

## BAB II

www.itk.ac.id

### TINJAUAN PUSTAKA

Pada pengantar bab ini berisi tentang dasar teori dari penelitian yang dilakukan. Adapun yang menjadi landasan teori yakni motor DC, *fullwave rectifier*, PWM dan *controller* PID.

#### 2.1 Motor Listrik

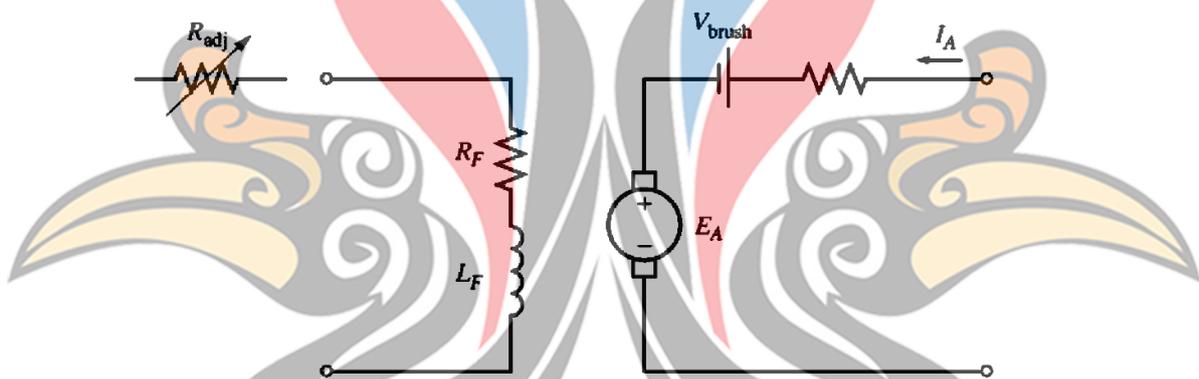
Mesin listrik merupakan sebuah alat yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik atau energi listrik menjadi energi mekanik. Sebuah alat yang digunakan untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik yang disebut generator. Untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik disebut motor. Setiap mesin listrik yang diberikan dapat mengubah daya di kedua arah, mesin apa pun dapat digunakan sebagai generator atau motor. Hampir semua motor dan generator dapat mengubah energi dari satu bentuk ke bentuk lainnya melalui aksi magnetik dan hanya mesin yang menggunakan medan magnet untuk melakukan konversi semacam itu (Chapman, 2005). Motor listrik dan generator ini ada di mana-mana dalam kehidupan modern. Contohnya banyak terdapat di rumah-rumah seperti pada kulkas, *freezer*, penyedot debu, *blender*, pendingin udara, kipas angin, dan banyak peralatan lainnya (Chapman, 2005).

Motor listrik dan generator begitu umum karena tenaga listrik adalah sumber energi yang dihasilkan bersih dan efisien dan mudah ditransmisikan dalam jarak yang jauh, dan mudah dikendalikan. Energi panas atau energi mekanis bisa jadi diubah menjadi tenaga listrik di lokasi yang jauh, energi dapat ditransmisikan dalam jarak jauh ke tempat yang akan digunakan (Chapman, 2005).

Terdapat beberapa jenis motor listrik dan generator salah satunya adalah motor DC. Keuntungan utama dari mesin DC adalah pengaturan kecepatan dan torsi yang mudah. Stator motor DC memiliki kutub, dimana kutub tersebut di eksitasi oleh arus DC untuk menghasilkan medan magnet. Rotor terbuat dari inti besi yang terlaminasi dan memiliki slot (Chapman, 2005).

### 2.1.1 Motor DC

Motor arus searah (motor DC) adalah mesin yang merubah energi listrik arus searah menjadi energi mekanis yang berupa putaran. Berdasarkan fisiknya motor DC secara umum terdiri atas bagian yang diam dan bagian yang berputar. Pada bagian yang diam (stator) merupakan tempat diletakkannya kumparan medan yang berfungsi untuk menghasilkan fluks magnet sedangkan pada bagian yang berputar (rotor) ditempati oleh rangkaian jangkar seperti kumparan jangkar, komutator dan sikat. Motor DC bekerja berdasarkan prinsip interaksi antara dua fluks magnetik. Dimana kumparan medan akan menghasilkan fluks magnet yang arahnya dari kutub utara menuju kutub selatan dan kumparan jangkar akan menghasilkan fluks magnet yang melingkar. Interaksi antara kedua fluks magnet ini akan menimbulkan suatu gaya (Bagia,2008). Rangkaian ekivalen motor DC dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.1 Rangkaian ekivalen motor DC (Chapman, 2005)

Dari rangkaian tersebut berdasarkan hukum Kirchoff tentang tegangan diperoleh persamaan 2.1 dan 2.2.

$$E_A = K \Phi \omega \quad 2.1$$

$$\tau_{ind} = K \Phi I_A \quad 2.2$$

### 2.1.2 Prinsip Kerja Motor DC

Setiap konduktor yang mengalirkan arus mempunyai medan magnet di sekelilingnya. Kuat medan magnet yang timbul tergantung pada besarnya arus yang mengalir di dalam konduktor. kumparan medan dihubungkan dengan suatu sumber tegangan, maka pada kumparan medan itu akan mengalir arus medan ( $I_f$ ).

