

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Letak geografis Indonesia yang berada di garis khatulistiwa mengakibatkan wilayahnya mendapatkan sinar matahari dengan intensitas radiasi rata-rata sekitar 4,8 kWh/m<sup>2</sup> per hari di seluruh wilayah [1]. Hal ini membuat wilayah di Indonesia berpotensi untuk membangun PLTS. Sumber energi ini merupakan salah satu sumber energi baru dan terbarukan (EBT) yang menjadi harapan baru di seluruh dunia, sehingga penggunaan dan teknologi PLTS sekarang ini telah berkembang dengan pesat.

PLTS menggunakan tiga sistem, yaitu sistem *on-grid*, *hybrid*, dan *off-grid*. Sistem *on-grid* pada umumnya tidak menggunakan baterai [2]. Hal ini membuat sistem *on-grid* hanya dapat bekerja saat panel surya menerima panas dari matahari. Sistem *hybrid* merupakan sistem yang menggunakan dua atau lebih sumber, seperti dari PLTS dan PLN [3]. Sistem *off-grid* merupakan sistem yang menggunakan baterai untuk penyimpanan energi listriknya [2].

Baterai pada PLTS sistem *off-grid* digunakan sebagai penyimpanan energi listrik. Ketika panel surya tidak lagi mendapatkan paparan sinar matahari, maka dapat menggunakan baterai sebagai sumber energinya. Banyak jenis baterai yang dapat digunakan pada PLTS. Salah satu baterai yang digunakan pada PLTS yaitu baterai LiFePO<sub>4</sub>. Baterai LiFePO<sub>4</sub> memiliki keamanan tinggi, siklus berumur panjang, dan ramah lingkungan [4].

Baterai LiFePO<sub>4</sub> yang digunakan terdiri dari beberapa sel. Muatan tiap sel memiliki perbedaan yang mengakibatkan terjadinya ketidakseimbangan muatan antara sel pada paket baterai. Ketidakseimbangan muatan sel pada paket baterai akan menyebabkan terjadinya *thermal runaway*, degradasi sel, pengisian yang tidak sempurna dan pengosongan yang tidak sempurna [5]-[6].

Berdasarkan permasalahan di atas, maka diperlukan penyeimbangan muatan pada baterai LiFePO<sub>4</sub>. Ada dua metode dalam menyeimbangkan muatan baterai, yaitu penyeimbang aktif dan penyeimbang pasif. Penyeimbang aktif bekerja dengan mengirimkan muatan dari sel yang memiliki muatan lebih banyak ke sel yang muatan lebih sedikit. Sedangkan penyeimbang pasif, bekerja dengan membuang muatan pada sel yang memiliki muatan lebih banyak menjadi energi panas [7].

Penelitian terkait penyeimbang aktif pada baterai pernah dilakukan oleh Khaeruddin, dkk [5]. Penelitian ini membahas terkait penyeimbangan sel-sel baterai *lithium-ion* menggunakan tiga sel baterai dengan teknik sel ke sel pada mode pengisian.

Pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, belum terdapat analisis penyeimbang baterai menggunakan baterai LiFePO<sub>4</sub> dan analisis saat mode pengosongan. Penelitian ini berfokus pada analisis penyeimbangan baterai LiFePO<sub>4</sub> menggunakan metode penyeimbang aktif induktor tunggal dengan teknik sel ke sel. Baterai yang digunakan yaitu LiFePO<sub>4</sub> 32700 dengan empat dan enam belas sel yang disusun secara seri. Analisis dilakukan dengan melihat waktu penyeimbangan setiap sel baterai dengan memberikan arus pengisian dan arus pengosongan yang berbeda. Sistem penyeimbangan baterai LiFePO<sub>4</sub> 32700 ini akan disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak Matlab Simulink.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penulisan tugas akhir yang telah diuraikan di atas, maka rumusan masalah dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang penyeimbang baterai LiFePO<sub>4</sub> 32700 menggunakan metode penyeimbang aktif induktor tunggal pada Matlab Simulink?
2. Bagaimana waktu penyeimbangan baterai LiFePO<sub>4</sub> 32700 saat mode pengisian dengan nilai arus pengisian yang berbeda menggunakan penyeimbang aktif induktor tunggal?
3. Bagaimana waktu penyeimbangan baterai LiFePO<sub>4</sub> 32700 saat mode pengosongan dengan nilai arus pengosongan yang berbeda menggunakan penyeimbang aktif induktor tunggal?
4. Bagaimana perbandingan hasil penelitian saat ini dengan penelitian sebelumnya?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang penyeimbang baterai LiFePO<sub>4</sub> 32700 menggunakan metode penyeimbang aktif induktor tunggal pada Matlab Simulink.
2. Melakukan analisis waktu penyeimbangan sel-sel baterai LiFePO<sub>4</sub> 32700 saat terjadinya pengisian dengan memberikan arus pengisian yang berbeda.
3. Melakukan analisis waktu penyeimbangan sel-sel baterai LiFePO<sub>4</sub> 32700 saat terjadinya pengosongan dengan memberikan arus pengosongan yang berbeda.
4. Melakukan perbandingan hasil penelitian saat ini dengan penelitian sebelumnya.

