 Sistem Kontrol PID (Proporsional, Integral dan Diferensial)

2.2.1. Kontrol Proporsional

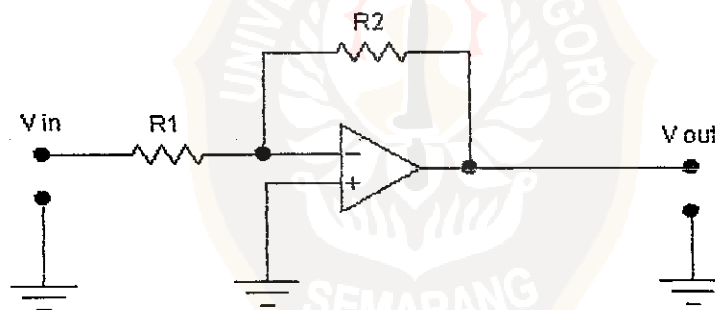
Untuk kontroler dengan aksi kontrol proporsional, hubungan antara input kontroler $u(t)$ dan sinyal pembangkit kesalahan $e(t)$ adalah

$$u(t) = K_P e(t) \quad (2.14)$$

atau dalam besaran transformasi Laplace

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \quad (2.15)$$

dengan K_P adalah suku penguatan proporsional. Kontrol proporsional pada dasarnya adalah suatu penguat dengan penguatan yang dapat diatur dengan mengubah harga K_P . Kontrol proporsional elektronik dapat digambarkan dengan rangkaian berikut :



Gambar 2.6 Rangkaian proporsional

Input melalui R_1 dan resistor pembalikannya adalah R_2 , sehingga persamaan outputnya adalah

$$u(t) = -\frac{R_2}{R_1} e(t) \quad \text{atau} \quad u(t) = -K_P e(t) \quad (2.16)$$

dengan K_P adalah konstanta proporsional yang besarnya R_2/R_1 (Jacob, 1995).

2.2.2. Kontrol Integral

Pada kontroler dengan aksi kontrol integral nilai input kontroler $u(t)$ diubah pada laju proporsional dari sinyal pembangkit kesalahan $e(t)$. Sehingga

$$\frac{du(t)}{dt} = K_I e(t) \quad (2.17)$$

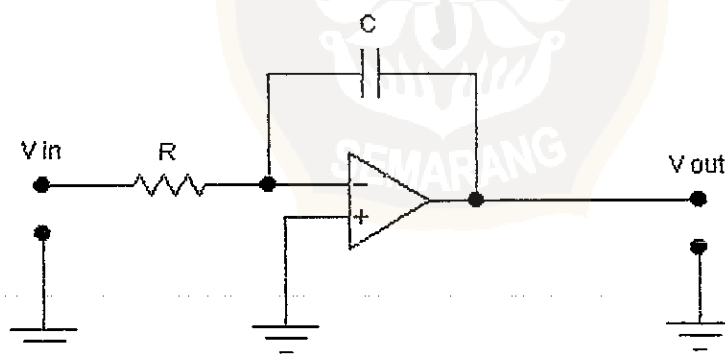
atau

$$u(t) = K_I \int_0^t e(t) dt \quad (2.18)$$

dengan K_I adalah konstanta integral yang dapat diubah. Fungsi alih dari kontroler integral adalah

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_I}{s} \quad (2.19)$$

Kontrol integral elektronik dapat digambarkan dengan rangkaian sebagai berikut :



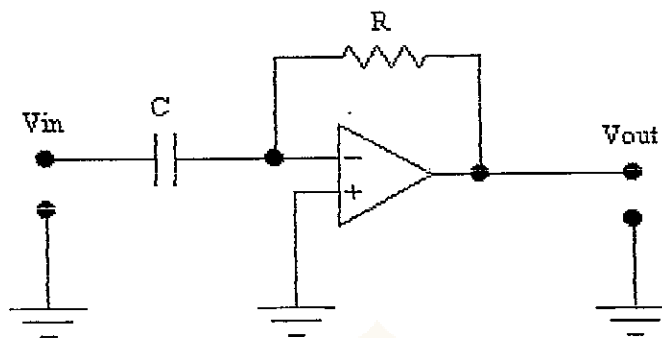
Gambar 2.7 Rangkaian kontrol integral elektronik

Output dari rangkaian integrator adalah sebanding dengan integral dari inputnya. Persamaan outputnya adalah

$$u(t) = -\int \frac{1}{RC} e(t) dt \quad \text{atau} \quad u(t) = -K_I \int e(t) dt \quad (2.20)$$

dengan K_I adalah konstanta integral yang besarnya $1/RC$ (Bolton, 1996).