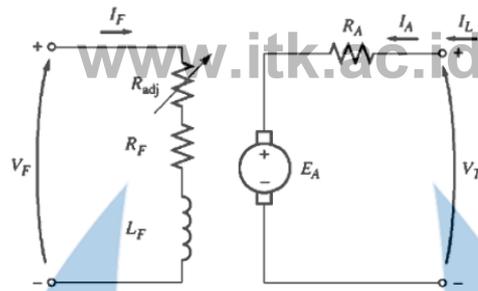
www.itk.ac.id

Kumparan medan yang dialiri arus ini akan menimbulkan fluks utama yang dinamakan fluksi stator. Fluks ini merupakan medan magnet yang arahnya dari kutub utara menuju kutub selatan (hal ini dapat dilihat dengan adanya garis – garis fluksi). Apabila pada kumparan jangkar mengalir arus yakni arus jangkar, maka dari hukum Lorentz diketahui apabila sebuah konduktor yang dialiri arus ditempatkan pada sebuah medan magnet maka pada konduktor tersebut akan timbul gaya, maka demikian pula halnya pada kumparan jangkar. Besarnya gaya ini bergantung dari besarnya arus yang mengalir pada kumparan jangkar ( $I_a$ ), kerapatan fluks ( $B$ ) dari kedua kutub dan panjang konduktor jangkar ( $l$ ). Semakin besar fluks yang terimbas pada kumparan jangkar maka arus yang mengalir pada kumparan jangkar juga besar, dengan demikian gaya yang terjadi pada konduktor juga semakin besar (Bagia, 2018). Besar gaya yang dihasilkan oleh arus yang mengalir pada konduktor jangkar yang ditempatkan dalam suatu medan magnet adalah

$$F = B \cdot I_a \cdot l \quad 2.3$$

### 2.1.3 Motor DC Eksitasi Terpisah

Motor DC eksitasi terpisah adalah motor arus searah yang memperoleh sumber arus penguat dari luar motor. Pada motor ini memiliki suplai tegangan yang berbeda sehingga tegangan penguatannya bisa diubah-ubah tanpa mempengaruhi tegangan suplainya. Motor ini digunakan untuk beban yang relatif konstan atau tidak berubah secara drastis. Motor DC penguat terpisah merupakan salah satu dari jenis motor DC yang dapat menambah kemampuan daya dan kecepatan karena memiliki fluks medan ( $\Phi$ ) yang dihasilkan oleh kumparan medan yang terletak secara terpisah dan mempunyai sumber pembangkit tersendiri berupa tegangan DC (Fauzannir, 2014).



Gambar 2.2 Rangkaian ekivalen motor DC eksitasi terpisah (Chapman, 2005)

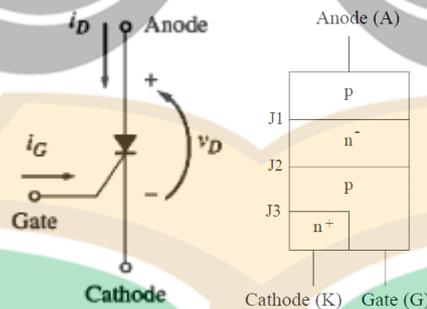
$$I_F = \frac{V_F}{R_F} \quad 2.4$$

$$V_T = E_A + I_A R_A \quad 2.5$$

$$I_L = I_A \quad 2.6$$

## 2.2 Silicon Controlled Rectifier

Bagian dari keluarga *thyristor* yang dikenal salah satunya adalah *Silicon Controlled Rectifier* atau SCR. Perangkat ini dikembangkan dan diberi nama SCR oleh General Electric Company pada tahun 1958. Nama *thyristor* diadopsi oleh *International Electrotechnical Commission* (IEC). Simbol untuk SCR ditunjukkan pada Gambar 2.3 (Chapman, 2005).

