

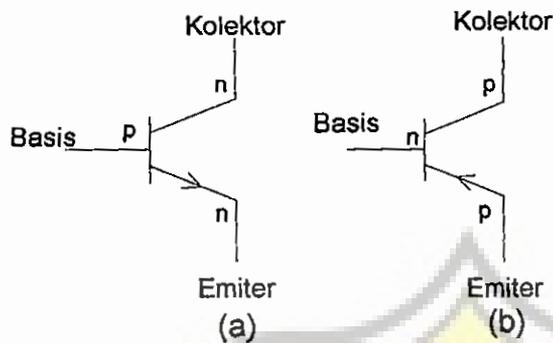
## **BAB II LANDASAN TEORI**

### **2.1. PENDAHULUAN**

Sebelum mengadakan kajian teoritis ini perlu dijelaskan teori dasar yang mendukung untuk perancangan Chopper klas E sebagai penggerak motor DC maka pada bab ini akan dibahas tentang chopper yang ditinjau dari besarnya tegangan masukan dan tegangan keluaran serta chopper bila ditinjau dari daerah kerjanya. Chopper atau sering kita sebut sebagai konverter DC-DC adalah sebuah devais atau alat yang dapat mengubah tegangan DC tetap menjadi tegangan DC variabel.

### **2.2 TRANSISTOR**

Transistor merupakan alat dengan tiga terminal seperti yang diperlihatkan oleh simbol sirkit pada gambar 2.1. setelah bahan semikonduktor dasar diolah, terbentuklah bahan semikonduktor janis p dan n. Walaupun proses pembuatannya banyak, pada dasarnya transistor merupakan tiga lapis gabungan kedua jenis bahan tadi, yaitu n p n atau p n p.



**Gambar 2.1 : Simbol sirkit untuk transistor . (a) n p n ; (b) p n p**

Simbol sirkit kedua jenis transistor itu hampir sama . Perbedaannya terletak pada arah panah diujung emitter. Seperti yang telah diketahui, arah panah ini menunjukkan arah aliran arus konvensional yang berlawanan arah dalam kedua jenis tadi tetapi selalu dari bahan jenis p ke jenis n dalam sirkit emitter dasar. Untuk menghindari kesalahan, transistor yang dibicarakan disini selalu n p n, kecuali bahwa polaritas tegangan suplai pada sirkit yang memakai transistor jenis p n p terbalik dan arus mengalir dalam arah yang berlawanan dengan sirkit yang memakai transistor n p n.

### 2.2.1 . TRANSISTOR n p n

Kolektor dan emitter merupakan bahan n dan lapisan diantara mereka merupakan jenis p. Transistor bekerja dalam satu arah, ialah dengan saling menghubungkan ujung – ujung kolektor dan emitter karena mereka terbuat dari jenis bahan yang sama. Namun, hal ini tidaklah mungkin karena mereka tidak terbuat dengan ukuran yang sama. Kolektor berukuran lebih besar dan kebanyakan

dihubungkan secara langsung ke kotaknya untuk penyerapan panas. Ketika transistor digunakan hampir semua panas yang terbentuk berada pada sambungan basis-kolektor yang harus mampu menghilangkan panas ini. Sambungan basis emitter hanya mampu menahan tegangan yang rendah. Operasi dalam arah balik dapat dijalankan tetapi tidak efisien, sehingga tidak sesuai dengan metode hubungan praktis karena sangat sering merusakkan alat.

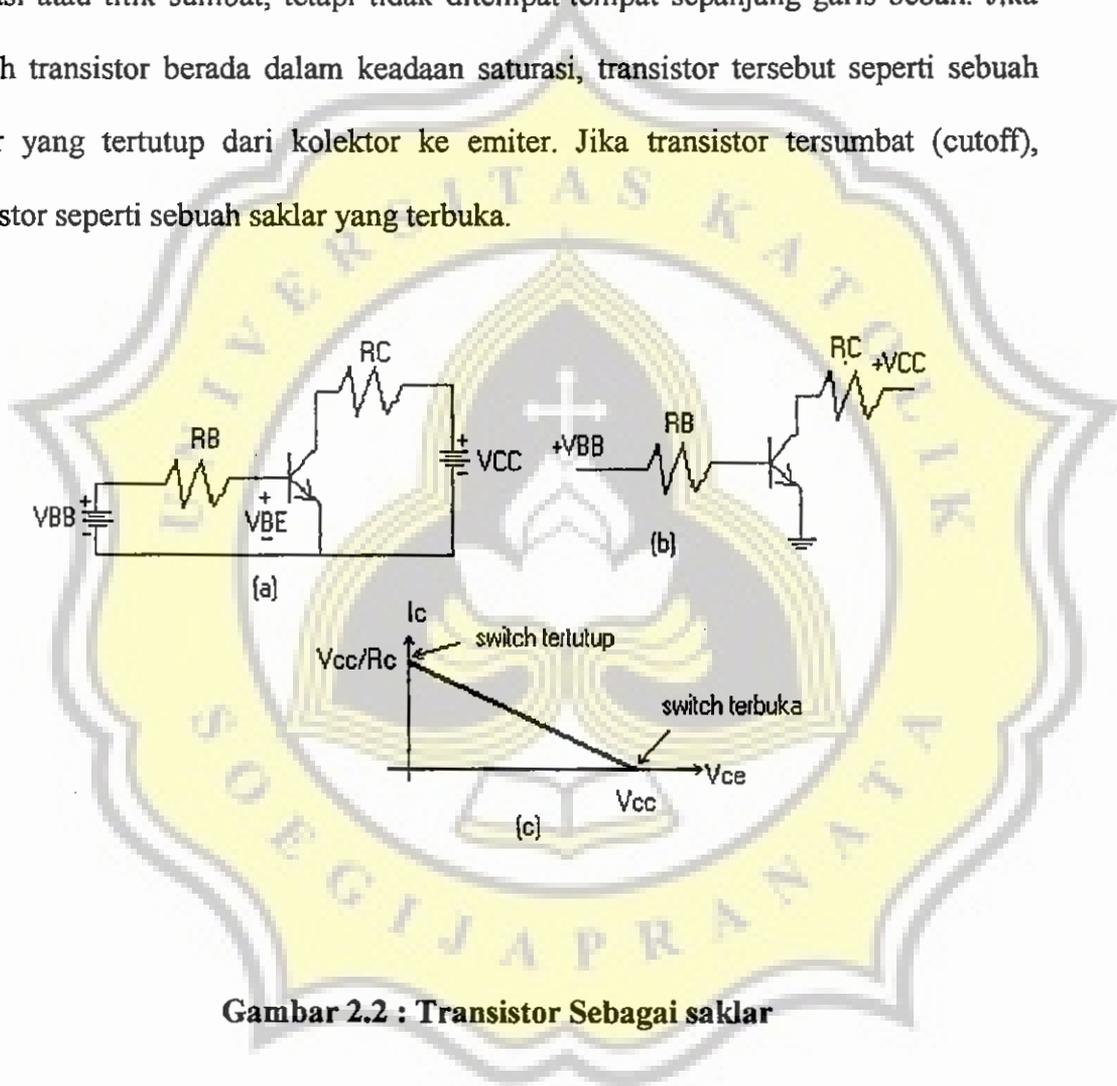
Pada umumnya transistor dianggap sebagai suatu alat yang beroperasi karena adanya arus. Kalau arus mengalir ke dalam basis dan melewati sambungan basis emitter, suatu suplai positif pada kolektor akan menyebabkan arus mengalir antara kolektor dan emitter. Dua hal yang harus diperhatikan pada arus kolektor ini adalah:

1. Untuk arus basis nol, arus kolektor turun sampai pada tingkat arus kebocoran, yaitu kurang dari  $1\mu\text{A}$  dalam kondisi normal ( untuk transistor silikon ).
2. Untuk arus basis tertentu, arus kolektor yang mengalir akan jauh lebih besar daripada arus basis itu. Arus yang dicapai disebut  $h_{FE}$  dengan

$$h_{FE} = \frac{i_C}{i_B} = \frac{\text{perubahan arus kolektor}}{\text{perubahan arus basis}}$$

### 2.2.2. TRANSISTOR SEBAGAI SAKLAR

Cara yang termudah untuk menggunakan sebuah transistor adalah sebagai sebuah saklar artinya bahwa kita mengoperasikan transistor pada salah satu dari saturasi atau titik sumbat, tetapi tidak ditempat-tempat sepanjang garis beban. Jika sebuah transistor berada dalam keadaan saturasi, transistor tersebut seperti sebuah saklar yang tertutup dari kolektor ke emiter. Jika transistor tersumbat (cutoff), transistor seperti sebuah saklar yang terbuka.