2.2.3. Kontrol Diferensial



Gambar 2.8 Rangkaian diferensial

Dengan memakai kontrol diferensial perubahan output kontrol dari nilai *set point* adalah sebanding dengan perubahan nilai sinyal input terhadap waktu. Hal ini dapat dibuat persamaan sebagai berikut

$$u(t) = -RC \frac{de(t)}{dt} \quad \text{atau} \quad u(t) = -K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.21)$$

dengan K_D adalah konstanta diferensial yang besarnya RC .

Dengan menggunakan transformasi Laplace diperoleh fungsi alih sebagai berikut

$$\frac{U(s)}{E(s)} = -K_D s \quad (2.22)$$

(Bolton, 1996).

2.2.4. Kontrol Proporsional Ditambah Integral

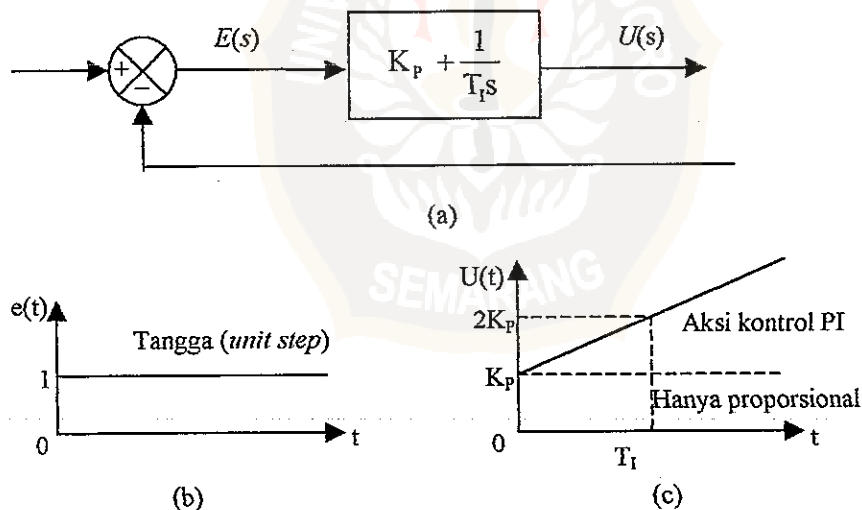
Aksi kontrol kontroler proporsional ditambah integral didefinisikan dengan persamaan berikut

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt \quad (2.23)$$

atau fungsi alih kontroler ini adalah

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{1}{T_I s} \quad (2.24)$$

dengan K_p penguatan proporsional dan T_I disebut waktu integral. Keduanya K_p dan T_I dapat ditentukan. Waktu integral mengatur aksi kontrol internal sedangkan perubahan nilai K_p berakibat pada bagian aksi kontrol proporsional maupun integral (Philips, 1998).



Gambar 2.9.(a) Diagram blok kontroler proporsional ditambah integral; (b) dan (c) Diagram input tangga satuan dan output kontroler (Ogata,1997).

2.2.5. Kontrol Proporsional Ditambah Diferensial

Aksi kontrol proporsional ditambah diferensial didefinisikan dengan persamaan berikut

$$u(t) = K_P e(t) + T_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.25)$$

dan fungsi alihnya adalah

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P + T_D s \quad (2.26)$$

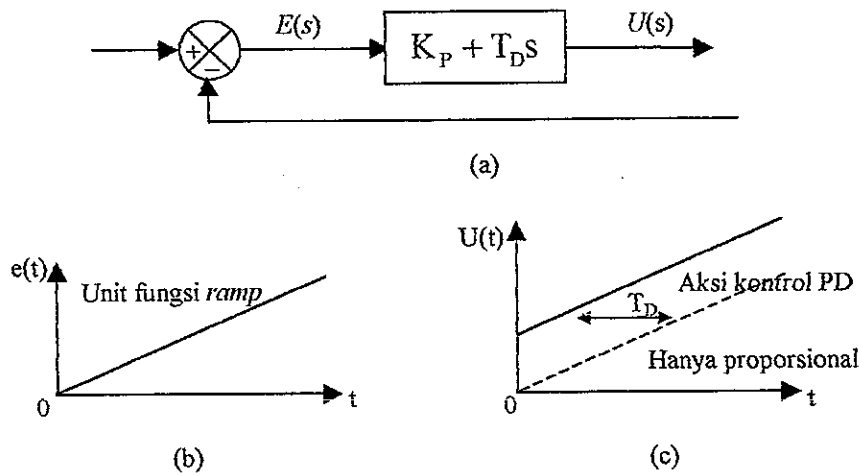
dengan K_P adalah penguatan proporsional dan T_D konstanta yang disebut waktu diferensial. K_P dan T_D keduanya dapat ditentukan. Aksi kontrol diferensial kadang-kadang disebut laju kontrol dengan besaran output kontroler proporsional ke laju perubahan sinyal pembangkit kesalahan. Waktu diferensial T_D adalah waktu interval dengan laju aksi memberikan pengaruh pada aksi kontrol proporsional. (Philips, 1998)

