

# TI-3222: Otomasi Sistem Produksi

## Teori dan Dasar Sistem Pengendali

Laboratorium Sistem Produksi

[www.lspitb.org](http://www.lspitb.org)

©2004



## Hasil Pembelajaran

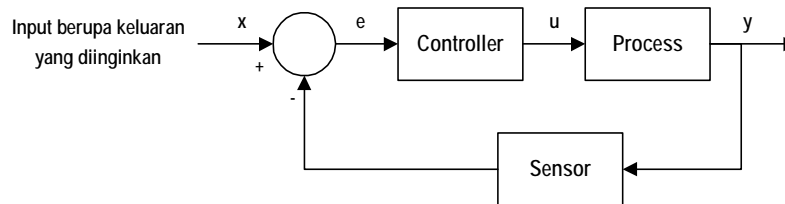
- Umum
  - Mahasiswa mampu untuk melakukan proses perancangan sistem otomasi, sistem mesin NC, serta merancang dan mengimplementasikan sistem kontrol logika.
- Khusus
  - Memahami dasar-dasar sistem pengendali serta jenis-jenis pengendali



## Teori dan Dasar Sistem Pengendali

### • Sistem Tertutup

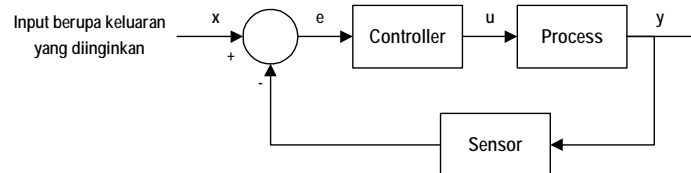
- Merupakan sistem yang mengukur keluaran aktual dari suatu proses dan membandingkannya dengan keluaran yang diinginkan.
- Proses penyesuaian akan dilakukan sampai hanya terjadi perbedaan yang sedikit antara keluaran yang diinginkan dan dihasilkan.



Gambar 1. Sistem Siklus Tertutup



## Sistem Tertutup



Nilai keluaran  $y$  akan dibandingkan dengan  $x$ .

Selisih diantaranya disebut sebagai **kesalahan / galat (error)**,

$$e = x - y$$

Untuk mengendalikan sistem, perlu dibangkitkan sinyal pengendali  $u$  yang didasarkan atas nilai  $e$ .

#### Kriteria performansi sistem:

1. Kecepatan respon, perubahan variabel keluaran  $y$  merespon perubahan nilai acuan  $x$ .
2. Error,  $e$ , selisih antara signal masuk  $x$  dan variabel proses keluaran  $y$  setelah sekian waktu.
3. Stabilitas sistem setelah bekerja sekian lama.
4. Sensitivitas sistem terhadap gangguan



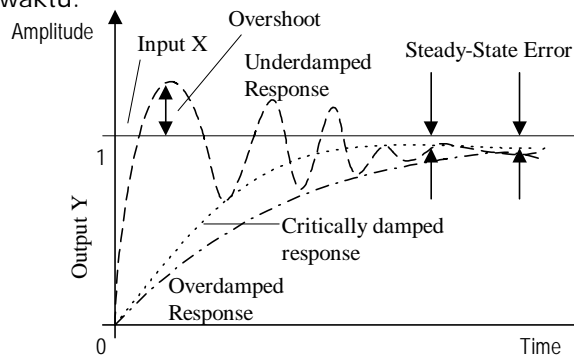
## Jenis Pengendali

- Empat **jenis pengendali** untuk pengendali proses sistem batch dan kontinu:
  - Proportional
  - Proportional plus integral
  - Proportional plus derivative
  - Proportional plus integral plus derivative
- Jenis (1) merupakan yang paling sederhana dan kurang akurat, dan jenis (4) yang paling kompleks dan sangat akurat.

