

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Anwar *et. all* (2016) Menyatakan bahwa energi surya di pilih sebagai energi alternatif untuk menghasilkan energi listrik. Dan alat yang di pakai adalah sel surya, karena karena dapat mengkonversi sinar matahari menjadi energi listrik (*photovoltaic*). Pada sing hari energi listrik dapat di simpan dulu di baterai yang di kontrol oleh regulator, agar energi surya dapat di gunakan di malam hari. Keluaran regulator langsung di hubungkan dengan inverter dari arus DC ke AC. Dari hasil pengujian modul surya bisa di ketahui hasil daya keluaran rata-rata mencapai 38,24 watt dan arus yang di dapatkan sebesar 2,29 A. Hal ini disebabkan *photovoltaic* saat mengikuti pergerakan arah matahari akan selalu memposisikan untuk selalu menghadap matahari sehingga bisa menangkap cahaya matahari secara maksimal.

Sedangka menurut Safrizal (2017) kebutuhan daya listrik untuk gedung Fkulytas Sains dan Teknologi (SAINTEK) selama beban puncak mulai jam 08.00-15.00 sebesar 3 x 65 Ampere atau 34,224 kW x 8 jam = 273,794 kWh. Dan penggunaan daya listrik saat kondisi luar waktu beban puncak (LWBP) 16.00 – 08.00 sekitar 3 x 13 Ampere atau 6,844 kW, konsumsi energi selama 16 jam x 6,844 kW=109,5 kWh. Bisa ditotal untuk konsumsi energi listrik selama 24 jam = 109,5 kWh + 273,794 kWh = 383,294 kWh. Jumlah PV panel 325 unit panel, per unit 280 WP, PV string 13 modul, PV array 25 modul, Kapasitas bateray 2331 Ah, Bi-directional inverter 45KW. Kapasitas PV array 89,864 kWp, PV array membangkitkan energi listrik rata-rata harian 418,59 kWh melebihi konsumsi kWh beban.

Timotius *et. all* (2018) menyataka bahwa dalam analisis data menggunakan metode perhitungan manual untuk menghitung kebutuhan daya listrik, menetapkan daya yang kan di bangkitkan, menghitung jumlah serta kapasitas modul surya da inverter, menghitung sudut kemiringan dan lokasi modul surya. PLTS menggunakan sistem *hybrid* dengan PLN, bekerja secara otomatis yang akan di atur oleh sistem

kontrol inverter. PLTS berkapasitas 148,274 kW mensupply 30% dari konsumsi energi listrik pada gedung sebesar 2,310 MWh.

Gifson *et. all* (2020) membahas perancangan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) On Grid dengan membangkitkan 60% dari kapasitas beban di area *Learning Farm*. Besar daya yang di bangkitkan sebesar 68,17 kWp dengan menggunakan 100 modul sel surya. PLTS ini di rancang untuk mengurangi pemakaian listrik dari PLN di ECO Park Ancol. Lokasi ini di nilai memiliki potensi radiasi matahari yang cukup baik dan ketersediaan lahan yang luas.

## **2.2 Dasar Teori**

### **2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)**

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) pada dasarnya adalah sumber tenaga (alat penghasil listrik) yang dapat dirancang untuk memenuhi kebutuhan listrik dari kecil hingga besar. Pada siang hari, panel surya menerima sinar matahari dan kemudian mengubahnya menjadi listrik melalui proses *photovoltaic*. Energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya dapat disuplai ke beban atau disimpan di baterai sebelum dialirkan ke beban. Konversi ini terjadi pada panel surya yang terdiri dari sel surya. PLTS menggunakan sinar matahari untuk menghasilkan listrik DC (arus searah), yang dapat diubah menjadi listrik AC (arus bolak-balik).

Matahari sebagai sumber utama yang mendukung berlangsungnya proses ini. Panel surya akan menyerap energi yang disalurkan matahari. *Battery Charge Regulator* (BCR) sebagai alat pembantu panel surya. BCR berfungsi membagikan energi ke tiap-tiap baterai samapai terisi penuh. Kemudian baterai meneruskan daya yang disimpannya menuju beban, baik berupa beban 24Vdc atau pun beban 220Vac. Tetapi untuk beban 220Vac dan 380Vac harus melakukan perubahan arus dan tegangan terlebih dahulu dari baterai DC. Kemudian Inverter merubah arus listrik dari DC menjadi AC yaitu 220Vac ataupun 380Vac dan menyambungkan dengan alat-alat yang memerlukan energi listrik. Ketika malam hari, panel surya tidak bisa memproduksi energi listrik dari matahari. Energi yang diperoleh berasal dari baterai yang telah menampung energi ketika siang hari.