## 1.4 Batasan Masalah

Penelitian dan penulisan tugas akhir ini akan dibatasi pada:

1. Penyeimbang baterai menggunakan metode penyeimbang aktif induktor tunggal ini dilakukan dengan simulasi menggunakan Matlab Simulink.
2. Baterai yang digunakan adalah baterai LiFePO<sub>4</sub> 32700, terdiri dari empat dan enam belas sel yang disusun secara seri.

3. Tidak membahas reaksi kimia pada baterai LiFePO<sub>4</sub> 32700.
4. Jenis baterai yang digunakan pada Matlab Simulink adalah baterai lithium-ion yang spesifikasinya disesuaikan dengan baterai LiFePO<sub>4</sub> 32700.
5. Simulasi tidak menggunakan pengaruh suhu pada baterai.
6. Analisis yang dilakukan adalah analisis waktu penyeimbangan pada sel-sel baterai LiFePO<sub>4</sub> 32700 dengan arus pengisian dan pengosongan yang berbeda.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian dan penulisan tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat berupa:

1. Terampil dalam merancang penyeimbang baterai menggunakan metode penyeimbang aktif induktor tunggal pada Matlab Simulink.
2. Memahami waktu penyeimbangan baterai LiFePO<sub>4</sub> 32700 jika diberikan arus pengisian dan arus pengosongan yang berbeda.
3. Mencegah terjadinya kerusakan pada baterai yang diakibatkan ketidakseimbangan sel pada baterai LiFePO<sub>4</sub> 32700.

### 1.6 Sistematika Penulisan

Dalam proposal tugas akhir ini yang terbagi menjadi beberapa bab dengan sistematika tertentu, sistematika laporan ini adalah sebagai berikut:

#### BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang latar belakang dari masalah dalam pembuatan tugas akhir ini, tujuan yang ingin dicapai, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistem penulisan.

#### BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang teori-teori pendukung yang digunakan untuk memecahkan masalah dalam tugas akhir ini.

#### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini memuat informasi tentang metodologi penelitian yang digunakan berupa metode penelitian, *flowchart* penelitian, dan rancangan sistem penelitian.

#### BAB IV HASIL DAN ANALISIS

Bab ini memuat informasi tentang hasil percobaan dari penelitian dan analisis yang didapatkan dari hasil penelitian.

#### BAB V SIMPULAN DAN SARAN

Bab ini memuat informasi tentang kesimpulan yang didapatkan dari penelitian yang telah dilakukan dan saran untuk pengembangan dari penelitian yang telah dilakukan.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) adalah pembangkit listrik yang menggunakan sinar matahari untuk menghasilkan energi listrik. PLTS menggunakan panel surya yang mengonversi radiasi matahari menjadi energi listrik. Indonesia memiliki potensi sinar matahari dengan intensitas radiasi rata-rata sekitar 4,8 kWh/m<sup>2</sup> per hari di seluruh wilayah [8]. PLTS menghasilkan listrik *direct current* (DC), yang dapat diubah menjadi listrik *alternating current* (AC). PLTS dapat dilihat pada Gambar 2.1.

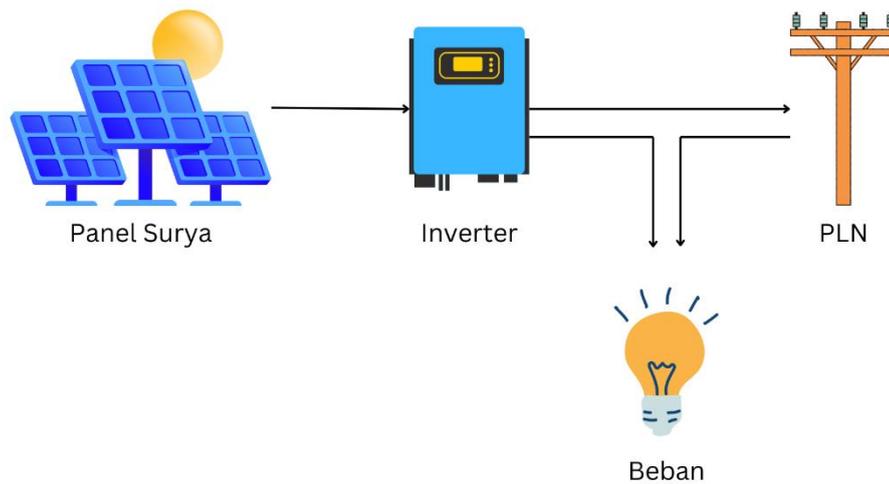


Gambar 2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Sistem PLTS terbagi menjadi tiga sistem berdasarkan konfigurasi dan aplikasinya. Sistem PLTS ini terdiri dari sistem tanpa menggunakan baterai atau langsung terhubung dengan beban (*on-grid*), sistem yang menyimpan energi listrik pada baterai (*off-grid*), dan sistem yang menggunakan dua sumber (*hybrid*).