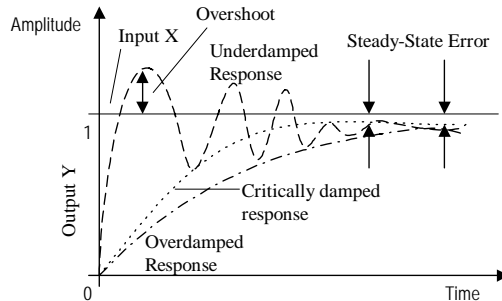


## Respons Transien (Peralihan)

- Respons peralihan: ketika input pada sistem pengendali berubah secara mendadak, keluaran memerlukan waktu untuk merespon perubahan tersebut.
- Bentuk respons ini seperti pada gambar
- Input diasumsikan berubah dari 0 menjadi 1, dan output akan berusaha mengakomodasi perubahan tersebut seiring dengan waktu.



## Respons Transien (Peralihan)

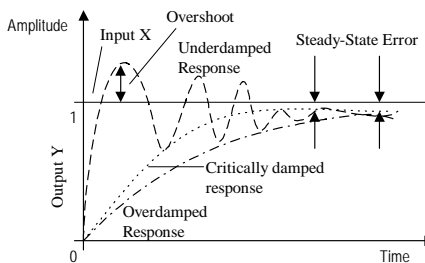


- *Respons Tipe 1 : Respons Underdamped.*
  - Output meleset naik untuk mencapai input, kemudian meleset turun dari nilai, dan akhirnya tinggal pada daerah dekat dengan nilai input. Respons ini dikatakan memiliki efek osilasi

- *Respons Tipe 2 : Respons Overdamped.*
  - Output tidak pernah meleset ke atas nilai dari input, namun butuh waktu yang lama untuk mencapai nilai final.
- *Respons Tipe 3 : Critically-damped.*
  - Respons yang sanggup mencapai nilai final dalam waktu singkat tanpa meleset.



## Respons Transien (Peralihan)



- **Kesalahan Kondisi Stabil (Steady-State Error)**
  - Fasa transien akan berlanjut ke fasa stabil (steady-state), dimana nilai akhir steady state akan dicapai untuk nilai yang diberikan. Selisih antara disebut steady-state error.

- **Stabilitas**
  - Jika dengan input atau gangguan yang diberikan pada fasa transien, kemudian tercapai output steady-state, maka dikatakan sistem ini stabil.
  - Jika sistem tidak stabil, maka output akan meningkat terus tanpa batas sampai sistem merusak diri sendiri atau terdapat sirkit pengaman yang memutus sistem.



## Respons Transien (Peralihan)

- Sensitivitas
  - Sensitivitas sistem adalah perbandingan antara persentase perubahan output dengan persentase perubahan input.
  - Perubahan pada input bisa normal ataupun gangguan.
  - Parameter proses akan berubah seiring dengan usia, lingkungan, kalibrasi salah, dsb.
  - Sistem siklus tertutup tidak terlalu sensitiv terhadap hal ini karena adanya proses monitoring balik. Kondisi sebaliknya terjadi pada sistem siklus terbuka.
  - Jika ingin dihasilkan sistem siklus terbuka presisi, maka harus sangat berhati-hati dalam pemilihan perangkat.



## Tipe Sistem

- Terdapat tiga tipe sistem:
  - **Tipe 0:** Sinyal input konstan menghasilkan nilai output konstan
  - **Tipe 1:** Sinyal input konstan menghasilkan nilai output yang berubah secara konstan
  - **Tipe 2:** Sinyal input konstan menghasilkan nilai output yang berakselerasi konstan



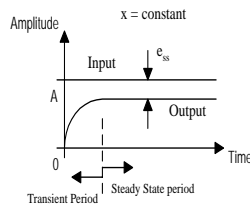
## Tipe 0

Jika sistem memiliki penguatan  $\kappa$ , maka kesalahan steady-state,  $e_{ss}$ , untuk nilai input  $A$  adalah :

$$e_{ss} = \frac{A}{1+\kappa}$$

Semakin besar nilai  $\kappa$ , semakin kecil kesalahan, semakin besar nilai  $\kappa$ , sistem akan semakin tidak stabil.