Gambar 2.2 : Transistor Sebagai saklar

Gambar 2.2(a) menunjukkan rangkaian *switching* transistor, gambar 2.2(b) adalah cara yang biasa kita lihat. Penjumlahan tegangan sekitar *loop* input memberikan

$$I_B R_B + V_{BE} - V_{BB} = 0$$

$$I_B R_B = V_{BE} - V_{BB}$$

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

Ini merupakan hukum ohm untuk tahanan basis. Sebagai contoh, andaikan diketahui

$$V_{BB} = 5 \text{ V}$$

$$R_{BB} = 1 \text{ MOhm}$$

Maka akan kita peroleh :

$$I_B = \frac{5 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{1 \text{ M}\Omega}$$

$$= \frac{4,3}{1 \text{ M}\Omega}$$

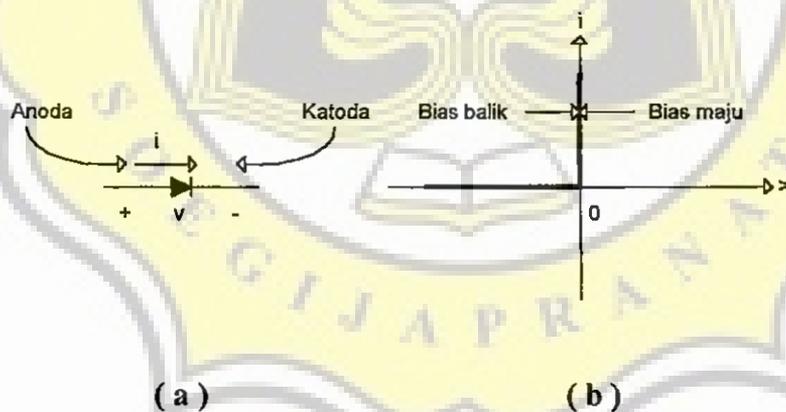
$$= 4,3 \text{ } \mu\text{A}$$

Jika arus basis lebih besar atau sama dengan  $I_{B(\text{sat})}$ , titik kerja Q berada pada ujung atas garis beban (gambar 2.2 . c ). Dalam hal ini transistor bekerja pada ujung bawah dari garis beban, dan transistor terlihat seperti sebuah switch yang terbuka.

### 2.3. TEORI DIODA

Dioda adalah singkatan dari kata “di “ yang berarti dua dan “ode “ yaitu elektrode, jadi dioda merupakan suatu piranti dua elektrode dengan arah arus yang tertentu. Dengan kata lain dioda akan bekerja sebagai penghantar jika beda tegangan listrik diberikan dalam arah tertentu, dan dioda akan bekerja sebagai isolator jika beda tegangan diberikan dalam arah berlawanan.

Prinsip kerja dari dioda dibedakan menjadi dua yaitu pada saat prategangan maju (*forward bias*) dan prategangan balik (*reverse bias*). Pada saat dioda bekerja sebagai forward bias maka akan mengalirkan arus dan pada saat bekerja sebagai reverse bias tidak mengalirkan arus. Simbol skematik dari dioda adalah sebagai berikut :

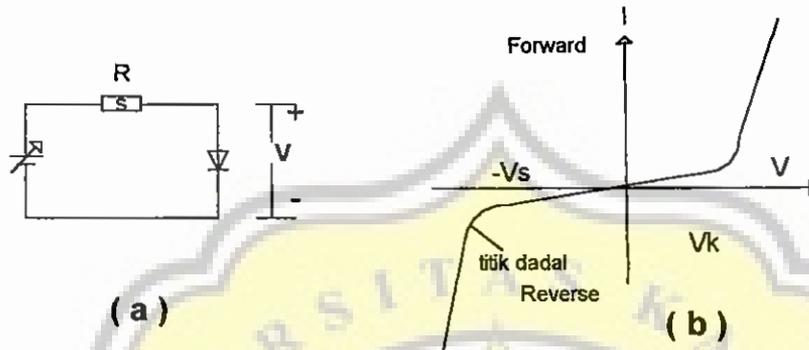


Gambar 2.3 : Dioda ideal (a) simbol rangkaian dioda (b) karakteristik  $i - v$

Dari gambar 2-3 a , karakteristik termal dioda dapat ditafsirkan sebagai berikut : bila suatu tegangan negatif (relatif terhadap arah acuan yang diperlihatkan gambar 2-3 a ) diberikan pada dioda, tidak ada arus yang mengalir dan bersikap sebagai hubungan terbuka. Dioda yang beroperasi dengan mode ini dikatakan terbias balik atau yang beroperasi pada arah balik. Sebuah dioda ideal mempunyai arus nol bila beroperasi pada arah balik. Sebaliknya, jika arus positif (relatif terhadap arah acuan yang diperlihatkan gambar 2-3a ) diberikan ke dioda ideal, tegangan jatuh nol timbul pada dioda, dengan kata lain dioda ideal berlaku sebagai hubungan singkat pada arah maju

Umpamakan suatu sumber tegangan dc yang variabel dihubungkan secara seri dengan suatu penghambat ( resistor ) dan sebuah dioda yang diperlihatkan pada gambar 2-4 a, jika tegangan yang diberikan sama dengan nol, maka tidak ada arus yang mengalir, dan bila tegangan dinaikan maka elektron – elektron akan mulai mengalir. Karena hubungan kawat bersifat seri, arus yang terjadi sama besarnya di semua bagian dari rangkaian, arus ini bertambah secara lambat dengan kenaikan tegangan. Bila tegangan tersebut mendekati potensial barrier arus akan bertambah dengan cepat, dengan kata lain ketika tegangan yang diberikan dari luar itu berhasil mengatasi potensial potensial barrier , maka arus maju tiba – tiba menjadi besar. Hubungan antara arus dioda dan tegangan yang dipasang itu diilustrasikan pada gambar 2-4 b. Dari gambar itu betapa kecilnya arus dioda sebelum tegangan dioda mencapai harga  $V_k$ . Tegangan  $V_k$  ini disebut

tegangan lutut (knee voltage ). Harga ini merupakan tegangan yang memisahkan daerah arus maju kecil dari daerah arus maju besar.



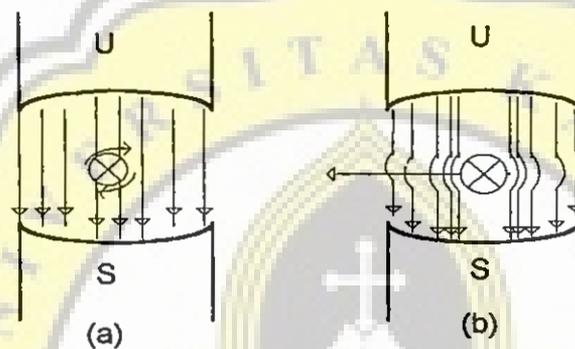
**Gambar 2-4 : ( a )Rangkaian dioda ( b ) kurva dioda untuk prategangan maju dan prategangan balik**

## 2.4. MOTOR DC

Prinsip dasar dari motor arus searah adalah kalau sebuah kawat berarus diletakkan antara kutub magnet ( U – S ), maka pada kawat itu akan bekerja suatu gaya yang menggerakkan kawat itu. Arah gerak kawat itu dapat ditentukan dengan “kaidah tangan kiri“ yang berbunyi sebagai berikut :

Apabila tangan kiri terbuka diletakkan diantara kutub U dan S , sehingga garis-garis gaya yang keluar dari kutub Utara menembus telapak tangan kiri dan arus didalam kawat mengalir searah dengan arah keempat jari, maka kawat itu akan mendapat gaya yang arahnya sesuai dengan arah ibu jari. Kalau sebatang kawat terdapat diantara kutub U – S dengan garis – garis gaya yang homogen, sedangkan

didalam kawat ini mengalir arus listrik yang arahnya menjauhi kita, maka disebelah kanan kawat garis gaya kutub magnet dan garis gaya arus listrik sama arahnya dan disebelah kiri kawat arahnya berlawanan , sehingga bentuk medan magnet akan berubah seperti gambar 2.5..(b). Kawat akan mendapat gaya yang arahnya ke kiri.



