

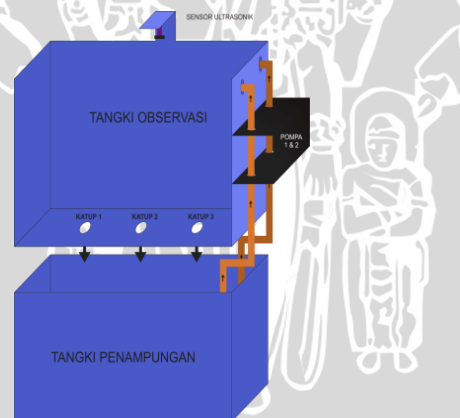
## BAB II

### DASAR TEORI

Pada bab ini akan dijelaskan teori penunjang yang digunakan dalam penulisan dengan tujuan untuk memudahkan dalam memahami cara kerja rangkaian maupun dasar-dasar perencanaan alat.

#### 2.1 Tangki plant sistem kontrol *level* air dengan variasi beban.

Plant sistem kontrol *level* air dengan variasi beban/outlet sistem terdiri dari beberapa bagian diantaranya tangki air, bak penampungan air, pompa (aktuator), dan rangkaian sensor. Tangki observasi, berbentuk balok yang pada bagian atasnya tidak menggunakan tutup. *Spesifikasi* ruang dari tangki tersebut adalah panjang 30 cm, lebar 5 cm, dan tinggi 20 cm. Pada bagian bawah tangki observasi juga terdapat 4 lubang outlet sistem, 1 lubang terbuka untuk beban/*outlet* sistem, 2 lubang (buka tutup) untuk mengatur variasi beban/*outlet* sistem dan 1 lubang (buka tutup) untuk gangguan, gangguan berupa beban lebih selama 15 detik setelah sistem mencapai *steady state*. Desain plant tangki air ditunjukkan pada Gambar 2.1



**Gambar 2.1** Tangki plant sistem kontrol sistem *level* air.

#### 2.2 Motor DC

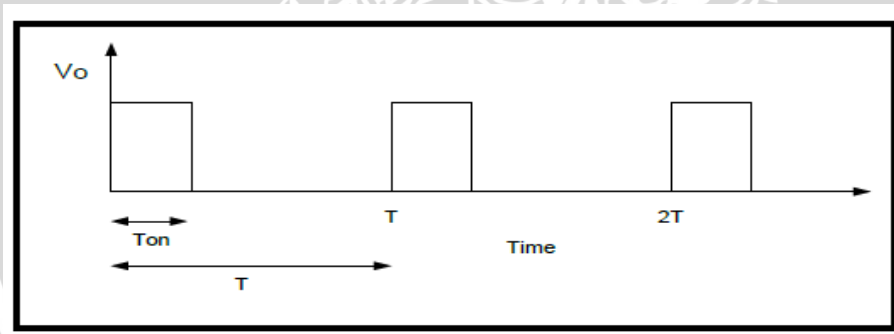
Motor DC merupakan salah satu penggerak utama yang banyak digunakan di industri masa kini. Motor DC merupakan sebuah perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Energi mekanik ini digunakan untuk, misalnya, memutar impeller pompa, fan atau blower, menggerakkan kompresor, mengangkat bahan, dan lain-lain. Motor listrik digunakan juga di rumah (mixer, bor listrik, fan angin) dan di industri. Prinsip kerja motor DC sesuai dengan

Hukum Kemagnetan Lorenz, yaitu membangkitkan fluksi magnet pada suatu konduktor berarus dalam medan magnet sehingga timbul GGL induksi. Setiap arus yang mengalir melalui sebuah konduktor akan menimbulkan medan magnet (Fathurohim, 2010).

Metode *Pulse Width Modulation* (PWM) adalah salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengatur kecepatan dari motor DC. Kecepatan motor DC tergantung pada besarnya *duty cycle* yang diberikan pada motor DC tersebut. Pada sinyal PWM, frekuensi sinyal konstan sedangkan *duty cycle* bervariasi dari 0%-100%. Dengan mengatur *duty cycle* akan diperoleh keluaran yang diinginkan. (Alfarisi,2011). *Duty cycle* adalah besarnya sinyal kontrol yang diberikan pada motor. Persamaan untuk perhitungan *duty cycle* ditunjukkan dalam persamaan 2.1 dengan Ton adalah periode logika tinggi, dan T adalah periode keseluruhan.

$$Duty\ cycle = \frac{Ton}{T} \times 100\% \quad (2.1)$$

Sinyal PWM secara umum ditunjukkan dalam Gambar 2.2.