Jika input ke sistem tipe 0 ini adalah kecepatan atau akselerasi, maka output tidak akan bisa mengikuti dan kesalahan steady-state akan naik seiring waktu dan mendekati nilai tak hingga

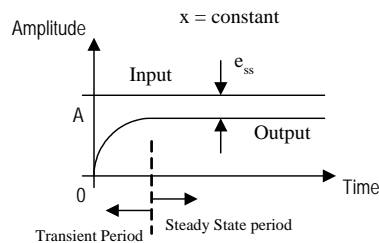


## Tipe 0

- Jika sistem memiliki penguatan  $K$ , maka kesalahan steady-state,  $e_{ss}$ , untuk nilai input  $A$  adalah:

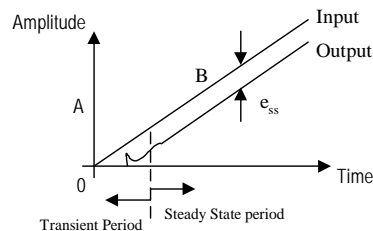
$$e_{ss} = \frac{A}{1+K}$$

- Semakin besar nilai  $K$  semakin kecil kesalahan, semakin besar nilai  $K$  sistem akan semakin tidak stabil.
- Jika input ke sistem tipe 0 ini adalah kecepatan atau akselerasi, maka output tidak akan bisa mengikuti dan kesalahan steady-state akan naik seiring waktu dan mendekati nilai tak hingga



## Tipe 1

- Kesalahan steady-state untuk sistem ini terhadap nilai input diharapkan adalah nol.
- Kesalahan steady-state dari sistem ini sehubungan dengan naiknya input dari nilai ukuran B
- Nilai error:  $e_{ss} = \frac{B}{K}$
- Kenaikan nilai akan menurunkan kesalahan steady-state.



TI-3222: Otomasi Sistem Produksi - 5

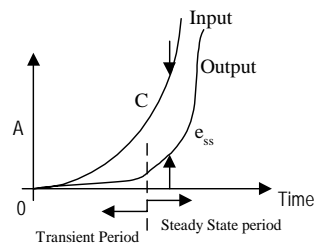
13

## Tipe 2

- Sistem ini memiliki kesalahan steady-state nol untuk semua input posisi ataupun kecepatan. Jika input adalah akselerasi dari nilai C, maka nilai error dapat dihitung:

$$e_{ss} = \frac{C}{K}$$

- Kenaikan nilai akan menurunkan kesalahan steady-state



TI-3222: Otomasi Sistem Produksi - 5

14

## Tipe Pengendali

- Pengendali Proportional
  - Pengendali proporsional secara sederhana menyesuaikan penguatan dari sistem.
  - Jika proses memiliki penguatan dan pengendali memiliki penguatan, maka penguatan sistem keseluruhan adalah .
  - Jika sistem tidak stabil untuk penguatan dari, maka dapat dipilih nilai yang lebih kecil dari nilai yang dihasilkan dari sistem stabil.
  - Jika tidak terdapat masalah stabilitas, dapat dipakai pengendali proporsional dan meningkatkan penguatan sampai kesalahan steady-state menurun pada nilai yang diinginkan.
- Pengendali Proportional Plus Integral
  - Pengendali Proportional plus Integral (disebut lag compensator) menyesuaikan penguatan sistem seperti pada pengendali proporsional, namun juga meningkatkan tipe sistem satu tingkat ke atas (perhatikan Tabel 1). Meningkatkan tipe sistem akan meningkatkan jenis input yang bisa diterima sistem tanpa menghasilkan kesalahan yang tidak bisa diterima.