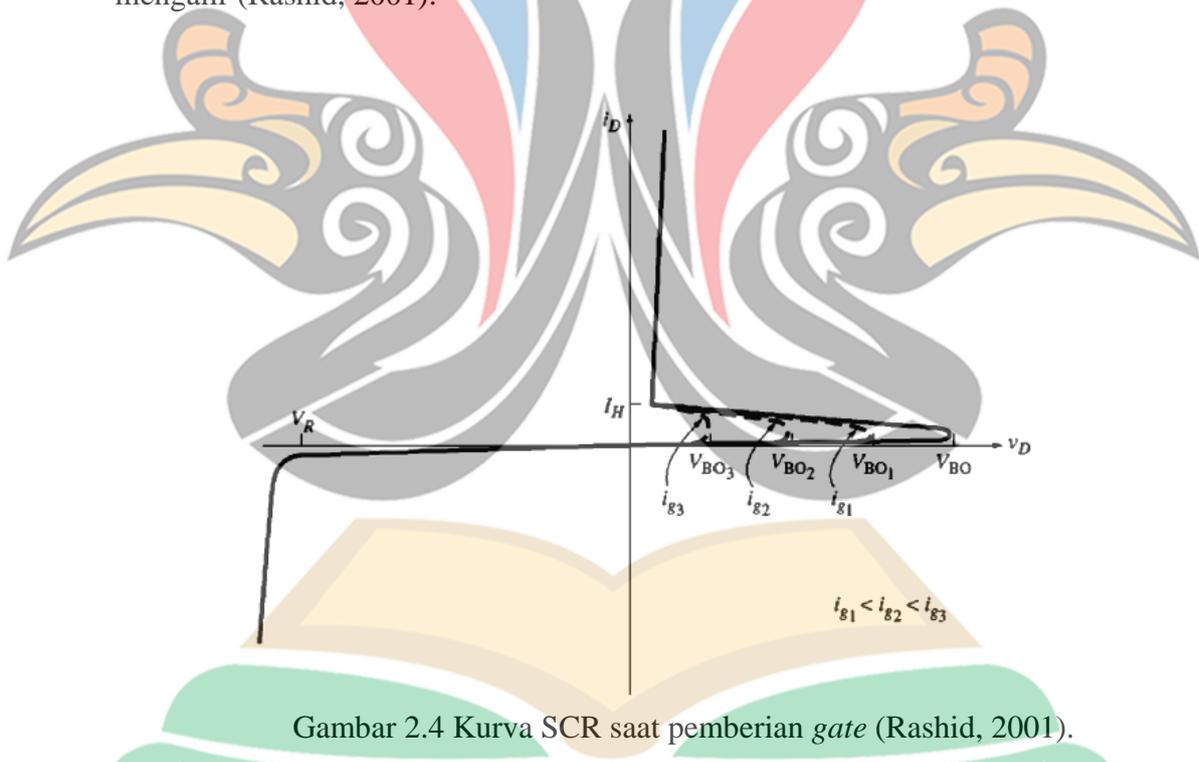


Gambar 2.3 Simbol dari SCR (Chapman, 2005)

Seperti namanya, SCR adalah *controlled rectifier*. Mempunyai empat lapisan semikonduktor P-N-P-N mempunyai 3 pn *junction* dan mempunyai 3 terminal yaitu anoda, katoda dan *gate*. Untuk membuka *gate* SCR mempunyai karakteristik tegangan dan arus (Chapman, 2005).

### 2.2.1 Karakteristik V-I SCR

Ketika tegangan anoda bernilai positif relatif terhadap katode maka *junction* satu  $J_1$  dan *junction* tiga  $J_3$  menjadi *forward* bias, artinya dapat dialiri arus listrik. Dan *junction* dua  $J_2$  menjadi *reverse* bias sehingga arus tidak bisa mengalir, hanya arus *reverse* saja yang mengalir yang nilainya sangat kecil. Pada kondisi ini maka *thyristor* dalam kondisi “*off state*” atau *forward blocking* area karena tidak ada arus yang mengalir ke katoda kecuali arus *reverse*. Jika tegangan anoda-katoda  $V_D$  meningkat maka *junction* dua  $J_2$  akan rusak sehingga arus dapat mengalir. Kondisi ini dikenal dengan *avalanche breakdown* dan tegangan yang menyebabkan kondisi ini disebut tegangan *forward* breakdown  $V_{BO}$ . Sementara *junction* yang lain selalu dalam kondisi *forward*. Kondisi ini disebut kondisi *on state* sehingga arus dapat mengalir (Rashid, 2001).



Gambar 2.4 Kurva SCR saat pemberian *gate* (Rashid, 2001).

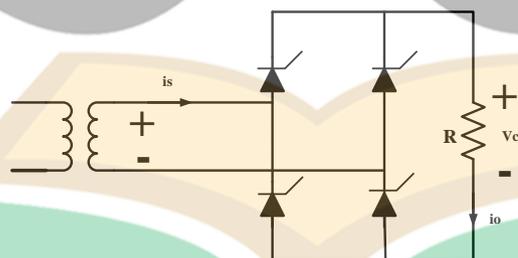
Gambar 2.4 merupakan kurva SCR saat pemberian *gate*. Ketika arus *gate* semakin meningkat maka  $V_{BO}$  akan semakin menurun, sehingga ketika arus *gate* semakin besar maka SCR akan dalam kondisi *on*. SCR akan kembali *off* jika tegangan anoda-katoda diturunkan. Batas penurunan arus anoda ketika pada kondisi *on* dibawah arus *holding*. Arus *holding* adalah arus minimum anoda untuk menjaga *thyristor* dalam keadaan *on*.

