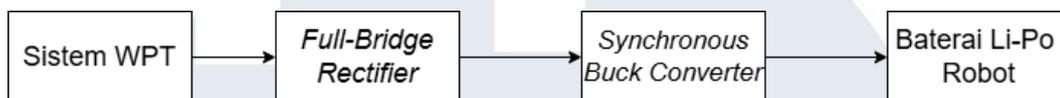


## BAB II

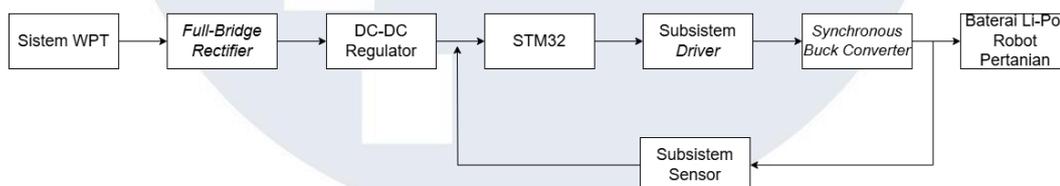
### KONSEP DESAIN & SPESIFIKASI SISTEM

#### 2.1 Konsep Desain Sistem



Gambar 2.1 Diagram Blok *Power Stage*

Secara umum, *power stage* pada sistem secara keseluruhan dapat dijelaskan pada Gambar 2.1. Input utama dari *synchronous buck converter* merupakan tegangan DC dari *full-bridge rectifier*. Tegangan yang diterima sebesar 24 V yang stabil, sehingga *synchronous buck converter* berfungsi untuk menurunkan tegangan agar sesuai dengan spesifikasi sistem.



Gambar 2.2 Diagram Blok *Control and Signal Stage*

Gambar 2.2 menggambarkan sistem kontrol digital secara umum untuk proses pengisian daya baterai. Mikrokontroler STM32 memperoleh suplai daya dari tegangan yang dihasilkan *full-bridge rectifier* yang sudah diregulasi menjadi 5 V. Salah satu fungsi STM32 adalah penghasil sinyal PWM, sinyal ini akan menjadi input pada subsistem *driver* yang menggunakan MOSFET *driver*. MOSFET *driver* terhubung dengan MOSFET pada *synchronous buck*. *Duty cycle* pada PWM yang dihasilkan oleh STM32 akan serupa dengan PWM pada proses *switching* MOSFET pada *synchronous buck converter*. Nilai *duty cycle* diatur oleh STM32 berdasarkan sinyal *feedback* dari sensor tegangan dan arus, dan sesuai dengan algoritma pengisian daya CC-CV.

## 2.2 Spesifikasi Sistem

### 2.2.1 Subsystem *Driver*

Subsystem *driver* merupakan subsistem yang menghubungkan sinyal PWM dari STM32 ke kedua MOSFET yang digunakan pada *synchronous buck converter*. *Gate* pada MOSFET bersifat seperti kapasitor, ketika dinyalakan (*ON*) dibutuhkan proses *charge* yang cepat dan ketika dimatikan (*OFF*) dibutuhkan proses *discharge* yang cepat. Jika MOSFET melakukan *switching* dari sinyal PWM langsung dihubungkan dengan mikrokontroler, maka proses *switching* tidak bisa dilakukan dengan cukup cepat karena suplai arusnya yang terbatas. Dengan menggunakan MOSFET *driver*, arus yang dibutuhkan oleh MOSFET untuk melakukan proses *switching* dapat disuplai dengan cukup untuk melakukan *switching* yang cepat. Subsystem ini juga berfungsi sebagai proteksi untuk mikrokontroler karena tipe IC yang digunakan adalah *isolated*.

Pada rangkaian subsistem *driver*, IC MOSFET *driver* yang digunakan adalah Si8233 karena merupakan *isolated driver* dan *high-side/low-side driver*. Salah satu fungsi dari fitur *isolation* adalah proteksi mikrokontroler, karena tidak ada koneksi listrik yang terhubung secara langsung pada *control stage* dan *power stage*. Selain itu, tipe *isolated driver* juga lebih tahan akan derau pada sistem. Berikut merupakan spesifikasi dari Si8233.

Tabel 2.1 Spesifikasi MOSFET *Driver* SI8233

Definisi	Keterangan
Tipe isolasi	Terisolasi
Frekuensi <i>switching</i> maksimum	8 MHz
Arus <i>output</i> maksimal	4 A
<i>Propagation delay</i> maksimum	60 ns
Tegangan sisi input	4.5 – 5.5 V
Tegangan <i>driver</i>	6.5 – 24 V
<i>Bootstrap</i>	Bisa, 1 $\mu$ F kapasitor
<i>Dead time</i> dan proteksi <i>overlap</i>	Bisa, diprogram dengan resistor

Sumber: alldatasheet.com

Pada aplikasi sebagai *high-side/low-side driver* seperti pada rangkaian *synchronous buck converter*, dibutuhkan sebuah rangkaian untuk mengoptimalkan performa. Rangkaian memiliki komponen-komponen sebagai berikut.