## Tipe Pengendali

- Pengendali Proportional Plus Derivative
  - Pengendali Proportional Plus Derivative (PD) (disebut juga lead compensator) mengijinkan adanya perubahan pada respons transien terhadap sistem.
  - Penggunaan pengendali PD dapat mengubah sistem tipe 0 menjadi tipe 1 ataupun 2 dan juga sebaliknya dengan kendala yang dimunculkan dari sistem sendiri.
  - Jika digabungkan dengan pengendali lainnya, penguatan dapat diubah untuk mengubah stabilitas dan kesalahan steady-state
- Pengendali Proportional Plus Integral Plus Derivative
  - Pengendali Proportional Plus Integral Plus Derivative atau pengendali tiga mode memungkinkan perubahan pada penguatan, tipe sistem, dan respons transien untuk meningkatkan operasi proses.
  - Dengan menentukan penguatan sistem akan menghasilkan sistem yang stabil dan respons yang lebih susah karena sistem menjadi semakin kompleks.



## Tipe Pengendali

**Tabel 1.** Steady State Error as a Function of System Type and Input Type

Tipe Input	Tipe Sistem		
	0	1	2
Position, A	$\frac{A}{1+K}$	0	0
Velocity, B	infinity	$\frac{B}{K}$	0
Accelaration, C	Infinity	infinity	$\frac{C}{K}$

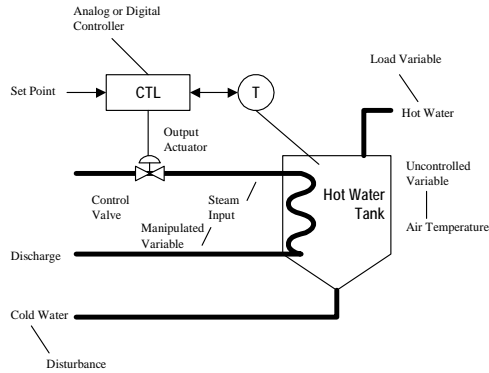


## Proses Kontinyu

- Beberapa terminologi yang dipakai dalam aplikasi proses kontrol kontinyu (untuk ilustrasi visual, lihat gambar 6):
  1. Process Variable
  2. Controlled Variable, misalnya suhu air.
  3. Manipulated Variable, misalnya jumlah uap yang disuplai ke dalam tangki
  4. Disturbance, misalnya tambahan jumlah air dingin yang tidak terkendali yang masuk sebagai respons dari kebutuhan beban
  5. Load Variable, misalnya kebutuhan air panas
  6. Continuous Control, misalnya jalan masuk pada pengendali katup uap
  7. Setpoint, suhu air yang diinginkan oleh operator
  8. System Lag, waktu yang dibutuhkan mulai dari saat kalor mulai dialirkan ke tangki sampai sensor suhu air mendeteksi perubahan.
  9. Transfer Lag,
  10. Dead Time
  11. Analog Control
  12. Digital Control



## Proses Kontinyu



- Dalam pengendali proses kontinyu, titik awal yang dimasukkan oleh operator, secara kontinyu dibandingkan dengan variabel keluaran.
- Sinyal error akan dipergunakan oleh pengendali untuk memodifikasi sinyal modul pengendali output dengan desain amplitudo dan polaritas untuk mereduksi nilai error.



## Proportional Control

$$H(C) = H(O) + K_p \cdot e,$$

dimana :