### **2.2.2 Potensi Energi Surya Pada Gedung Laboratorium Fakultas Teknik UM Surabaya**

Indonesia merupakan daerah yang memiliki potensi untuk menerapkan energi surya yang sepanjang tahunnya cukup besar. Energi

surya dapat di manfaatkan secara langsung sebagai sumber energi alternatif selain dari jaringan PLN. Maka dari itu Laboratorium FT UM Surabaya yang lokasinya di Indonesia sangat cocok untuk menerapkan energi surya tersebut. Hal ini juga di landasi dengan berdasarkan data potensi melalui Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Juanda Sidoarjo tahun 2019. Berikut data hasil yang di peroleh melalui melalui BMKG Juanda Sidoarjo. Tabel 2.1 merupakan data radiasi matahari berdasarkan BMKG Juanda Sidoarjo.

<b>BULAN</b>	<b>Radiasi Matahari kWh/m<sup>2</sup>/day</b>
Januari	3,588
Februari	4,165
Maret	3,943
April	4,121
Mei	4,648
Juni	4,240
Juli	4,466
Agustus	4,798
September	5,446
Oktober	5,651
November	5,371
Disember	4,459
Rata-rata	<b>4,575</b>

**Tabel 2.1** Radiasi Matahari Laboratorium FT UM Surabaya

*Sumber :BMKG Juanda Sidoarjo*

Pada tabel 2.1 merupakan data radiasi matahari berdasarkan hasil data dari BMKG Juanda Sidoarjo di daerah Surabaya. Dengan hasil rata-rata 4,575 kWh/m<sup>2</sup>/day maka Laboratorium FT UM Surabaya sangat berpotensi untuk menerapkan panel surya.

### **2.2.3 Photovoltaic (Modul Surya)**

*Photovoltaic* atau bisa disebut modul surya adalah bahan semikonduktor yang di gunakan untuk mengubah sinar matahari secara langsung menjadi energi listrik. Perubahan sinar matahari menjadi energi listrik ini di sebut efek *Photovoltaic*.

Kinerja *photovoltaic* sendiri sangat bergantung pada intensitas cahaya matahari karena semakin tinggi intensitas cahaya matahari maka semakin besar energi listrik yang di dihasilkan oleh *photovoltaic*.

Modul surya terbuat dari bahan semikonduktor (umumnya silicon) yang apabila disinari oleh cahaya matahari dapat menghasilkan arus listrik. Prinsip kerja dari modul surya adalah jika cahaya matahari mengenai modul surya, maka elektron-elektron yang ada pada sel surya akan bergerak dari N ke P, sehingga pada terminal keluaran dari modul surya akan menghasilkan energi listrik. Besarnya energi listrik yang dihasilkan oleh modul surya berbeda-beda tergantung dari jumlah sel surya yang dikombinasikan didalam modul surya tersebut. Keluaran dari panel surya ini adalah berupa listrik arus searah (DC) yang besar tegangan keluarannya tergantung jumlah sel surya yang dipasang didalam modul surya dan banyaknya sinar matahari yang menyinari modul surya tersebut.

#### **2.2.3.1 Poly-crystalline**

Modul surya jenis Poly-crystalline adalah jenis modul surya yang terbuat dari kristal silion block-cast. Elektron yang ada akan terjebak dalam batas butir kristal individu dalam panel Poly-crystalline, hal ini menyebabkan efisiensinya lebih rendah di bandingkan dengan Mono-crystalline. Efisiensi yang dimiliki oleh modul jenis ini hanya berkisar 13,5% pada suhu 25 °C dan dapat mengalami penurunan hingga 15-25% pada suhu 50 °C. Contoh dari modul surya Poly-crystalline adalah CanadianSolar Standard CS6P-260. Tipe inilah yang digunakan pada perancangan sistem Laboratorium Fakultas Teknik UM Surabaya karena jenis ini masih dapat memproduksi daya listrik meskipun cuaca berawan maupun mendung.



**Gambar 2.1** Modul Surya Jsky 200Wp Poly-crystalline

*Sumber : Gifson et. all (2020)*

#### **2.2.3.2 Mono-crystalline**

Modul surya jenis Mono-crystalline ini terbuat dari silikon kristal tunggal. Dapat di temukan secara alami, namun sangat jarang atau juga dapat dibuat di Laboratorium. Proses ini di namakan dengan recrystallising, sehinga pembuatan dan harga dari modul jenis ini sangat mahal. Panel dari modul Mono-crystalline ini lebih halus dibandingkan dengan jenis Poly-crystalline. Pada panel Mono-crystalline memiliki efisiensi sebesar 15% pada suhu 25 °C dan menurun menjadi 12-15% pada suhu 50 °C. Contoh dari modul Mono-crystalline adalah CanadianSolar All-Black CS6K-290MS, CanadianSolar MaxPower CS6U-340M dan lainnya. Kelemahan dari jenis Mono-crystalline yakni tidak berfungsi dengan baik ditempat yang intensitas cahaya matahari yang sedikit, dan efisiensinya akan turun drastis dalam cuaca berawan.

#### **2.2.3.3 Amorphous Silicon**

Selain itu panel sel surya ada yang terbuat dari lapisan tipis amorphous silicon, berwarna agak gelap kehitaman dan umum digunakan pada perangkat dengan konsumsi daya sangat rendah seperti kalkulator. Tipe panel ini adalah yang paling murah akan tetapi efisiensinya paling rendah, yaitu antara 9 hingga 10,4%.