### 1) *Bootstrap*

*Bootstrap* merupakan metode untuk menyalakan MOSFET *high-side* dengan menyediakan tegangan *gate* yang lebih tinggi dari *source*-nya. Tanpa *bootstrap*, saat MOSFET *high-side* ingin diaktifkan (ON), nilai *source* dari MOSFET *high-side* akan *floating* dan tidak akan menyala. Metode ini menggunakan kapasitor dan dioda, kapasitor diisi ketika MOSFET *low-side* ON, dan muatan tersebut digunakan untuk menyalakan *gate* MOSFET *high-side*. Dioda berfungsi mencegah adanya arus balik dari kapasitor *bootstrap* menuju suplai. Perhitungan untuk menentukan kapasitor *bootstrap* adalah sebagai berikut.

$$Q_{Total} = Q_G \frac{I_{QS}}{f_{sw}} \quad (2.1)$$

$$Q_{Total} = 11 + \frac{3}{85} = 46 \text{ nC}$$

$$C_{Boot} = \frac{Q_{Total}}{\Delta V_{Boot}} \quad (2.2)$$

$$C_{Boot} = \frac{46}{(0.05 \times 12)} = 77 \text{ nF}$$

di mana,

$Q_{Total}$  : *Charge* total (nC)

$Q_G$  : MOSFET *gate charge* (nC)

$I_{QS}$  : *Driver quiescent current* (mA)

$f_{sw}$  : *Frekuensi switching* (kHz)

$\Delta V_{Boot}$  : *Target ripple* kapasitor *bootstrap* (V)

$C_{Boot}$  : *Kapasitor bootstrap* (nF)

Pada Persamaan 2.1 menunjukkan total *charge* yang dibutuhkan kapasitor pada 1 siklus *switching*. Nilai yang dibutuhkan adalah 1 nC, sehingga nilai kapasitor *bootstrap* yang dibutuhkan adalah 77 nF melalui rumus pada Persamaan 2.2. 100 nF adalah nilai kapasitor yang dipakai, karena menyesuaikan dengan nilai kapasitor yang ada di pasar. Kapasitor yang digunakan bertipe keramik untuk karena memiliki respons yang cepat. Dioda *bootstrap* menggunakan adalah tipe 1N5822 karena memiliki *rating* yang cukup untuk mem-*block* tegangan 12 V.

## 2) *Decoupling capacitor*

Kapasitor ini digunakan untuk filter derau dan memastikan tegangan yang masuk pada input *driver* tetap stabil. Nilai kapasitor yang digunakan sesuai dengan anjuran *datasheet*, 1  $\mu\text{F}$  dan 10  $\mu\text{F}$  kapasitor elektrolit dan 0.1  $\mu\text{F}$  kapasitor keramik [30].

## 3) *Dead-time*

MOSFET *driver* yang digunakan memiliki fitur *dead time* yang dapat diprogram melalui nilai resistor yang terhubung pada pin DT. Nilai *dead time* yang diinginkan adalah 1% dari periode *switching* atau 1% dari 11.76  $\mu\text{S}$  yang bernilai sekitar 120 ns. Nilai resistor yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$R_{DT} \approx \frac{DT}{10} \quad (2.3)$$
$$R_{DT} \approx \frac{120}{10} \approx 12 \text{ k}\Omega$$

di mana,

RDT : Resistor *dead time* ( $\text{k}\Omega$ )

DT : *Dead time* (ns)

Persamaan 2.3 merupakan perhitungan *dead time* yang berasal dari *datasheet* [30]. Nilai resistor mengikuti nilai yang sering ditemukan di pasar, yaitu 10  $\text{k}\Omega$ .

## 4) Resistor arus *source*

Resistor ini digunakan untuk membatasi arus masuk saat *gate* MOSFET sedang diisi. Arus ini harus dibatasi untuk proteksi MOSFET *driver*, selain itu resistor ini mempengaruhi kecepatan naiknya tegangan pada *gate* MOSFET ketika ON dan mengurangi *ringing*. Perhitungan untuk menentukan nilai resistor adalah sebagai berikut.

$$R_{source} = \frac{V_o}{I_{source}} \quad (2.4)$$
$$R_{source} = \frac{12}{2} = 6 \Omega$$

di mana,

$R_{source}$  : Resistor arus *source* ( $\Omega$ )

$V_o$  : Tegangan *output driver* (V)

$I_{source}$  : Arus *source* (A)

Berdasarkan Persamaan 2.4, nilai resistor arus *source* ditentukan dari nilai tegangan *output driver* yaitu 12 V dan arus *source* maksimal, 2 A [30]. Nilai resistor yang digunakan sesuai dengan ketersediaan di pasar, yaitu 6.8  $\Omega$ .

5) Resistor arus *sink*

Resistor ini digunakan untuk membatasi arus *discharge* pada *gate* MOSFET yang menuju ke *driver* saat MOSFET OFF. Arus harus dibatasi agar tidak merusak *driver* dan nilainya juga akan mempengaruhi transisi OFF dari sinyal *gate-source* MOSFET. Perhitungan untuk menentukan nilai resistor adalah sebagai berikut.

$$R_{sink} = \frac{V_o}{I_{sink}} \quad (2.5)$$

$$R_{sink} = \frac{12}{4} = 3 \Omega$$

di mana,

$R_{sink}$  : Resistor arus *sink* ( $\Omega$ )

$I_{sink}$  : Arus *sink* (A)

Persamaan 2.5 menunjukkan nilai resistor ini dipengaruhi oleh nilai tegangan *output driver* dan arus *sink* maksimal, yaitu masing-masing 12 V dan 4 A [30]. Nilai resistor yang digunakan adalah 3.3  $\Omega$  karena menyesuaikan ketersediaan di pasar.