Maka dari itu SCR akan *on* ketika tegangan SCR ( $V_D$ ) yang mengalir tersebut melebihi tegangan *breakover*  $V_{BO}$ . Memiliki  $V_{BO}$  yang levelnya dikendalikan oleh jumlah arus gate ( $I_G$ ) ada dalam SCR. SCR akan *off* ketika arus SCR ( $I_D$ ) yang mengalir di bawah  $I_h$  (Rashid, 2001).

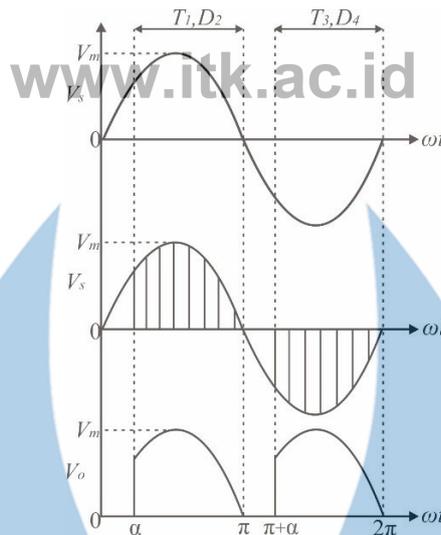
### 2.3 Fullwave Controlled rectifier 1 Fasa

*Fullwave controlled rectifier* 1 fasa merupakan pengembangan penyearah 1 fasa setengah gelombang. *Rectifier* ini terdiri dari empat buah komponen pensakelaran yang dapat dikendalikan secara berpasang-pasangan. Gambar 2.5 merupakan rangkaian daya dari suatu *fullwave controlled rectifier* (Binara, 2013).

*Thyristor* T1 dan T2 mengalami tegangan arah maju selama setengah siklus dari tegangan sumber. Bila ke dua *thyristor* dinyalakan secara bersama pada  $\omega t = \alpha$ , maka beban dihubungkan pada sumber melalui T1 dan T2. *Thyristor* T1 dan T2 akan terus mengantar pada daerah  $\omega t = \pi$  sebagai akibat penggunaan jenis beban dominan induktif. Selama setengah siklus negatif, *thyristor* T1 dan T2 akan mengalami tegangan arah maju, dan pada saat  $\omega t = \pi + \alpha$  *thyristor* T1 dan T2 akan mengalami tegangan arah balik (*reversed bias*) dan akan *off* bersamaan dengan terjadinya komutasi alami dari tegangan sumber. Selanjutnya pada periode  $\alpha \leq \omega t \leq \pi$ , tegangan dan arus masukan akan bernilai positif dan akan menali menuju beban. Mode operasi konverter pada kondisi ini adalah mode penyearah .



Gambar 2.5 Rangkaian *fullwave controlled rectifier* (Binara , 2013)



Gambar 2.6 Gelombang *fullwave controlled rectifier* (Binara, 2013)

Seperti pada Gambar 2.6 pada periode  $\pi \leq \omega t \leq \pi + \alpha$  tegangan masukan akan bernilai negatif, arus masukan bernilai positif yang menghasilkan daya mengalir pada beban dari sumber. Dalam hal ini konverter beroperasi pada mode pembalik tegangan. Konverter ini dapat menyuplai daya dengan operasi 2 kuartan dimana tegangan keluaran dapat bernilai positif maupun negatif dan sangat ditentukan oleh nilai sudut perlambatan penyalan (Binara, 2013).

Tegangan keluaran rata-rata dinyatakan persamaan:

$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m \sin \omega t d(\omega t) \quad 2.7$$

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha \quad 2.8$$

$$I_{DC} = \frac{V_{DC}}{R} \quad 2.9$$

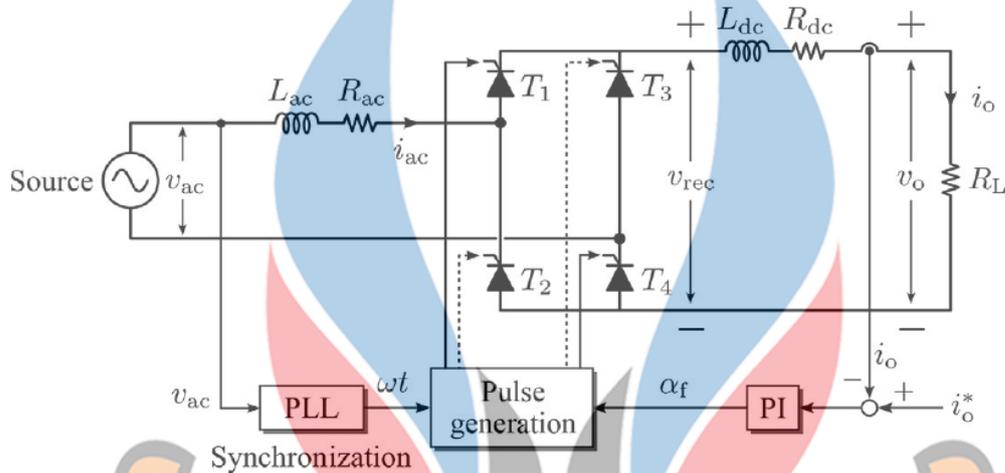
Tegangan keluaran dapat divariasikan dalam range  $\frac{2V_m}{\pi}$  sampai dengan  $-\frac{2V_m}{\pi}$  dengan cara memvariasikan sudut perlambatan penyalan dari 0 sampai  $\pi$ .