#### **2.2.3.4 Prinsip Kerja Fotovoltaik**

Apabila suatu bahan semikonduktor seperti bahan silicon disimpan dibawah sinar matahari, maka bahan silicon tersebut akan

melepaskan sejumlah kecil listrik yang biasa disebut efek fotolistrik. Efek fotolistrik adalah pelepasan electron dari permukaan metal yang disebabkan penumbukan cahaya. Efek ini merupakan proses dasar fisis dari fotovoltaiik merubah energy cahaya menjadi listrik.

Cahaya matahari terdiri dari partikel-partikel yang disebut sebagai “*photons*” yang mempunyai sejumlah energy yang besarnya tergantung dari panjang gelombang pada spectrum cahaya. Pada saat photon menumbuk sel surya maka cahaya tersebut akan dipantulkan atau diserap atau mungkin hanya diteruskan. Cahaya yang diserap akan membangkitkan listrik.

Pada saat terjadi tumbukan, energy yang dikandung oleh photon ditransfer pada electron yang terdapat pada atom sel surya yang merupakan bahan semikonduktor. Dengan energi yang didapat dari photon, electron melepaskan diri dari ikatan normal bahan semikonduktor dan menjadi arus listrik yang mengalir dalam rangkaian listrik yang ada. Dengan melepaskan dari ikatannya, electron tersebut menyebabkan terbentuknya lubang atau “*hole*”.

### 2.2.3.5 Faktor Kinerja Modul Surya

Gifson *et. all* (2020) menyatakan bahwa kinerja modul surya dapat dipengaruhi dengan beberapa faktor sebagai berikut :

#### a. Suhu Modul

Suhu panel yang normal adalah 25°C maka panel surya bisa beroperasi dengan maksimal. Melemahkan tegangan *open circuit (Voc)* yang dihasilkan disebabkan karena naiknya suhu dari suhu normal. Setiap naiknya suhu sebesar 1°C (dari 25°C) menyebabkan kurangnya daya yang diproduksi sekitar 0,5%. Untuk menghitung daya yang berkurang ketika suhu panel lebih tinggi dari suhu standar di tunjukan pada persamaan 2.1.

$$P \text{ saat } t \text{ naik } ^\circ\text{C} = 0,5\% \times \Delta t \times P_{MPP} \quad (2.1)$$

Dimana :

$P \text{ saat } t \text{ naik } ^\circ\text{C}$  = daya pada saat suhu naik °C dari suhu standar

$P_{MPP}$  = daya keluaran maksimal modul surya

$\Delta t$  = kenaikan suhu

Daya maksimum ketika panel surya mengalami kenaikan suhu menjadi  $t$  °C dari suhu normal ditunjukan pada persamaan 2.2.

$$P_{MPP} \text{ saat naik menjadi } t \text{ } ^\circ\text{C} = P_{MPP} - P \text{ saat } t \text{ naik } ^\circ\text{C} \quad (2.2)$$

$P_{MPP}$  saat naik menjadi  $t$  °C adalah daya keluaran maksimum panel surya ketika suhu panel surya naik menjadi  $t$  °C dari suhu normal. Untuk menghitung Faktor Koreksi Temperatur (*Temperature Correction Factor*) ditunjukkan pada persamaan 2.3.

$$TCF = \frac{P_{MPP \text{ saat naik menjadi } t \text{ } ^\circ\text{C}}}{P_{MPP}} \quad (2.3)$$

b. Intensitas Cahaya Matahari

Radiasi matahari dari satu lokasi ke lokasi yang lain akan sangat berbeda dan akan bervariasi bergantung keadaan spektrum matahari ke bumi. Daya keluaran panel surya akan sangat berpengaruh radiasi matahari.

c. Kecepatan Tiupan Angin

Panel surya yang terhembus oleh tiupan angin sangat membantu untuk pendinginan permukaan panel surya sehingga suhu menjadi lebih konduktif.

d. Keadaan Atmosfir Bumi

Keadaan atmosfer bumi berkabut, mendung, berawan, jenis debu udara, polusi, asap, dan uap air dapat mempengaruhi kinerja panel surya.

e. Peletakan Panel Surya

Permukaan panel surya harus tegak lurus dengan sinar matahari agar energi matahari bisa diserap secara optimal. Oleh sebab itu, peletakan posisi panel surya sangat penting untuk kinerja yang maksimal.