6) Dioda *gate*

Dioda digunakan untuk mempercepat proses OFF pada *gate* MOSFET dengan melewati arus *discharge* langsung tanpa melewati resistor arus *sink*. Dioda yang digunakan adalah 1N4148 karena memiliki waktu pemulihan yang cepat, arus forward yang cukup, dan umum digunakan pada aplikasi ini.

## 2.2.2 Subsistem *Synchronous Buck Converter*

Subsistem ini merupakan subsistem utama dari keseluruhan sistem. Tegangan input yang digunakan adalah 24 V, sedangkan tegangan maksimum pada baterai Li-Po 3 sel adalah 12.6 V [32]. Sehingga, dibutuhkan rangkaian *synchronous buck converter* untuk mengkonversi daya agar sesuai dengan spesifikasi pengisian daya baterai. Metode CC-CV juga dapat diterapkan pada topologi rangkaian ini karena arus dan tegangan *output* dapat dikendalikan dengan mengatur *duty cycle* PWM pada MOSFET.

Dibandingkan dengan rangkaian *buck converter* biasa, *synchronous buck converter* mengganti dioda dengan MOSFET, sehingga rugi-rugi akibat dioda diganti dengan rugi konduksi MOSFET yang nilainya lebih kecil. Oleh karena itu, nilai efisiensi rangkaian *synchronous buck converter* akan besar dibandingkan dengan rangkaian *buck converter* biasa. Selain itu, topologi konverter ini menghasilkan *ripple* tegangan dan arus yang kecil, sehingga meningkatkan keamanan dan menjaga umur baterai selama proses pengisian daya.

Untuk memastikan bahwa sistem ini dapat dikendalikan dengan baik menggunakan algoritma CC-CV, maka dilakukan penurunan fungsi alih (*transfer function*) dari rangkaian *synchronous buck converter*. Fungsi alih digunakan memodelkan dinamika sistem dan menggambarkan hubungan matematis antara input, yang merupakan *duty cycle* PWM dari MOSFET *high-side*, dan *output*, yang merupakan tegangan *output* ( $V_{out}$ ) serta arus pada induktor ( $I_L$ ). Dengan mengetahui model dinamis tersebut, dapat dilakukan analisis respons sistem terhadap sinyal kontrol, yang kemudian menjadi acuan dalam menentukan nilai konstanta P ( $K_p$ ) dan konstanta I ( $K_i$ ) yang tepat pada kontroler PI untuk implementasi metode CC-CV.

Fungsi alih akan diturunkan dengan metode analisis *small-signal* yang merupakan metode pendekatan linear yang digunakan untuk menganalisis perilaku dinamis suatu sistem non-linear, dengan cara melihat respons sistem terhadap gangguan kecil (*small signal*) [31]. Pendekatan juga menggunakan asumsi bahwa sistem bekerja dalam *continuous conduction mode* (CCM), yang mengasumsikan

bahwa arus pada induktor tidak pernah turun ke nol dan model *small-signal* dapat disederhanakan menjadi linier. Persamaan dasar dari metode analisis ini adalah *Inductor Volt-Second Balance* (IVSB) dan *Capacitor Charge Balance* (CCB), sebagai berikut.

$$\langle V_L \rangle_{T_s} = 0 \quad (2.6)$$

$$\langle I_C \rangle_{T_s} = 0 \quad (2.7)$$

di mana,

$\langle V_L \rangle_{T_s}$  : Tegangan rata-rata induktor selama satu periode *switching*

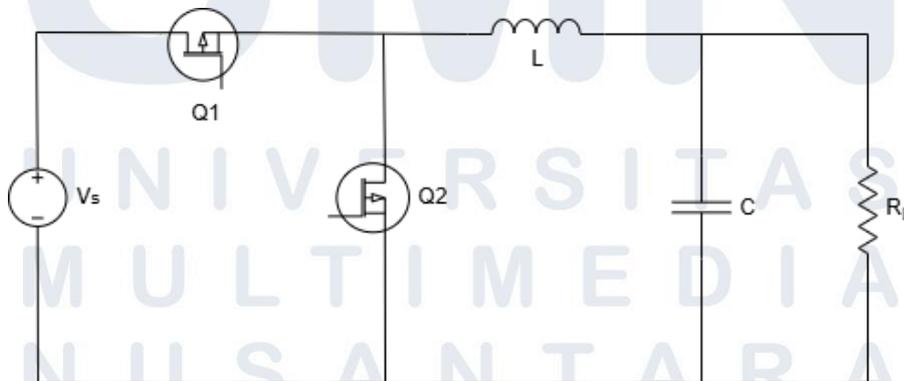
$\langle I_C \rangle_{T_s}$  : Arus rata-rata kapasitor selama satu periode *switching*