**Gambar 2.5. : Perubahan garis gaya disekitar kawat berarus**

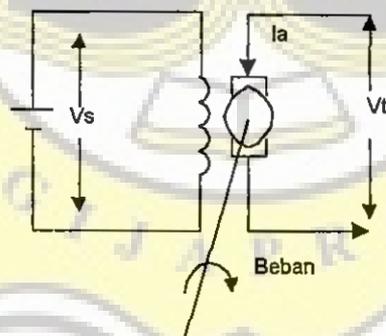
Bila ditinjau dari segi medan berputar dengan kecepatan tetap, mesin DC lebih sesuai digunakan untuk segala jenis keperluan yang membutuhkan pengaturan kecepatan dibandingkan dengan mesin AC. Alasan utama penggunaan mesin DC, terutama pada industri-industri moderen adalah karena kecepatan kerja motor-motor DC mudah diatur dalam suatu rentang kecepatan yang luas, disamping banyaknya metode-metode yang dapat digunakan.

Pada prinsipnya mesin listrik dapat berlaku sebagai motor maupun generator. Perbedaannya hanya terletak dalam konversi dayanya. Generator adalah suatu mesin listrik yang mengubah daya masuk mekanik menjadi daya keluar listrik, sedangkan

sebaliknya motor mengubah daya masuk listrik menjadi daya keluar mekanik. Maka dengan membalik generator arus searah, dimana sekarang tegangan  $V_t$  menjadi sumber dan tegangan jangkar  $E_a$  merupakan ggl lawan, mesin arus searah ini akan berlaku sebagai motor.

Jenis-jenis motor DC dapat kita lihat berdasarkan sumber arus penguat magnetnya dan berdasarkan hubungan lilitan penguat magnet terhadap lilitan jangkar. Untuk jenis motor DC berdasarkan sumber arus penguat magnetnya ada dua jenis yaitu :

1. Motor DC penguat terpisah, bila arus penguat magnet diperoleh dari sumber DC diluar motor. Pada jangkar motor timbul EMF (GGL) lawan sebesar  $E_b$  yang melawan tegangan masuk ( $V_t$ ). Rangkaian ekivalen motor arus searah berpenguatan terpisah dapat dilihat pada gambar 2.6 berikut :



**Gambar 2.6. Rangkaian ekivalen motor arus searah berpenguatan terpisah**

Dari gambar rangkaian ekivalen tersebut maka persamaan yang menyatakan hubungan besaran tegangan , arus , daya dan resistans dapat dituliskan sebagai berikut .

$$V_t = E_b + I_a R_a + \Delta V_{si}$$

$$I = I_a$$

$$I_f = \frac{V_f}{R + R_f}$$

$$I = \frac{\text{Daya input}}{V_t}$$

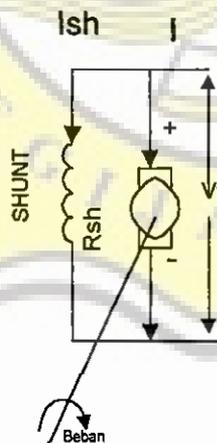
Keterangan persamaan diatas ,

- $V_t$  = Tegangan terminal dalam volt.
- $E_b$  = EMF (GGL) lawan dalam volt.
- $I$  = Arus dari jala-jala dalam ampere.
- $I_a$  = Arus jangkar dalam ampere.
- $I_f$  = Arus medan dalam ampere.
- $V_f$  = Tegangan penguat dalam volt.
- $R_f$  = Resistans medan dalam ohm.
- $R_a$  = Resistans jangkar dalam ohm.
- $R$  = Resistans pengatur arus medan dalam ohm.
- $\Delta V_{si}$  = Rugi tegangan pada sikat.

2. Motor DC dengan penguat sendiri, bila arus penguat magnet berasal dari motor itu sendiri. Rangkaian ekivalen motor arus searah shunt dapat dilihat pada gambar 2.7. Sedangkan jenis motor DC berdasarkan hubungan lilitan penguat magnet terhadap lilitan jangkar motor DC dengan penguat sendiri dapat dibedakan, yaitu :

- a. Motor Shunt
- b. Motor Seri
- c. Motor Kompon (kompon panjang atau kompon pendek)

a. *Motor shunt* : mempunyai kecepatan yang hampir konstan. Pada tegangan jepit ( $U$ ) konstan, motor shunt mempunyai putaran hampir konstan walaupun terjadi perubahan beban. Pemakaian misalnya untuk kipas angin, blower, pompa centrifugal, elevator, pengaduk, mesin cetak, juga untuk pengerjaan kayu dan logam.



Gambar 2.7. Rangkaian ekivalen motor arus searah shunt.

Dari rangkaian ekivalen motor arus searah shunt tersebut diatas, persamaan yang menyatakan hubungan antara tegangan, arus, daya dan resistan adalah sebagai berikut :

$$V_t = E_b + I_a R_a + \Delta V_{si}$$

$$I_{sh} = I_f = \frac{V_t}{R_{sh}}$$

$$I = I_a + I_{sh}$$

$$I = \frac{\text{Daya input}}{V_t}$$

Dengan :

$V_t$  = Tegangan terminal dalam volt.

$E_b$  = EMF (GGL) lawan dalam volt.

$I_a$  = Arus jangkar dalam ampere.

$R_a$  = Resistans kumparan jangkar dalam ohm.

$I_{sh}$  = Arus medan shunt dalam Ampere.

$I$  = Arus jala-jala dalam ampere.

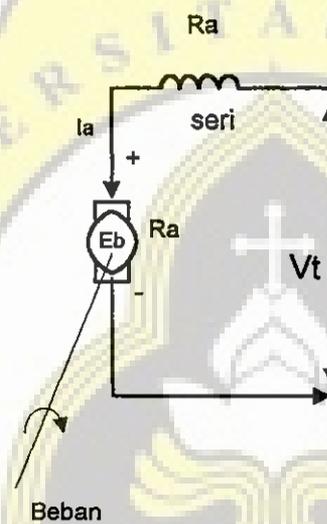
$P_I$  = Daya input  $V_t \times I$  dalam Watt.

$\Delta V_{si}$  = Rugi tegangan pada sikat.

b. *Motor seri* : dapat memberi momen yang besar pada waktu start dengan arus start yang rendah. Juga dapat memberi perubahan kecepatan / beban dengan arus

yang kecil dibandingkan dengan motor type lain, tetapi kecepatan menjadi besar bila beban rendah atau tanpa beban dan hal ini sangat berbahaya. Dengan mengetahui sifat ini dapat dipilih motor seri untuk daerah perubahan kecepatan yang luas. Misalnya : untuk traksi , pengangkat dan lain-lain .

Rangkaian ekivalen motor arus searah seri dapat dilihat pada gambar 2.8 :



Gambar 2.8 . Rangkaian ekivalen motor arus searah seri

Dari gambar rangkaian ekivalen tersebut persamaan yang menyatakan hubungan antara tegangan , arus, daya dan resistan adalah sebagai berikut :

$$V_t = E_b + I_a R_a + I R_s + \Delta V_{si}$$

$$I = I_a$$

$$I = \frac{P_{input}}{V_t}$$

Keterangan persamaan diatas :

$V_t$  = Tegangan terminal motor dalam volt.

