

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

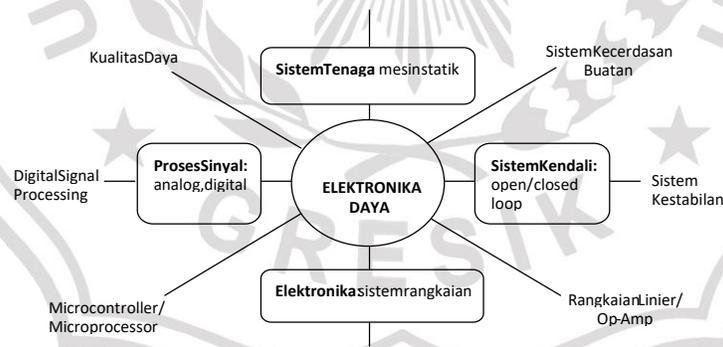
2.1 Rekayasa Elektronika Daya

Elektronika Daya adalah bidang ilmu yang mengembangkan sistem pengonversian energi listrik menggunakan saklar-saklar semikonduktor. Sistem pengonversi energi merupakan rangkaian elektronik yang berfungsi mengendalikan aliran energi, misal dari ac ke dc, dari dc ke ac, memperbaiki kualitas tegangan dan sebagainya. Perangkat pengonversi energi listrik banyak digunakan di sektro rumah tangga, industri, sistem tenaga kelistrikan , misalnya peralatan pengisi baterai telepon seluler, Uninterruptible Power Supply (UPS), filter aktif dan sebagainya. Seiring dengan kemajuan teknologi, sistem pengonversi energi telah mengalami kemajuan yang sangat cepat dalam bebrapa dasawarsa terakhir. Pada awalnya tegangan dc diperoleh langsung dari generator dc, atau dari motor ac yang digandeng dengan generator dc. Perkembangan berikutnya, digunakan sebuah transformator yang dilengkapi dengan diode sebagai penyearah tegangan. Pada akhir abad 20 dan awal abad 21, peralatan penyearah tegangan telah berubah menjadi sebuah kotak kecil yang berukuran 70% dibanding sistem dengan kapasitas sama menggunakan transformator, atau berukuran 10% dibanding generasi motor-generator [6].

Elektronika daya tersusun atas 4 bidang utama dalam hidup teknik elektro yaitu :

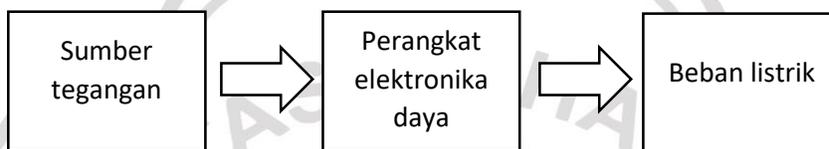
1. Teknik sistem tenaga
2. Elektronika
3. Sistem kendali
4. Pemrosesan sinyal

menunjukkan keterkaitan 4 bidang utama terhadap teknologi elektronika daya. Sebagai contoh adalah teknologi alat pengisi baterai dalam suatu telepon seluler atau laptop. Peralatan tersebut merupakan mesin statik yang menggunakan saklar semikonduktor. Saklar-saklar semikonduktor dikendalikan oleh rangkaian elektronik yang menggunakan umpan balik tertutup untuk menjaga kestabilan dan keakuratan hasil keluarannya. Proses pengendalian dapat menggunakan teknik analog yang memanfaatkan op-amp, ataupun menggunakan teknik digital yang berbasis pemrograman dikombinasi dengan sistem kecerdasan buatan.



Gambar 2. 1 susunan elektronika daya dan 4 bidang utama dalam lingkup teknik elektro

Di sisi aplikasi perangkat keras, gabungan beberapa bidang tersebut membentuk suatu perangkat elektronika daya, yang berperan sebagai antarmuka antara sumber tegangan dan beban, seperti terlihat pada gambar 2.2 Beban-beban yang dipikul dapat berupa motor listrik, kapasitor bank, baterai, ataupun alat-alat elektronik seperti radio, TV, komputer, lampu pendar (flurescent).



Gambar 2. 2 Diagram blok suatu sistem dengan perangkat elektronika daya

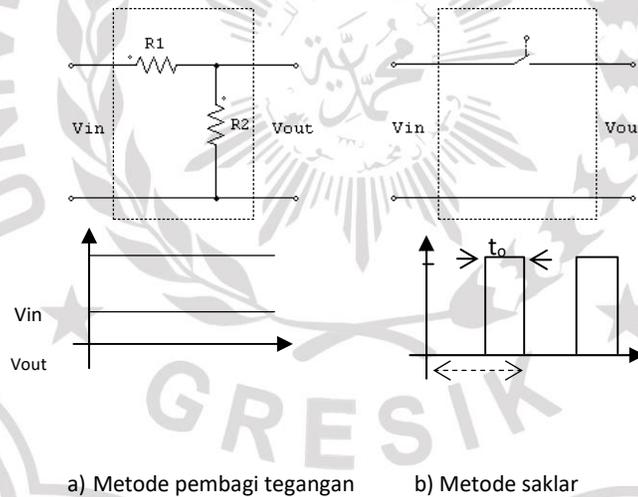
Gambar 2.2 menunjukkan pula arah aliran daya, yaitu dari sumber ke beban. Pada perangkat tersebut, daya di transfer dari sumberb untuk digunakan oleh beban.

Parameter-parameter utama yang perlu mendapat perhatian adalah:

- Tegangan (satuan Volt), pengamatan meliputi besaran dan bentuk gelombang
- Arus (satuan Ampere), meliputi besaran dan bentuk gelombang, sudut fasa
- Daya aktif (satuan Watt), merupakan daya rata-rata
- Energi (satuan Watt jam atau Wh), merupakan hasil perkalian antara daya dan waktu dalam rentang tertentu

Sistem perangkat Elektronika Daya beroperasi berdasarkan prinsip *on-off*, atau menggunakan saklar untuk mengubah status memutus dan menyambung.

Dengan prinsip *on-off*, proses konversi energi bekerja pada efisiensi yang cukup tinggi. Gambar 1.4 adalah ilustrasi terhadap 2 macam perangkat untuk menurunkan tegangan dc. Gambar 1.4 adalah perangkat pengkonversi energi, berupa sebuah kotak dengan garis putus-putus yang memiliki 2 terminal input (V_{in}) dan 2 terminal output (V_{out}). Untuk mempermudah penjelasan, dimisalkan tegangan input = 100 volt dc dan tegangan output = 20 volt dc. Cara pertama (Gambar 1.4.a) menggunakan metode pembagi tegangan berupa R_1 dan R_2 , sedangkan cara kedua (Gambar 1.4.b) menggunakan saklar *on-off*. Gambar bagian bawah adalah bentuk gelombang tegangan output yang dihasilkan oleh kedua macam metode.



Gambar 2. 3 Metode menurunkan tegangan

Metode pertama menghasilkan tegangan output V_{out} sesuai persamaan berikut:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} \quad (2.1)$$

Metode kedua menggunakan saklar yang dinyalakan selama t_{on} dan di ulang dalam periode T detik, sehingga dihasilkan tegangan output rata-rata sebesar:

$$V_{out} = \frac{t_{on}}{T} V_{in} \quad (2.2)$$

Jika arus beban tidak menjadi perhatian utama, resistor pada metode pertama dapat dipilih $R_1 = 8\Omega$ dan $R_2 = 2\Omega$, sedangkan metode kedua $t_{on}/T = 20\%$. Kedua metode ini akan sama-sama menghasilkan tegangan output rata-rata 20 volt, dari tegangan input 100 volt. Perbedaan kedua metode ini adalah pada bentuk gelombang tegangan output dan efisiensi rangkaian. Sistem pembagi tegangan menghasilkan bentuk output yang rata, sedangkan sistem saklar menghasilkan tegangan berupa pulsa. Tegangan pulsa berupa gelombang persegi dengan amplitudo 100 volt selama 20% periode dan bernilai nol selama 80% periode, sehingga nilai rata-rata tegangan tersebut adalah 20 volt.