Persamaan 2.6 dan 2.7 masing-masing artinya adalah nilai tegangan rata-rata pada induktor dan arus rata-rata pada kapasitor pada keadaan *steady state* pada satu periode *switching* adalah nol. Kedua persamaan tersebut dapat diubah karena mengasumsikan bahwa sistem selalu ada pada keadaan *steady state*, sehingga diperlukan persamaan baru yang menganggap sistem dinamis.

$$\langle V_L \rangle_{T_s} = L \frac{d}{dt} \langle I_L(t) \rangle_{T_s} \quad (2.8)$$

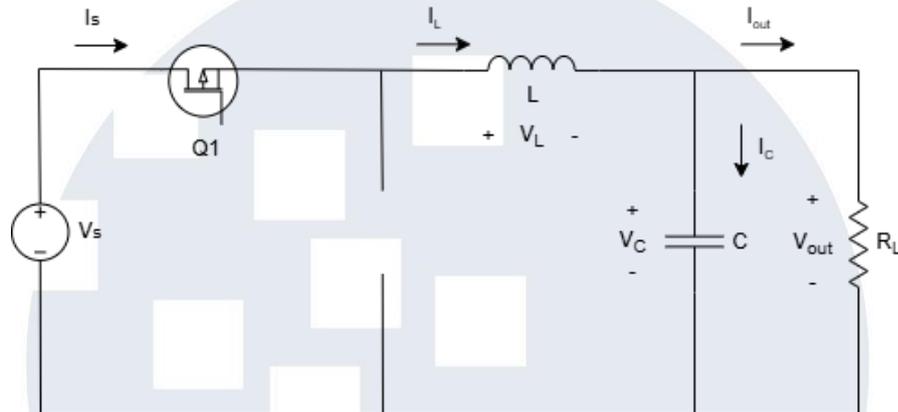
$$\langle I_C \rangle_{T_s} = C \frac{d}{dt} \langle V_C(t) \rangle_{T_s} \quad (2.9)$$

Dengan pendekatan *small-signal*, sistem dianggap dinamis, sehingga Persamaan 2.8 dan 2.9 merupakan hasil modifikasi dari persamaan-persamaan sebelumnya. Untuk memasukkan persamaan tersebut ke rangkaian *synchronous buck converter* dapat dianalisis sebagai berikut.



Gambar 2.3 Diagram Sirkuit *Synchronous Buck Converter*

Gambar 2.3 menunjukkan rangkaian *synchronous buck converter* yang menggunakan MOSFET *high-side* (Q1) dan MOSFET *low-side* (Q2).



Gambar 2.4 Diagram Sirkuit Keadaan ON dari *Synchronous Buck Converter*

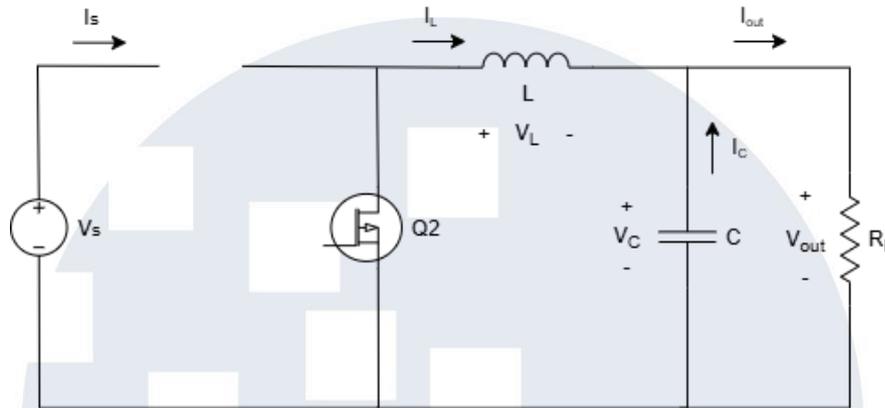
Selama satu periode *switching*, terdapat dua siklus pada rangkaian *synchronous buck converter*. Gambar 2.4 merupakan siklus pertama dari rangkaian *synchronous buck converter*. MOSFET Q1 dalam keadaan ON sedangkan MOSFET Q2 dalam keadaan OFF, sehingga dianggap tidak ada. Dalam siklus ini, persamaan yang didapatkan adalah

$$\langle V_L \rangle_{T_s} = D(t) [\langle V_s \rangle(t) - \langle V_{out} \rangle(t)] \quad (2.10)$$

$$\langle I_C \rangle_{T_s} = D(t) \left[ \langle I_L \rangle(t) - \frac{\langle V_{out} \rangle(t)}{R_L} \right] \quad (2.11)$$

Persamaan 2.10 menunjukkan bahwa tegangan rata-rata pada induktor dipengaruhi dari *duty cycle* dari MOSFET Q1 (D) dan tentunya tegangan *output* ( $V_{out}$ ). Sedangkan pada Persamaan 2.11, arus pada kapasitor dipengaruhi oleh D, arus induktor dan arus yang keluar.

