

## BAB III

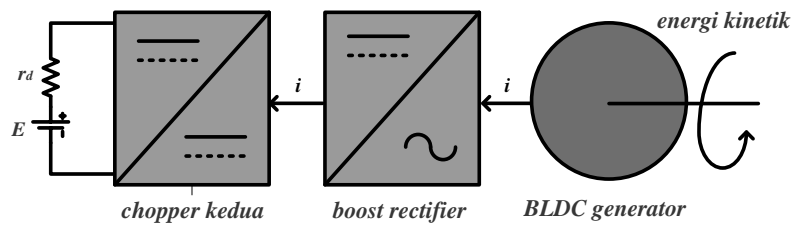
### DESAN RANCANGAN DAN IMPLEMENTASI Pengereman REGENERATIF MENGGUNAKAN *CASCADED BOOST CONVERTER*

#### 3.1 Pendahuluan

Pada bab ini menjelaskan tentang perancangan dan implementasi pengereman regeneratif menggunakan *cascaded boost converter* dan beberapa rangkaian pendukung. Beberapa rangkaian pendukung dalam implementasi yaitu rangkaian driver *optocoupler*, rangkaian sensor arus LEM HX-10P, rangkaian *DC-DC isolated power supply*,

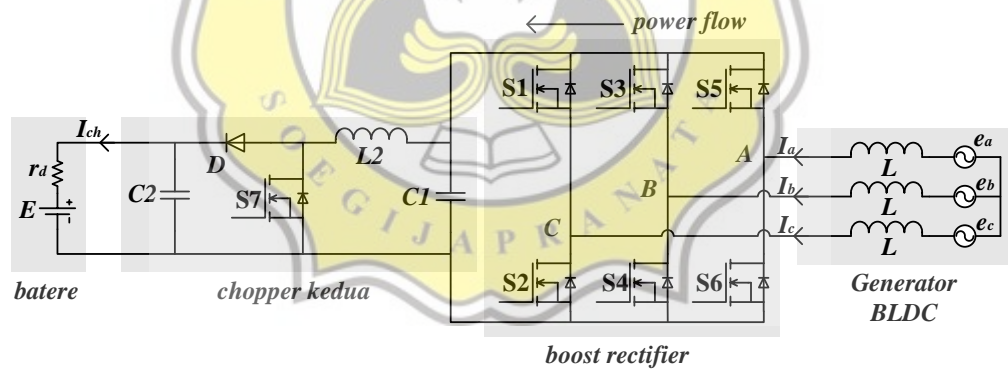
#### 3.2 Prinsip Kerja *Cascaded Boost Converter* pada Pengereman Regeneratif

Mesin BLDC yang diputar oleh energi kinetik dapat menghasilkan GGL keluaran pada setiap belitan di statornya. Tanpa penguatan, mesin ini tidak dapat melakukan pengereman regeneratif karena GGL keluaran mesin BLDC selalu lebih rendah dari GGL sumber. Permasalahan tersebut dapat diatasi dengan melakukan penguatan agar arus dapat mengalir ke batere. Penguatan pertama dilakukan dengan cara mengoperasikan konverter *bidirectional* sebagai *boost rectifier*. Penguatan kedua dilakukan dengan menambahkan *chopper* kedua. Penguatan dua kali ini dilakukan agar pengereman regeneratif berlangsung lebih optimal. Blok diagram pengereman regeneratif menggunakan *cascaded boost converter* disajikan dalam Gambar-3.1.



Gambar-3. 1 Blok diagram pengereman regeneratif menggunakan *cascaded boost converter*

Batasan dari *boost rectifier* adalah *gain* keluaran yang rendah, sehingga pengereman regeneratif berlangsung kurang optimal. Permasalahan tersebut dapat diatasi dengan menambahkan *chopper* kedua untuk meningkatkan *gain* keluaran. Metode *boost converter* yang dipasang secara seri ini dinamakan *cascaded boost converter*. Rangkaian ekivalen pengereman regeneratif menggunakan *cascaded boost converter* disajikan dalam Gambar-3.2.