Perbedaan adalah efisiensi, yang dapat di wakili oleh nilai rugi-rugi internal rangkaian atau perbandingan antara daya output dan input. Metode pertama mewakili efisiensi yang amat rendah. Dalam keadaan tanpa beban, rugi-rugi rangkaian sebesar $I^2 (R_1 + R_2) = 1000$ watt. Rugi-rugi akan muncul dalam bentuk energi panas yang dipancarkan oleh resistor. Sebaliknya, sistem saklar *on-off* tidak menyerap rugi-rugi sama sekali saat beban kosong (diasumsikan sebagai saklar ideal). Pada saat berbeban, rugi-rugi akan berporsional terhadap arus kuadrat dan resistansi internal saklar, sehingga rugi-rugi bernilai mili atau mikro Ohm. Jadi, jelaslah sekarang bahwa metode

saklar *on-off* sangat layak diaplikasikan pada sistem-sistem berdaya besar karena efisiensi yang tinggi.

Saklar dalam teknologi Elektronika Daya mempunyai peran yang sangat penting. Saklar adalah perangkat yang bekerja untuk memutus atau menyambung satu rangkaian terhadap rangkainya lainnya. Parameter utama suatu saklar adalah kecepatan memutus-menyambung (*switching frequency*), kapasitas daya dan resistansi. Saklar dibedakan menjadi 2 macam yaitu : saklar elektro mekanik dan semikonduktor. Saklar elektromekanik pada umumnya digunakan sebagai aktuator sistem proteksi, saklar elektromekanik tidak dapat digunakan dalam teknologi elektronika daya karena kecepatan switching yang rendah. Sebaliknya, saklar semikonduktor yang memiliki ciri kecepatan tinggi orde kHz dan berdaya besar, digunakan sebagai jaringan sistem perangkat Elektronika Daya. Saklar semikonduktor dikelompokkan dalam 3 keluarga meliputi: transistor, thyristor dan diode.

2.2 Saklar Elektro Mekanik

Saklar elektro mekanik berupa peralatan pemutus arus yang dikendalikan oleh kumparan elektromagnetik, relay, konduktor, circuit breaker merupakan contoh saklar elektromekanik. Gambar 2.4 adalah skema dasar sebuah saklar elektromagnetik yang terdiri dari sebuah kumparan dan kontak penghubung. Kontak penghubung berupa sebuah tuas terbuat dari bahan feromagnetik, yang dapat berubah posisi apabila terkena medan magnetik yang dibangkitkan oleh kumparan.



Gambar 2. 4 Prinsip kerja saklar elektromagnetik

2.3 Saklar Semikonduktor : Transistor

Transistor merupakan komponen semikonduktor yang memiliki 3 terminal, yaitu 1 terminal sebagai pengendali dan 2 terminal sebagai bagian yang dikendalikan. Secara umum keluarga transistor dikelompokkan dalam 3 golongan:

- BJT (Bipolar Junction Transistor)
- FET (Field Effect Transistor) meliputi JFET, MOSFET
- IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

Ketiga golongan transistor tersebut mempunyai susunan semikonduktor yang berbeda, sehingga karakteristik dan cara pengendaliannya juga berbeda-beda.

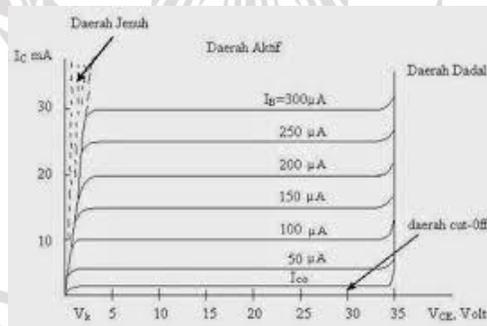
Bipolar Junction Transistor (BJT) merupakan bentuk keluarga transistor yang paling sederhana dan pertama kali ditemukan tahun 1953. BJT memiliki 3 terminal, yaitu kolektor, basis, emitor. Terminal basis digunakan untuk mengendalikan aliran arus pada kolektor-emitor. Bentuk gelombang arus yang diumpankan pada basis akan dibentuk serupa pada kolektor-emitor, tetapi dengan besaran berlipat

puluhan hingga ratusan kali. Beberapa bentuk transistor dilihat pada gambar 2.5 BJT, memiliki kecepatan pensaklaran paling rendah dibandingkan dengan keluarga transistor yang lain, berkisar pada 5 kHz dan daya hingga 50 kVa.



Gambar 2. 5 Bentuk fisik transistor

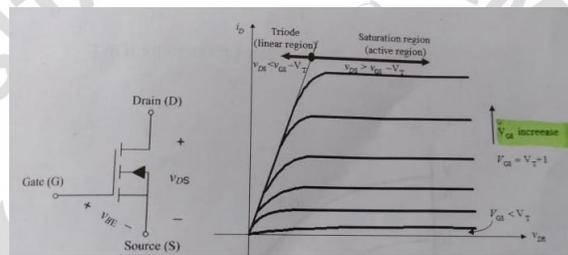
Simbol dan karakteristik BJT dapat dilihat pada gambar BJT dapat dilihat pada gambar 2.6 sumbu horisontal mewakili tegangan pada terminal kolektor-emitor, sedangkan sumbu vertikal adalah arus kolektor-emitor. Semakin besar arus yang diumpangkan pada basis, menghasilkan aliran arus dan tegangan yang lebih besar pula pada terminal Kolektor-Emitor.



Gambar 2. 6 Simbol dan grafik karakteristik BJT

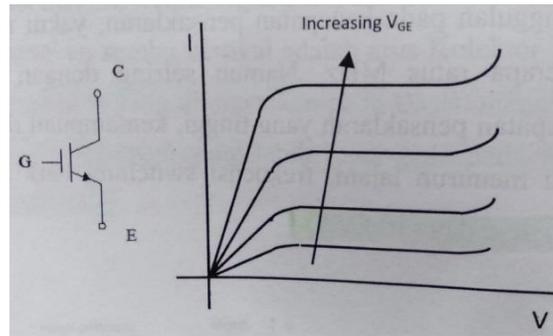
Keluarga transistor yang lainnya adalah dari golongan FET(Field Effect Transistor). Salah satu jenis FET yang amat populer banyak digunakan dalam aplikasi manufaktur adalah MOSFET. Transistor jenis memiliki 3 terminal dengan pengaman :

Saource, Gate, Drain. Terminal Gate adalah tempat pengendalian. Berbeda dengan BJT, pengendalian MOSFET bukan menggunakan arus, melainkan tegangan. Pengontrolan menggunakan tegangan sangat memudahkan dalam perancangan suatu rangkaian. Simbol dan karakteristik MOSFET disajikan pada gambar 2.7. MOSFET memiliki keunggulan pada kecepatan pensaklaran, yakni mampu hingga beberapa pensaklaran yang tinggi, kemampuan daya MOSFET akan menurun tajam, frekuensi switching berkisar hingga 50 MHz dan daya 10 Kva.