#### 2.1.1 PLTS Sistem *On-Grid*

Sistem *On-Grid* atau yang disebut dengan *grid connected PV system* adalah sistem PLTS yang memanfaatkan radiasi matahari untuk menghasilkan listrik. Sesuai dengan namanya, maka sistem ini akan dihubungkan dengan jaringan PLN dengan mengoptimalkan pemanfaatan energi matahari melalui panel surya yang menghasilkan listrik semaksimal mungkin [9]. PLTS sistem *on-grid* dapat dilihat pada Gambar 2.2.

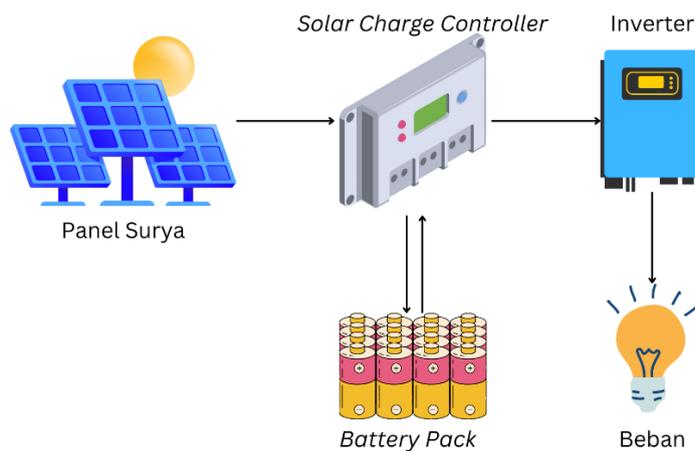


Gambar 2.2 PLTS On-Grid

Prinsip kerja PLTS sistem *on-grid* dapat diuraikan sebagai berikut: Pada siang hari, panel surya yang terpasang akan mengonversi radiasi matahari menjadi energi listrik *direct current* (DC). Selanjutnya sebuah komponen yang disebut inverter mengubah listrik DC tersebut dari panel surya menjadi listrik *alternating current* (AC). Kemudian listrik tersebut dapat digunakan untuk menyuplai beban. Jadi pada siang hari kebutuhan energi listrik berbagai beban disuplai langsung oleh PLTS. Jika kondisi ini terdapat kelebihan energi listrik dari panel, maka kelebihan energi listrik ini dapat dijual ke PLN sesuai kebijakan. Sedangkan pada malam hari atau jika kondisi cuaca mendukung, maka beban akan tetap disuplai PLN. Hal ini dikarenakan sistem *on-grid* tetap terkoneksi dengan jaringan PLN [10].

### 2.1.2 PLTS Sistem Off-Grid

Sistem *off-grid* merupakan sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) alternatif untuk daerah-daerah terpencil atau pedesaan yang belum terjangkau jaringan listrik PLN. Sulitnya akses dan mobilisasi ke lokasi menjadikan biaya pengembangan jaringan listrik PLN menjadi besar. PLTS sistem *off-grid* mengandalkan energi matahari sebagai sumber tunggal dan utama listrik. PLTS sistem *off-grid* merupakan solusi terbaik dalam penyediaan energi listrik di daerah terpencil dengan memanfaatkan energi matahari. Energi matahari dikonversi menjadi energi listrik untuk melengkapi kebutuhan listrik penduduk. Pemilihan PLTS sistem *off-grid* didasarkan atas pertimbangan beberapa faktor, yaitu rumah penduduk yang cukup menyebar, mudah dikembangkan, kapasitas kecil sehingga mudah diinstalasi, dan radiasi matahari sebagai sumber energi mencukupi [11]. PLTS sistem *off-grid* dapat dilihat pada Gambar 2.3.

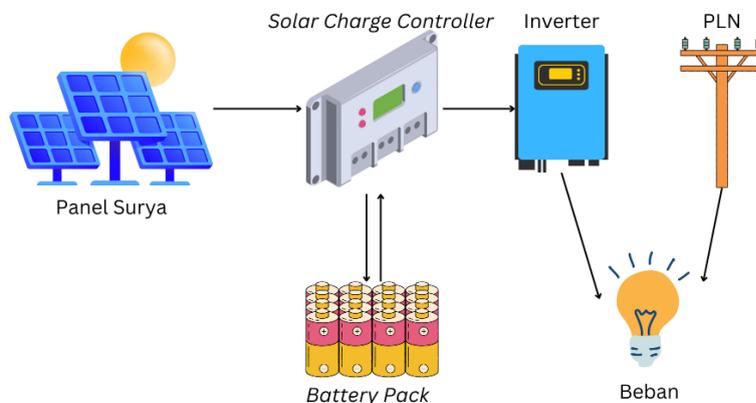


**Gambar 2.3 PLTS Off-Grid**

Prinsip kerja PLTS sistem *off-grid* dapat diuraikan sebagai berikut: Pada siang hari, panel surya terpapar dengan panas matahari. Lalu, panel surya menghasilkan energi listrik yang akan disimpan ke dalam baterai. Apabila baterai telah terisi penuh, maka energi listrik pada panel surya langsung dialirkan ke beban. Ketika panel surya tidak lagi terpapar oleh panas matahari atau sudah malam, maka baterai akan dijadikan sumber energi listrik untuk mencukupi kebutuhan beban.