$E_b$  = EMF (GGL) lawan dari jangkar dalam volt.

$I_a$  = Arus jangkar dalam ampere.

$I$  = Arus dari jala- jala dalam ampere.

$R_a$  = Resistans kumparan jangkar dalam ohm.

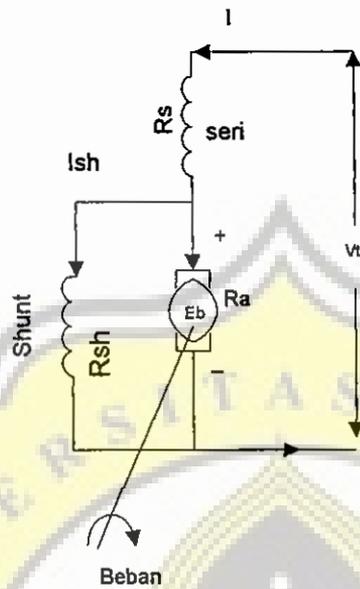
$R_s$  = Resistans kumparan medan seri dalam ohm.

$\Delta V_{si}$  = Rugi tegangan pada sikat .

c. *Motor kompon* : mempunyai sifat diantara motor seri dan motor shunt, tergantung mana yang kuat lilitannya ( kumparan seri atau shuntnya ) umumnya mempunyai momen start yang besar, sehingga seperti pada motor seri. Pemakaian untuk pompa plunger, pemecah, bulldozer, elevator dan lain – lain.

Motor arus searah kompon ini, berdasarkan susunan rangkaian kumparan medan, terbagai atas :

1. Motor arus searah kompon pendek.
2. Motor arus searah kompon panjang.



**Gambar 2.9. Rangkaian ekivalen motor arus searah kompon pendek**

Dari rangkain ekivalen motor arus searah kompon pendek pada gambar 2.9 , persamaan yang menyatakan hubungan arus , tegangan, daya dan resistan akan mengikuti persamaan berikut :

$$V_t = E_b + I_a R_a + I R_s + \Delta V_{si}$$

$$I_a = I - I_{sh}$$

$$I = \frac{\text{Daya input}}{V_t}$$

$$I_{sh} = \frac{V_t - I R_s}{R_{sh}}$$

Dengan ,

$V_t$  = Tegangan terminal motor dalam volt.

$E_b$  = EMF(GGL) lawan dari jangkar dalam volt.

$I_a$  = Arus jangkar dalam ampere.

$I$  = Arus dari jala-jala dalam ampere.

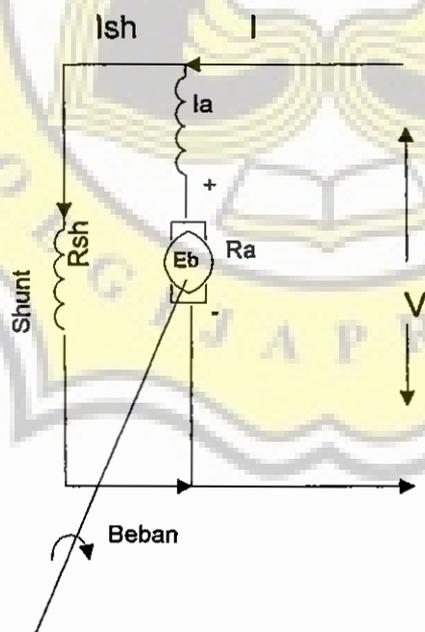
$I_{sh}$  = Arus pada medan shunt dalam ampere.

$R_a$  = Resistans kumparan jangkar dalam ohm.

$R_s$  = Resistans kumparan medan seri dalam ohm.

$R_{sh}$  = Resistans kumparan medan shunt dalam ohm.

$\Delta V_{si}$  = Rugi tegangan pada sikat.



Gambar 2.10 Rangkaian ekivalen motor arus searah kompon panjang.

Dari gambar rangkaian ekivalen tersebut persamaan yang menyatakan hubungan arus, tegangan, daya dan resistans akan mengikuti persamaan berikut :

$$V_t = E_b + I_a R_a + I_a R_s + \Delta V_{si}$$

$$I_a = I - I_{sh}$$

$$I = \frac{\text{Daya input}}{V_t}$$

$$I_{sh} = \frac{V_t}{R_{sh}}$$

Keterangan persamaan diatas adalah :

- $V_t$  = Tegangan terminal motor dalam volt.
- $E_b$  = EMF(GGL) lawan dari jangkar dalam volt.
- $I_a$  = Arus jangkar dalam ampere.
- $I$  = Arus dari jala-jala dalam ampere.
- $I_{sh}$  = Arus pada medan shunt dalam ampere.
- $R_a$  = Resistans kumparan jangkar dalam ohm.
- $R_s$  = Resistans kumparan medan seri dalam ohm.
- $R_{sh}$  = Resistans kumparan medan shunt dalam ohm.
- $\Delta V_{si}$  = Rugi tegangan pada sikat.

### 2.4.1. Pengaturan Kecepatan Motor DC

Pengaturan kecepatan memegang peranan penting dalam motor arus searah, karena motor arus searah mempunyai karakteristik kopel-kecepatan yang menguntungkan dibandingkan dengan motor lainnya. Telah diketahui bahwa untuk motor arus searah dapat diturunkan rumus sebagai berikut :

$$E_a = Cn\phi, E_a = V_t - I_a R_a$$

$\phi$  = Fluks / kutub

$n$  = Putaran (rpm)

$C$  =  $(p/a) \times (Z/60) =$  konstanta

$p$  = jumlah kutub

$a$  = jalur paralel konduktor jangkar

$z$  = jumlah konduktor jangkar

$$n = \frac{V_t - I_a R_a}{C\phi}$$

$n$  = kecepatan

Dari persamaan diatas, dapat dilihat bahwa kecepatan ( $n$ ) dapat diatur dengan mengubah-ubah besaran  $\phi$ ,  $R_a$ , atau  $V_t$ .

#### **A . Pengaturan kecepatan dengan mengatur medan shunt ( $\phi$ )**

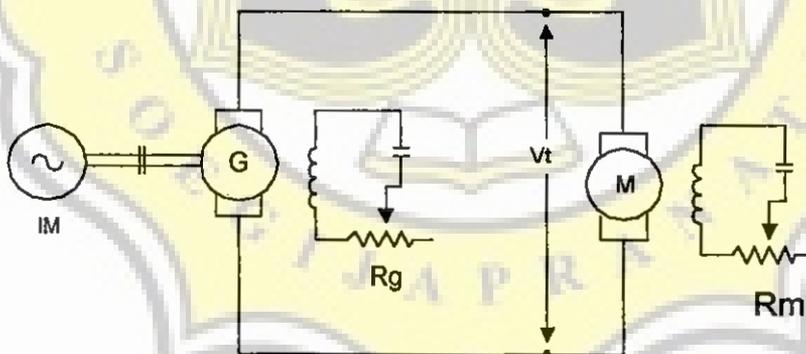
Dengan menyisipkan tahanan variabel yang dipasang secara seri terhadap kumparan medan (pada medan shunt) , dapat diatur arus medan  $I_f$  dan fluks (  $\phi$  ). Cara ini sangat sederhana dan murah , selain itu rugi panas yang ditimbulkan kecil pengaruhnya. Karena besarnya fluks yang bisa dicapai oleh kumparan medan terbatas, kecepatan yang dapat diatur pun terbatas. Kecepatan terendah didapat dengan membuat tahanan variabel sama dengan nol, sedangkan kecepatan tertinggi dibatasi oleh perencanaan mesin dimana gaya sentrifugal maksimum tidak sampai merusak rotor. Kopel maksimum didapatkan pada kecepatan terendah. Motor yang dapat diatur dengan cara ini adalah motor shunt atau motor kompon.