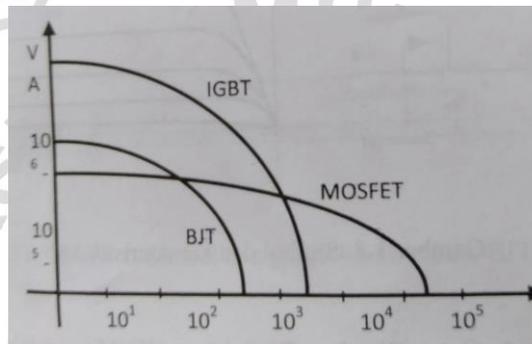


Gambar 2. 7 Simbol dan karakteristik MOSFET

Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) adalah gabungan antara BJT dan MOSFET. Terminal pengendali berupa Gate, sedangkan terminal yang dikendalikan adalah kolektor dan emitor. Karakteristik IGBTB mirip dengan BJT, tetapi teknik pengendaliannya menggunakan tegangan, simbol dan grafik karakteristik terdapat pada gambar 2.8. karakteristik kecepatan pensaklaran IGBT berada diantara BJT dan MOSFET. Kecepatan penyaklaran mampu hingga 70 kHz, sedangkan kemampuan daya IGBT hingga 5 MVA. Pada saat ini, IGBT merupakan saklar semikonduktor yang paling banyak digunakan dalam aplikasi dilapangan.



Gambar 2. 8 simbol dan karakteristik IGBT

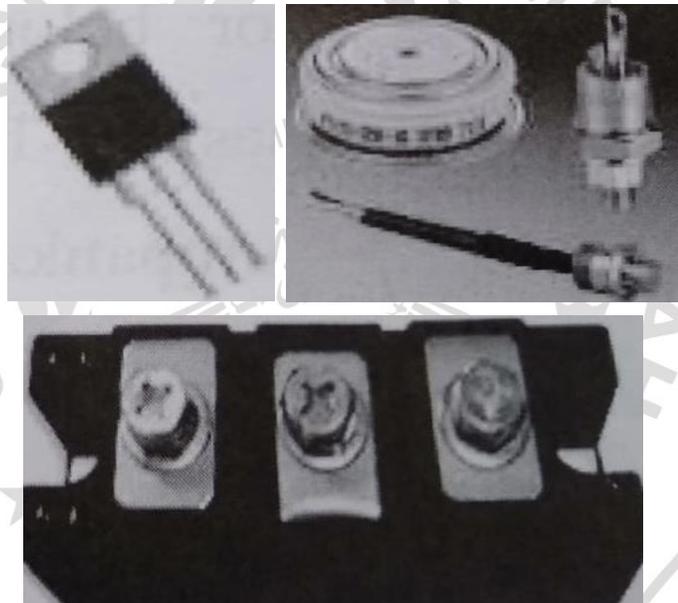


Gambar 2. 9 Kecapatan pensaklaran dan kemampuan daya transistor

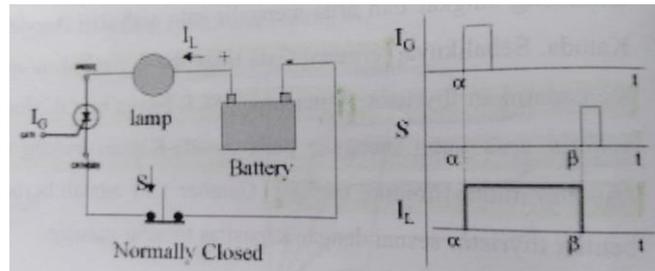
2.4 Saklar Semikonduktor : Thyristor

Thyristor atau juga disebut silicon control rectifier (SCR) tersusun atas 4 keping semikonduktor dan memiliki 3 terminal: Anoda, Katoda, Gate. Terminal Gate berfungsi untuk menyalakan thyristor, dimana Anoda dan Katoda seolah terhubung singkat dan arus mengalir satu arah Anoda ke Katoda. Sebaliknya, terminal Gate tidak dapat digunakan untuk memadamkan thyristor. Pemadaman SCR hanya bisa dilakukan apabila arus yang mengalir pada Anoda-Katoda kurang dari arus minimum (holding current). Gambar 2.10 adalah berbagai bentuk thyristor sesuai dengan kapasitas masing-masing.

Prinsip kerja sebuah thyristor dijabarkan mengikuti gambar 2.11. rangkaian baterai, lampu, SCR dan saklar S disusun pada gambar. terminal Anoda terpasang pada polaritas positif baterai, sedangkan Katoda terhubung pada polaritas negatif baterai. Susunan ini telah sesuai, sehingga memungkinkan SCR dapat konduksi. Namun, SCR hanya bisa konduksi apabila tegangan Anoda > tegangan Katoda, atau dengan kata lain arus yang akan mengalir searah dengan anak panah simbol SCR, yaitu dari Anoda ke Katoda. Kondisi ini disebut "*forward*"



Gambar 2. 10 Berbagai bentuk thyristor

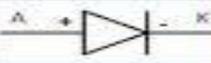
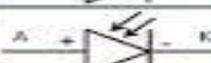


Gambar 2. 11 Prinsip kerja thyristor

Mengacu pada grafik gambar 2.11 thyristor belum akan menyala meskipun susunan rangkaian telah sesuai. Thyristor mulai konduksi saat arus pemantik, I_G , diumpankan pada terminal Gate pada saat $t = \alpha$. Konduksi thyristor ditandai dengan mengalirnya arus I_F , atau lampu menyala. Pada saat arus I_G telah habis atau kembali ke nol, terlihat arus I_F thyristor masih tetap mengalir. Disinilah perbedaan utama cara kerja thyristor dan transistor. Selanjutnya, thyristor akan padam apabila saklar S dipencet untuk beberapa saat, yang mengakibatkan arus I_F bernilai nol. Karena arus thyristor turun hingga dibawah arus minimum, maka thyristor akan padam. SCR akan kembali konduksi apabila arus Gate diumpankan kembali. Grafik karakteristik thyristor mirip dengan karakteristik Dioda, yang akan di bahas di bawah ini.

2.5 Saklar Semikonduktor : Dioda

Dioda merupakan perangkat power semikonduktor yang paling sederhana dibandingkan dengan jenis thyristor dan transistor. Gambar 2.12 menunjukkan beberapa bentuk dan ukuran dioda.

Nama Komponen	Gambar	Simbol
Dioda Penyearah		
Dioda Zener		
LED (Light Emitting Diode)		
Dioda Foto (Photo Diode)		
SCR (Silicon Control Rectifier)		
Dioda Laser (Laser Diode)		

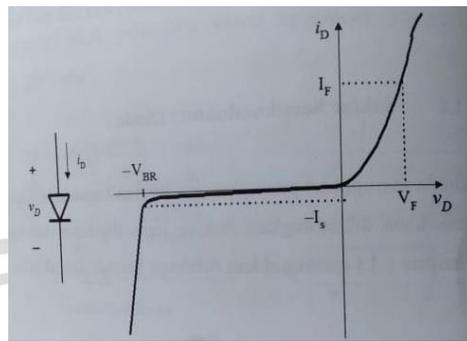
Gambar 2. 12 Berbagai macam dioda dalam berbagai ukuran.

Dioda adalah saklar semikonduktor yang mampu mengalirkan arus dalam satu arah dari terminal Anoda dan Katoda. Dioda secara otomatis akan konduksi apabila tegangan Anoda lebih tinggi dari tegangan Katoda dan melebihi tegangan *threshold* semikonduktor, yaitu sekitar 0,7 atau 0,9 volt. Sebaliknya, dioda secara otomatis akan pada apabila arus yang mengalir kurang dari arus minimum (*holding current*). Simbol dan karakteristik dioda ditunjukkan pada Gambar 2.13.