**Gambar 2.2** Sinyal PWM

Keterangan:

Ton = Periode logika tinggi

T = Periode keseluruhan

V<sub>o</sub> = Amplitudo

### 2.3 Daya Arduino UNO

ArduinoUNO dapat diaktifkan melalui koneksi USB atau dengan catu daya eksternal (otomatis). Eksternal (non-USB) daya dapat berasal baik dari AC-ke adaptor-DC atau baterai. Adaptor ini dapat dihubungkan dengan menancapkan plug

jack pusat-positif ukuran 2.1mm konektor POWER. Ujung kepala dari baterai dapat dimasukkan kedalam Gnd dan Vin pin header dari konektor POWER.

Kisaran kebutuhan daya yang disarankan untuk board UNO adalah 7 sampai dengan 12 volt, jika diberi daya kurang dari 7 volt kemungkinan pin 5v UNO dapat beroperasi tetapi tidak stabil kemudian jika diberi daya lebih dari 12V, regulator tegangan bisa panas dan dapat merusak board UNO.

## 2.4 Memori Arduino UNO

ATmega328 memiliki 32 KB (dengan 0,5 KB digunakan untuk bootloader), 2 KB dari SRAM dan 1 KB EEPROM.

## 2.5 Input dan Output Arduino UNO

Masing-masing dari 14 pin digital di UNO dapat digunakan sebagai input atau output, dengan menggunakan fungsi *pinMode ()*, *digitalWrite ()*, dan *digitalRead ()*, beroperasi dengan daya 5 volt. Setiap pin dapat memberikan atau menerima maksimum 40 mA dan memiliki internal pull-up resistor (secara default terputus) dari 20-50 kOhms. Selain itu, beberapa pin memiliki fungsi khusus:

- i. *Serial*: 0 (RX) dan 1 (TX). Digunakan untuk menerima (RX) dan mengirimkan (TX) TTL data serial. Pin ini dihubungkan ke pin yang berkaitan dengan chip Serial ATmega8U2 USB-to-TTL.
- ii. *Eksternal menyela*: 2 dan 3. Pin ini dapat dikonfigurasi untuk memicu interrupt pada nilai yang rendah, dengan batasan tepi naik atau turun, atau perubahan nilai.  
*PWM*: 3, 5, 6, 9, 10, dan 11. Menyediakan output PWM 8-bit dengan fungsi *analogWrite ()*.
- iii. *SPI*: 10 (SS), 11 (Mosi), 12 (MISO), 13 (SCK). Pin ini mendukung komunikasi SPI menggunakan *SPI library*.
- iv. *LED*: 13. Ada built-in LED terhubung ke pin digital 13. Ketika pin bernilai nilai HIGH, LED on, ketika pin bernilai LOW, LED off.
- v. UNO memiliki 6 masukan analog, berlabel A0 sampai dengan A5, yang masing-masing menyediakan 10 bit dengan resolusi (yaitu 1024 nilai yang berbeda). Selain itu, beberapa pin memiliki fungsi khusus:

- vi. *I2C: A4 (SDA) dan A5 (SCL)*. Dukungan I2C (TWI) komunikasi menggunakan perpustakaan *Wire.Aref*. Tegangan referensi (0 sampai 5V saja) untuk input analog. Digunakan dengan fungsi *analogReference ()*.
- vii. *Reset*. Bawa baris ini LOW untuk me-reset mikrokontroler.

## 2.6 Komunikasi Arduino UNO

Arduino UNO memiliki sejumlah fasilitas untuk berkomunikasi dengan komputer, Arduino lain, atau mikrokontroler lainnya. ATmega328 menyediakan UART TTL (5V) untuk komunikasi serial, yang tersedia di pin digital 0 (RX) dan 1 (TX). Sebuah ATmega8U2 sebagai saluran komunikasi serial melalui USB dan sebagai port virtual com untuk perangkat lunak pada komputer. Firmware '8 U2 menggunakan driver USB standar COM, dan tidak ada driver eksternal yang diperlukan. Namun, pada Windows diperlukan, sebuah file inf. Perangkat lunak Arduino terdapat monitor serial yang memungkinkan digunakan memonitor data tekstual sederhana yang akan dikirim ke atau dari board Arduino. LED RX dan TX di papan tulis akan berkedip ketika data sedang dikirim melalui chip USB-to-serial dengan koneksi USB ke komputer (tetapi tidak untuk komunikasi serial pada pin 0 dan 1).