Satu pihak aksi kontrol mempunyai keuntungan mengantisipasi, tapi di pihak lain juga mempunyai kelemahan yaitu adanya gangguan sinyal penguatan yang dapat bercampur pada pembangkit (aktuator).

Perlu diketahui bahwa aksi kontrol diferensial tidak pernah digunakan sendiri karena aksi kontrol ini hanya efektif selama periode transient.

Gambar 2.10.(a) menunjukkan diagram blok kontroler proporsional ditambah diferensial. Jika sinyal pembangkit kesalahan $e(t)$ unit fungsi *ramp* seperti ditunjukkan pada gambar 2.10.(b), maka output kontroler menjadi seperti gambar 2.10.(c). Seperti dapat dilihat pada gambar 2.10.(c), aksi kontrol

diferensial mempunyai karakter antisipasi. Namun demikian, aksi kontrol diferensial tidak dapat mengantisipasi aksi lain yang belum pernah dilakukan.



Gambar 2.10.(a) Diagram blok kontroler proporsional ditambah diferensial; (b) dan (c) diagram yang menggambarkan input fungsi *ramp* dan outputnya (Ogata, 1997).

2.2.6. Kontrol Proporsional, Integral, Diferensial (PID)

Kombinasi dari aksi kontrol proporsional, integral dan diferensial disebut aksi kontrol proporsional, integral dan diferensial (PID). Persamaan dari tiga kombinasi ini diberikan oleh

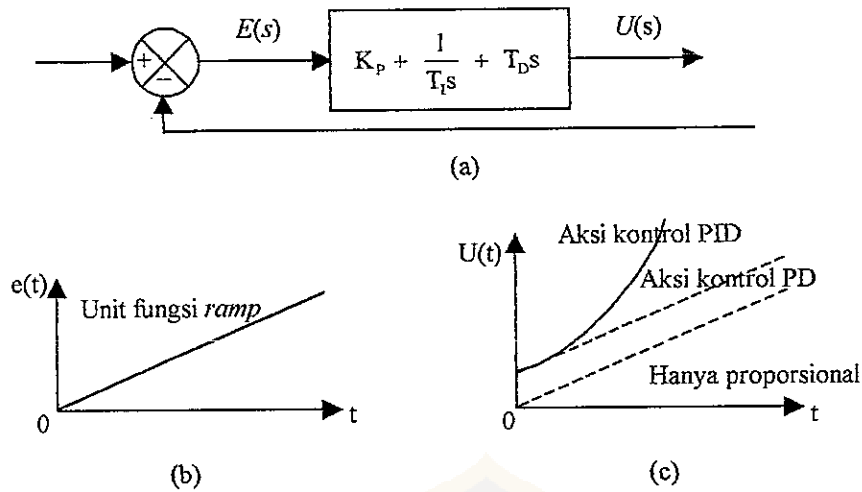
$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.27)$$

atau fungsi alihnya

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{1}{T_I s} + T_D s \quad (2.28)$$

dengan K_p penguatan proporsional, T_I waktu integral, dan T_D waktu diferensial (Philips, 1998).

Diagram blok kontroler proporsional ditambah integral ditambah diferensial ditunjukkan pada gambar 2.11.(a), jika $e(t)$ fungsi *ramp* seperti pada gambar 2.11.(b), maka output kontroler seperti pada gambar 2.11.(c).



Gambar 2.11.(a) Diagram blok kontroler proporsional ditambah integral ditambah diferensial; (b) dan (c) diagram yang menggambarkan input fungsi *ramp* dan output kontroler (Ogata, 1997).