Dari gambar 2.13. dioda dalam kondisi *forward* atau konduksi pada saat ada aliran arus I_F . Pada kedua terminal timbul tegangan drop V_F , yang besarnya proporsional terhadap besar arus I_F . Sebaliknya diaoda berada dalam kondisi *reverse bias* atau tidak kodusi, untuk kurva yang berbeda disebalah kiri sumbu vertikal I_D . Diaoda non ideal terdapat arus bocor, digambarkan arus negatif dibawah sumbu horisontal V_D . Dalam kondisi

reverse, dioda akan secara otomatis konduksi apabila tegangan balik tersebut melebihi

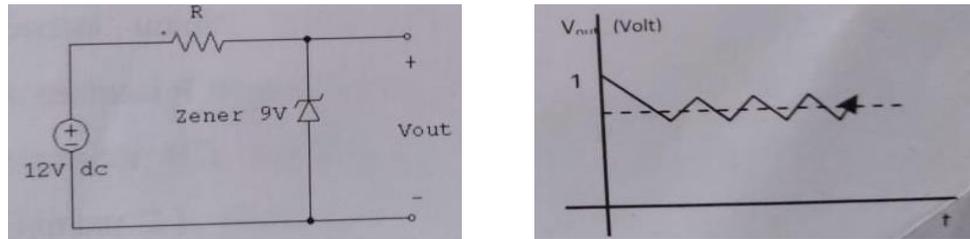
V_{BR} .



Gambar 2. 13 simbol dan karakteristik dioda

Salah satu jenis dioda yang dimanfaatkan fungsi V_{BR} adalah zener. Zener dioda pada umumnya digunakan untuk menstabilkan tegangan. Sebuah zener dioda memiliki tegangan V_{BR} tertentu sesuai dengan desain pabrik pembuat. Gambar 2.14 menyajikan contoh rangkaian yang menggunakan zener dioda dengan rating volt. Tegangan sumber 12 volt dc. Resistor berfungsi sebagai pembatas arus agar zener tidak rusak. Sesaat setelah sumber tegangan dihubungkan, maka zener dalam kondisi *reverse*. Karena tegangan pada terminal zener melebihi ratingnya (90 volt), maka zener akan konduksi. Sesaat setelah konduksi, tegangan pada terminal zener akan turun menuju ke nol. Disaat tegangan terminal zener tepat dibawa 9 volt, zener akan berubah ke posisi non konduksi. Ini akan mengakibatkan tegangan di terminal zener akan naik menuju ke 12 volt, dan zener akan kembali konduksi. Operasi on dan off ini terjadi berulang-ulang di sekitar 9 volt, sehingga didapatkan tegangan konstanta pada terminal zener dioda,

V_{out} .

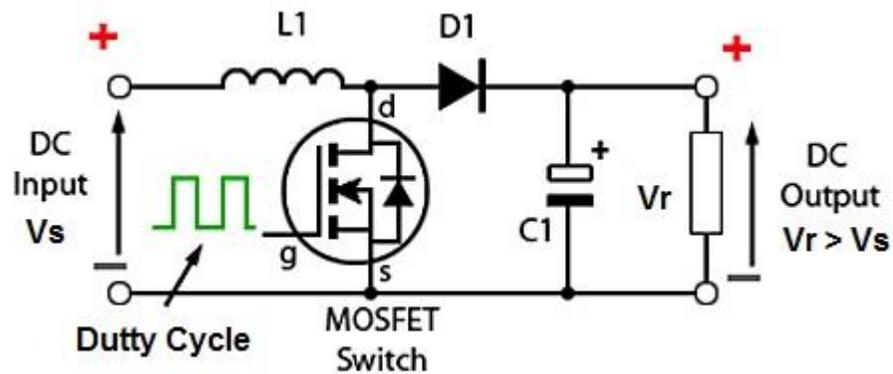


Gambar 2. 14 contoh rangkaian yang menggunakan zener dioda dengan rating volt

2.6 Boost Konverter

Boost converter adalah sebuah rangkaian daya yang mampu menyediakan tegangan output yang lebih besar dibanding tegangan sumber atau inputnya [6].

Tata letak inductor, diode, dan saklar Mosfet tersusun seri terhadap sumber dan akan terhubung langsung ke tegangan sumber pada saat saklar Mosfet dinyalakan yang ditunjukkan pada gambar 2.15



Gambar 2. 15 rangkaian Boost Converter

Cara kerja Boost converter dipaparkan dalam 2 mode:

- Mode pengisian arus inductor (saklar Mosfet konduksi)
- Mode pengosongan arus inductor (saklar Mosfet padam)

Pada saat saklar Mosfet konduksi, konduktor akan dihubung-singkat dengan tegangan sumber. Karena semua arus mengalir negative melalui saklar, maka arus mengalir ke beban R dapat diabaikan [6].

Tegangan resistor V_r adalah tegangan output converter dan akan berharga nol selama pengisian berlangsung. Persamaan tegangan rangkaian dapat dituliskan sebagai berikut:

$$V_s = L \frac{di}{dt} \quad (2.3)$$

Karena saklar Mosfet konduksi berlangsung selama t_{on} , karena linier maka penyebut dt pada persamaan diatas dapat diganti dengan t_{on} , sedangkan $di = \Delta I$ sehingga diperoleh:

$$V_s = L \frac{\Delta I}{t_{on}} \quad (2.4)$$

Diubah ke bentuk lain:

$$L \Delta I = V_s t_{on} \quad (2.5)$$

Pada saat saklar Mosfet padam, tegangan sumber akan terangkai seri terhadap inductor dan beban, inductor yang semula dalam mode pengisian arus akan berubah menjadi mode pengosongan arus. Pada kondisi ini, inductor berfungsi sebagai sumber arus atau sumber tegangan, sedangkan resistor sebagai beban [6].

Terlihat bahwa resistor R dicatu oleh 2 buah sumber yang di seri, yaitu sumber tegangan V_s dan V_L . kondisi inilah yang menyebabkan tegangan output Boost Converter selalu lebih tinggi dari tegangan inputnya. Rentang waktu saat saklar Q padam adalah t_{off} , sehingga persamaan tegangan berubah menjadi:

$$V_s + L \frac{\Delta I}{t_{\text{off}}} = V_r \quad (2.6)$$

Persamaan (2.4) disubstitusikan dengan persamaan (2.6) akan dihasilkan:

$$V_s = V_s \frac{t_{\text{on}}}{t_{\text{off}}} + V_r \quad (2.7)$$

$$V_r = V_s \left(1 - \frac{t_{\text{on}}}{t_{\text{off}}} \right) \quad (2.8)$$

Dari persamaan sebelumnya, diketahui bahwa $t_{\text{on}} + t_{\text{off}} = T$ dan $t_{\text{off}} = (1-k) T$, maka persamaan (2.8) dapat diubah menjadi

$$V_r = V_s \frac{1}{1-k} \quad (2.9)$$

Persamaan (2.9) adalah untuk menghitung tegangan output sebagai fungsi tegangan input dan *duty cycle*. Dalam persamaan tersebut tidak terlihat peran nilai inductor ataupun nilai frekuensi switching dalam menentukan tegangan output. Namun, inductor dan frekuensi switching sangat mempengaruhi riak gelombang output. Riak arus berhubungan dengan nilai induktansi, sedangkan riak tegangan dipengaruhi oleh kapasitansi. Menggunakan rangkaian boost converter saat saklar Q konduksi diperoleh hubungan antara riak arus dan inductor sebagai berikut:

$$V_s = L \frac{\Delta I}{t_{\text{on}}} \quad (2.10)$$

Dari persamaan tersebut, nilai induktansi L dapat diperoleh secara langsung apabila riak arus ΔI ditentukan terlebih dahulu. Setelah ditentukan nilai riak arus maka diperoleh nilai kapasitor dengan rumus :

$$C = V_{\text{max}} \frac{1-k}{f_{\text{RAV}}} \quad (2.11)$$

Maka diperoleh hubungan:

$$\Delta V = V_{max} \left(\frac{t_{off}}{RC} \right) \quad (2.12).$$

2.7 PID (Proportional Integral Derivative) kontroler

Kontroler otomatis membandingkan harga yang sebenarnya dari keluaran “proses” dengan harga yang diinginkan, menentukan deviasi, dan menghasilkan suatu sinyal kontrol untuk memperkecil deviasi sampai nol atau suatu harga yang kecil, dengan cepat, tepat, dan stabil.