Besar tegangan efektif keluaran dinyatakan dalam bentuk persamaan

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \left( 1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 2.10$$

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R}$$

Selanjutnya, contoh rangkaian penyearah gelombang penuh dengan beban  $R_L$  dapat ditunjukkan oleh gambar 2.7.



Gambar 2.7 Full wave rectifier dengan beban (Yang, 2018)

Dengan mengasumsikan  $L_{dc} \gg L_{ac}$  dan mengabaikan resistansi internal  $R_{dc}$  dan  $R_{ac}$ . Pemodelan sistem *full wave rectifier* dengan beban  $R_L$  pada gambar 2.7 dapat dimodelkan secara lebih sederhana dengan menggunakan persamaan 2.12 (Yang, 2018).

$$\frac{di_o}{dt} = \frac{R_L}{L_{dc}} i_o + \frac{1}{L_{dc}} v_{rec} \tag{2.12}$$

$v_{rec}$  pada persamaan 2.11 adalah tegangan *rectifier* yang nilai rata-ratanya dapat dicari dengan menggunakan persamaan 2.12.

$$v_{rec} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} v_{ac} \cos \alpha_r \tag{2.13}$$

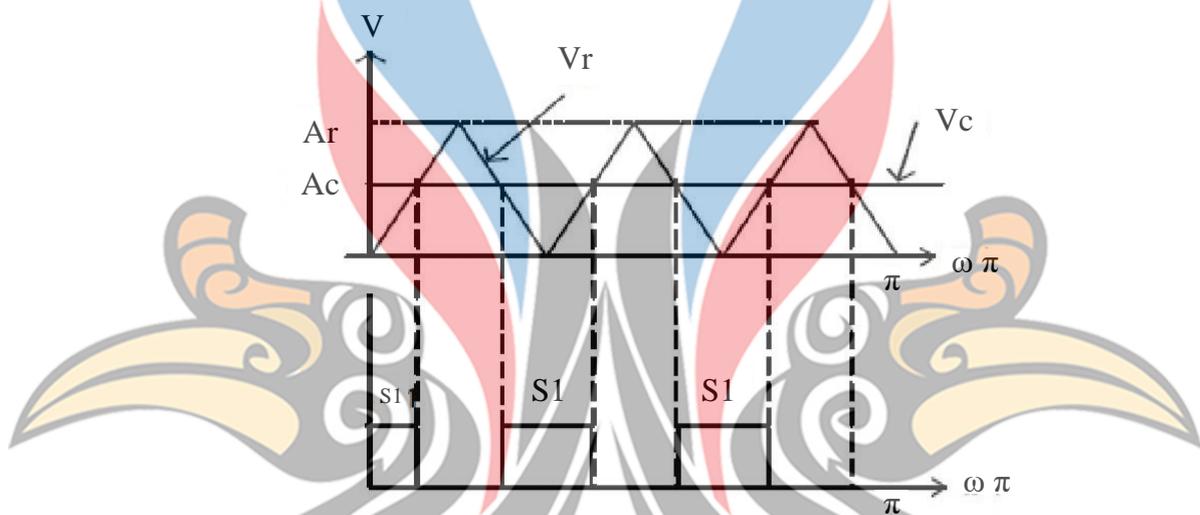
### 2.4 Pulse Width Modulation

Modulasi lebar pulsa atau yang lebih dikenal dengan sebutan PWM (*Pulse Widht Modulation*) merupakan suatu teknik yang membandingkan sinyal referensi dengan sinyal *carrier*. Pada umumnya untuk sinyal *carrier* berupa gelombang segitiga. Apabila *amplitude* sinyal referensi berada di atas amplitudo sinyal *carrier*

maka dihasilkan sinyal “high” dan jika amplitudo sinyal referensi berada di bawah amplitudo sinyal *carrier* maka dihasilkan sinyal “low”. Pada gambar 2.11 berikut menunjukkan hasil perbandingan tersebut dimana mempunyai nilai *duty cycle* tertentu (Purnomo , 2007).