### 2.1.3 PLTS Sistem Hybrid

Sistem *hybrid* adalah penggunaan dua atau lebih sumber energi listrik. Tujuan utama dari PLTS sistem *hybrid* pada dasarnya adalah berusaha menggabungkan dua atau lebih sumber energi sehingga dapat saling menutupi kekurangan dari masing-masing sumber energi dan efisiensi ekonomis pada beban tertentu. PLTS sistem *hybrid* merupakan salah satu alternatif PLTS yang tepat digunakan untuk meminimalkan penggunaan listrik dari sumber PLN. Hal ini dapat menghemat pengeluaran pembayaran ke PLN [12]. PLTS sistem *hybrid* dapat dilihat pada Gambar 2.4.



**Gambar 2. 4 PLTS Hybrid**

Prinsip kerja PLTS sistem *hybrid* dapat diuraikan sebagai berikut: PLTS sistem *hybrid* menggunakan dua atau lebih sumber seperti PLTS dan PLN. PLTS bekerja dengan sistem *off-grid* yang mana menggunakan baterai sebagai penyimpan energi listrik. Ketika PLTS dapat menyuplai energi listrik dengan cukup, maka energi listrik akan menggunakan sumber dari PLTS. Akan tetapi, ketika PLTS tidak dapat mencukupi kebutuhan listrik, maka dapat menggunakan PLN sebagai energi listriknya. Hal ini dapat terjadi dikarenakan panel surya tidak terpapar oleh cahaya matahari secara maksimal.

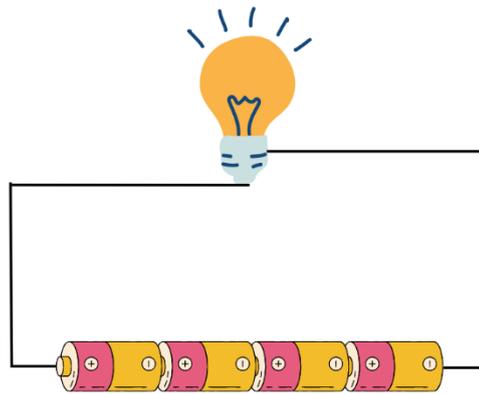
## 2.2 *Solar Charge Controller*

*Solar charge controller* adalah perangkat yang digunakan untuk mengendalikan pengisian energi listrik dari panel surya ke baterai. Ada dua jenis *solar charge controller*, yaitu: teknologi PWM (*Pulse Width Modulation*) dan MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). *Solar charge controller* akan mengisi baterai dengan arus tinggi saat baterai habis dan arus pengisian akan berkurang secara bertahap saat baterai mulai penuh. Teknologi ini memungkinkan baterai terisi penuh tanpa mengisi daya baterai secara berlebihan (*overcharge*). Saat baterai sudah penuh, *solar charge controller* akan menjaga baterai tetap penuh hingga panel surya tidak menghasilkan energi listrik [3].

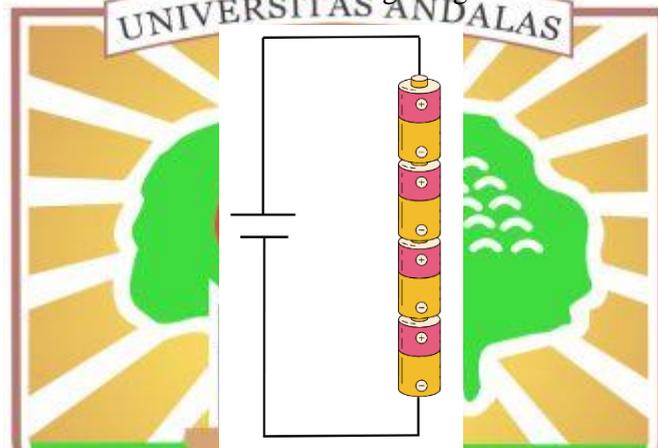
*Solar charge controller* tipe MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) memiliki keunggulan dibandingkan tipe PWM dalam hal kualitas pengisian baterai. *Solar charge controller* tipe MPPT dapat mendeteksi bahkan ketika daya yang dihasilkan panel surya rendah. Tegangan kerja *solar charge controller* tipe PWM hanya dapat beradaptasi dengan tegangan kerja baterai. Jika tegangan yang dihasilkan oleh panel surya lebih rendah dari tegangan kerja, sistem tidak akan secara otomatis mengisi baterai [13].