### 2.2.3.6 Model Matematis *Photovoltaic*

Menurut Timotius *et. all* (2018) untuk menghitung luas area array PLTS di tunjukan pada persamaan matematis 2.4.

$$PV \text{ area} = \frac{E_L}{G_{AV} \times \eta_{PV} \times TCF \times \eta_{Out}} \quad (2.4)$$

Dimana :

$E_L$	= Pemakaian Energi (kWh / hari).
$G_{AV}$	=Insolansi harian matahari rata-rata (kWh/m <sup>2</sup> /hari)
$\eta_{PV}$	= efisiensi panel surya
TCF	= Temperature Correction Factor
$\eta_{Out}$	= efisiensi converter

Kemudian untuk menghitung daya yang dibangkitkan PLTS ditunjukkan pada persamaan matematis 2.5.

$$P \text{ Watt Peak} = \text{Area Array} \times \text{PSI} \times \eta_{PV} \quad (2.5)$$

Dimana :

$$\begin{aligned} P \text{ Watt Peak} &= \text{Besar Daya yang dibangkitkan} \\ &\quad \text{PLTS (wattpeak)} \\ \text{PSI (Peak Solar Insolation)} &= 1000\text{W/m}^2 \\ \eta_{PV} &= \text{efisiensi panel surya} \end{aligned}$$

Untuk mencari kebutuhan panel yang digunakan, pada sistem ini ditunjukkan pada persamaan matematis 2.6

$$\text{Jumlah Modul Surya} = \frac{P \text{ (Watt Peak)}}{P_{\text{mpp}}} \quad (2.6)$$

Dimana :

$$P \text{ Watt Peak} = \text{Daya yang dibangkitkan (WP)}$$

$$P_{\text{MPP}} = \text{Daya maksimum keluaran panel surya}$$

Dan kemudian untuk menghitung sudut kemiringan panel surya di tunjukan pada persamaan 2.7. Untuk instalasi PLTS diperlukan sudut kemiringan panel surya yang akurat. Perhitungan ini dilakukan untuk memperoleh pancaran sinar matahari yang optimal di area Laboratorium FT UM Surabaya. Untuk menghitung ketinggian maksimum (dalam derajat) sat matahari mencapai langit ( $\alpha$ ) di tunjukan pada persamaan matematis 2.7.

$$\alpha = 90^\circ - \text{lat} + \delta \text{ (N hemisphere)}$$

$$90^\circ + \text{lat} - \delta \text{ (S hemisphere)} \quad (2.7)$$

Dimana :

Lat = garis lintang (latitude) lokasi modul surya yang terpasang (derajat)

$$\delta = \text{Sudut deklinasi matahari (23,45}^\circ\text{)}$$

Sudut yang dibentuk modul surya terhadap permukaan bumi ( $\beta$ ) ditunjukkan pada persamaan 2.8.

$$\beta = 90^\circ - \alpha \quad (2.8)$$

### 2.2.4 Inverter

Inverter adalah inverter yang bisa mengubah tegangan DC menjadi AC yang di hasilkan oleh modul surya. Tegangan output dari inverter setelah dilakukan konversi, bisa bernilai berubah-ubah ataupun tetap sesuai kebutuhan. Gelombang keluaran inverter berbentuk gelombang sinus. Namun aktualnya tidak demikian disebabkan adanya harmonisa. Ada dua macam inverter yaitu, inverter satu fase dan inverter tiga fase Istardi dan Wirabowo (2019). Ada tiga macam inverter yang ada di pasaran menurut jenis gelombangnya yaitu :

#### 1. Inverter Gelombang Sinus

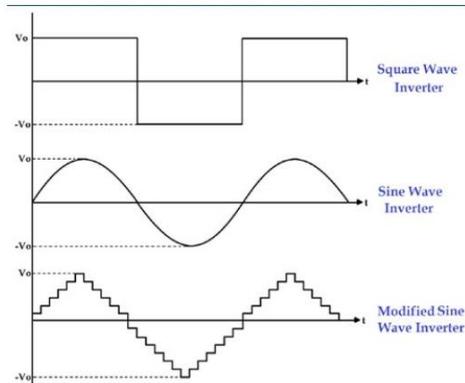
Inverter gelombang sinus merupakan kualitas inverter terbaik, karena dapat menghasilkan gelombang sinus yang sangat murni. Oleh karena itu tegangan yang dibangkitkan memiliki efisiensi yang sangat baik dan dapat digunakan pada berbagai jenis perangkat elektronik. Dari segi harga, inverter ini merupakan inverter termahal yang ada di pasaran. Namun tidak ada keraguan tentang kualitas dan kepuasan Anda dalam menggunakannya. Inverter dapat digunakan di berbagai jenis peralatan elektronik.

#### 2. Inverter Gelombang Sinus Termodifikasi

Untuk inverter gelombang sinus termodifikasi ini, akan menghasilkan gelombang persegi, tetapi sayangnya ini hanya dapat memberikan efisiensi yang lebih rendah. Oleh karena itu, dapat digunakan untuk perkakas listrik dengan tegangan yang cukup tinggi, tetapi tidak untuk beban yang lebih sensitif. Inverter ini sering ditemukan di pasaran dengan harga yang relatif murah, sehingga banyak dipilih. Namun bagi yang ingin mencari inverter untuk AC, pompa air atau lemari es, mohon tidak menggunakan inverter ini karena tidak digunakan untuk alat elektronik tersebut.