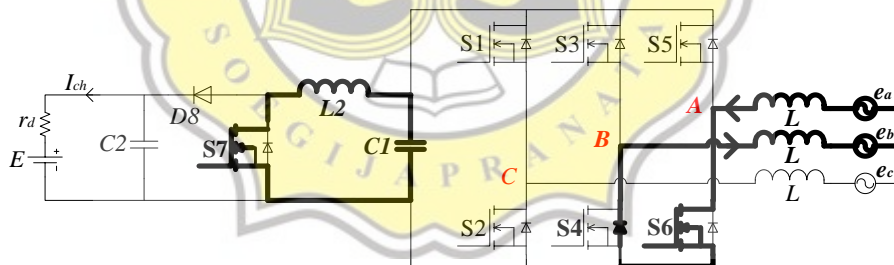


Gambar-3. 2 Rangkaian ekivalen pengereman regeneratif menggunakan *cascaded boost converter*

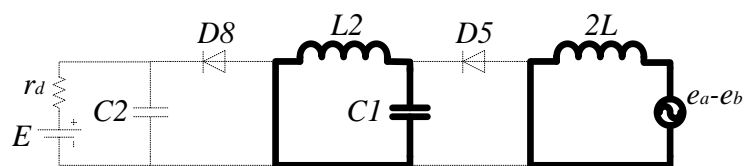
Pada Gambar-3.2. konverter *bidirectional* difungsikan sebagai *boost rectifier*, dimana S2, S4, S6 difungsikan sebagai saklar statis dan S1, S3, S5 difungsikan sebagai dioda. Keluaran dari *boost rectifier* akan dikuatkan kembali

menggunakan *chopper* kedua. Konverter ini memiliki dua mode operasi yaitu ketika saklar dalam kondisi-*on* dan saklar dalam kondisi-*off*.

Pada saat saklar dalam kondisi-*on*, belitan pada stator akan menyimpan energi dalam bentuk medan magnet dan induktor dua ( $L_2$ ) mendapat suplai dari kapasitor satu ( $C_1$ ). Pada mode ini, saklar enam dan saklar tujuh dalam kondisi-*on* karena menerima sinyal dari mikrokontroler. *Loop* pertama pada *boost rectifier* menunjukkan arus mengalir pada belitan stator fasa-a, fasa-b, saklar enam, dan dioda pada saklar empat. *Loop* kedua pada *chopper* kedua menunjukkan arus mengalir pada induktor, kapasitor satu, dan saklar tujuh. Rangkaian ekivalen pengereman regeneratif mesin BLDC saat belitan menyimpan energi disajikan pada Gambar-3.3. dan rangkaian ekivalen cascaded boost converter ketika saklar dalam kondisi-*on* disajikan pada Gambar-3.4.



**Gambar-3. 3 Rangkaian ekivalen pengereman regeneratif mesin BLDC saat belitan menyimpan energi**



**Gambar-3. 4 Rangkaian ekivalen cascaded boost converter ketika saklar dalam kondisi-*on***

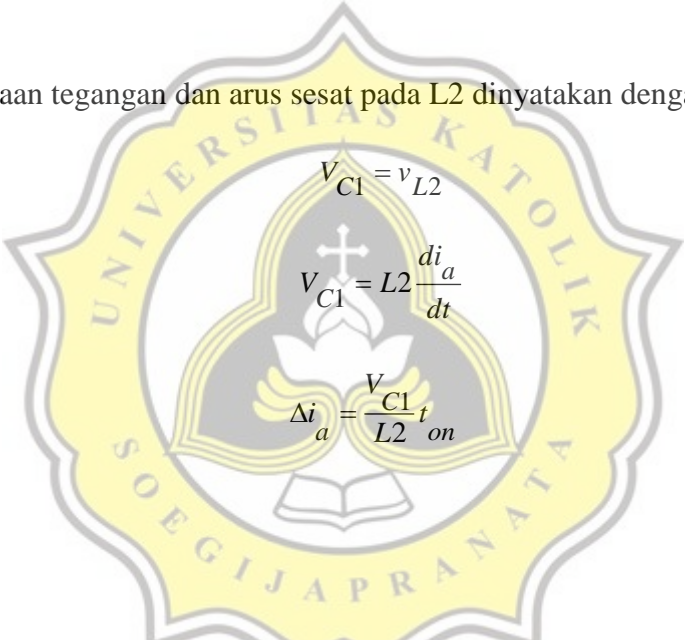
Berdasarkan rangkaian pada Gambar-3.3. dan Gambar-3.4. persamaan tegangan dan arus sesaat pada  $2L$  dinyatakan dengan (3-1)

$$e_a - e_b = 2v_L$$

$$e_a - e_b = 2L \frac{di_a}{dt}$$

$$\Delta i_a = \frac{e_a - e_b}{2L} t_{on} \quad (3-1)$$

dan persamaan tegangan dan arus sesat pada  $L2$  dinyatakan dengan (3-2)



The logo of Universitas Katolik Soegijapranata is a yellow shield-shaped emblem. It features a central white cross above a white lotus flower, which is positioned above an open book. The text 'UNIVERSITAS KATOLIK' is written in a semi-circle at the top, and 'SOEGIJAPRANATA' is written in a semi-circle at the bottom.