UNIVERSITAS  
MULTIMEDIA  
NUSANTARA



Gambar 2.5 Diagram Sirkuit Keadaan OFF dari *Synchronous Buck Converter*

Gambar 2.5 merupakan siklus kedua dari rangkaian *synchronous buck converter*, yaitu ketika OFF. Dalam keadaan OFF, MOSFET Q1 tidak bekerja dan MOSFET Q2 dalam keadaan ON. Q1 dan Q2 tidak pernah dalam keadaan ON secara bersamaan, karena dapat menyebabkan arus pendek. Pada siklus ini, tidak ada arus yang mengalir dari sumber tegangan ( $V_s$ ), namun sistem dianggap dalam mode CCM sehingga persamaan menjadi sebagai berikut.

$$\langle V_L \rangle_{T_s} = D'(t)[- \langle V_{out} \rangle(t)] \quad (2.12)$$

$$\langle I_C \rangle_{T_s} = D'(t) \left[ \langle I_L \rangle(t) - \frac{\langle V_{out} \rangle(t)}{R_L} \right] \quad (2.13)$$

Pada siklus ini, tegangan pada induktor akan dipengaruhi oleh *duty cycle* MOSFET Q2 ( $D'$ ) dan  $V_{out}$  seperti pada Persamaan 2.12. Selanjutnya pada Persamaan 2.13, arus pada kapasitor juga dipengaruhi oleh  $D'$ , selain itu dipengaruhi oleh arus induktor ( $I_L$ ) dan arus *output*. Untuk melihat persamaan secara keseluruhan, persamaan-persamaan tersebut dapat digabungkan menjadi sebagai berikut.

$$\langle V_L \rangle_{T_s} = D(t)[\langle V_s \rangle(t) - \langle V_{out} \rangle(t)] + D'(t)[- \langle V_{out} \rangle(t)] = L \frac{d}{dt} \langle I_L(t) \rangle_{T_s} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} \langle I_C \rangle_{T_s} &= D(t) \left[ \langle I_L \rangle(t) - \frac{\langle V_{out} \rangle(t)}{R_L} \right] + D'(t) \left[ \langle I_L \rangle(t) - \frac{\langle V_{out} \rangle(t)}{R_L} \right] \\ &= C \frac{d}{dt} \langle V_{out}(t) \rangle_{T_s} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Persamaan 2.14 dan 2.15 merupakan gabungan dari persamaan-persamaan sebelumnya, yang menunjukkan nilai tegangan rata-rata pada induktor ( $\langle V_L \rangle_{T_s}$ ) dan nilai arus rata-rata pada kapasitor ( $\langle i_C \rangle_{T_s}$ ) dalam satu periode *switching*. Tahap selanjutnya merupakan menambahkan sinyal pengganggu dan linearisasi sebagai berikut.

Ubah,

$$V(t) = V + \hat{v}$$

$$I(t) = I + \hat{i}$$

$$D(t) = D + \hat{d}$$

$$D'(t) = D' - \hat{d}$$

di mana,

$\hat{v}$  : Tegangan gangguan

$\hat{i}$  : Arus gangguan

$\hat{d}$  : *Duty cycle* gangguan

sehingga Persamaan 2.14 dan 2.15 menjadi sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \langle V_L \rangle_{T_s} &= (D + \hat{d})[V_s + \hat{v}_s - V_{out} - \hat{v}_{out}] + (D' - \hat{d})[-V_{out} - \hat{v}_{out}] \\ &= L \frac{d}{dt} (I_L - \hat{i}_L) \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} \langle I_C \rangle_{T_s} &= D + \hat{d} \left( I_L + \hat{i}_L - \left( \frac{V_{out} + \hat{v}_{out}}{R_L} \right) \right) + D' - \hat{d} \left( I_L + \hat{i}_L - \left( \frac{V_{out} + \hat{v}_{out}}{R_L} \right) \right) \\ &= C \frac{d}{dt} (V_{out} + \hat{v}_{out}) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Kedua persamaan tersebut disederhanakan dan dikelompokkan menjadi sebagai berikut.

Dari Persamaan 2.16:

$$\begin{aligned} \langle V_L \rangle_{T_s} &= DV_s - DV_{out} - D'V_{out} + \hat{d}V_s - \hat{d}V_{out} + D\hat{v}_s - D\hat{v}_{out} + \hat{d}V_{out} \\ &\quad - D'\hat{v}_{out} + \hat{d}\hat{v}_s - \hat{d}\hat{v}_{out} + \hat{d}\hat{v}_{out} = L \frac{d\hat{i}_L}{dt} \end{aligned}$$

Dikelompokkan menjadi,

$$\begin{aligned}
\hat{d}\hat{v}_s - \hat{d}\hat{v}_{out} + \hat{d}\hat{v}_{out} &= 0 \\
DV_s - DV_{out} - D'V_{out} &= 0 \\
\hat{d}V_s - \hat{d}V_{out} + D\hat{v}_s - D\hat{v}_{out} + \hat{d}V_{out} - D'\hat{v}_{out} &= L \frac{d\hat{i}_L}{dt}
\end{aligned} \tag{2.18}$$