#### 3. Inverter Gelombang Kotak

Inverter ini merupakan inverter paling sederhana dan juga memiliki keluaran berbentuk gelombang persegi. Inverter dapat menghasilkan sekitar 220 volt, 50 Hz, tetapi kualitasnya sangat buruk. Oleh karena itu, inverter hanya dapat digunakan untuk beberapa peralatan listrik saja. Saat ini, inverter gelombang kotak tidak berguna, tetapi biasanya malah membuat peralatan elektronik mudah rusak. Oleh karena itu, dalam perkembangan zaman, ditemukan gelombang sinus yang dimodifikasi dari inverter yang dibahas di atas.



**Gambar 2.2** Bentuk Gelombang Inverter

*Sumber : Istardi dan Wirabowo (2019)*

#### 2.2.4.1 Karakteristik Inverter

Berdasarkan karakteristik dari performa yang diperlukan, inverter untuk sistem PLTS grid-connected dan PLTS stand-alone mempunyai karakteristik yang berbeda, yaitu :

1. Pada PLTS grid-connected, inverter bisa menghasilkan kembali tegangan yang sama persis dengan tegangan jaringan pada saat yang sama, untuk memaksimalkan dan mengoptimalkan output energi yang dihasilkan oleh modul surya.
2. Pada PLTS stand-alone, Inverter harus mampu memberikan tegangan AC yang konstan untuk beradaptasi dengan perubahan keluaran modul surya dan kebutuhan beban yang ditanggungnya.

#### 2.2.4.2 Komponen Inverter

Berikut ini adalah beberapa komponen yang harus dipahami pada rangkaian inverter, yaitu :

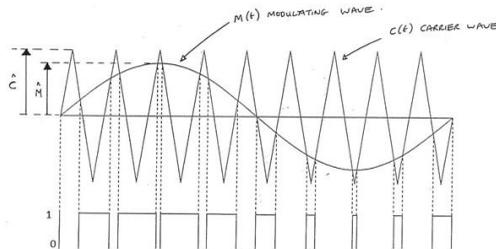
1. Komparator

Komparator digunakan untuk membandingkan dua nilai dan setelah itu memberikan hasil perbandingan tersebut. Komparator digunakan untuk membandingkan sine waves (modulating waves) dan triangular waves (carrier waves). Untuk mengetahui keluaran dari komparator, perlu mengetahui rumusan yang digunakan, yaitu :

$$V_{sine} > V_{tria}, 1$$

$$V_{sine} < V_{tria}, 0$$

Artinya jika nilai *sine waves* lebih kecil dibandingkan nilai *triangle waves*, maka nilainya adalah 0, dan sebaliknya. Untuk lebih mudah dipahami, dapat dilihat gambar 2.3.

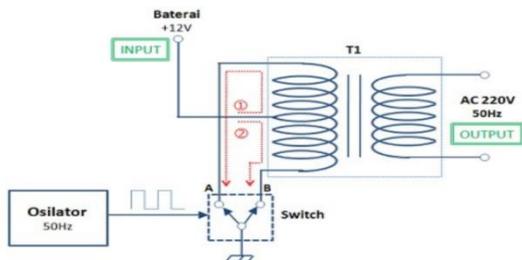


**Gambar 2.3** Perbandingan triangular waves dan sine waves  
*Sumber: Fajri chair (2008)*

## 2. Transistor MOSFET

Transistor MOSFET (Metal Oxide FET) mempunyai 3 kutub yaitu drain, source, dan gate. Pada bagian gate terisolasi bahan oksida. Transistor MOSFET digunakan untuk saklar elektronik, karena tidak mungkin memakai saklar mekanik.

Singkatnya, sebuah power inverter yang dapat mengubah arus DC menjadi arus AC hanya terdiri dari rangkaian osilator, rangkaian switching dan transformator CT, seperti terlihat pada gambar 2.4. *Prinsip kerja inverter* bisa dijelaskan sebagai berikut :



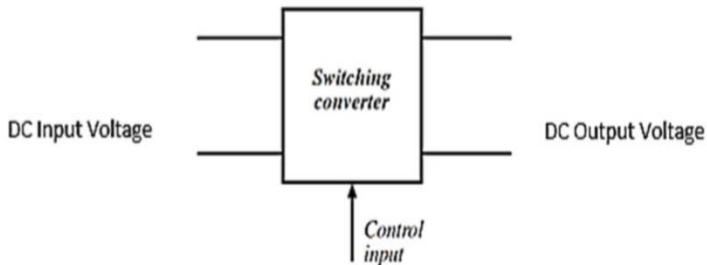
**Gambar 2.4** Rangkaian Inverter

*Sumber : Istardi and Wirabowo (2019)*

Daya berupa arus searah tegangan rendah (misalnya 12V) disalurkan ke Center Tap (CT) Secondary Transformator, sedangkan dua ujung transformator lainnya (titik A dan titik B) dihubungkan ke ground rangkaian melalui sakelar dua arah. Jika sakelar dihubungkan ke titik A, itu akan membuat arus jalur 1 mengalir dari terminal positif baterai ke Center Tap Primer Transformator, dan kemudian mengalir melalui sakelar ke titik A dari transformator sampai ke ground. Ketika sakelar bergerak dari titik A ke titik B, arus yang mengalir melalui saluran 1 akan berhenti, dan arus yang mengalir melalui saluran 2 akan mulai mengalir dari terminal positif baterai ke Center Tap Primer Transformator, dan kemudian ke ground melalui titik sakelar B. Titik A, B dan saluran 1 2 dapat dilihat pada gambar 2.4.