## 2.3 **Baterai**

Baterai adalah perangkat yang mampu menyimpan energi listrik dan menjadi sumber energi listrik, melalui transformasi dari energi listrik menjadi energi kimia atau sebaliknya [14]. Baterai mempunyai dua kutub, yaitu kutub positif (katoda) dan kutub negatif (anoda). Kutub positif (katoda) adalah kutub yang memiliki energi potensial lebih tinggi dibandingkan kutub negatif (anoda). Baterai terbagi menjadi dua jenis baterai, yaitu baterai primer dan baterai sekunder. Baterai primer merupakan baterai dapat digunakan dalam sekali pemakaian dan tidak dapat diisi ulang. Baterai sekunder merupakan baterai yang dapat diisi ulang sehingga dapat dipakai secara terus menerus dan siklus pemakaiannya lama [15]. Baterai memiliki dua proses kejadian, yaitu proses pengosongan seperti pada Gambar 2.5 dan proses pengisian seperti pada Gambar 2.6. Proses pengosongan merupakan proses perubahan energi kimia menjadi energi listrik, sebaliknya yang terjadi saat proses pengisian.



Gambar 2.5 Proses Pengosongan Baterai



Gambar 2.6 Proses Pengisian Baterai

### 2.3.1 Baterai LiFePO<sub>4</sub>

Baterai LiFePO<sub>4</sub> merupakan salah satu jenis baterai lithium-ion yang dapat digunakan secara berulang-ulang. Baterai LiFePO<sub>4</sub> terdiri dari anoda, katoda, dan elektrolit [16]. Baterai LiFePO<sub>4</sub> mempunyai beberapa keunggulan di antaranya memiliki kestabilan yang baik pada suhu tinggi, *life cycle* yang panjang (lebih dari 1000 siklus pengosongan) dan ramah lingkungan [17]. Baterai LiFePO<sub>4</sub> dapat dilihat pada Gambar 2.7. Spesifikasi baterai LiFePO<sub>4</sub> dapat dilihat pada Tabel 2.1.



Gambar 2.7 Baterai LiFePO<sub>4</sub> 32700

**Tabel 2.1** Spesifikasi Baterai LiFePO4 32700 [18]

Fitur	Spesifikasi
Tegangan	3.2 V
Kapasitas	6000 mAh
<i>Cycle Life</i>	2000 kali
Batas Tegangan Pengisian	3.65 V
Batas Tegangan Pengosongan	2.5 V
Dimensi	32 mm x 70 mm

### 2.3.2 State of Charge

State of charge (SOC) merupakan indikator yang menunjukkan perbandingan antara kapasitas sisa baterai dengan kapasitas total baterai. Secara umum, satuan dari SOC adalah dalam bentuk persentase, di mana 100% adalah kondisi kapasitas baterai penuh dan 0% adalah kondisi kapasitas baterai kosong. Estimasi SOC memiliki peranan yang sangat penting dalam pengaplikasian baterai karena dapat mencegah terjadinya hal yang tidak diinginkan pada baterai seperti pengisian berlebih [19].

Salah satu perhitungan untuk mengetahui nilai SOC, yaitu menggunakan metode *coulomb counting*. Metode *coulomb counting* dapat menghitung kapasitas sisa baterai dengan cara mengakumulasi total arus yang dikirim ketika pengisian dan pengosongan. Cara menghitung SOC dengan metode *coulomb counting* terdapat pada Persamaan (1) [20].

$$SOC(t) = SOC(t - 1) + \frac{i(t) \Delta t}{Q_{rated}} 100 \quad (1)$$

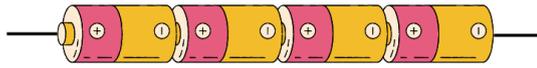
Keterangan:

- $SOC(t)$  : Nilai SOC pada waktu sekarang
- $SOC(t - 1)$  : Nilai SOC sebelumnya
- $i(t)$  : Arus pada waktu sekarang
- $\Delta t$  : Perbedaan waktu sekarang dengan waktu SOC sebelumnya
- $Q_{rated}$  : Kapasitas total pada baterai

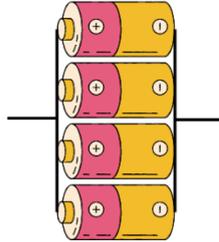
### 2.3.3 Paket Baterai

Paket baterai merupakan kumpulan dari sel-sel baterai. Tiap sel baterai dihubungkan secara paralel atau seri. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan nilai tegangan atau arus yang dibutuhkan.

Apabila paket baterai membutuhkan untuk memperbesar nilai tegangan, maka sel-sel baterai dihubungkan secara seri seperti pada Gambar 2.8. Sedangkan untuk membutuhkan sumber tenaga lebih lama memberikan daya listriknya terhadap beban, maka sel-sel baterai dihubungkan secara paralel seperti pada Gambar 2.9.