Dari Persamaan 2.17:

$$\langle I_C \rangle_{TS} = I_L + \hat{i}_L - \frac{V_{out}}{R_L} - \frac{\hat{v}_{out}}{R_L} = C \frac{d\hat{v}_{out}}{dt}$$

Dikelompokkan menjadi,

$$\begin{aligned}
I_L - \frac{V_{out}}{R_L} &= 0 \\
\hat{i}_L - \frac{\hat{v}_{out}}{R_L} &= C \frac{d\hat{v}_{out}}{dt}
\end{aligned} \tag{2.19}$$

Dari Persamaan 2.18, nilai  $\langle V_L \rangle_{TS}$  telah dikelompokkan menjadi 3 bagian. Dalam proses linearisasi, produk dua variabel atau sinyal pengganggu diabaikan untuk mempermudah proses penurunan fungsi alih, sehingga bagian pertama pada Persamaan 2.18 diabaikan. Selanjutnya, bagian kedua merupakan perkalian antara dua komponen DC, sehingga dapat diketahui hubungan matematis antara  $V_{out}$  dengan  $V_{in}$  sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
DV_s &= V_{out}(D + D') \\
\frac{V_{out}}{V_s} &= D
\end{aligned} \tag{2.20}$$

Nilai D dan D' bersifat saling komplementer, sehingga jumlah kedua nilai selalu sama dengan 1. Sehingga pada Persamaan 2.20, nilai D merupakan rasio dari tegangan  $V_{out}$  dan  $V_{in}$ .

Selanjutnya, bagian pertama Persamaan 2.19 menunjukkan hubungan  $V_{out}$  dengan  $V_{in}$  yang mempengaruhi nilai  $I_L$ . Pada bagian terakhir dari Persamaan 2.18 dan 2.19, dapat dianalisis untuk melihat pengaruh perubahan-perubahan kecil terhadap rangkaian dengan menulis ulang dalam bentuk Laplace sebagai berikut.

$$\hat{d}V_s + D\hat{v}_s - \hat{v}_{out} = sL\hat{i}_L \tag{2.21}$$

$$\hat{i}_L = \hat{v}_{out} \left( sC + \frac{1}{R_L} \right) \tag{2.22}$$

Persamaan 2.21 merupakan penulisan ulang dari bagian terakhir pada Persamaan 2.18 dalam bentuk Laplace, sedangkan Persamaan 2.22 merupakan penulisan ulang bagian terakhir pada Persamaan 2.19. Nilai gangguan tegangan output ( $\hat{v}_{out}$ ) dapat diturunkan dengan mengganti gangguan arus induktor ( $\hat{i}_L$ ) pada Persamaan 2.21 dengan Persamaan 2.22.

Dari Persamaan 2.21 dan 2.22:

$$\begin{aligned} \hat{d}V_s + D\hat{v}_s - \hat{v}_{out} &= sL \left( \hat{v}_{out} \left( sC + \frac{1}{R_L} \right) \right) \\ \hat{v}_{out} &= \hat{d} \frac{V_s}{s^2LC + s\frac{L}{R_L} + 1} + \hat{v}_s \frac{D}{s^2LC + s\frac{L}{R_L} + 1} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Persamaan 2.23 merupakan pengaruh nilai  $\hat{v}_{out}$  terhadap kontrol ( $\hat{d}$ ) dan  $\hat{v}_{out}$  terhadap  $\hat{v}_s$  pada sistem. Selain mengetahui pengaruh tersebut, pengaruh nilai  $\hat{i}_L$  juga dapat diketahui dengan mengganti Persamaan 2.21 dan 2.22 sebagai berikut.

Asumsikan  $\hat{v}_s = 0$ , untuk menganalisa respons  $\hat{i}_L$  terhadap kontrol ( $\hat{d}$ ), sehingga persamaan menjadi.

$$\hat{d}V_s - \hat{v}_{out} = sL\hat{i}_L \quad (2.24)$$

$$\hat{v}_{out} = \frac{\hat{i}_L}{\left( sC + \frac{1}{R_L} \right)} \quad (2.25)$$

Selanjutnya, mengganti nilai pada Persamaan 2.24 ke persamaan 2.25.

$$\begin{aligned} \hat{d}V_s - \left( \frac{\hat{i}_L}{\left( sC + \frac{1}{R_L} \right)} \right) &= sL\hat{i}_L \\ \frac{\hat{i}_L}{\hat{d}} &= \frac{V_s \left( sC + \frac{1}{R_L} \right)}{s^2LC + s\frac{L}{R_L} + 1} \end{aligned} \quad (2.26)$$

Persamaan 2.26 merupakan pengaruh nilai  $\hat{i}_L$  terhadap  $\hat{d}$  terhadap sistem. Dari penurunan rumus sistem yang telah dilakukan, didapatkan tiga fungsi alih penting untuk menggambarkan karakteristik rangkaian *synchronous buck converter* sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
G_{vd}(s) &= \frac{\hat{v}_{out}}{\hat{d}} = \frac{V_s}{s^2 LC + s \frac{L}{R_L} + 1} \\
G_{vs}(s) &= \frac{\hat{v}_{out}}{\hat{v}_s} = \frac{D}{s^2 LC + s \frac{L}{R_L} + 1} \\
G_{id}(s) &= \frac{\hat{i}_L}{\hat{d}} = \frac{V_s \left( sC + \frac{1}{R_L} \right)}{s^2 LC + s \frac{L}{R_L} + 1}
\end{aligned} \tag{2.27}$$