### 2.2.4.3 DC – DC Konverter

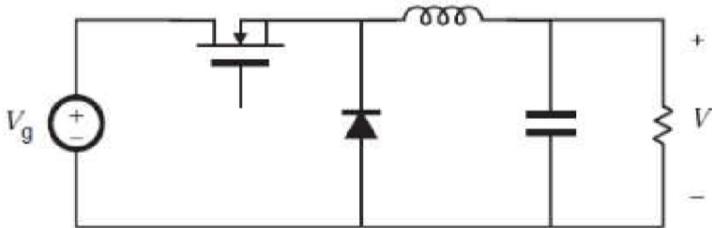
Menurut Saodah dan Utami (2019) Konverter DC-DC merupakan rangkaian elektronika daya yang mengubah tegangan *input* DC menjadi tegangan DC yang nilai tegangannya bisa lebih besar atau lebih kecil dari tegangan *input*. Dasar dari DC-DC konverter terdiri dari tiga topologi yaitu buck converter , boost converter , dan buck boost converter.



**Gambar 2.5** DC-DC Konverter

*Sumber : Saodah dan Utami (2019)*

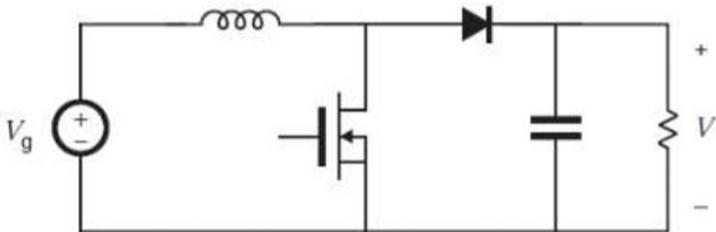
*Buck converter* adalah konverter DC-DC yang tegangan keluarannya lebih kecil dari tegangan masukan (penurunan tegangan).



**Gambar 2.6** Rangkaian *Buck Converter*

*Sumber : Saodah dan Utami (2019)*

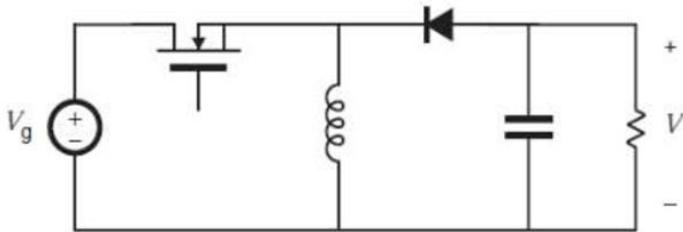
*Boost Converter* adalah Konverter DC-DC yang tegangan keluarannya lebih besar dari tegangan masukan (penguat).



**Gambar 2.7** Rangkaian *Boost Converter*

*Sumber : Saodah dan Utami (2019)*

*Buck-Boost converter* adalah Konverter DC-DC yang dapat mengatur tegangan keluaran menjadi lebih kecil dari atau lebih besar dari tegangan masukan (menurunkan dan menaikkan tegangan).

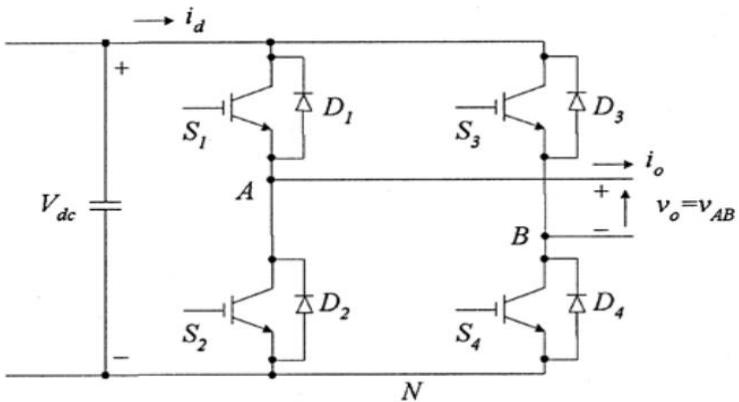


**Gambar 2.8** Rangkaian *Buck-Boost converter*

*Sumber : Saodah dan Utami (2019)*

#### 2.2.4.4 *Solar Inverter untuk PLTS Off Grid*

Menurut Halim (2020) *Solar inverter* dibuat khusus untuk sistem PLTS off-grid yang ada. Pembuatannya dilakukan melalui konfigurasi sistem kendali yang telah dirancang sebelumnya, sehingga fungsi yang dibutuhkan dari solar inverter dapat terwujud dengan benar. Topologi *solar inverter* didasarkan pada topologi umum inverter, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.