*Duty cycle* adalah perbandingan antara waktu konduksi dibagi dengan total waktu antara konduksi dan tidak konduksi dikalikan seratus persen. Pengertian *duty cycle* tersebut dapat dituangkan dalam persamaan 2.16.

$$Duty\ Cycle = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \times 100\% \quad 2.14$$



Gambar 2.8 *Pulse width modulation* (Purnomo, 2007)

Dari *duty cycle* tersebut nantinya akan dipakai untuk memberikan waktu konduksi kepada komponen semikonduktor. Didalam teknik PWM, pulsa penyalan yang mengontrol keadaan *on* dan *off* saklar dihasilkan dari perbandingan gelombang Tegangan kontrol dengan gelombang segitiga seperti pada gambar di atas. Tegangan kontrol umumnya dihasilkan dengan memperbesar tegangan DC atau perbedaan antara tegangan keluaran dengan tegangan yang diinginkan. Jadi prinsip kerja dari PWM adalah jika nilai sesaat gelombang Tegangan kontrol lebih besar dari gelombang segitiga, maka saklar akan menutup (*on*) dan sebaliknya saklar akan membuka (*Off*). Dalam menghasilkan sinyal PWM ini dapat dihasilkan melalui komponen analog dan komponen digital. Untuk komponen analog dapat menggunakan komponen berbagai jenis IC untuk menghasilkan sinyal PWM. Sedangkan untuk komponen digital biasanya menggunakan berbagai jenis

mikrokontroler sebagai komponen untuk menghasilkan sinyal PWM (Purnomo, 2007).

## 2.5 Respons Transien

Dalam mendesain suatu sistem kendali, hal terpenting adalah spesifikasi atau kriteria performansi yang ditampilkan. Berikut ini penjelasan dari beberapa komponen kriteria performansi yang akan digunakan dalam penelitian (Ogata, 2010).

1. *Error steady-state* ialah nilai selisih antara nilai *setpoint* dengan nilai aktual pada kondisi *steady-state*. Sistem akan semakin baik apabila nilai *error steady-state* mendekati
2. *Rise time* ialah waktu untuk respons naik dari 0% sampai 100% kondisi *steady-state*
3. *Maximum overshoot* adalah puncak maksimum respons transien, biasanya dinyatakan dalam bentuk persentase selisih nilai *setpoint* dengan nilai aktual puncak. Besarnya persentase ini menunjukkan kestabilan relatif sistem. Sistem yang memiliki nilai persen *overshoot* yang kecil merupakan sistem yang lebih stabil.

## 2.6 Karakteristik Pengendali *Proportional* (P), *Integral* (I), dan *Derivative* (D)

Pengendali PID sangat banyak dan umum digunakan pada industri. Setiap kekurangan dan kelebihan dari masing-masing pengendali P, I dan D dapat saling menutupi dengan menggabungkan ketiganya secara paralel menjadi pengendali PID. Karakteristik dari masing-masing parameter sistem kendali PID dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Karakteristik Parameter Sistem Kendali PID (Yuan & Liu, 2012)

Penguatan	<i>Time Rise</i>	<i>Overshoot</i>	<i>Settling Time</i>	<i>Error Steady State</i>
$K_p$	Berkurang	Bertambah	Sedikit Berubah	Berkurang
$K_i$	Berkurang	Bertambah	Bertambah	Hilang
$K_d$	Sedikit Berubah	Berkurang	Berkurang	Sedikit Berubah

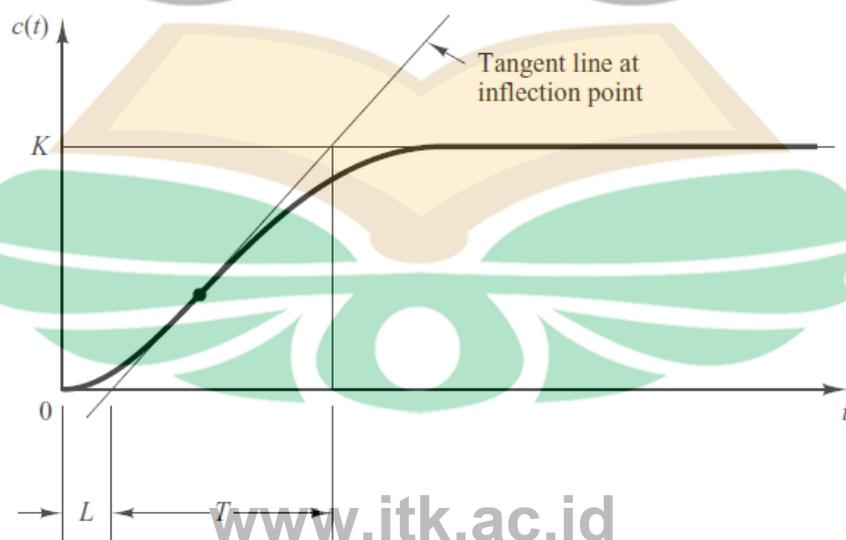
## 2.7. Kontrol PID [www.itk.ac.id](http://www.itk.ac.id)