$H(C)$  : output to manipulated variable

$H(O)$  : initial output setpoint

$K_p$  : gain factor

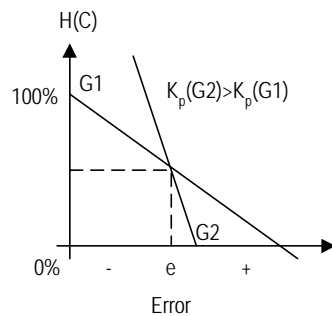
$e$  : error signal

- Jika output lebih besar dari nilai input, maka nilai error negative akan menjadi input buat pengendali sehingga output nantinya akan menurun dan nilai error akan mengecil, demikian juga sebaliknya.
- Permasalahan yang dihadapi oleh pengendali proportional bahwa jika terjadi gangguan permanen, tipe pengendali ini tidak mungkin dapat mengembalikan nilai variabel pengendali menjadi nilai input awal. Hal ini karena pengendali berbasis pada sinyal error untuk mengubah variabel manipulasinya.
- Salah satu cara untuk mengeliminasi error ini adalah dengan menyesuaikan secara manual  $H(O)$  ke titik keseimbangan baru.

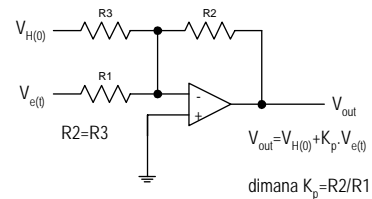


## Analog Proportional Control

- Situasi yang ditunjukkan pada gambar 7 di bawah dapat dibentuk dari rangkaian operational amplifier seperti pada gambar 8.



Gambar 7. Grafik Respons Output Pengendali Proportional VS Error

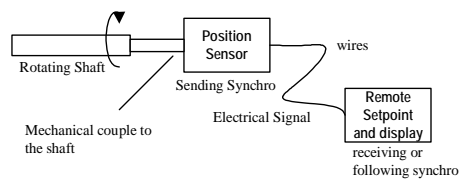


Gambar 8. Proportional Analog Control Implementation



## Analog Proportional Control

- Salah satu contoh aplikasi dari pengendali proportional ini adalah sistem positioning synchro seperti pada Gambar 9.



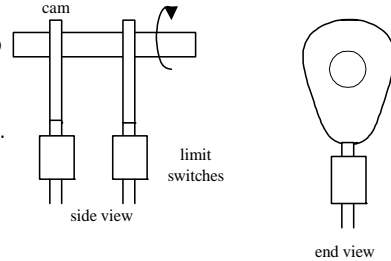
Gambar 9. Proportional Position Sensor System

- Synchro transmitter adalah peralatan yang mengubah posisi poros menjadi sinyal elektrik.
- Synchro receiver akan membalikkan proses.
- Synchro transmitter yang ditempelkan pada poros output dari sistem dan mengirimkan sinyal fasa AC untuk mengatur indikator yang ada di stasiun pengendali untuk mengindikasikan posisi poros.
- Output dari pengiriman synchro dapat diartikan sebagai voltase yang secara kontinyu berbeda tergantung dari sudut poros.



## Analog Proportional Control

- Dalam praktek nyatanya, gelombang sinus dan tegangan output adalah proportional terhadap perbedaan pada sudut fasa antara gelombang sinus referensi dan gelombang sinus yang dibangkitkan.
- Sebagai hasil kombinasi output dari pengiriman synchro ke synchro penerima, maka synchro penerima akan mengikuti synchro pengirim pada posisinya.
- Aplikasi: extrusion forming dan rolling mills dalam industri baja.
- Dalam aplikasi lain: limit switches yang mengaktifasi berbagai operasi diaktivasi oleh yang disatukan pada poros dari remote receiving synchro seperti terlihat pada gambar 10.
- Gambar 10. Proportional Position Sensor System



## Analog Integral Control

Persamaan :

$$H(C) = \frac{1}{T_i} \int_0^t e \, dt \rightarrow H(C) = \frac{1}{T_i} \sum_0^n \frac{e_{i+1} - e_i}{t_{i+1} - t_i}$$

dimana :

$H(C)$  = output value

$T_i$  = interation interval also called the reset rate

$e$  = error signal

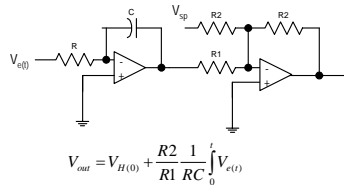
$\sum$  = summation symbol

- Pada pengendali ini, setiap kesalahan pada penambahan waktu yang kecil akan dijumlah bersamaan, dan operasi ini dilakukan dengan menggunakan integrasi.