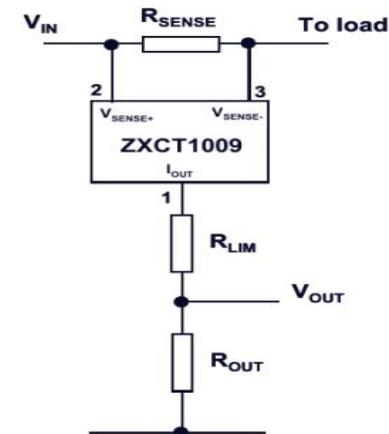
**Gambar 2.9** topologi Inverter

*Sumber : Halim (2020)*

Solar Inverter merupakan aplikasi inverter khusus PLTS yang akan dirancang. Dirancang dengan menggunakan topologi umum inverter dan telah dimodifikasi untuk mendapatkan hasil yang dibutuhkan berdasarkan hasil perancangan Fitur Solar Inverter yang telah dijalankan sebelumnya.

#### 2.2.4.5 Evaluasi Terhadap Solar Inverter

Kemudian mengevaluasi *solar inverter* berdasarkan desain dan pembuatan sebelumnya. *Solar inverter* dapat dievaluasi dengan memasang *solar inverter* yang sebenarnya pada PLTS off-grid yang telah terpasang beban. Jika inverter surya ini dapat mengeluarkan tegangan 220 V AC, berapapun tegangan input dari panel surya yang terhubung ke PLTS off-grid, maka dapat disebut *solar inverter*. Selain itu, dilakukan evaluasi dengan membandingkan efisiensi daya inverter dan *solar charge controller* dengan *solar inverter* yang di buat. Solar inverter yang dibuat direncanakan akan menggantikan solar charge controller dan inverter pada PLTS Off-Grid.



Gambar 2.10 Rangkaian Pengukur Arus

Sumber : Halim (2020)

Pengukuran daya dilakukan dengan mengukur arus dan tegangan input dan output dari modulmodul yang dibandingkan. Sedangkan untuk dapat mengukur daya keluaran dari inverter diperlukan beban.

### 2.2.4.6 Model Matematis Inverter

Didalam *Inverter* sudah terdapat *Charger Controller* untuk pengisian baterai. *Charger Controller* diperlukan dalam sistem fotovoltaik untuk mencegah pengisian daya baterai berlebih atau kurang. Pengontrol pengisi daya dirancang untuk mencegah kerusakan cepat masa pakai baterai. Charge controller yang digunakan telah menggunakan fitur Maximum Power Point Tracking (MPPT) sehingga proses pengisian baterai dari panel PV lebih optimal dibandingkan charge controller tanpa menggunakan MPPT. Pemodelan solar charge controller dengan fitur MPPT dilakukan dengan melalui persamaan matematis sebagai berikut:

$$D = \frac{V_0}{V}$$

(2.9)

Dimana :

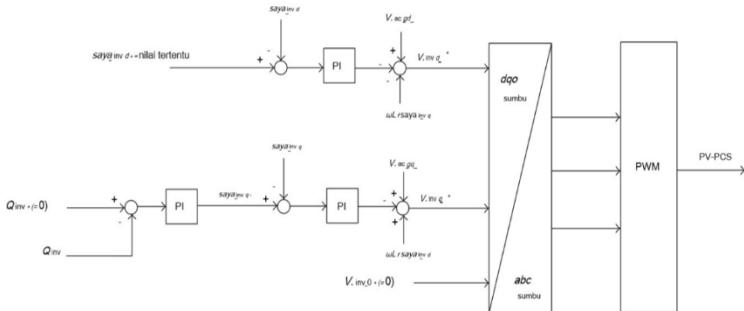
- V = input tegangan inverter
- $V_0$  = output tegangan inverter
- D = Duty cycle

### 2.2.4.7 Control System Inverter – Energy Storage System (ESS)

Pemasangan sistem penyimpanan energi di pembangkit listrik *Photovoltaic* (PV) terbukti berguna untuk menekan uktuasi keluaran dalam kondisi normal dan penyelamatan kehilangan pembangkit selama terjadi gangguan. Biasanya, sistem penyimpanan energi dihubungkan secara paralel ke susunan PV di sisi-ac melalui inverter dc-ac individu.

*Array* PV secara langsung terhubung ke dc-link dan ESS juga terhubung ke dc-link yang sama melalui konverter dc-dc dua arah yang terdiri dari dua dioda, dua *self-turn-off* perangkat *switching*, dan reaktor. Perhatikan bahwa tegangan internal ESS harus lebih besar dari kemungkinan tegangan rangkaian terbuka array PV untuk merealisasikan arus konverter dc-dc dua arah.