Pada Persamaan 2.27, tiga fungsi alih utama pada sistem telah diperoleh. Di mana,  $G_{vd}(s)$  merupakan *control-to-output* yang artinya pengaruh variasi *duty cycle* ke *output*. Sedangkan  $G_{vs}(s)$  merupakan *line-to-output* yang artinya pengaruh tegangan input ke tegangan *output*. Selain itu,  $G_{id}(s)$  merupakan *control-to-inductor current* yang artinya pengaruh *duty cycle* ke arus pada induktor.

Setelah mengetahui fungsi-fungsi alih utama pada *synchronous buck converter*, diperlukan perhitungan untuk mengetahui nilai-nilai komponen utama seperti kapasitor dan induktor. Dengan parameter utama seperti tegangan input ( $V_{in}$ ) adalah 24 V, sedangkan tegangan *output* ( $V_{out}$ ) adalah 12 V dengan arus 3 A, perhitungan nilai kapasitor dan induktor dapat menggunakan rumus sebagai berikut [22].

$$C = V_{max} \left( \frac{1 - D}{f \times R \times \Delta V} \right) \tag{2.28}$$

$$L = \frac{V_{in}(1 - D)D}{\Delta I \times f} \tag{2.29}$$

Di mana,

$$V_{max} = V_{out} + \frac{\Delta V}{2}$$

$$D = \frac{V_{in}}{V_{out}}$$

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

$$\Delta V = 0.5\% \times V_{out}$$

$$\Delta I = 30\% \times I_{out}$$

Sehingga,

$$C = \left(12 + \frac{0.06}{2}\right) \left(\frac{1 - 0.5}{850000 \times 4 \times 0.06}\right)$$

$$C = 295.5 \mu F$$

$$L = \frac{24(1 - 0.5)0.5}{0.9 \times 85000}$$

$$L = 78.43 \mu H$$

Melalui Persamaan 2.28 dan 2.29, nilai kapasitor yang diperoleh adalah 295.5  $\mu F$  dan nilai induktor adalah 78.43  $\mu H$ . Nilai kapasitor yang digunakan pada rangkaian akan mengikuti ketersediaan di pasar dan diparalelkan sebanyak 4 buah agar mendapatkan nilai ESR yang lebih rendah. Kapasitor yang akan diparalelkan adalah kapasitor elektrolit 330  $\mu F$  sebanyak 2 buah, kapasitor film 1  $\mu F$ , dan kapasitor film 0.1  $\mu F$ , dengan total kapasitansi sebesar 661.1  $\mu F$ . Induktor akan dibuat sendiri dengan menggulungkan *litz wire* di *ferrite core* hingga mencapai nilai minimum 78.43  $\mu H$ .

Tabel 2.2 Parameter Rangkaian *Synchronous Buck Converter*

Parameter	Nilai
Tegangan Input ( $V_{in}$ )	24 V
Tegangan Output ( $V_{out}$ )	12 V
Arus Output ( $I_{out}$ )	3 A
Load (R)	4 $\Omega$
Frekuensi <i>Switching</i> ( $f_{sw}$ )	85 kHz
<i>Duty Cycle</i> (D)	0.5
<i>Ripple Voltage</i> ( $\Delta V$ )	0.06 V
<i>Ripple Current</i> ( $\Delta I$ )	0.9 A
Kapasitor (C)	661.1 $\mu F$
Induktor (L)	78.43 $\mu H$
MOSFET	P2003BDG
MOSFET <i>driver</i>	SI8233

### 2.2.3 Subsistem Kendali dan Sensor

Tegangan baterai Li-Po 3 sel umumnya menghasilkan tegangan sekitar 12 V pada keadaan 80% *state of charge* (SOC) [32]. Pengisian daya hingga SOC yang tinggi atau melebihi 80% dapat merusak umur baterai [33,34]. Kedua subsistem ini saling berhubungan, di mana data tegangan dan arus digunakan sebagai *feedback* untuk menentukan mode pengisian daya yang sesuai dengan kondisi baterai.

Mikrokontroler STM32 akan membaca nilai analog dari pembacaan masing-masing sensor melalui pin ADC dan memprosesnya dengan algoritma kontrol PI. Jika tegangan baterai yang terdeteksi oleh sensor di bawah 12 V, maka sistem akan mengaktifkan mode CC. Mode CC menggunakan *set point* 3 A, sehingga sistem akan mengeluarkan arus konstan pada 3 A hingga tegangan baterai mencapai 12 V. Ketika mencapai 12 V, sistem akan beralih ke mode CV dan menjaga tegangan baterai agar tetap stabil hingga arus semakin kecil. Mode CC berfungsi agar pengisian dapat berlangsung dengan lebih cepat, sedangkan mode CV berfungsi untuk memastikan baterai terisi dengan aman, mencegah *overvoltage*, dan melindungi umur pakai baterai.