#### **B . Pengaturan kecepatan dengan mengatur Tahanan $R_a$**

Dengan menyisipkan tahanan variabel secara seri terhadap tahanan jangkar, sehingga dengan demikian tahanan jangkar pun dapat diatur, berarti pula kecepatan motor dapat dikontrol. Cara ini jarang dipakai, karena penambahan tahanan seri terhadap tahanan jangkar menimbulkan rugi panas yang cukup besar.

### C. Pengaturan kecepatan dengan mengatur tegangan $V_t$

Cara ini dikenal sebagai sistem Ward Leonard. Motor yang dipakai adalah motor berpenguat bebas. Penggerak mula (biasanya motor induksi) digunakan untuk menggerakkan generator G pada suatu kecepatan konstan. Perubahan tahanan medan  $R_G$  akan mengubah tegangan  $V_t$  yang diberikan pada motor. Perubahan ini mempunyai batas yang cukup lebar. Kadang – kadang pengaturan  $V_t$  yang diberikan pada motor. Perubahan ini mempunyai batas yang cukup lebar. Kadang – kadang pengaturan  $V_t$  ini juga dibarengi dengan pengaturan fluks medan motor, yaitu dengan mengatur tahanan medan  $R_M$ , cara ini menghasilkan suatu pengaturan kecepatan yang sangat halus dan banyak dipakai lift, mesin bubut dan lain – lain. Satu – satunya kerugian sistem ini adalah biaya yang sangat tinggi akibat penambahan generator dan penggerak mula.



Gambar 2.11 Pengaturan kecepatan dengan sistem ward leonard

### 2.4.2. Membalik putaran Motor DC

Untuk membalik putaran motor DC dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu :

- a. *membalik arah arus jangkar, arah arus penguat tetap.*
- b. *Membalik arah arus penguat, arah arus jangkar tetap.*

Apabila arah arus jangkar dan arah arus penguat keduanya dibalik arah putaran motor tidak berubah. Apabila mula-mula arah putaran motor berlawanan dengan arah jarum jam , untuk mengubah arah putaran menjadi searah jarum jam dapat dilakukan dengan 2 cara yaitu dengan membalik arah arus jangkar atau merubah kutub-kutub magnet. Apabila arus jangkar dan kutub-kutub magnet keduanya dirubah arah putaran akan tetap.

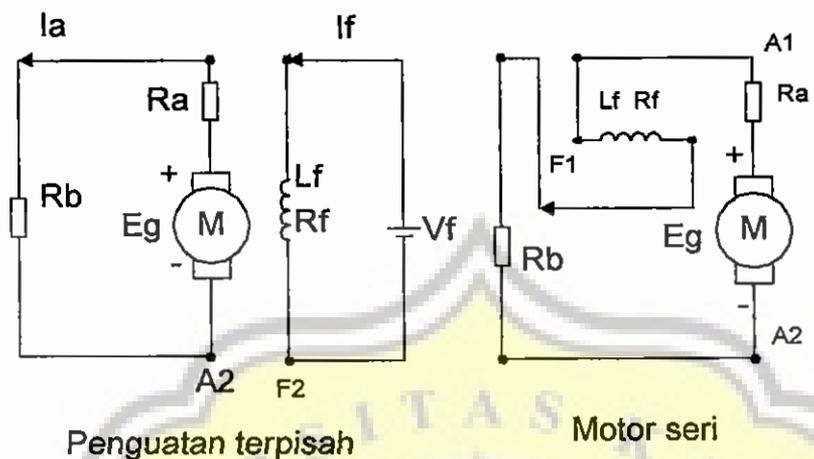
### 2.4.3. Pengereman Motor DC

Suatu motor listrik dapat berhenti dengan adanya gesekan yang terjadi. Tetapi tentu saja hal ini membutuhkan waktu yang lama. Untuk dapat menghentikan motor dalam waktu yang relatif singkat dilakukan pengereman.

Pengereman motor DC dapat dilakukan dengan berbagai cara, pengereman secara elektrik dikelompokkan sebagai berikut :

- Pengereman dinamik

Pengereman dinamik adalah pembalikan arah daya dengan cara melepaskan tegangan suply dan menggantikannya dengan tahanan luar.



**Gambar 2.12 Pengereman Dinamik**

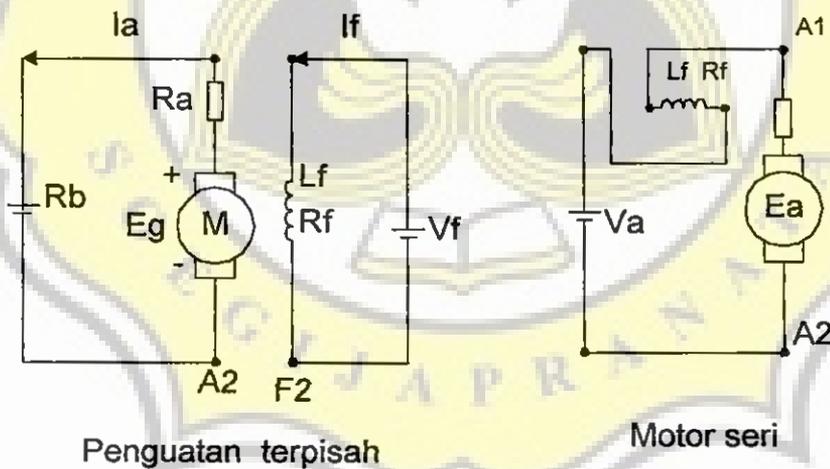
Pada pengereman dinamik, penghentian motor dapat terjadi jika tegangan terminal  $V_t$  dihilangkan dan diganti dengan tahanan  $R_1$ . Dalam keadaan ini energi putaran diberikan pada tahanan  $R_1$ , yang menyebabkan kecepatan menjadi turun, demikian pula tegangan  $E_a$  pun akan menurun. Sekarang motor berfungsi sebagai generator penggerak mula. Untuk menjaga penurunan kopel yang konstan,  $R_1$  harus pula diturunkan. Harga  $R_1$  dipilih sedemikian rupa, sehingga arus jangkar tidak terlalu besar ( umumnya diambil dua kali harga arus jangkar pada beban penuh ). Harga  $R_1$  dapat dihitung dengan persamaan .

$$E_a = I_L R_1 + I_a R_a$$

- Pengereman regeneratif

Pengereman regeneratif adalah melakukan motor sebagai generator dan energi kinetik dari motor dan beban dikembalikan ke sumber.

Pada pengereman regeneratif, energi yang tersimpan pada putaran dikembalikan kepada sistem jala – jala. Cara ini ini biasanya dipakai pada kereta listrik. Ketika kereta api berjalan menurun, kecepatan motor laju sekali, Karenanya  $E_a > V_t$ , yang mengakibatkan daya dikembalikan kepada sistem jala – jala untuk keperluan lain. Pada saat daya dikembalikan ke jala – jala, kecepatan menurun dan proses pengereman berlangsung seperti pada pengereman dinamik.

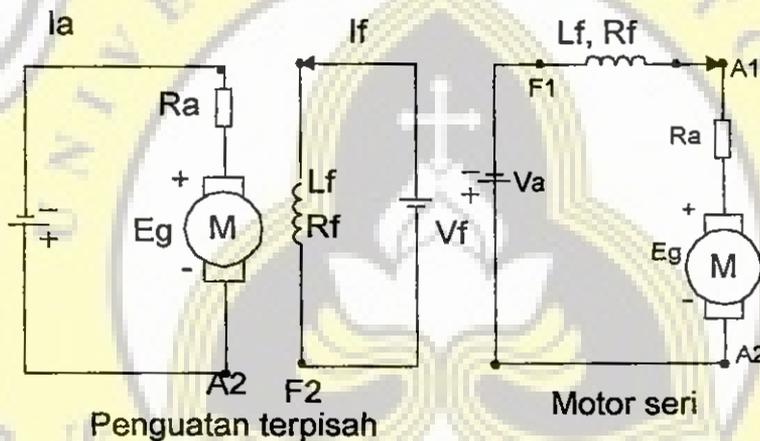


Gambar 2.13 pengereman regeneratif

- Pengereman plugging

Pengereman plugging adalah dengan membalik polaritas tegangan jangkar atau dengan membalik polaritas tegan medan dari motor.