*Controller* merupakan salah satu komponen yang berfungsi mengolah sinyal umpan balik dan sinyal referensi menjadi sinyal kontrol sedemikian rupa dan sehingga performa sistem yang dikendalikan sesuai dengan spesifikasi performansi yang diinginkan. Tipe *controller* salah satunya adalah *controller* PID. Elemen-elemen P, I, dan D masing-masing secara keseluruhan bertujuan untuk mempercepat reaksi sebuah sistem, menghilangkan *offset* dan menghasilkan perubahan awal yang besar. Persamaan *controller* PID dalam bentuk *Laplace* (Ogata,2010).

$$M(s) = K_c(E(s) + \frac{1}{T_I s} E(s) + T_D s E(s)) \quad 2.15$$

### 2.7.1 *Controller* PID dengan Pendekatan *Open loop*

Aspek yang sangat penting dalam desain *controller* PID ialah *tuning controller*. Ziegler-Nichols mengembangkan metode kurva reaksi pada *plant* dengan sistem *open loop*. Hasil respons terbentuk kurva berbentuk huruf S. Kurva bentuk S memiliki karakteristik dengan 2 buah konstanta, yaitu waktu tunda  $L$  dan *time constant*  $T$ . Kedua parameter tersebut diperoleh dengan menggambar garis tangensial pada titik infleksi kurva S. Garis *tangensial* tersebut akan berpotongan dengan garis *time axis* dan garis  $c(t) = K$ . (Ogata, 2010)



Gambar 2.9 Respons kurva Ziegler-Nichols 1(Ogata, 2010).

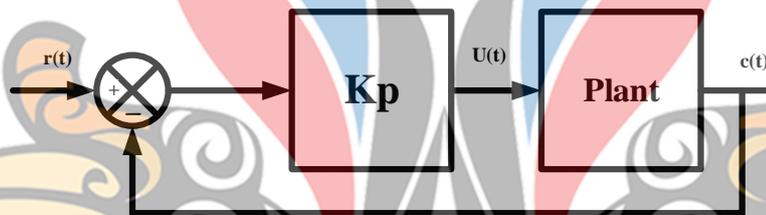
Hasil parameter Ziegler-Nichols I seperti tabel 2.2 (Ogata, 2010).

Tabel 2.2 Parameter PID Untuk ZN Tipe 1 Model Plant

Type controller	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

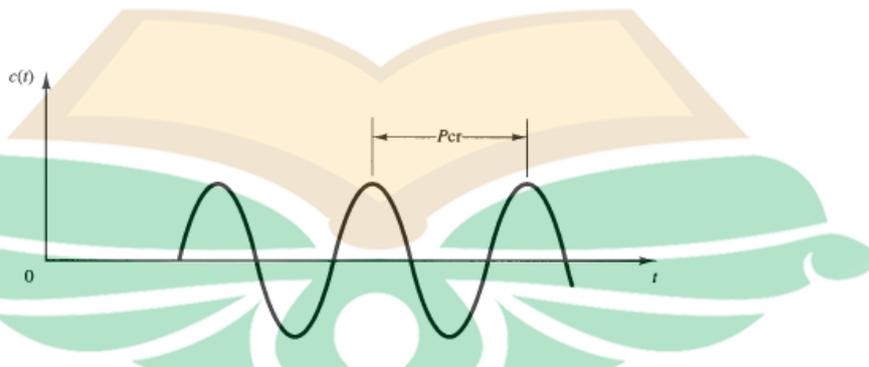
### 2.7.2. Controller PID dengan Pendekatan Closed Loop

Dalam metode ZN *closed loop* yang digunakan hanya nilai  $K_p$  saja. Sistem dibuat hingga berosilasi terus menerus dengan mengatur besarnya nilai  $K_p$ .



Gambar 2.10 Sistem *closed loop* dengan menggunakan  $K_p$  (Ogata, 2010).

Besarnya nilai  $K_p$  saat respons sistem berosilasi terus menerus merupakan nilai  $K_{cr}$ . Dari respons yang dihasilkan, parameter lain ZN tipe *close loop* selain  $K_{cr}$ , yaitu  $P_{cr}$  dapat dicari. Proses desain menentukan parameter  $P_{cr}$  ditunjukkan pada gambar 2.11.