Sebuah *Software Serial library* memungkinkan untuk berkomunikasi secara serial pada salah satu pin digital pada board UNO's. ATmega328 juga mendukung I2C (TWI) dan komunikasi SPI. Perangkat lunak Arduino termasuk perpustakaan Kawat untuk menyederhanakan penggunaan bus I2C.

## 2.7 Driver EMS 5 A H-BRIDGE

*Embedded Module Series (EMS) 5A H-Bridge* merupakan driver H-Bridge yang didisain untuk menghasilkan drive 2 arah dengan arus kontinyu sampai dengan 5A pada tegangan 5 Volt sampai 40 Volt. Modul ini dilengkapi dengan rangkaian sensor arus beban yang dapat digunakan sebagai umpan balik ke pengendali. Modul ini mampu men-drive beban-beban induktif seperti misalnya relay, solenoida, motor DC, motor stepper, dan berbagai macam beban lainnya.



**Gambar 2.3** Driver EMS 30 A H-BRIDGE

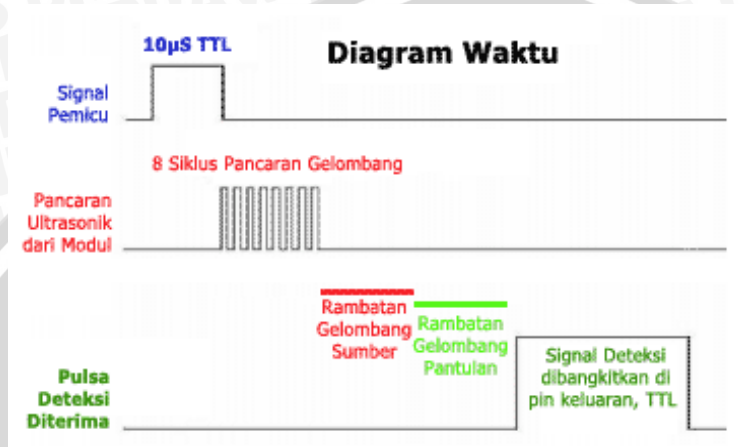
## 2.8 Sensor Ultrasonic HC-SR04

Sensor Ultrasonic merupakan sensor yang bekerja dengan cara memancarkan suatu gelombang dan kemudian menghitung waktu pantulan gelombang tersebut. Gelombang ultrasonic dapat merambat melalui zat padat, cair maupun gas. Sensor HC-SR04 memiliki jarak jangkauan minimal 2 cm dan maksimal 300 cm serta memiliki akurasi sebesar 3 mm. Modul sensor Ultrasonic bekerja pada tegangan DC 5V, arus 15mA dan frekuensi 40Hz, dalam sebuah modul sensor ultrasonic terdiri dari Ultrasonic Transmitter, Receiver dan unit kontrol. Rangkaian sensor yang berfungsi sebagai pemancar (Transmitter) akan memancarkan gelombang ultrasonik dengan frekuensi tertentu, kemudian apabila terjadi benturan terhadap suatu benda atau objek maka gelombang ultrasonik akan dipantulkan kembali dan diterima oleh rangkaian sensor yang berfungsi sebagai penerima (Receiver). Maksimum jarak yang dapat dibaca sensor ultrasonik adalah 2 cm sampai dengan 300 cm. Gambar sensor jarak HC-SR04 dapat dilihat pada Gambar 2.4



**Gambar 2.4** Sensor Jarak HC-SR04

Cara kerja alat ini yaitu ketika sensor diberikan tegangan positif pada pin Trigger selama 10uS, maka sensor akan mengirimkan 8 step sinyal ultrasonik dengan frekuensi 40kHz. Selanjutnya, sinyal akan diterima pada pin Echo. Untuk mengukur jarak benda yang memantulkan sinyal tersebut, maka selisih waktu ketika mengirim dan menerima sinyal digunakan untuk menentukan jarak benda tersebut. Untuk lebih jelas akan dijelaskan pada gambar dibawah ini.