Pengereman mendadak adalah pengereman suatu motor dalam waktu yang sangat singkat dan tiba – tiba , yaitu dengan cara membalik polaritas motor. Tahanan  $R_2$  disisipkan antara titik X dan Y (Gambar 2.14)



**Gambar 2.14 Pengereman plugging**

Karena tegangan jangkar telah terbalik polaritasnya , sehingga arahnya sama dengan tegangan terminal , besarnya  $R_2$  pun dapat dihitung dari persamaan

$$E_a + V_t = I_a (R_2 + R_2 )$$

Harga  $R_2$  dipilih sedemikian sedemikian rupa , sehingga arus jangkar yang mengalir pada saat pengereman tidak terlalu besar ( umumnya dua kali harga arus

pada beban penuh ). Selama pengeraman berlangsung  $E_a$  turun, sehingga  $R_2$  harus diperkecil untuk menjaga penurunan kopel yang konstan.

## 2.5. CHOPPER

Dalam arus searah (DC) untuk mengubah suatu tegangan konstan menjadi tegangan dengan nilai tertentu kita tidak mungkin menggunakan transformator karena suatu transformator akan berfungsi untuk menahan arus DC. Dalam arus searah kita dapat menggunakan suatu Chopper yaitu suatu alat yang dapat mengubah tegangan dc konstan menjadi tegangan dc variabel. Apabila kita mendasarkan pada besarnya tegangan keluaran dan tegangan masukan, Chopper dapat kita bedakan menjadi 3 jenis, yaitu :

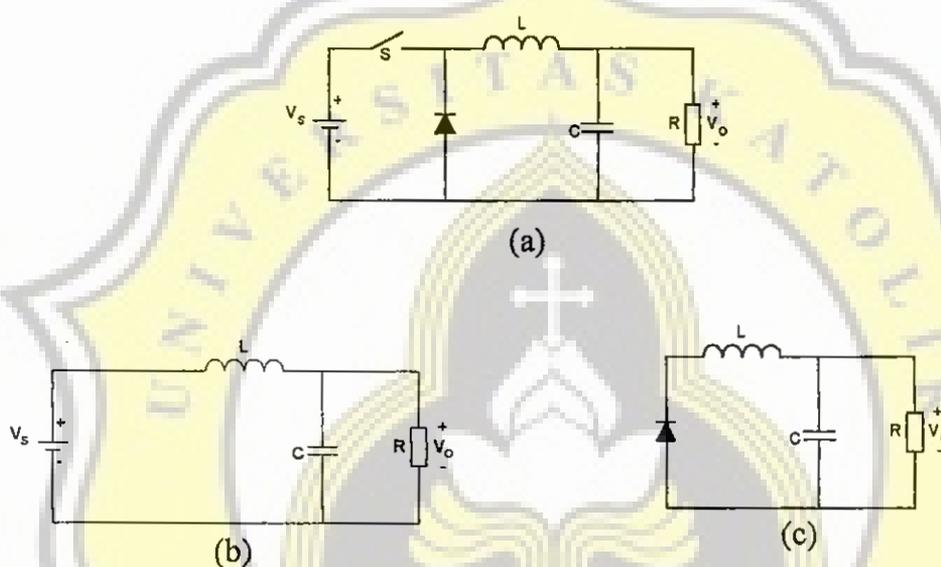
- a. *Chopper step down*
- b. *Chopper step up*
- c. *Chopper step up / down*

### 3.5.1. CHOPPER STEP DOWN

Chopper step down adalah konverter DC-DC yang menghasilkan tegangan keluaran lebih kecil dibandingkan dengan tegangan masukannya.

Prinsip kerja dari chopper step down ini dapat dilihat pada gambar 2.15 Ketika saklar menutup (on) dalam jangka waktu tertentu ( $t_{on}$ ), maka tegangan input ( $V_s$ ) akan diberikan kepada beban resistor .jika saklarmembuka (off) dalam jangka waktu tertentu ( $t_{off}$ ), maka tegangan pada beban resistor adalah nol.

Pada rangkaian Chopper step down, tegangan masukan adalah  $V_s$  dan beban menggunakan resistor. Dengan mengatur duty cycle  $t_{on}/T$  dari saklar, maka tegangan keluaran  $V_o$  dapat diatur. Rangkaian chopper step down pada gambar 2.15. Pada rangkaian tersebut, tegangan keluaran dari chopper step down difilter dengan menggunakan filter induktor dan kapasitor dan R sebagai beban.



**Gambar 2.15 : Chopper jenis step down**

Pada kondisi saklar on (gambar 2.15 (b)) maka arus dari sumber tegangan dc masukan  $V_s$  akan mengalir melewati induktor L lalu mengalir juga melewati kapasitor C dan beban.

Pada kondisi ini energi dari sumber akan diserap induktor L, maka arus pada induktor L akan bertambah. Dengan melihat pada gambar 2.15 (b) dapat kita peroleh persamaan sebagai berikut :

$$V_s = V_L + V_0$$

$$V_L = V_s - V_0$$

$$V_L = L \frac{di}{dt}$$

$$L \frac{di}{dt} = V_s - V_0$$

$$L di = (V_s - V_0) dt$$

$$L di = (V_s - V_0) t$$

Karena posisi saklar pada kondisi on maka :

$$L di = (V_s - V_0) t_{on}$$

Sedangkan saat saklar dalam kondisi off ( gambar 2.15 (c) ) , maka sumber tidak akan terhubung ke beban, tetapi karena arus yang mengalir pada induktor L tidak dapat berubah secara mendadak, arus akan mengalir melalui induktor L, beban dan kapasitor C serta dioda freewheeling D. Pada kondisi ini energi yang tersimpan pada induktor L akan dilepas sehingga arus induktor L akan berkurang.

Dengan melihat gambar 2.15 (c) kita dapatkan persamaan sebagai berikut :

$$V_L = -V_0$$

$$L \frac{di}{dt} = -V_0$$

$$L di = -V_0 dt$$

Karena saklar pada posisi off maka :

$$Ldi = V_o t_{off}$$

Ketika saklar pada posisi aktif (on) maka dioda akan dibias balik dan arus akan mengalir ke beban melalui induktor. Ketika saklar pada posisi tidak aktif (off), maka arus induktor akan mengalir melalui dioda dan memindahkan energi yang tersimpan pada induktor ke beban. Chopper step down pada posisi on dan off akan menghasilkan suatu persamaan yaitu

$$(V_s - V_o)t_{on} = V_o t_{off}$$

$$(V_s)t_{on} = V_o(t_{on} + t_{off})$$

$$(V_s)t_{on} = V_o T$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{t_{on}}{T}$$