Cara kontroler otomatis menghasilkan keluaran sinyal kontrol disebut mode pengendalian (*control mode*). Kontroler otomatis di industri dapat diklasifikasikan sesuai dengan mode pengendaliannya sebagai berikut [8] :

1. Mode kontrol *on off*
2. Mode kontrol *proportional*
3. Mode kontrol *proportionalintegral*
4. Mode kontrol *proportionalintegral derivative*

Pada proses kontrol terdapat dua jenis proses yaitu proses *servo*, sering mengalami perubahan titik proses (*SV*) dan proses *regulator*, sering mengalami perubahan pada beban. Blok diagram kedua proses dapat dilihat pada gambar 2.5 untuk *regulator* dan 2.6 untuk *servo*. Dalam rumus penghitungan pada mode pengendalian (persamaan matematis kontroler PID), untuk proses dengan jenis *servo* perlu ditambahkan elemen bias.

2.7.1 Kontroler “On-Off”

Dengan mode kontrol *on-off*, pada intinya pengontrol merupakan sebuah saklar yang diaktivasi oleh sinyal *error* dan hanya menyuplai sinyal pengoreksi *on-off*. Keluaran pengontrol hanya mempunyai dua nilai yang mungkin, ekuivalen dengan kondisi *on* dan *off*. Karena aksi kontrolnya yang bersifat diskontinu, serta terdapat ketertinggalan waktu di dalam sistem, maka akan muncul kondisi osilasi dari nilai variabel yang dikontrol disekitar nilai yang diharapkan.

Kontrol *on-off* merupakan mode kontrol yang sederhana dan murah, dan sering kali digunakan dengan osilasi yang direduksi hingga level yang dapat diterima.

2.7.2 Kontroler proposional

Kontrol proporsional dirancang untuk menghilangkan osilasi disekitar nilai *set point* yang diakibatkan oleh kontrol *on-off*, sehingga kontrol proposional memiliki respond yang lebih stabil dibandingkan dengan kontrol *on-off*.

Pada kontrol proposional, besar *manipulated variable* adalah proposional terhadap besar *error* yang terjadi. Persamaan matematis kontroler proposional dapat dituliskan sebagai berikut :

$$mv_{(t)} = Kp \cdot e_{(t)} \quad (2.13)$$

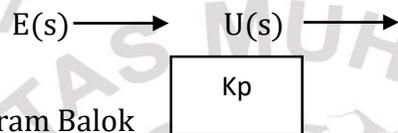
Dimana :

$$Kp = \frac{100\%}{PB}, \text{ PB (\%): } \textit{propotional band}$$

Atau dalam bentuk transfer function ,

$$\frac{U(s)}{E(s)} = Kp \quad (2.14)$$

Dalam bentuk diagram balok, kontroler tipe-P ini digambarkan sebagai:



Gambar 2.16 Diagram Balok Kontroler tipe-P

Band proportional merupakan angka presentase terhadap skala penuh indikator, dimana output kontroler membuka (atau menutup) *control valve* dari posisi 0% sampai 100% [8].

Pengontrolan proposional memiliki keterbatasan berupa *steady state error* (*error keadaan tunak*) atau *offset proportional*. Semakin tinggi *gain* penguat, maka semakin rendah *offset* karena sistem akan bereaksi dengan lebih cepat. Mode kontrol proporsional cenderung digunakan dalam proses-proses dimana *gain* K_p dapat dibuat cukup besar untuk mereduksi *error* keadaan tunak hingga level yang dapat diterima. Namun, semakin besar *gain* , maka semakin besar pula peluang sistem berosilasi. Osilasi terjadi karena keteringgalan atau jeda waktu pada sistem, dimana semakin besar *gain*, maka semakin besar aksi pengontrolan untuk suatu nilai *error* tertentu, sehingga akan semakin besar peluang bahwa sistem akan melewati nilai pengaturan dan osilasi terjadi.

2.7.3 Kontroler proportional integral

Dalam aplikasi dilapangan, kontrol proporsional integral biasa digunakan untuk pengontrolan proses yang memiliki dinamika relatif cepat (seperti aliran, tekanan, dan level). Berdasarkan sebuah survei dinyatakan bahwa hampir 80% kontroler PID yang terinstal di industri menggunakan kontrol PI dalam operasinya [8].

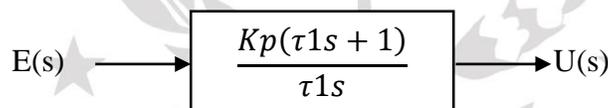
Untuk sebuah modul kontrol PID, kontrol PI dapat diperoleh dengan cara *setting* nilai gain (waktu) *derivative* sama dengan nol, sehingga secara matematis dapat ditulis sebagai berikut :

$$mv_{(t)} = Kp \left[e_{(t)} + \frac{1}{T_i} \int_0^t e_{(t)} dt \right] \quad (2.15)$$

atau dalam bentuk transfer function,

$$\frac{U(s)}{E(s)} = Kp \left(1 + \frac{1}{\tau 1s} \right) \text{ atau } \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{Kp(\tau 1s + 1)}{\tau 1s} \quad (2.16)$$

Dalam bentuk diagram balok, kontroler tipe-PI ini digambarkan sebagai:



Gambar 2. 17 Balok kontroler tipe-PI

Penambahan integrator dalam kontroler pada dasarnya dimaksudkan untuk menggantikan sinyal bias manual (atau manual reset) yang berfungsi untuk menghilangkan error *steady*. Sehingga selama masih ada error atau selisih antara

setpoint dengan *variable proses*, output kontroler PI akan terus membesar atau mengecil.

2.7.4 Kontroler proportional integral derivative

Aksi kontrol PID pada dasarnya bertujuan untuk menggabungkan kelebihan – kelebihan komponen – komponen dasar kontrol PID :

- **Kontrol proposional**, berfungsi untuk mempercepat respon.
- **Kontrol integral**, berfungsi untuk menghilangkan *error steady*.
- **Kontrol derivatif**, berfungsi untuk memperbaiki sekaligus mempercepat respon transien.