**Gambar 2.5** Diagram waktu sensor ultrasonik HC-SR04

Jarak sensor ke objek pantul dapat dihitung dengan rumus (Prawiroedjo,2008):

$$S = \frac{(t_{IN} \times V)}{2} \quad (2.2)$$

Dengan:

S = Jarak sensor ke objek yang dideteksi

$t_{IN}$  = waktu pemancaran dan penerimaan pantulan

V = Cepat rambat gelombang ultrasonik di udara (344 m/s)

## 2.9 Kontroler PID

Salah satu komponen sistem pengaturan yang berfungsi mengolah sinyal umpan balik dan sinyal masukan acuan (*setpoint*) atau sinyal *error* mejadi sinyal kontrol. Sistem pengendalian dirancang untuk melakukan dan menyelesaikan tugas tertentu. Syarat utama sistem pengendalian adalah harus stabil. Di samping kestabilan mutlak, maka sistem harus memiliki kestabilan secara relatif, yakni tolak ukur kualitas kestabilan sistem dengan menganalisis sampai sejauh mana batas-batas kestabilan sistem tersebut jika dikenai gangguan (Ogata K.,1997). Selain itu analisis juga

dilakukan untuk mengetahui bagaimana kecepatan sistem dalam merespons *input*, dan bagaimana peredaman terhadap adanya lonjakan (*over shoot*).

Suatu sistem dikatakan stabil jika diberi gangguan maka sistem tersebut akan kembali ke keadaan *steady state* di mana *output* berada dalam keadaan tetap seperti tidak ada gangguan. Sistem dikatakan tidak stabil jika *output*nya berosilasi terus menerus ketika dikenai suatu gangguan. Karena suatu sistem pengendalian biasanya melibatkan penyimpanan energi maka *output* sistem ketika diberi suatu *input*, tidak dapat mengikuti *input* secara serentak, tapi menunjukkan respon transien berupa suatu osilasi teredam sebelum mencapai *steady state*. Dalam sistem pengendalian terdapat 2 macam loop:

1. Pengendalian Dengan Loop Terbuka

Sistem kontrol loop terbuka adalah sistem kontrol yang keluarannya tidak berpengaruh pada aksi pengontrolan. Jadi pada sistem kontrol loop terbuka, keluaran tidak diukur atau diumpun balik untuk dibandingkan dengan masukan.

2. Pengendalian Dengan Loop Tertutup

Sistem kontrol loop tertutup adalah sistem kontrol yang keluarannya mempunyai pengaruh langsung pada aksi pengontrolan. Disebut juga sistem kontrol yang menggunakan umpan balik untuk memperkecil kesalahan sistem.

### 2.9.1 Kontroler Proporsional (P)

Kontroler proporsional adalah sebuah kontroler yang memiliki karakteristik mempercepat respon. Hubungan antara keluaran kontroler  $m(t)$  dan sinyal kesalahan penggerak  $e(t)$  ditunjukkan pada persamaan 2.3:

$$m(t) = K_p e(t) \quad (2.3)$$

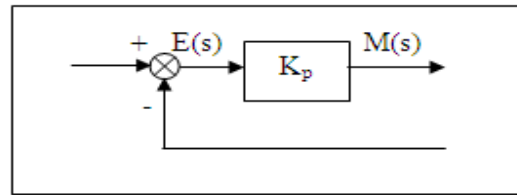
atau, dalam besaran transformasi Laplace ditunjukkan pada persamaan 2.4

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \quad (2.4)$$

dimana  $K_p$  adalah kepekaan proporsional atau penguatan.

Apapun wujud mekanisme yang sebenarnya dan apapun bentuk daya penggeraknya, kontroler proporsional pada dasarnya merupakan penguat

dengan penguatan yang dapat diatur (Ogata K.,1997). Diagram blok kontroler proporsional ditunjukkan pada Gambar 2.6.