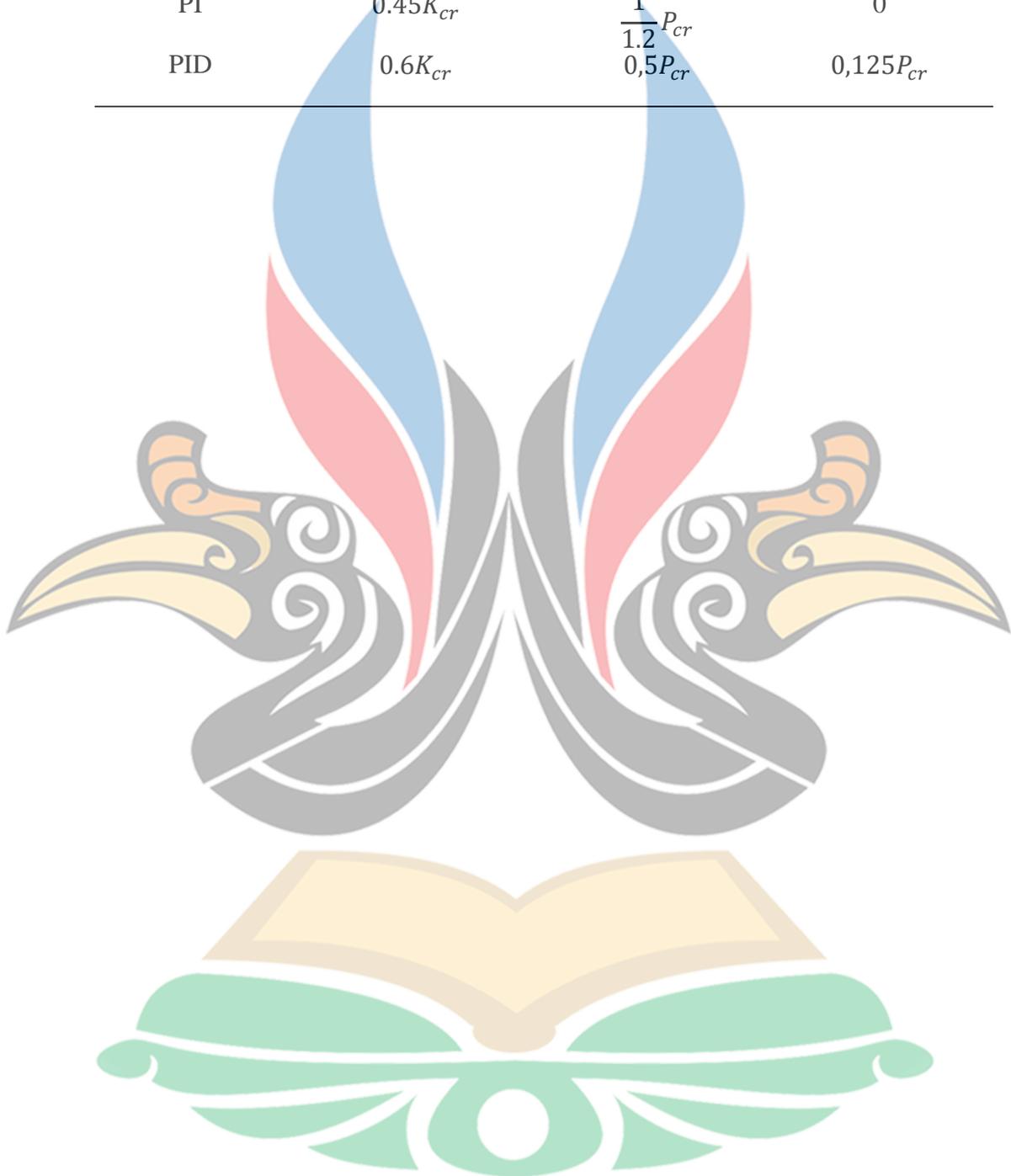


Gambar 2.11 Proses desain menentukan parameter  $P_{cr}$  (Ogata, 2010).

Setelah parameter  $K_{cr}$  dan  $P_{cr}$  didapatkan, nilai-nilai  $K_p$ ,  $T_i$ , dan  $T_d$  bisa dihitung dengan menggunakan rumus-rumus parameter PID untuk ZN tipe 2. Tabel berikut menunjukkan tabel 2.3 parameter PID untuk ZN tipe 2 (Ogata, 2010).

Tabel 2.3 Parameter PID untuk ZN tipe 2

Tipe controller	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_{cr}$	$\infty$	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$



[www.itk.ac.id](http://www.itk.ac.id)

Tabel 2.4 Posisi Penelitian

No	Nama Penulis dan Tahun Publikasi	Metode	Objek Penelitian	Plant/Sistem	Hasil
1.	G. Dyana Godwin dkk, 2015	Controller PID	Pengaruh kecepatan terhadap sudut penyalaan	Fullwave Controlled Rectifier	Menentukan nilai sudut penyalaan sebesar 89, didapatkan hasil saat menggunakan <i>controller</i> PID dengan $K_i$ 0.4, $K_p$ 15.7 detik, dan $K_d$ 10
2.	Tawfeeq dkk, 2014	Controller PID	Pengaruh kecepatan terhadap sudut penyalaan	Fullwave Controlled Rectifier	$K_p=0.15$ , $K_i=0.3$ and $K_d=0.002$ dengan sudut penyalaan sebesar 20
3.	Padmaprakash, dkk, 2016	Controller PID	Pengaruh kecepatan terhadap sudut penyalaan	Fullwave Controlled Rectifier	$K_p=2.9$ , $K_i= 5.5$ $K_d= 0.0001$ pada kecepatan 200-800 rpm sudut penyalaan semakin besar
4.	Imro, 2019	Controller PID	Pengaruh kecepatan terhadap sudut penyalaan	Fullwave Controlled Rectifier	-