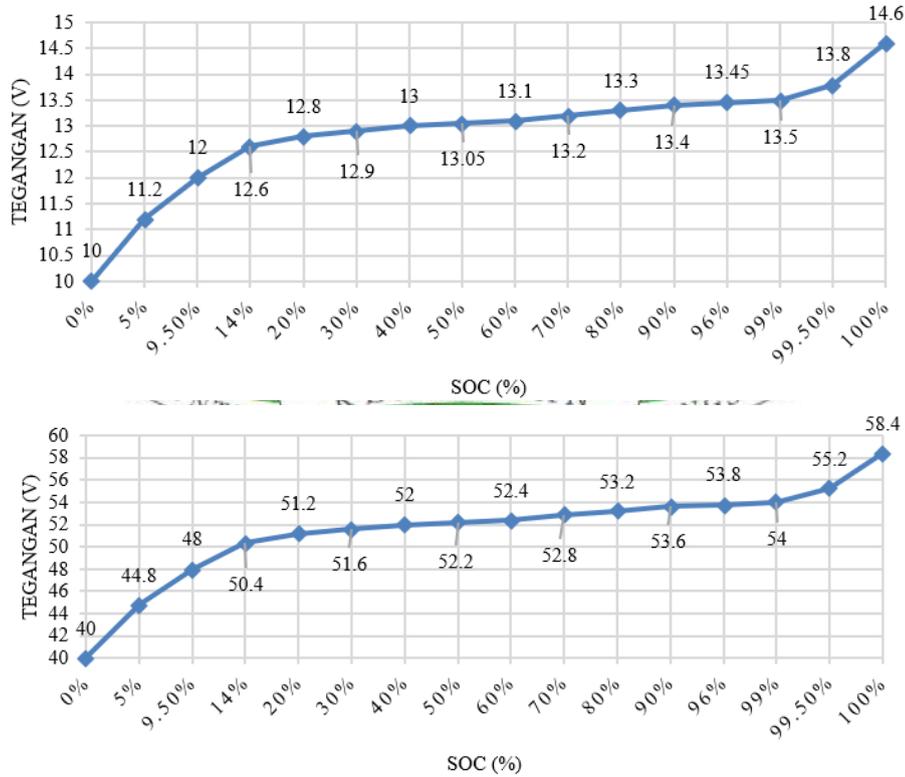


**Gambar 2.8** Baterai yang Disusun Secara Seri

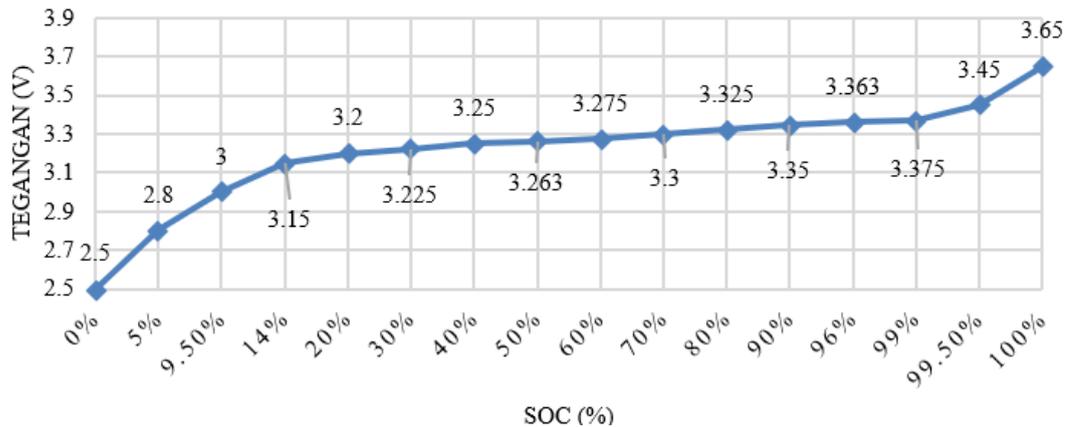


**Gambar 2.9** Baterai yang Disusun Secara Paralel

Baterai LiFePO<sub>4</sub> dengan sel yang disusun secara seri akan menambah nilai tegangan. Sel-sel baterai yang disusun seri, akan membuat perbedaan dari nilai tegangan terhadap SOC. Seperti pada Gambar 2.9, memperlihatkan kurva tegangan dan SOC pada baterai yang disusun secara seri. Sedangkan pada Gambar 2.10, memperlihatkan kurva tegangan dan SOC pada baterai yang disusun secara paralel.



**Gambar 2.10** Kurva Tegangan dan SOC pada Baterai LiFePO<sub>4</sub> yang Disusun Secara Seri



**Gambar 2.11** Kurva Tegangan dan SOC pada Baterai LiFePO4 yang disusun secara Paralel

## 2.4 Penyeimbang Aktif

Penyeimbang aktif merupakan salah satu metode dalam penyeimbangan baterai. Metode ini bekerja dengan mentransfer muatan dari sel baterai yang memiliki muatan lebih besar ke sel baterai yang memiliki muatan lebih kecil, seperti pada Gambar 2.12 [21]. Ada beberapa komponen yang biasa digunakan pada penyeimbangan penyeimbang aktif, yaitu menggunakan kapasitor dan induktor. Penyeimbang aktif induktor lebih banyak digunakan karena penyeimbangan lebih cepat, harga lebih murah, dan efisiensi yang tinggi [22].