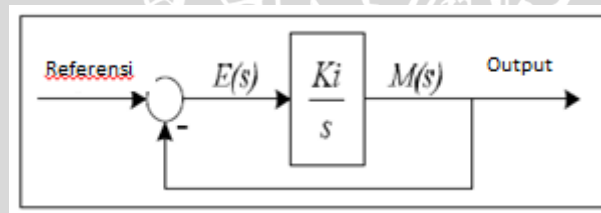
**Gambar 2.6** Diagram Blok Kontroler Proporsional (Ogata K., 1997)

### 2.9.2 Kontroler Integral (I)

Kontroler integral memiliki kemampuan untuk mengurangi *offset* yang ditinggalkan oleh kontroler proporsional. Harga keluaran kontroler  $m(t)$  diubah dengan laju yang sebanding dengan sinyal kesalahan penggerak  $e(t)$ . Persamaan kontroler  $K_i$  ditunjukkan dalam persamaan 2.4.(Ogata K.,1997).

$$\frac{dm(t)}{dt} = K_i e(t) \quad (2.5)$$

$K_i$  adalah penguatan integral. Gambar 2.6 menunjukkan diagram blok kontroler integral.



**Gambar 2.7** Diagram Blok Kontroler Integral (Ogata., 1997)

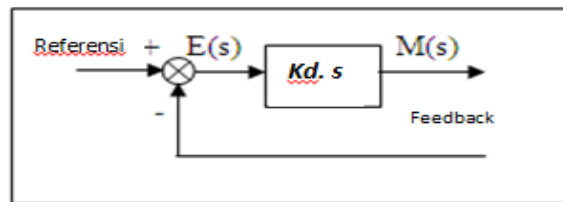
### 2.9.3 Kontroler Differensial (D)

Kontroler ini digunakan untuk memperbaiki atau mempercepat respons transien sebuah sistem kontrol dengan cara memperbesar *phase lead* terhadap penguatan kontrol dan mengurangi *phase lag* penguatan tersebut (Ogata K.,1997). Kontroler differensial tidak dapat mengeluarkan *output* bila tidak ada perubahan *input*, selain itu kontroler differensial tidak dapat digunakan untuk proses yang mengandung *noise*. Hubungan antara keluaran kontroler  $m(t)$  dan sinyal kesalahan penggerak  $e(t)$  dinyatakan pada persamaan 2.5



$$\frac{M(s)}{E(s)} = Kd \cdot s \quad (2.6)$$

Kd adalah penguatan diferensial. Gambar 2.7 menunjukkan diagram blok kontroler differensial.



**Gambar 2.8** Diagram Blok Kontroler Differensial (Ogata K., 1997)

#### 2.9.4 Kontroler Proporsional Integral Differensial (PID)

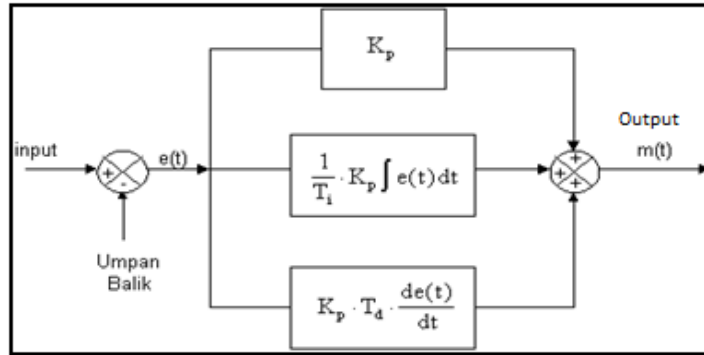
Gabungan aksi kontrol proporsional, integral, dan differensial mempunyai keunggulan dibandingkan dengan masing-masing dari tiga aksi kontrol tersebut. Masing – masing kontroler P, I, maupun D berfungsi untuk mempercepat reaksi sistem, menghilangkan *offset*, dan mendapatkan energi ekstra ketika terjadi perubahan *load*. Persamaan kontroler PID ini dapat dinyatakan dalam persamaan 2.6:

$$m(t) = Kp \cdot e(t) + \frac{Kp}{Ti} \cdot e(t)dt + Kp \cdot Td \frac{de(t)}{dt} \quad (2.7)$$

Dalam transformasi Laplace dinyatakan dalam persamaan 2.7 :

$$\frac{M(s)}{E(s)} = Kp \left( 1 + \frac{1}{Ti \cdot s} + Td \cdot s \right) \quad (2.8)$$

Ti adalah waktu integral dan Td adalah waktu derivatif. Gambar 2.8 menunjukkan diagram blok kontroler PID.