## Analog Integral Control

Rangkaian Op-Amp untuk pengendali integral ini adalah :



$$V_{out} = V_{H(0)} + \frac{R2}{R1} \frac{1}{RC} \int_0^t V_{e(t)} dt$$

Gambar 11. Sirkit Analog integral Control Implementation

Analog Derivative Control

Persamaan :

$$H(C) = T_d \frac{de}{dt} \rightarrow H(C) = T_d \frac{(e_{t1} - e_{t0})}{(t_1 - t_0)}$$

dimana :

$T_d$  = derivative time

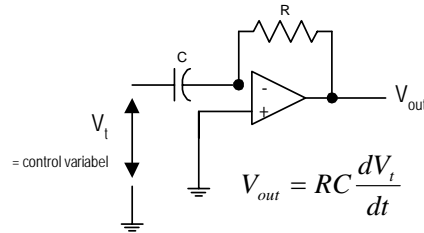
$e$  = error signal

$t_1 - t_0$  = time interval



## Analog Derivative Control

- Sistem pengendali derivatif ini dapat mengantisipasi kesalahan sistem dengan bereaksi lebih cepat untuk mengubah rata-rata perubahan dari variabel. Ini akan berefek untuk membuat pengendali merespons lebih cepat dan mempertahankan titik awal lebih baik. Secara fisik, dengan rangkaian op-amp dapat dilihat pada gambar 12.



Where : derivative gain  $T_d = RC$

Gambar 12. Sirkit Analog Derivative Control Implementation



## Composite Modes

- Jika ketiga pengendali dipergunakan secara terpisah, maka masing-masing memiliki kekurangan dan keterbatasan dalam efektifitasnya. Sehingga bisa dilakukan penggunaan beberapa jenis pengendali secara bersamaan.
- PI Mode
  - Pengendali Proportional Integral dipakai dalam situasi dimana terjadi perubahan load yang besar yang memerlukan perubahan signifikan pada titik awal.
  - Pengendali PI akan efektif dalam sistem dimana perubahan beban muncul secara perlahan karena perubahan beban yang cepat dapat menimbulkan instabilitas sistem jika waktu integrasi tidak ditentukan dengan baik.
  - Keuntungan lainnya, bagian integral bisa mengeliminasi kesalahan yang muncul jika menerapkan pengendali proporsional saja.
  - Untuk itu rentang proportional dapat ditentukan lebih lebar untuk menurunkan respon kemelesetan naik dari sistem.



## Composite Modes

Persamaan untuk pengendali PI adalah :

$$H(C) = H(0) + K_p \cdot e + K_p \cdot \frac{1}{T_i} \int_0^t e \cdot dt$$

dimana :

$e$  = error signal

$K_p$  = proportional gain

$T_i$  = integral time

$H(0)$  = setpoint

Penguatan total integral dipengaruhi dari faktor penguatan proporsional,  $K_p$ , namun faktor penguatan integral,  $T_i$ , bisa secara bebas dikendalikan untuk menghasilkan penguatan total integral yang diinginkan



## Composite Modes

- **PD Mode**

- Pengendali Proportional Derivative ini tidak dapat mengeliminasi kesalahan yang muncul dari pengendali proporsional.
- Pengendali PD dapat berguna bagi sistem yang memiliki perubahan yang cepat pada beban karena pengendali PD cenderung mengantisipasi kesalahan total dengan merespons pada seberapa cepat perubahan itu terjadi.
- Semakin cepat rata-rata perubahan kesalahan, maka kesalahan total akan semakin besar. Pengendali PD dipakai dalam sistem motor servo dan dalam sistem yang memiliki perubahan parameter proses yang kecil, dan cepat.