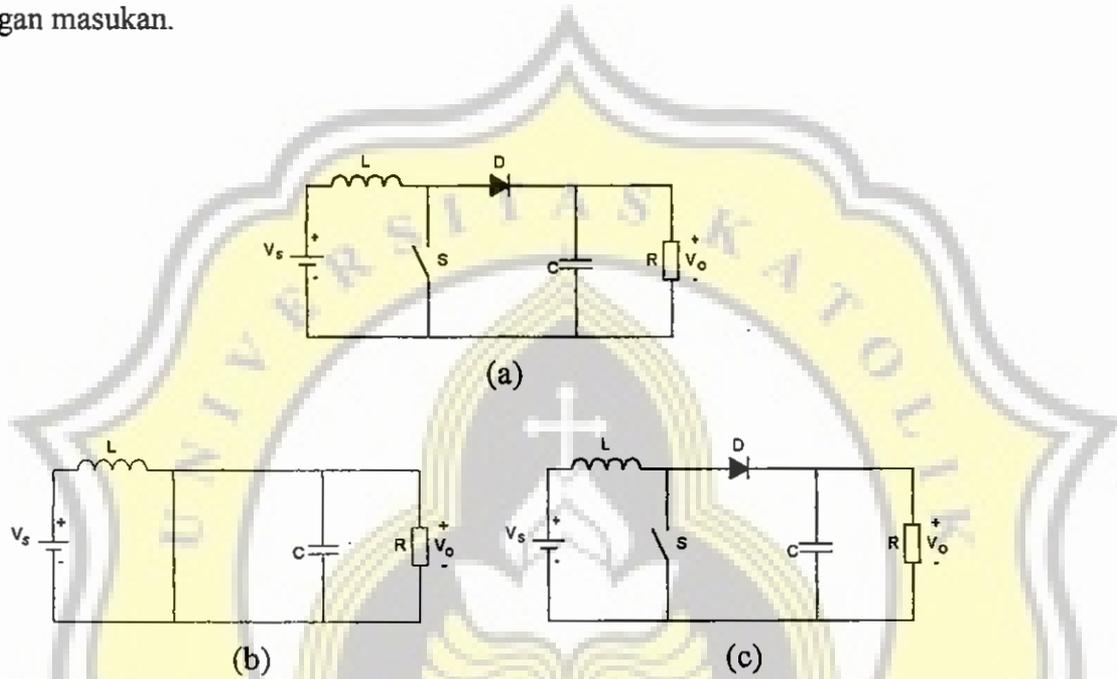
$$\text{Jika Duty cycle (D)} = \frac{t_{on}}{T}$$

$$\frac{V_o}{V_s} = D$$

Suatu tegangan dc keluaran dari suatu chopper jenis step down sama dengan tegangan dc masukan dikalikan dengan perbandingan antara lamanya saklar menutup terhadap perioda (*Duty cycle*).

### 2.5.2. CHOPPER STEP UP

Fungsi dari Chopper jenis step up adalah menaikkan tegangan masukan dc menjadi tegangan keluaran dc yang mempunyai nilai lebih besar atau sama dengan tegangan masukan.



Gambar 2.16. : Choper jenis step up

Pada saat saklar on maka arus yang berasal dari sumber tegangan masukan  $V_s$  akan mengalir melalui induktor  $L$  dan kembali lagi ke sumber tegangan. Dari keadaan ini dapat kita peroleh persamaan sebagai berikut :

$$V_s = V_L$$

$$V_s = L \frac{di}{dt}$$

$$V_s dt = L di$$

$$V_{st_{on}} = L di$$

Arus saklar akan mengalir pada saat saklar menutup. Sedangkan untuk saklar pada kondisi off maka rangkaian akan membentuk seperti gambar 2.16 (c). Dengan melihat gambar 2.16 maka dapat kita peroleh persamaan sebagai berikut :

$$V_s + V_L = V_o$$

$$V_L = V_o - V_s$$

$$L \frac{di}{dt} = V_o - V_s$$

$$L di = (V_o - V_s) dt$$

$$L di = (V_o - V_s) t_{off}$$

Arus pada dioda D akan mengalir saat saklar pada kondisi off. Pada kondisi off maka kapasitor akan terisi muatan yang disimpan dalam bentuk medan listrik. Pada rangkaian step up kapasitor akan menjaga tegangan keluaran  $V_o$  supaya tetap ada. Suatu Chopper step up apabila pada kondisi on dan off digabungkan maka akan menghasilkan suatu persamaan sebagai berikut :

Persamaan yang diperoleh pada saat saklar on :

$$L di = V_{st_{on}}$$

Persamaan yang diperoleh pada saat saklar off :

$$L di = (V_o - V_s) t_{off}$$

Dari kedua persamaan apabila digabungkan akan kita peroleh persamaan sebagai berikut :

$$V_{st_{on}} = (V_o - V_s) t_{off}$$

$$V_{o\text{off}} = V_s (t_{\text{on}} + t_{\text{off}})$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{t_{\text{on}} + t_{\text{off}}}{t_{\text{off}}}$$

$$T = (t_{\text{on}} + t_{\text{off}})$$

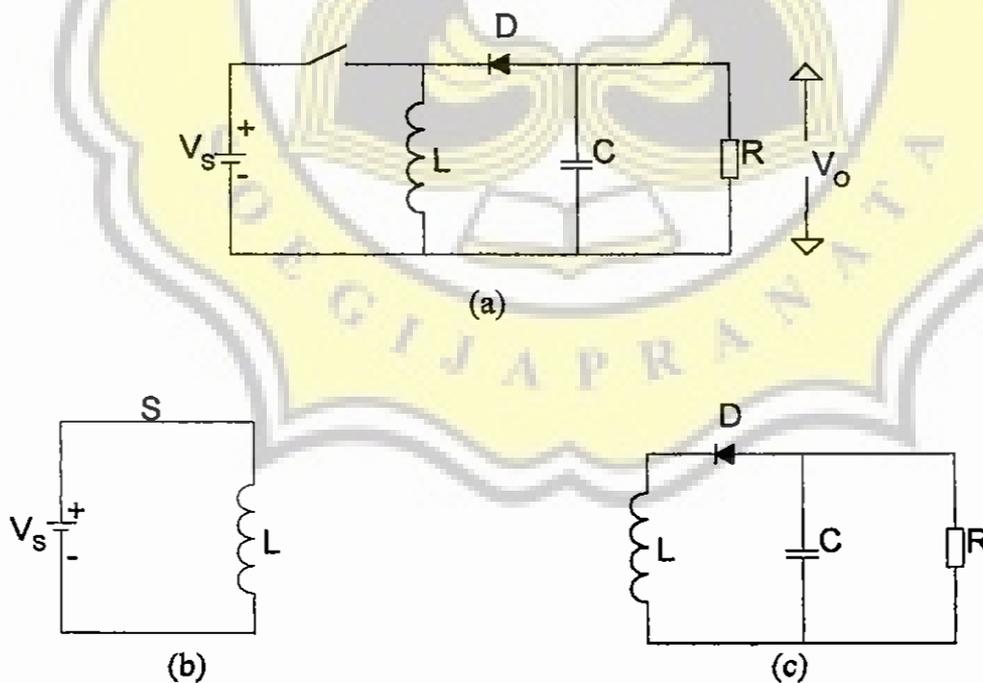
$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{T}{t_{\text{off}}}$$

$$t_{\text{off}} = T - t_{\text{on}}$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{T}{T - t_{\text{on}}}$$

### 2.5.3. CHOPER STEP UP-DOWN

Chopper step up-down berfungsi untuk menaikkan dan menurunkan suatu tegangan dc.



Gambar 2.17 : Chopper jenis Step up-down

Persamaan yang diperoleh saat saklar kondisi on :

$$V_s = V_L$$

$$V_L = V_s$$

$$V_L = L \frac{di}{dt}$$

$$L \frac{di}{dt} = V_s$$

$$L di = V_s dt$$

$$L di = V_s t_{on}$$

Sedangkan pada saat saklar membuka atau kondisi off persamaan yang diperoleh adalah sebagai berikut :

$$V_o = V_L$$

$$V_L = V_o$$

$$V_L = L \frac{di}{dt}$$

$$L \frac{d_i}{d_t} = V_o$$

$$L di = V_o t_{off}$$

Pada saat saklar on dan off akan diperoleh persamaan sebagai berikut :