$$V_{C1} = v_{L2}$$

$$V_{C1} = L2 \frac{di_a}{dt}$$

$$\Delta i_a = \frac{V_{C1}}{L2} t_{on} \quad (3-2)$$

di mana :

$e_a$  = back-electromotive force fasa-A

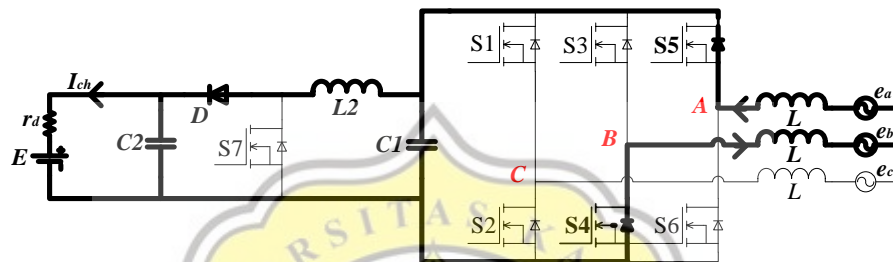
$e_b$  = back-electromotive force fasa-B

$v_L$  = tegangan pada induktor

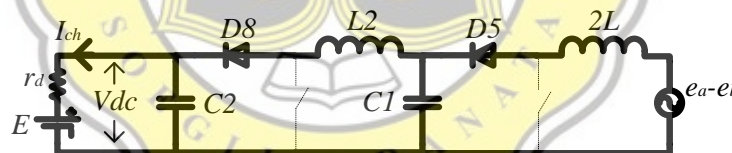
$i_a$  = fluktuasi dari arus fasa-A

Pada saat saklar dalam kondisi-off energi yang tersimpan akan mengalir ke batere melalui dioda. Hal ini yang menyebabkan tegangan keluaran konverter memiliki *gain* yang tinggi, karena energi yang tersimpan ditambahkan dengan

energi dari sumber. Semakin tinggi tegangan keluaran konverter maka arus yang masuk ke baterai akan semakin besar. Rangkaian ekuivalen pengereman regeneratif mesin BLDC saat energi pada belitan mengalir melalui dioda disajikan pada Gambar-3.5. dan rangkaian ekuivalen cascaded boost converter ketika saklar dalam kondisi-off disajikan pada Gambar-3.6.



**Gambar-3. 5 Rangkaian ekuivalen pengereman regeneratif mesin BLDC saat energi pada belitan mengalir melalui diode**



**Gambar-3. 6 Rangkaian ekuivalen cascaded boost converter ketika saklar dalam kondisi-off**

Berdasarkan rangkaian pada Gambar-3.5. dan Gambar-3.6. persamaan tegangan dan arus dinyatakan dalam (3-3) dan (3-4)

$$\begin{aligned}
 (e_a - e_b) + v_{2L} &= V_{C1} \\
 2L \frac{di_a}{dt} &= V_{C1} - (e_a - e_b) \\
 \Delta i_a &= \frac{V_{C1} - (e_a - e_b)}{2L} t_{off}
 \end{aligned}
 \tag{3-3}$$

$$V_{C1} + vL2 = V_{dc}$$

$$L2 \frac{di_a}{dt} = V_{dc} - V_{C1}$$

$$\Delta i_a = \frac{V_{dc} - V_{C1}}{L2} t_{off} \quad (3-4)$$

Berdasarkan persamaan (3-3) dan (3-4), tegangan keluaran *cascaded boost converter* dinyatakan dalam (3-5)

$$\frac{V_{dc}}{(e_a - e_b)} = \frac{1}{(1 - d_1)} \frac{1}{(1 - d_2)} \quad (3-5)$$

Semakin tinggi tegangan keluaran dari konverter, maka arus yang masuk ke batere akan semakin besar. Maka arus yang masuk ke batere dapat dinyatakan dalam (3-6)

$$I_{ch} = \frac{V_{dc} - E}{r_d} \quad (3-6)$$

di mana:

$I_{ch}$  = arus yang masuk ke batere (A)