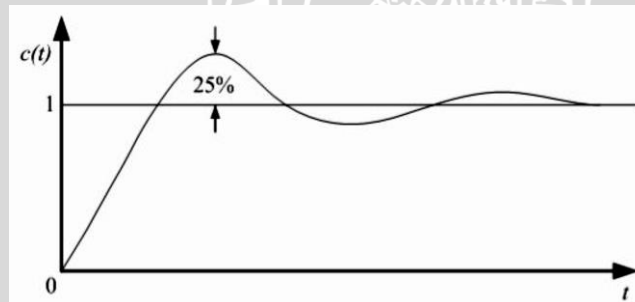


**Gambar 2.9** Diagram Blok Kontroler PID (Ogata K., 1997)

### 2.10 Ziegler – Nichols

Ziegler dan Nichols mengemukakan aturan-aturan untuk menentukan nilai dari *gain* proporsional  $K_p$ , waktu integral  $T_i$ , dan waktu derivatif  $T_d$  berdasarkan karakteristik respon transien dari *plant* yang diberikan. Penentuan parameter kontroler PID atau penalaan kontroler PID tersebut dapat dilakukan dengan bereksperimen dengan plan. (Ogata, K., 1997)

Terdapat dua metode yang disebut dengan aturan penalaan Ziegler-Nichols, pada kedua metode tersebut memiliki tujuan yang sama yaitu untuk mencapai 25% *maximum overshoot* pada respon unit step, seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.9.

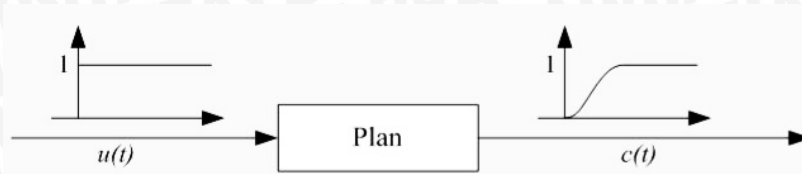


**Gambar 2.10** Kurva Respon Unit Step yang Menunjukkan 25% *Maximum Overshoot*.

Sumber: Ogata, K., 1997

#### a. Metode Kurva Reaksi

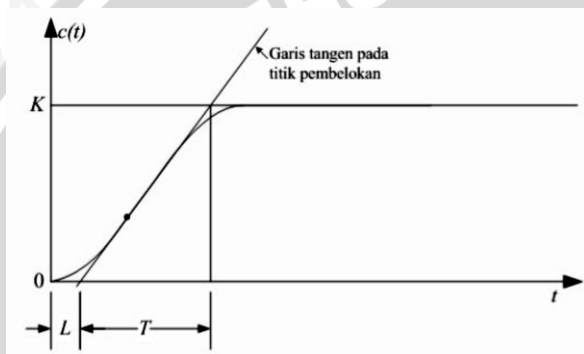
Metode pertama atau sering disebut metode kurva reaksi, respon dari plan dapat diperoleh secara eksperimental dengan masukan berupa unit step, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.10



**Gambar 2.11** Respon Plant Terhadap Masukan Berupa Unit Step

Sumber: Ogata, K. 1997

Jika dalam plan tersebut minimal tidak mengandung unsur integrator atau *dominan complex-conjugate poles*, maka kurva respon unit step berbentuk seperti huruf S, seperti dalam Gambar 2.11 jika respon tidak memberikan bentuk kurva S, maka metode ini tidak berlaku. (Ogata, K., 1997).



**Gambar 2.12** Kurva Respon yang Berbentuk S

Sumber: Ogata, K. 1997

Kurva berbentuk S tersebut dapat dikarakteristikkan menjadi dua konstanta yaitu waktu mati  $L$  dan waktu tunda  $T$ . Waktu mati dan waktu tunda ditentukan dengan menggambar sebuah garis tangen pada titik pembelokan dari kurva S, dan menentukan perpotongan antara garis tangen dengan sumbu waktu  $t$  dan sumbu  $c(t) = K$ , seperti yang telah ditunjukkan dalam Gambar 2.12. Fungsi alih  $C(s)/U(s)$  dapat dilakukan pendekatan dengan sistem orde satu dengan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts+1} \tag{2.9}$$

Sumber: Ogata, K. 1997

Ziegler dan Nichols menyarankan untuk menentukan nilai-nilai dari  $K_p$ ,  $T_i$  dan  $T_d$  berdasarkan pada formula yang ditunjukkan dalam Tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Aturan Penalaan Ziegler-Nichols Berdasarkan Respon Unit Step Dari Plan