## Composite Modes

Rumusnya adalah sebagai berikut :

$$H(C) = H(0) + K_p \cdot e + K_p \cdot T_d \frac{de}{dt}$$

dimana :

- $e$  = error signal
- $K_p$  = proportional gain
- $T_d$  = derivative time
- $H(0)$  = setpoint

Interaksi antara respons proporsional dan respons derivatif diindikasikan dengan perkalian faktor  $K_p$  (faktor penguatan proporsional) dan  $T_d$  (faktor derivatif).

Interaksi dapat dikendalikan dengan secara tepat menetapkan dua faktor penguatan secara independen.



## Composite Modes

### **PID Mode**

Persamaan :

$$H(C) = H(0) + K_p \cdot e + K_p \cdot \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt - K_p T_d \cdot \frac{dcv}{dt}$$

dimana :

- $K_p$  = proportional gain
- $T_i$  = integral time interval
- $T_d$  = derivative time interval
- $e$  = error
- $cv$  = control variable
- $H(0)$  = setpoint

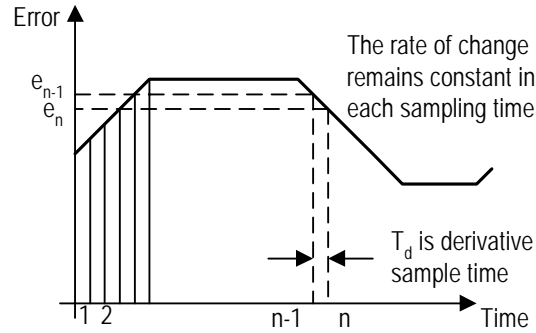


## Digital Methods

- Selain menggunakan sirkuit analog untuk menyelesaikan permasalahan persamaan proses pengendali linear, bisa dipakai komputer digital secara aljabar.
- Sinyal analog dikonversi menjadi data biner, dan operasi seperti penambahan, pengurangan, perkalian dan pembagian bisa diipergunakan untuk menyelesaikan persamaan yang telah disebutkan.
- Contoh grafis untuk menghitung rata-rata perubahan dari variabel pengendali yang dipergunakan dalam pengendali derivatif dapat dilihat pada Gambar 13.
- Metoda yang dipergunakan sebenarnya membagi waktu menjadi sekian bagian tertentu, dan melihat kesalahan yang timbul pada tiap segmen.
- Demikian juga dengan yang integrasi, dapat dilihat pada gambar 14. Prinsipnya juga membagi area yang ada menjadi segmen-segmen kecil.



## Digital Methods



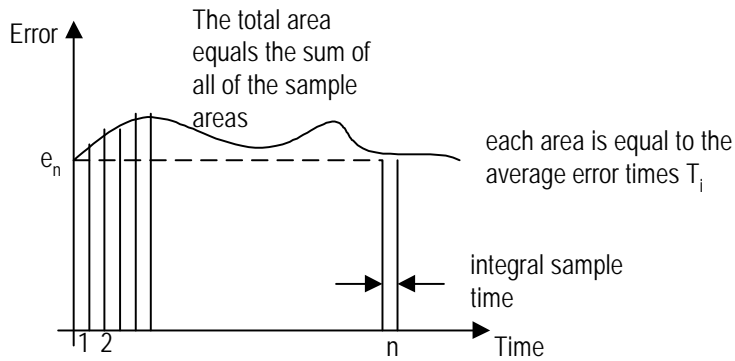
$$M_n = \frac{(e_n - e_{n-1})}{T_d}$$

where  $M_n$  is called the slope of the error signal at sample N

Gambar 13. Graphical Solution of Derivative



## Digital Methods



Note 1 : Area of  $n^{\text{th}}$  sample is  $e_n \cdot T_i$

Note 2 : Sum of the area is  $(e_1 \cdot T_1) + (e_2 \cdot T_2) + \dots + (e_n \cdot T_n)$

Gambar 14. Graphical Solution of Integration