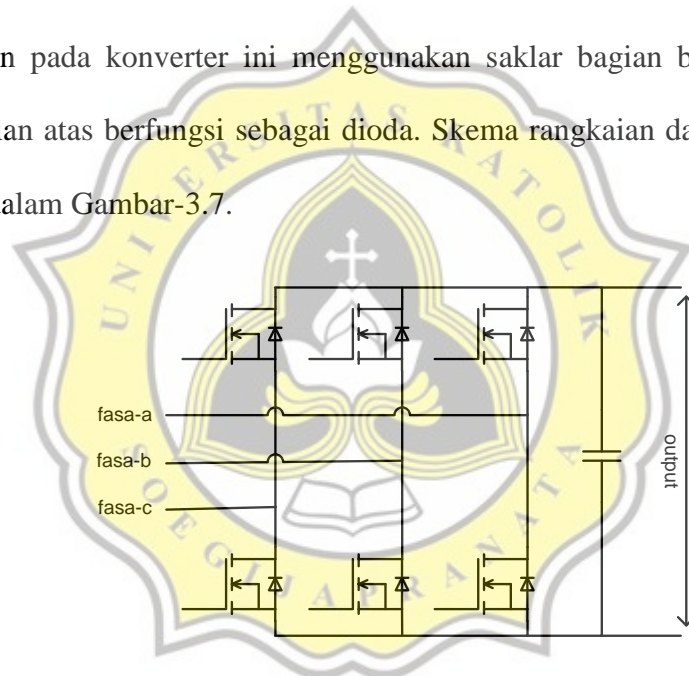
$V_{dc}$  = tegangan keluaran *cascaded boost converter* (V)

$E$  = tegangan batere (V)

$r_d$  = hambatan dalam batere ( $\Omega$ )

### 3.3 Rangkaian Daya *Boost Rectifier*

Rangkaian daya dari *boost rectifier* menggunakan MOSFET IRFP460 sebagai saklar daya dan kapasitor 1000 uF pada sisi keluaran. Rangkaian ini membutuhkan tiga *pin input* yang disambungkan ke masing-masing fasa pada generator BLDC. Rangkaian daya *boost rectifier* ini akan menjadi penguatan tahap pertama dari generator BLDC. Tegangan keluaran dari rangkaian ini berupa tegangan DC yang nantinya akan dikuatkan lagi melalui *chopper* kedua. Pensaklaran pada konverter ini menggunakan saklar bagian bawah, sedangkan saklar bagian atas berfungsi sebagai dioda. Skema rangkaian daya *boost rectifier* disajikan dalam Gambar-3.7.

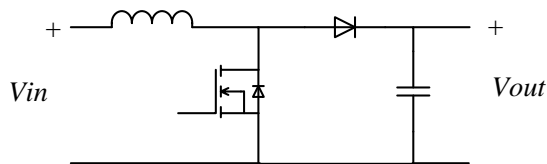


Gambar-3. 7 Skema rangkaian daya *boost rectifier*

### 3.4 Rangkaian Daya *Chopper* kedua

Rangkaian daya *chopper* kedua menggunakan MOSFET IRFP460, induktor 2 mH, dioda *ultrafast* MUR860, dan kapasitor 47 uF. Rangkaian daya ini membutuhkan sumber tegangan DC dari keluaran *boost rectifier*. *Chopper* kedua ini berfungsi sebagai penguatan kedua setelah *boost rectifier*. Rangkaian ini

menggunakan dioda *ultrafast* karena pensaklarannya menggunakan frekuensi tinggi. Skema rangkaian daya *chopper* kedua disajikan pada Gambar-3.8.



**Gambar-3. 8** Skema rangkaian *chopper* kedua

Saklar statis yang digunakan memiliki *rating* tegangan 500V dan arus maksimal 20 A. *Gate* dari MOSFET akan mendapatkan sinyal dari driver sesuai dengan perintah mikrokontrol.

### 3.5 Rangkaian Driver

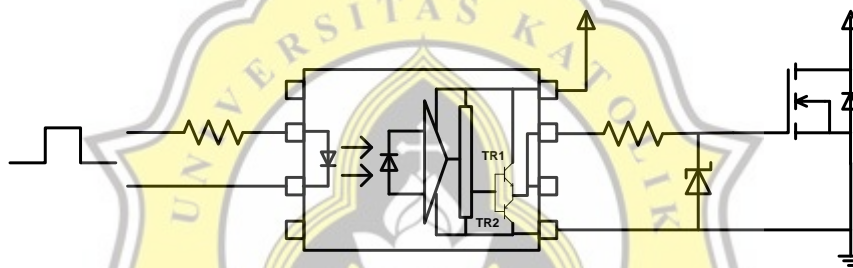
Rangkaian *driver* merupakan salah satu komponen utama yang didalamnya terdapat *photoelectric coupler*. Rangkaian *driver* berfungsi sebagai *interfacing* antara mikrokontroler yang beroperasi pada tegangan dan arus kecil dengan rangkaian daya yang beroperasi pada tegangan dan arus besar. Tegangan masukan dan tegangan keluaran dari *photoelectric coupler* memiliki *grounding* yang berbeda.