Secara matematis kontrol proposional integral derivatif dapat dituliskan sebagai berikut :

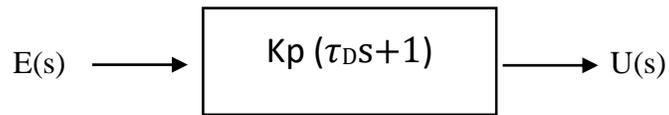
$$mv_{(t)} = Kp \left[e_{(t)} + \frac{1}{T_i} \int_0^t e_{(t)} dt + T_d \frac{de_{(t)}}{dt} \right] \quad (2.17)$$

$$u(t) = Kp \left[e(t) + t_D \frac{d}{dt} e(t) \right] \quad (2.18)$$

atau dalam bentuk transfer function,

$$\frac{U(s)}{E(s)} = Kp (\tau D s + 1) \quad (2.19)$$

Dalam bentuk diagram blok, kontroler tipe-PD ini digambarkan sebagai:



Gambar 2. 18 Balok kontroler tipe-PD

2.7.5 Kontroler tipe-PID (Proportional Integral Derivative controller)

Dalam system pengaturan dikenal dua macam kontroler tipe-PID, yaitu; kontroler PID standar (standar PID controller) dan kontroler PID yang dimodifikasi (modified PID controller).

a. Standar PID Controller

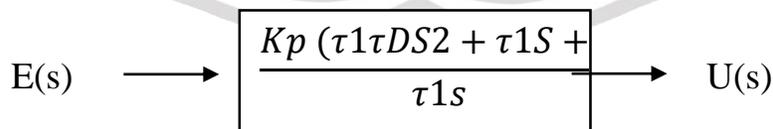
Hubungan sinyal eror dan sinyal control pada control tipe-PID standar dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$u(t) = K_p [e(t) + \int e(t) dt + \tau_D \frac{d}{dt} e(t)] \quad (2.20)$$

atau dalam bentuk transfer function,

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right) \text{ atau } \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_p (\tau_I \tau_D s^2 + \tau_I s + 1)}{\tau_I s} \quad (2.21)$$

Dalam bentuk diagram balok, kontroler tipe-PID ini digambarkan sebagai:



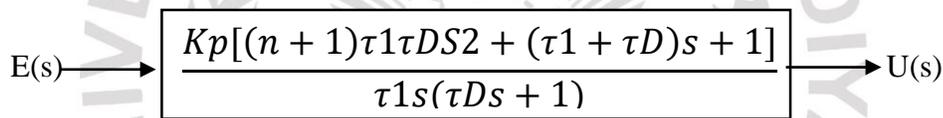
Gambar 2. 19 Diagram Balok kontroler standar tipe-PID

b. Modified PID Controller

Hubungan sinyal eror dan sinyal control pada kontroler tipe-PID yang modifikasi dapat dinyatakan sebagai berikut: $n\tau_D^s$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = Kp\left(1 + \frac{1}{\tau I s} + \frac{n\tau D s}{\tau I s + 1}\right) \text{ atau } \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{Kp[(n+1)\tau I \tau D s^2 + (\tau I + \tau D)s + 1]}{\tau I s(\tau D s + 1)} \quad (2.22)$$

Dalam bentuk diagram balok, kontroler tipe-PID ini digambarkan sebagai:



Gambar 2. 20 Diagram balok kontroler modifikasi tipe-PID

2.8 Tuning Kontroler

Salah satu latar belakang penggunaan kontrol PID digunakan hampir pada setiap industry yang bergerak dibidang proses adalah kesederhaan struktur kontrolnya. Selain hanya memiliki tiga parameter kontrol yang perlu diatur atau dilakukan usaha tuning (penalaan), pengaruh perubahan setiap parameter PID terhadap dinamika pengontrolan secara intuitif mudah dipahami oleh operator.

Tuning kontroler (penalaan) merupakan suatu proses pengaturan nilai *proportional band* (PB) atau K_p (100), *integral/reset time* (T_i), dan *derivative/rate time* (T_d) pada nilai yang menghasilkan kinerja sistem pengoperasian proses optimal.

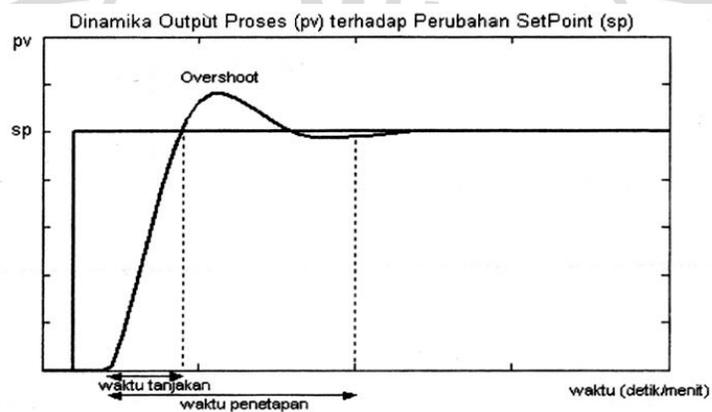
Kondisi optimal tuning dapat tercapai bila kinerja dari sistem kontrol dapat stabil (tidak fluktuasi), tepat (*steady state error*), dan cepat (*transient respons*). Kondisi ini dapat kita lihat berdasar pada beberapa parameter. Berikut ini adalah tabel mengenai pengaruh tuning pada salah satu parameter PID terhadap unjuk kerja proses.

Tabel 2. 1 Pengaruh tuning parameter PID terhadap unjuk kerja proses

	Waktu Tanjakan	Overshoot	Waktu Penetapan	Kestabilan
Pembesaran K_p	Berkurang	Bertambah	Sedikit Bertambah	Menurun
Pembesaran K_i (Pengecilan T_i)	Sedikit Berkurang	Bertambah	Bertambah	Menurun
Pembesaran K_d (Pembesaran T_d)	Sedikit Berkurang	Berkurang	Berkurang	Meningkat

Berikut ini adalah penjelasan mengenai parameter – parameter unjuk kerja yang nampak pada tabel 2.1.

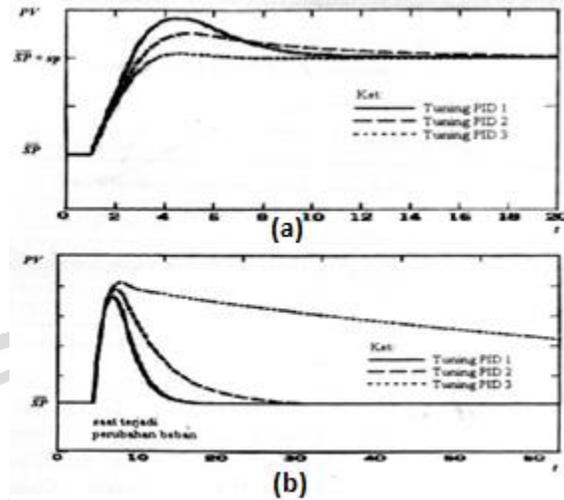
- **Waktu tahanan**, waktu yang diperlukan respon (deviasi output variabel proses) untuk naik dari 0 sampai 100% harga akhirnya.
- **Overshoot**, lonjakan maksimum yang dialami oleh respon proses.
- **Waktu penetapan**, waktu yang diperlukan respon untuk mencapai dan menetap disekitar 95%-98% dari harga akhirnya.



Gambar 2. 21 Respon Proses sebagai akibat perubahan SV

Nilai parameter PID yang optimal pada dasarnya dapat dicari secara mudah berdasarkan metode – metode tuning yang telah dikembangkan oleh sejumlah peneliti. Beberapa hal yang perlu diperhatikan sebelum melakukan tuning, antara lain.

- **Struktur PID**, kontrol P, PI, atau PID.
- **Karakteristik proses**, walaupun pada tuning metode Ziegler & Nichols terdapat cara tuning bila tidak diketahui karakteristik prosesnya. Karakteristik proses ini dapat dicari dengan menggunakan model FOPDT dan IPDT.
- **Problem proses**, pengaruh tuning pada problem *servo* maupun *regulator*.