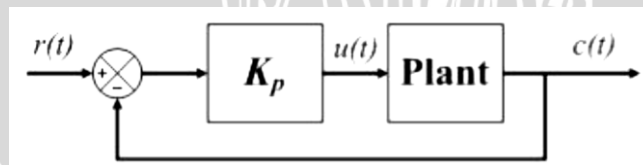


Type Kontroler	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0,9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2\frac{T}{L}$	$2L$	$0,5 L$

Sumber: Ogata, K., 1997

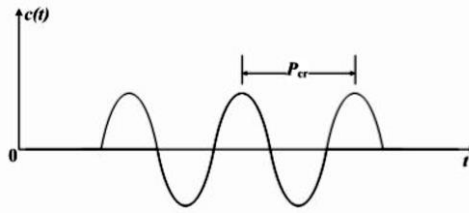
b. Metode Osilasi

Dalam metode kedua ziegler-nichols, mula-mula yang dilakukan adalah membuat  $T_i = \infty$  dan  $T_d = 0$ . Kemudian hanya dengan menggunakan tindakan kontrol proporsional, harga ditingkatkan dari nol ke suatu nilai kritis  $K_{cr}$ , disini mula-mula keluaran memiliki osilasi yang berkesinambungan (Jika keluaran tidak memiliki osilasi berkesinambungan untuk nilai  $K_p$  manapun yang telah diambil, maka metode ini tidak berlaku). Dari keluaran yang berosilasi secara berkesinambungan, penguatan kritis  $K_{cr}$  dan periode  $P_{cr}$  dapat ditentukan. Diagram blok sistem loop tertutup dengan kontroler proporsional dapat dilihat dalam Gambar 2.12. dan untuk osilasi berkesinambungan dengan periode  $P_{cr}$  dapat dilihat dalam Gambar 2.13. Ziegler dan Nichols menyarankan penyetelan nilai parameter  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  dan berdasarkan rumus yang diperlihatkan dalam Tabel 2.3



**Gambar 2.13** Sistem Loop Tertutup dengan Kontroler Proporsional

Sumber: Ogata, K., 1997



**Gambar 2.14** Osilasi Berkesinambungan dengan Periode  $P_{cr}$

Sumber: Ogata, K., 1997

**Tabel 2.3** Aturan Dasar Ziegler-Nichols Berdasarkan Critical Gain  $K_{cr}$  dan Critical Period  $P_{cr}$

Type Kontroler	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5 K_{cr}$	$\infty$	0
PI	$0.45 K_{cr}$	$\frac{1}{1,2} P_{cr}$	0
PID	$0.60 K_{cr}$	$0.5 P_{cr}$	$0.125 P_{cr}$

Sumber: Ogata, K., 1997

## 2.11 Transformasi Z

Dalam sistem waktu kontinu *time-invariant*, transformasi laplace dapat dimanfaatkan dalam analisis sistem dan desain. Sedangkan transformasi Z dapat dimanfaatkan dalam menganalisa sistem yang termodelkan dalam waktu diskrit dari persamaan diferensial. Sebuah transformasi ditetapkan sebagai deret angka yang berurutan. Fungsi  $E(z)$  ditetapkan sebagai sebuah *power series* dalam  $z^{-k}$  dengan koefisien yang sama untuk nilai dari deret angka  $\{e(k)\}$ . Transformasi ini disebut sebagai transformasi Z, yang kemudian diungkapkan dalam bentuk Persamaan 2.10.

$$E(z) = Z[\{e(k)\}] = e(0) + e(1)z^{-1} + e(2)z^{-2} + \dots \quad (2.10)$$

$$\text{Dengan, } e(k) = Z^{-1}[E(z)] = \frac{1}{2\pi j} \oint_{\Gamma} E(z)z^{k-1}dz, \quad j = \sqrt{-1}$$

Dimana  $Z(\dots)$  mengindikasikan operasi transformasi Z dan  $Z^{-1}(\dots)$  mengindikasikan invers dari transformasi z.  $E(z)$  dalam Persamaan 2.10 dapat dituliskan dalam notasi yang disederhanakan seperti pada Persamaan 2.11.

$$E(z) = Z[\{e(k)\}] = \sum_{k=0}^{\infty} e(k) z^{-k} \quad (2.11)$$

Transformasi  $Z$  terdefiniskan untuk beberapa deret angka  $\{e(k)\}$ , dan mungkin digunakan dalam menganalisis dari beberapa jenis sistem yang diuraikan oleh persamaan diferensial *time-invariant* linier.