Fungsi utama dari rangkaian *driver* pada sistem ini adalah menyalakan MOSFET sesuai dengan perintah mikrokontroler. Rangkaian *driver* ini menggunakan tipe TLP250. Sinyal masukan TLP250 berupa sinyal digital, yaitu hanya mempunyai dua kemungkinan. Dua kemungkinan dari sinyal digital tersebut adalah logika 1 dan logika 0. Logika tersebut berdasarkan tegangan kerja mikrokontroler, jika mikrokontroler memiliki tegangan kerja 5 Vdc maka logika 1



akan membangkitkan tegangan 5 Vdc. Pada saat logika 0, maka mikrokontrol tidak akan membangkitkan tegangan atau 0 V.

*Photoelectric coupler* tipe TLP250 memiliki logika sinyal keluaran yang sama dengan logika sinyal masukan. Perbedaan antara masukan dan keluaran TLP250 yaitu terletak pada tegangan kerja. Tegangan masukan TLP250 menyesuaikan dari mikrokontroler, tetapi tegangan keluaran memiliki catu daya sendiri. Skema rangkaian *driver* menggunakan *photoelectric coupler* tipe TLP250 disajikan pada Gambar-3.9.

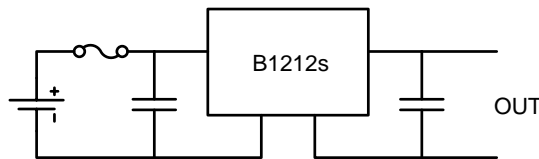


Gambar-3. 9 Skema rangkaian *driver* menggunakan *photoelectric coupler* tipe TLP250

### 3.6 Rangkaian *Isolated Power Supply*

Rangkaian *isolated power supply* digunakan untuk penyuplai daya pada rangkaian driver. Rangkaian *isolated power supply* ini dibutuhkan karena saklar setiap lengan pada *boost rectifier* memiliki *grounding* yang berbeda. Dalam rangkaian ini terdapat komponen utama yaitu B1212s. B1212s memiliki konfigurasi empat *pin*, yaitu dua *pin* untuk tegangan masukan dan dua *pin* untuk tegangan keluaran. Dengan bantuan komponen ini membuat tegangan masukan dan tegangan keluaran memiliki *grounding* yang berbeda, sehingga hanya membutuhkan satu sumber DC. Selain komponen utama B1212s pada rangkaian

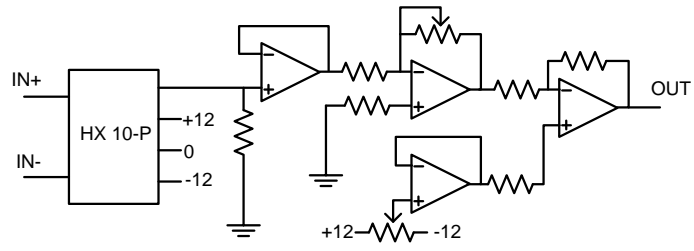
*isolated power supply*, terdapat komponen lain yaitu kapasitor polar dan *fuse*. Kapasitor dalam rangkaian ini berfungsi agar tegangan relatif stabil dan *fuse* sebagai pengaman jika terjadi *short* pada rangkaian. Skema rangkaian *isolated power supply* disajikan pada Gambar-3.10.



Gambar-3. 10 Skema rangkaian *isolated power supply*

### 3.7 Rangkaian Sensor Arus

Rangkaian sensor arus digunakan untuk mendeteksi arus pada rangkaian daya seperti arus induktor dan arus yang masuk ke batere. Salah satu sensor arus berjenis CT (*Current Transformers*) adalah tipe LEM HX-10P. Sensor ini memiliki *rating* arus sebesar 10 A dengan tegangan kerja +12 V -12 V, maka dari itu LEM HX-10P membutuhkan catu daya simetris. Pada prinsipnya, sensor arus ini mengubah nilai arus menjadi tegangan sesuai dengan skala. Agar tegangan keluaran sensor dapat digunakan, perlu adanya rangkaian penguat *op-amp*. Rangkaian *op-amp* berfungsi untuk penguat, mengatur *dc offset*, dan mengatur *gain* dari tegangan keluaran sensor. Skema rangkaian *op-amp* dengan sensor arus LEM HX-10P disajikan dalam Gambar-3.11.



Gambar-3. 11 Skema rangkaian *op-amp* dengan sensor arus LEM HX-10P