Gambar 2. 22 (a) Problem servo, respon proses dalam menanggapi perubahan setpoint, (b) Problem regulator, respon proses dalam menanggapi perubahan beban (gangguan).

2.8.1 Karakteristik Proses dengan FOPDT

Berkaitan dengan masalah pengontrolan, salah satu kunci utama keberhasilan adalah pengetahuan mengenai karakteristik dinamik atau model proses yang akan dikontrol. Pengetahuan model sangat penting mengingat secara teknis terdapat hubungan antara proses yang akan dikontrol parameter PID yang harus di-*tuning*.

Dalam banyak kasus, karakteristik dari suatu proses dapat diketahui melalui dua model matematis berikut :

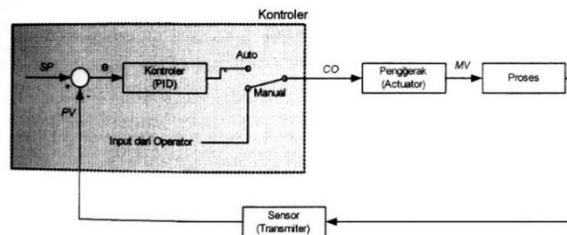
- **Model proses self regulating**, model proses yang bersifat stabil. Untuk kepentingan perancangan dan tuning parameter kontrol PID-nya, model proses

ini dapat didekati oleh sebuah model matematis yang dikenal dengan nama **FOPDT** (*First Order Plus Dead Time*) yang hanya dicirikan oleh tiga buah parameter : Keterlambatan transportasi (**L**), Konstanta waktu (**T**), dan Gain statis proses (**K**).

- **Model proses non self regulating**, model proses yang tidak stabil. Salah satu yang sering dijumpai di industri adalah model **IPDT** (*Integrating Plus Dead Time*) yang hanya dicirikan oleh dua buah parameter, yaitu Keterlambatan transportasi (**L**) dan Gain integratif proses (**K***).

Pada sub-bab ini akan lebih banyak mengulas mengenai metode FOPDT yang paling umum dijumpai di industri proses.

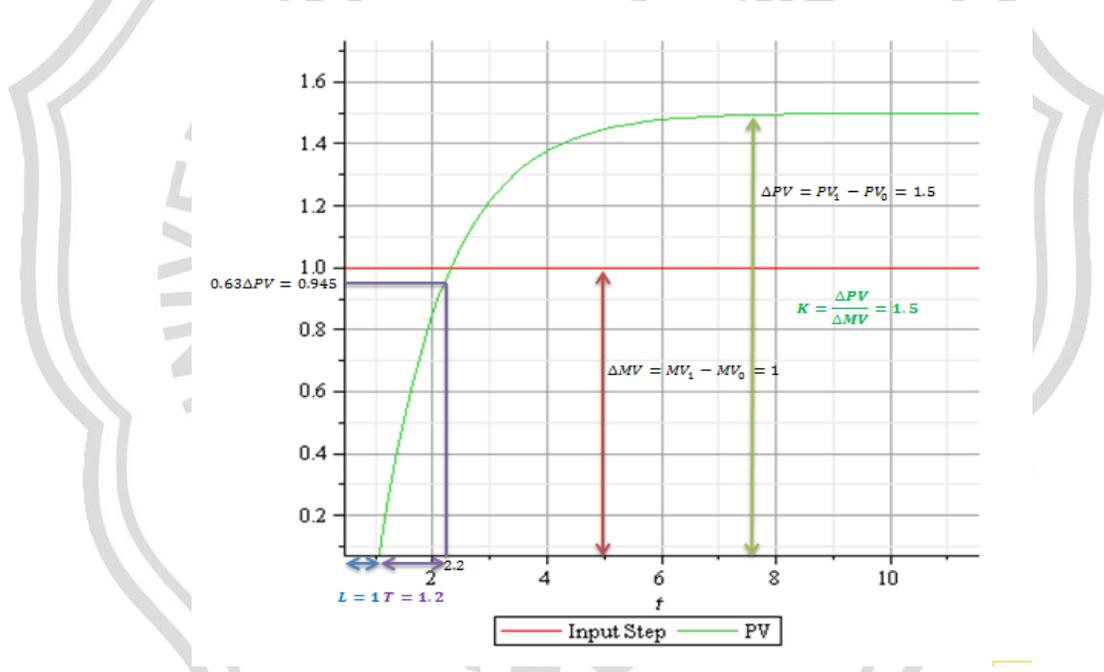
Seperti telah sedikit disinggung di atas, model *self regulating process* pada dasarnya dapat didekati dengan metode matematis **FOPDT** (*First Order Plus Dead Time*) yang hanya dicirikan oleh tiga buah parameter. Ketiga parameter yang menggambarkan dinamika proses tersebut, secara praktis dapat diperoleh atau diidentifikasi melalui eksperimen sederhana *Bump Test* atau tes sinyal tangga secara *open loop* pada mode kontrol manual, seperti pada gambar 2.18.



Gambar 2. 23 Eksperimen Bump Test pada mode kontrol manual (open loop)

Secara teknis, eksperimen *bump test* dilakukan dengan cara memberi perubahan tangga (*step*) sinyal output kontroler oleh operator pada saat proses telah

mengalami *steady* (menetap) disekitar titik kerja nominalnya. Respon variabel output (PV) kemudian direkam dan dianalisis dengan menggunakan perangkat lunak tertentu atau dapat juga dianalisis secara manual oleh operator yang bertanggung jawab pada proses tersebut.



Gambar 2. 24 Respon tangga pada eksperimen bump test untuk model FOPDT

Dengan mengacu grafik respon tangga pada gambar 2.19 parameter – parameter proses FOPDT dapat dicari/dihitung sebagai berikut :

- Keterlambatan transportasi proses, L , waktu keterlambatan transportasi atau waktu ketidakpastian yang terjadi pada proses dihitung sejak terjadi perubahan tangga pada MV sampai PV yang dikontrol mulai menanggapi perubahan input MV tersebut.
- Konstanta waktu proses (*time constan*), T , waktu yang diperlukan agar nilai PV mencapai kurang lebih 63% dari keadaan *steady* akhirnya. Perhitungan nilai *time constan* dimulai setelah waktu tunda berlalu. Selain dengan cara mengamati respon dari grafik, konstanta waktu proses dapat dihitung berdasarkan *gradient* atau *slope max* yang terjadi pada saat masa transien.