Pada saat saklar off diperoleh :

$$L di = V_o t_{off}$$

Pada saat saklar on diperoleh :

$$L di = V_{st_{on}}$$

Dari kedua persamaan diatas diperoleh :

$$V_o t_{off} = V_s t_{on}$$

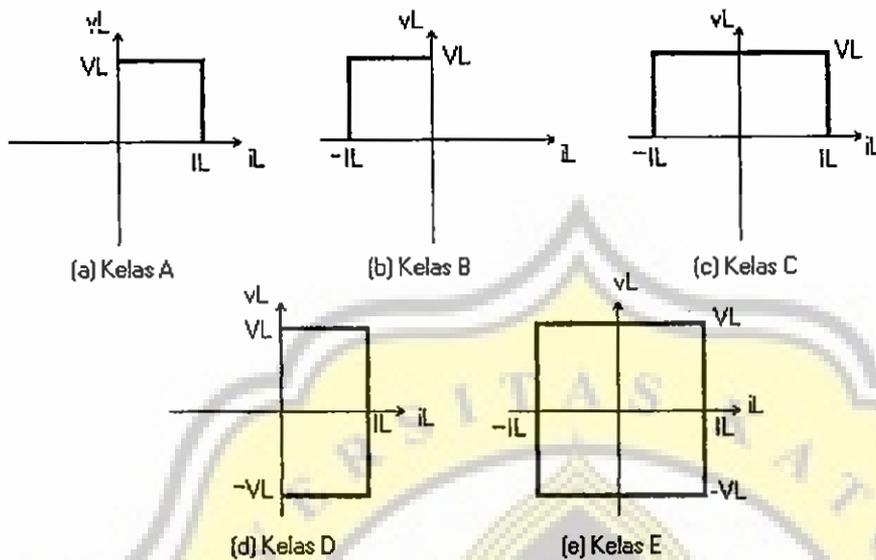
$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{t_{on}}{t_{off}}$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{t_{on}}{T - t_{on}}$$

#### 2.5.4. KONFIGURASI CHOPPER

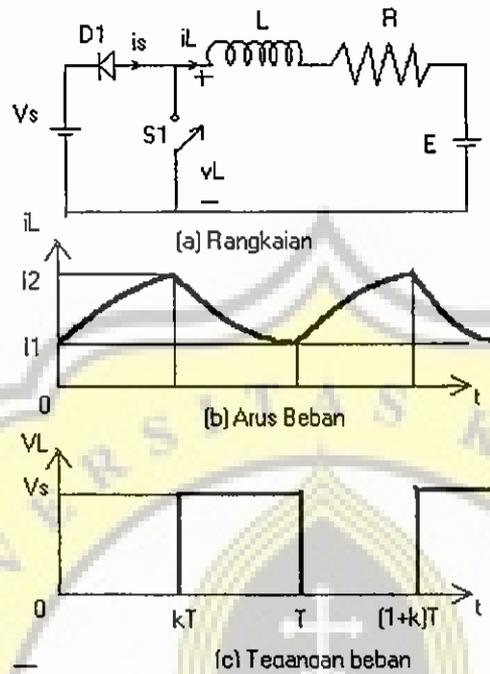
Ditinjau dari karakteristik tegangan dan arus, maka DC chopper mempunyai beberapa konfigurasi. Masing-masing konfigurasi dapat beroperasi dalam kuadran yang berbeda seperti yang ditunjukkan pada klasifikasi Chopper sebagai berikut :

1. **Chopper kelas A.** Arus beban mengalir kebeban. Kedua tegangan dan arus beban adalah positif, seperti ditunjukkan pada gambar 2.18 (a). Ini adalah chopper kuadran kesatu, dan disebut bekerja sebagai penyearah.



**Gambar 2.18 : Klasifikasi Chopper**

2. **Chopper kelas B.** Arus beban keluar dari beban. Tegangan beban positif, tetapi arus beban negatif, seperti pada gambar 2.19 (b). Ini disebut pula chopper satu kuadran, tetapi bekerja pada kuadran kedua dan bekerja sebagai inverter. Chopper kelas B ditunjukkan pada gambar 2.19 (a), dengan baterai E adalah bagian dari beban dan dapat menjadi emf balik motor DC. Bila saklar  $S_1$  di-onkan, tegangan E menghasilkan arus melalui induktor L dan tegangan beban  $V_L$  menjadi nol. Tegangan beban sesaat  $V_L$  dan arus beban  $i_L$  ditunjukkan pada gambar 2.19 (b) dan (c), berturut-turut.

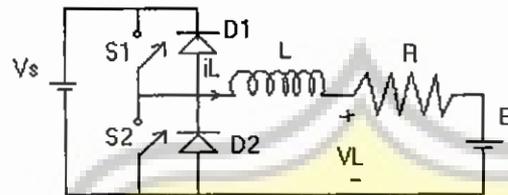


**Gambar 2.19 : Chopper Kelas B**

Ketika saklar  $S_1$  di-off-kan, jumlah energi yang disimpan pada induktor  $L$  dikembalikan pada sumber  $V_s$  melalui diode  $D_1$ . Arus beban  $i_L$  akan turun.

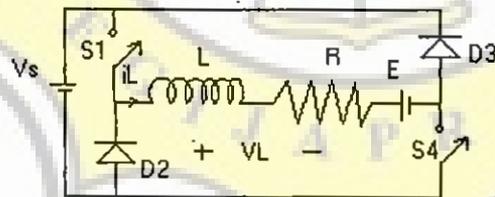
3. **Chopper kelas C.** Arus beban dapat positif atau negatif, seperti pada gambar 2.18 (c) . Tegangan beban selalu positif. Ini disebut chopper kuadran kedua. Chopper kelas A dan B dapat dikombinasikan untuk membentuk chopper kelas C seperti terlihat pada gambar 2.20.  $S_1$  dan  $D_2$  bekerja seperti chopper kelas A.  $S_2$  dan  $D_1$  bekerja seperti chopper kelas B. Harus dijaga hati-hati agar dua saklar tersebut tidak bekerja secara bersama-sama; bila hal ini terjadi maka sumber  $V_s$

akan mengalami hubung singkat. Chopper kelas C dapat bekerja sebagai penyearah atau pembalik (inverter).



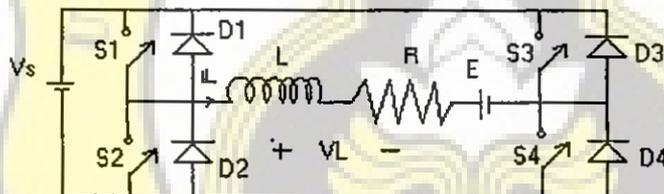
Gambar 2.20 : Chopper Kelas C

4. **Chopper kelas D.** Arus beban selalu bernilai positif. Tegangan beban dapat positif atau negatif, seperti terlihat pada Gambar 2.21. Bila saklar  $S_1$  dan  $S_4$  di-on-kan,  $V_L$  dan  $i_L$  menjadi positif. Bila  $S_1$  dan  $S_4$  di-off-kan, arus beban  $i_L$  akan positif dan tetap mengalir untuk beban induktif yang tinggi. Diode  $D_2$  dan  $D_3$  menyediakan jalan bagi arus beban dan  $V_L$  akan berbalik arah.



Gambar 2.21 : Chopper Kelas D

5. **Chopper kelas E.** Arus beban dapat bernilai positif atau negatif, seperti terlihat pada gambar 2.22 (e). Tegangan beban dapat pula bernilai positif atau negatif. Chopper ini disebut juga chopper kuadran keempat. Dua buah chopper kelas C dapat digabung untuk membentuk chopper kelas E, seperti terlihat pada gambar 2.22 (a). Polaritas tegangan beban dan arus beban ditunjukkan pada gambar 2.22 (b). Devais yang beroperasi pada macam-macam kuadran ditunjukkan pada gambar 2.22 (c). Untuk operasi pada kuadran keempat, arah baterai E harus dibalik. Chopper jenis ini merupakan dasar untuk membentuk pembalik jembatan penuh satu fasa.



(a) Rangkaian

Inverting $V_L + V_e$ $i_L - V_e$	Rectifying $V_L + V_e$ $i_L + V_e$
Rectifying $V_L - V_e$ $i_L - V_e$	Inverting $V_L - V_e$ $i_L + V_e$

(b) Polaritas

S2, D4 D4, D1	S1, S4 D2, S4
S3, S2 S2, D4	S4, D2 D2, D3

(c) Devais penghubung

**Gambar 2.22 : Chopper Kelas E**