Dalam merancang sistem kendali ini, digunakan pendekatan fungsi alih yang telah diperoleh. Fungsi alih yang digunakan untuk memodelkan sistem pada mode CV adalah  $G_{vd}(s)$ , sedangkan untuk mode CC dapat menggunakan fungsi alih  $G_{id}(s)$ . Kedua fungsi alih tersebut digunakan pada simulasi dengan *software* MATLAB/Simulink untuk mendapatkan nilai konstanta kontroler sebagai nilai acuan.

### 2.3 Metode Verifikasi Spesifikasi

Untuk memverifikasi spesifikasi, digunakan beberapa alat seperti osiloskop, *power supply*, *printed circuit board* (PCB), *differential probe*, *passive probe*, *current probe*, beban resistif, multimeter, LCR meter, dan sebagainya. Sebelum melakukan pengujian pada masing-masing subsistem, pengujian tiap komponen utama juga dilakukan. Komponen utama yang diuji adalah mikrokontroler STM32, IC MOSFET *driver*, dan MOSFET. Tujuan pengujian komponen adalah untuk memastikan komponen berjalan sesuai dengan yang diinginkan.

Pengujian mikrokontroler STM32 dilakukan dengan membuat kode sederhana untuk menghasilkan sinyal PWM. Selanjutnya, pada pengujian MOSFET *driver*, sinyal PWM pada *output* MOSFET *driver* akan diperhatikan dan yang terakhir pada komponen MOSFET, proses *switching* pada *drain-source* ketika kaki *gate*

diberikan sinyal dari MOSFET *driver*. Setelah seluruh komponen telah berfungsi dengan baik, perakitan dan pencetakan PCB dilakukan.

Pengujian masing-masing subsistem dilakukan ketika PCB telah dicetak dan komponen-komponen pada PCB dipasang. Pengujian subsistem MOSFET *driver* dapat dilakukan dengan menganalisis sinyal-sinyal yang ada di rangkaian MOSFET *driver*, sebagai berikut.

- 1) IC *driver* dipastikan mendapatkan tegangan 5 V pada pin VDD input
- 2) Sinyal PWM dari STM32 dipastikan terhubung dengan pin input *driver* dengan benar
- 3) IC *driver* dipastikan mendapatkan tegangan 12 V pada pin VDD *output*
- 4) Sinyal *output* MOSFET *driver* yang masuk pada kaki MOSFET atau  $V_{GS}$  (*gate-source*) dianalisis. Sinyal yang dapat diterima tidak memiliki *spike* berlebihan, tidak memiliki *ringing*, dan memiliki *dead time* yang cukup antara *switching* MOSFET *high-side* dan *low-side*.

Pengujian subsistem selanjutnya adalah *synchronous buck converter*. Cara pengujian juga sama seperti subsistem sebelumnya, yaitu dengan menganalisis sinyal-sinyal yang ada di rangkaian *synchronous buck converter*, sebagai berikut.

- 1) Sinyal *switching* pada kedua MOSFET dianalisis. Sinyal yang dapat diterima tidak memiliki *spike* pada  $V_{DS}$  (*drain-source*) yang terlalu tinggi, tidak ada *ringing*, dan tidak ada *overlap* antara kedua sinyal  $V_{DS}$
- 2) Arus induktor dianalisis, pastikan *ripple* tidak berlebihan dan induktor bekerja dalam CCM (*continuous conduction mode*)
- 3) Tegangan input berhasil diturunkan sesuai dengan *duty cycle* PWM. Pastikan juga tidak ada *ripple* yang berlebihan
- 4) Arus *output* dipastikan terhubung dengan beban agar dapat dianalisis. Sama seperti tegangan, pastikan tidak ada *ripple* yang berlebihan

Pengujian subsistem terakhir merupakan subsistem kendali dan sensor. Subsistem dapat diuji setelah subsistem lainnya telah beroperasi dengan lancar. Berikut merupakan langkah-langkah dalam menguji subsistem ini.

- 1) Kedua sensor dipastikan telah mendapatkan tegangan
- 2) *Output* kedua sensor dipastikan agar tidak melebihi batas tegangan pin ADC pada mikrokontroler STM32
- 3) *Output* sensor dihubungkan dengan pin ADC STM32, pastikan STM32 dapat membaca nilai ADC
- 4) Kalibrasi sensor dilakukan. Kalibrasi berfungsi untuk mengubah nilai digital yang telah dibaca oleh ADC kembali ke nilai analog
- 5) Algoritma kontroler PI pada STM32 dipastikan agar dapat mengontrol tegangan dan arus sesuai dengan nilai *set point*
- 6) *Output* sistem setelah menggunakan kontroler dipastikan agar tidak memiliki osilasi atau *overshoot* yang berlebihan.
- 7) Respons sistem dipastikan sudah sesuai dengan kriteria yang diinginkan.

Pengujian ini dilakukan di dalam ruangan dengan suhu yang terkendali untuk meminimalkan pengaruh lingkungan pada hasil pengujian. Tahapan verifikasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap subsistem bekerja sesuai dengan spesifikasi desain dan sistem secara keseluruhan dapat menjalankan metode CC-CV untuk pengisian daya.