$$T = \frac{\Delta PV}{\text{slope max}} \quad (2.23)$$

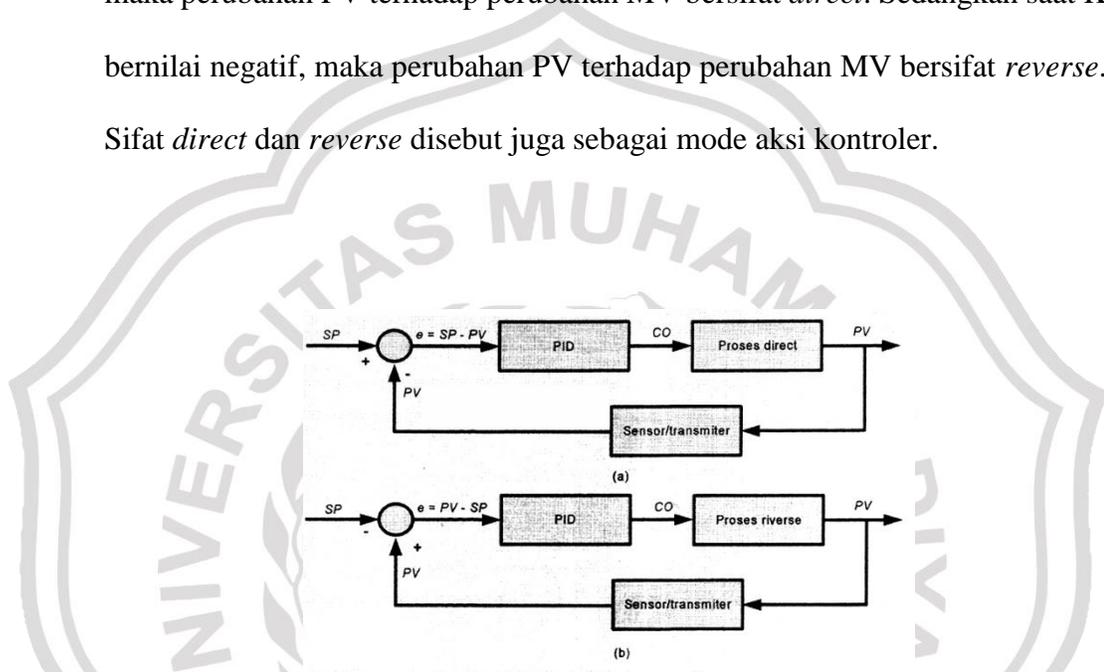
Besarnya konstanta waktu tersebut pada dasarnya menunjukkan kecepatan respon proses, semakin kecil nilai konstanta waktu, respon semakin cepat. Nilai ini pada dasarnya ditentukan oleh tiga hal utama, yaitu dimensi *plant* tempat kontrol proses berlangsung, jenis material dan beban yang terlihat pada kontrol proses, dan kekuatan atau daya penggerak.

- Gain statis proses, K , perbandingan perubahan PV terhadap perubahan MV dalam keadaan *steady*.

$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta MV} \quad (2.24)$$

Nilai gain proses ini secara langsung menunjukkan kesensitifan dari proses, semakin besar gain statis maka proses semakin sensitif.

Gain statis proses pada dasarnya dapat bernilai positif dan negatif tergantung dari proses dan sifat *control valve* (hal ini berbeda dengan dua parameter proses sebelumnya yaitu, L dan T yang selalu bernilai positif). Bila K bernilai positif, maka perubahan PV terhadap perubahan MV bersifat *direct*. Sedangkan saat K bernilai negatif, maka perubahan PV terhadap perubahan MV bersifat *reverse*. Sifat *direct* dan *reverse* disebut juga sebagai mode aksi kontroler.



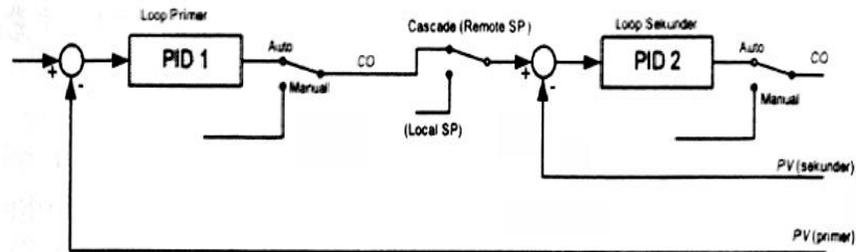
Gambar 2. 25 Prinsip kerja (a) mode aksi reverse, (b) dan mode aksi direct

Berdasarkan nilai ketiga parameter diatas, persamaan diferensial yang menggambarkan perilaku proses diatas secara umum dapat direpresentasikan kedalam bentuk fungsi alih proses seperti yang direlasikan oleh persamaan berikut ini :

$$H(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-sL} \quad (2.25)$$

$H(s)$: fungsi alih kontrol proses FOPDT

2.8.2 Tuning cascade control



Gambar 2. 26 Aliran Sinyal Kontrol Lengkap pada mode Cascade

Berikut adalah langkah-langkah untuk melakukan tuning pada sistem kontrol *cascade* :

- 1 Letakkan kedua loop pada mode manual.
- 2 Lakukan tuning terlebih dahulu pada loop sekunder, seperti pada tuning sistem kontrol PID loop tunggal. Jika parameter proses sekunder telah diketahui secara pasti, parameter kontrol PID dapat dihitung secara mudah dengan menggunakan metode tuning yang telah dijelaskan diatas.
- 3 Setelah setting di loop sekunder menghasilkan respon yang cukup mantap, ubah mode kontrol loop sekunder ke auto. Kemudian tuning dilakukan pada loop primer, yaitu dengan terlebih dahulu mengubah mode loop kontrol sekunder dari posisi auto ke cascade. Dengan menganggap sistem kontrol memiliki

bumplesstransfer, secara otomatis output kontrol primer akan diinisialisasi dengan nilai setpoint dari loop sekunder.

- 4 Lakukan tuning dengan menggunakan metode-metode yang ada diatas

2.9 FireFly Algorithm

Pada bidang *artificial intelligence* atau kecerdasan buatan ada istilah *swarm intelligence* yang diartikan sebagai desain algoritma atau alat *problem solving* terdistribusi yang terinspirasi oleh perilaku sosial kolektif koloni serangga dan koloni binatang [12]. FA merupakan salah satu algoritma *swarm intelligence* yang berkembang sangat cepat pada hampir semua bidang permasalahan optimasi dan perancangan [10]. Algoritma ini dikembangkan oleh Dr Xin-She Yang di Universitas Cambridge pada tahun 2007. Formulasi umum dari algoritma ini disajikan bersama-sama dengan pemodelan matematika analisis untuk memecahkan masalah dengan tujuan ekuivalen fungsi.

Dr. Xin-She Yang merumuskan 3 persamaan yang dibuat dalam hal perilaku pergerakan kunang- kunang yaitu:

1. Intensitas Cahaya

Ada dua hal yang berkaitan dan sangat penting dalam firefly algorithm yaitu intensitas cahaya dan fungsi keatraktifan. Dalam hal ini banyak dari kita berasumsi bahwa keatraktifan dipengaruhi oleh tingkat intensitas cahaya. Untuk

kasus yang paling sederhana contohnya masalah optimasi maksimum, tingkat intensitas cahaya pada sebuah kunang-kunang x dapat dilihat sebagai,

$$I(x) = f(x) \quad (2.26)$$

Dengan nilai I merupakan tingkat intensitas cahaya pada x kunang-kunang yang sebanding terhadap solusi fungsi tujuan permasalahan yang akan dicari $f(x)$. Keatraktifan β yang bernilai relatif, karena intensitas cahaya yang harus dilihat dan dinilai oleh kunang-kunang lain. Dengan demikian, hasil penilaian akan berbeda tergantung dari jarak antara kunang-kunang yang satu dengan yang lainnya r_{ij} . Selain itu, intensitas cahaya akan menurun dilihat dari sumbernya

dikarenakan terserap oleh media contohnya udara γ [11]. Fungsi keatraktifan ialah sebagai berikut [11]:

$$\beta(r) = \beta_0 \cdot e^{-\gamma r^m}, \quad (m \geq 1) \quad (2.27)$$

2. Jarak

Jarak antara dua kunang-kunang setiap i dan j , pada posisi x_i dan x_j , masing-masing, dapat didefinisikan sebagai jarak *Cartesian* atau *Euclidean* sebagai berikut:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (2.28)$$

3. Pergerakan Kunang-kunang

Pergerakan i kunang-kunang yang tertarik oleh, lebih terangnya kunang-kunang j diberikan oleh persamaan berikut:

$$x_i = x_i + \beta_0 * \exp(-\gamma r_{ij}^2) * (x_j - x_i) + a * \left(\text{rand} - \frac{1}{2}\right) \quad (2.29)$$