## 2.12 Diskritisasi

Banyak cara yang dapat digunakan untuk proses diskritisasi (mengubah bentuk analog menjadi diskrit), tiga diantaranya yang banyak digunakan dalam bidang kontrol adalah *backward difference*, *forward difference* (metode Euler) dan *bilinear transformation*. Semua metode yang digunakan hanya merupakan pendekatan (*approximations*), sehingga hasilnya tidak akan persis sama dengan bentuk analog. Hal ini dikarenakan bentuk diskrit selalu ada sebagian informasi yang hilang, yaitu informasi yang terjadi antara satu cuplikan dengan cuplikan lainnya walaupun frekuensi cuplik yang digunakan tinggi dan karena formula matematika yang digunakan dalam proses diskritisasi juga diturunkan berdasarkan pendekatan agar lebih mudah digunakan.

Menurut teori sampling Nyquist dan Shannon mengatakan bahwa jika suatu fungsi waktu  $e(t)$  tidak mengandung komponen frekuensi yang lebih tinggi dari  $f_0$  hertz, dalam hal ini nilai dai nilai  $e(t)$  dapat ditentukan dengan memberikan titik sampling berjarak  $1/2f_0$  detik terpisah.

Berikut tahapan diskritisasi yang dapat digunakan:

1. Tulis algoritma analog dalam bentuk transformasi laplace.
2. Lakukan diskritisasi menjadi bentuk transformasi  $Z$  dengan mengganti operator  $s$  dengan menggunakan salah satu dari tiga metode diskritisasi, yaitu:

- *Backward difference* :

$$s = \frac{1 - z^{-1}}{T_s} \quad (2.12)$$

- *Forward difference* :

$$s = \frac{1 - z^{-1}}{T_s z^{-1}} \quad (2.13)$$

- *Bilinear transform :*

$$s = \frac{2(1 - z^{-1})}{T_s(1 + z^{-1})} \quad (2.14)$$

Dimana  $T_s$  adalah waktu cuplik (*time sampling*)

Hingga tahap 2, algoritma sudah didapat dalam bentuk diskrit yang dinyatakan dalam transformasi Z. Pada implementasinya, bentuk transformasi Z tersebut perlu diubah menjadi time domain (persamaan beda), yaitu dengan mengubah operator  $z^n$  menjadi  $n$  kali waktu delay ( $z^{-1}$  berarti 1 kali waktu delay,  $z^{-2}$  berarti 2 kali waktu delay dan seterusnya).

### 2.13 Parameter Performansi Sistem

Parameter-parameter dibagi menjadi lima (performansi sistem) antara lain :

1. Waktu penetapan (*Settling Time*),  $t_s$  : merupakan waktu yang diperlukan kurva respons untuk mencapai dan menetap dalam daerah di sekitar nilai akhir yang ukurannya ditentukan dengan presentase mutlak dari nilai akhir (biasanya 5 % atau 2 %). Waktu penetapan ini dikaitkan dengan konstanta waktu terbesar dari sistem kontrol. Kriteria prosentase kesalahan yang akan digunakan ditentukan dari sasaran disain.
2. Waktu tunda (*Delay Time*),  $t_d$  : merupakan waktu yang diperlukan respons untuk mencapai setengah nilai akhir pada saat lonjakan yang pertama kali.
3. Waktu naik (*Rise Time*),  $t_r$  : merupakan waktu yang diperlukan respons untuk naik dari 10 sampai 90 %, 5 sampai 95 % atau 0 sampai 100 % dari nilai akhir. Untuk sistem orde dua redaman kurang (*Underdamped*) digunakan waktu naik 0 – 100 % dan untuk sistem redaman lebih (*Overdamped*) digunakan waktu naik 10-90 %.
4. Waktu puncak (*Peak Time*),  $t_p$  : merupakan waktu yang diperlukan respons untuk mencapai puncak lewat (lonjakan maksimal) yang pertama kali.

5. Lewatan maksimum (*Maximum Overshoot*),  $M_p$  : merupakan nilai puncak maksimum kurva respons yang diukur dari satu. Jika nilai keadaan mantap respons tidak sama dengan satu, maka dapat digunakan persen lewatan maksimum.