**Gambar 2.12** Proses Penyeimbang Aktif Baterai

### 2.4.1 Penyeimbang Aktif Menggunakan Induktor

Induktor merupakan komponen yang memiliki susunan lilitan kawat membentuk sebuah kumparan. Induktor dapat menghasilkan medan magnet jika dialiri oleh arus listrik. Medan magnet yang dihasilkan tersebut dapat menyimpan energi dalam waktu yang cukup singkat. Maka dari itu, induktor termasuk ke dalam kategori komponen pasif. Kemampuan induktor dalam menyimpan energi magnet disebut induktansi dengan satuan unitnya adalah Henry (H). Simbol yang

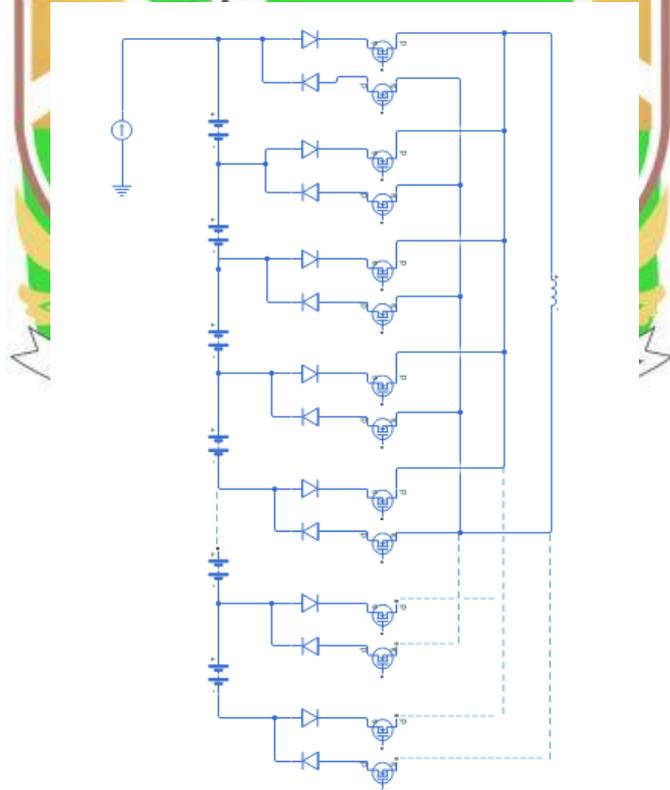
digunakan untuk melambangkan induktor dalam rangkaian elektronika adalah huruf “L” [23].

Induktor digunakan sebagai tempat penyimpanan sementara muatan dari sel yang memiliki muatan yang lebih tinggi pada paket baterai. Penyeimbang aktif induktor terdiri dari beberapa jenis, yaitu induktor tunggal dan banyak induktor. Induktor tunggal membuat sistem lebih sederhana dan lebih hemat biaya dibandingkan banyak induktor [24].

#### 2.4.2 Penyeimbang Aktif Induktor Tunggal

Penyeimbang aktif menggunakan induktor tunggal merupakan salah satu jenis dari penyeimbang aktif baterai. Induktor tunggal hanya menggunakan satu induktor dalam menyeimbangkan muatan sel-sel baterai. Pengendalian pada induktor tunggal cukup sederhana. Pengendali akan mendeteksi nilai SOC pada sel yang lebih tinggi dan nilai SOC lebih rendah serta memilih sakelar (MOSFET) yang sesuai untuk memindahkan muatan dari keduanya [25].

Pada Gambar 2.13 merupakan rangkaian dari penyeimbang aktif induktor tunggal. Terlihat komponen utama pada penyeimbang baterai induktor tunggal, yaitu sakelar (MOSFET), dioda, dan induktor. Jumlah sakelar (MOSFET) yang digunakan sama dengan jumlah diodanya. Penentuan jumlah sakelar (MOSFET) dan dioda yang digunakan dapat diketahui dengan menggunakan Persamaan (2).



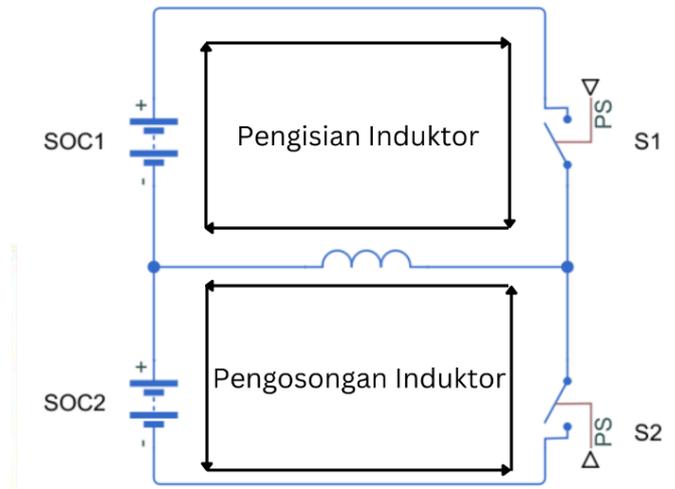
**Gambar 2.13** Rangkaian Induktor Tunggal

$$T_{SD} = 2n + 2 \quad (2)$$

Keterangan:

$T_{SD}$  : Jumlah sakelar (MOSFET) dan dioda yang akan digunakan

$n$  : Jumlah baterai yang digunakan



**Gambar 2.14** Prinsip Kerja Penyeimbang Aktif Induktor Tunggal

Pada Gambar 2.14 merupakan prinsip kerja dari induktor tunggal. Prinsip kerja dari induktor tunggal yaitu mendeteksi sel yang lebih tinggi dan lebih rendah serta memilih sakelar (MOSFET) yang sesuai untuk memindahkan muatan dari keduanya. Misalnya, SOC1 lebih tinggi daripada SOC2. Maka dari itu, muatan pada SOC1 akan dikirimkan ke SOC2 dengan cara mengaktifkan sakelar (MOSFET) s1. Sakelar (MOSFET) s1 akan dikontrol hidup dan mati untuk mengirimkan muatan SOC1 ke induktor, sedangkan sakelar (MOSFET) s2 akan dikontrol mati dan hidup untuk menerima muatan dari induktor ke SOC2. Jadi, SOC1 akan mengirimkan muatan ketika sakelar (MOSFET) s1 dalam keadaan hidup dan sakelar (MOSFET) s2 dalam keadaan mati, sedangkan SOC2 akan menerima muatan ketika sakelar (MOSFET) s1 dalam keadaan mati dan sakelar (MOSFET) s2 dalam keadaan hidup. Teknik dari penyeimbangan tersebut merupakan teknik sel ke sel. Arus yang mengalir pada induktor dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3) [25].

$$i_L(t) = \frac{V}{L}t \quad (3)$$

Keterangan:

$i_L(t)$  : Arus induktor saat waktu sekarang

$V$  : Tegangan baterai yang terbaca

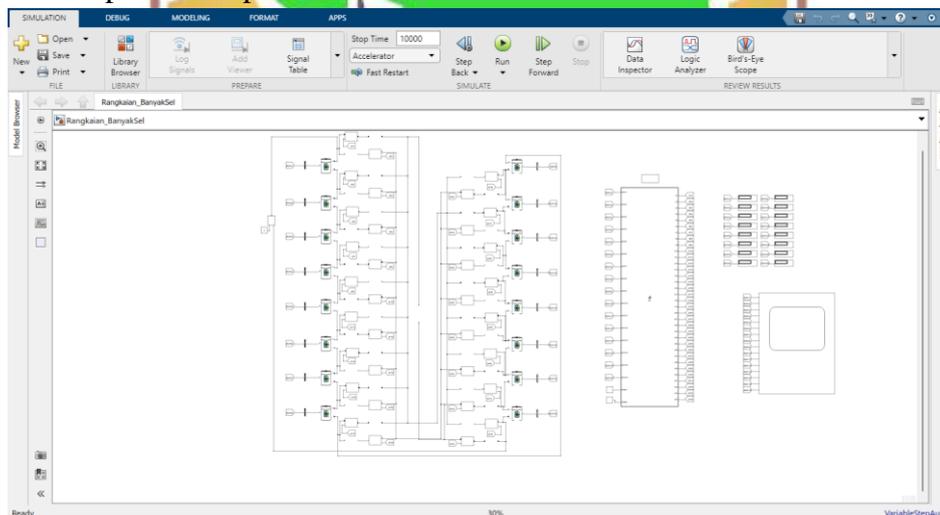
$L$  : Nilai induktansi  
 $t$  : Waktu

### 2.4.3 Sel ke Sel

Sel ke sel merupakan salah satu teknik dalam menyeimbangkan muatan sel-sel baterai. Teknik ini dapat menyeimbangkan tegangan secara langsung dari salah satu sel yang memiliki muatan lebih tinggi ke salah satu sel yang lebih rendah. Hal ini membuat proses penyeimbangan baterai lebih efisien. Akan tetapi, membutuhkan waktu penyeimbangan yang lebih lama [26].

### 2.5 Matlab Simulink

Matlab merupakan bahasa pemrograman level tinggi (*high-performance*) yang dikhususkan untuk kebutuhan komputasi teknis, visualisasi, dan pemrograman. Pada Matlab memiliki beberapa komponen, salah satunya adalah Simulink. Matlab Simulink digunakan untuk memodelkan dan menyimulasikan sistem. Hal ini berguna untuk mengamati dan menganalisis perilaku dari sistem yang akan dibuat. Sistem yang dibuat pada Matlab Simulink diharapkan mempunyai hasil yang sangat mirip dengan sistem fisik. Jika digunakan dengan benar, simulasi akan membantu proses analisis pada sistem [27]. Tampilan Matlab Simulink dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Tampilan Matlab Simulink