Pada sistem kontrol ini, ESS bertindak sebagai perangkat kendur di dc-link. Artinya, ketika *output array* PV lebih besar dari daya *inverter* dc-ac, sistem ESS secara otomatis menyerap atau mengisi daya yang berlebihan. Sebaliknya, *output array* PV yang lebih kecil dari daya inverter dc-ac, secara otomatis dikompensasi oleh pasokan dari ESS.



**Gambar 2.11** Sistem Kontrol untuk Inverter DC-AC Dalam Sistem PV-ESS

### 2.2.5 Baterai

Baterai di gunakan untuk menyimpan listrik yang di dihasilkan oleh panel surya ketika siang hari dan di gunakan pada waktu malam hari ketika panel surya tidak memproduksi energi listrik. Baterai bisa mengosongkan/discharge atau mengisi/charge tergantung sinar matahari yang akan di dihasilkan modul surya, Priyono *et. all* (2019).

Untuk cara menghitung total kapasitas baterai bisa menggunakan persamaan (2.9). kemampuan dari seberapa lama baterai untuk mensupply aliran listrik ke beban dalam satuan Wh (Watt Hour) bisa di sebut dengan kapasitas baterai. Misal baterai yang di pakai 24 V 60 Ah berarti baterai memberikan arus 60 A dalam satu jam artinya memberikan daya 1440 Wh.

Ada beberapa jenis baterai yang beredar di pasaran yaitu tipe basah / konvensional, hybrid dan tipe MF (bebas perawatan). Aki basah / konvensional artinya masih menggunakan cairan asam sulfat ( $H_2SO_4$ ). Aki MF sering juga disebut aki kering karena asam sulfat sudah dalam bentuk gel. Dari segi penempatan, aki kering tidak mempunyai masalah, berbeda dengan aki basah.

Baterai konvensional juga mengandung sekitar 2,5% timbal tinggi (Pb) untuk setiap sel positif dan negatif. Meskipun kandungan timbal dari tipe hibrida telah dikurangi menjadi 1,7%, sel-sel negatif telah ditambahkan kalsium. Sedangkan baterai MF / *dry cell* yang digunakan untuk sel positif masih menggunakan timbal 1,7%, tetapi sel negatif tidak menggunakan timbal, tetapi kalsium 1,7%. Baterai Kalsium sulfat ( $H_2SO_4$ ) masih cair, namun karena laju penguapannya sangat kecil dan akan mengembun kembali, maka memerlukan sedikit perawatan.

Teknologi saat ini bahkan menggunakan perak untuk campuran sel negatif.

#### **2.2.5.1 Kapasitas Baterai**

Menurut Junaidi *et. all* (2016) kapasitas baterai adalah ukuran banyaknya energi dalam baterai yang dapat dilepas mulai dari keadaan penuhnya sampai habis. Besar kapasitas baterai ditentukan dalam satuan Ah. Kapasitas baterai dipengaruhi oleh discharge rate yang diterapkan kepada baterai tersebut. Semakin tinggi nilai arus discharge akan mengakibatkan kapasitas baterai semakin berkurang. Pengaruh arus discharge terhadap kapasitas baterai dapat ditentukan dengan kurva kapasitas. Kurva kapasitas baterai dibuat dengan cara mengukur kapasitas baterai dengan menerapkan arus discharge konstan tertentu. Untuk menunjang sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan sumber energi terbarukan seringkali menggunakan nilai discharge rate  $C/20$ . Dengan discharge rate  $C/20$ , baterai 100Ah dapat beroperasi dengan arus pelepasan 5A selama 20jam untuk mengosongkan baterai. Pada proses pengisian baterai (charging) maka charge rate yang paling efisien adalah antara  $C/10$  dan  $C/3$ . Tingkat pengisian tersebut hanya dapat dilakukan dalam periode yang singkat dan jika diterapkan untuk periode yang lama akan menjadi tidak ekonomis. Pelepasan energi tidak boleh dilakukan sampai baterai kosong sama sekali karena akan memendekkan umur baterai. Umur baterai adalah ukuran lama maksimum pemakaian baterai sampai perlu segera diganti. Umur baterai dapat dinyatakan dalam jumlah siklus, siklus penuh, kWh dan tahun. Satu siklus baterai sama dengan proses pelepasan energi baterai sampai pada nilai DOD (depth of discharge) tertentu dan kemudian diisi penuh kembali.

#### **2.2.5.2 Baterai Mode Penyimpan Energi**

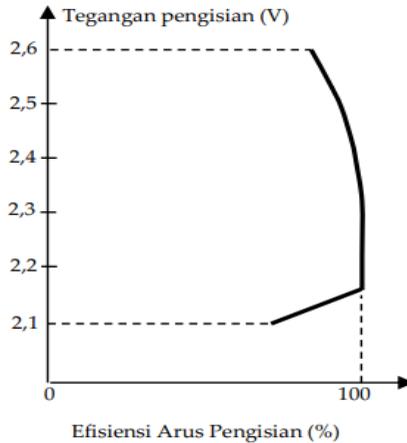
Baterai penyimpan energi listrik (misalnya: PLTS) adalah baterai yang digunakan untuk dapat menyimpan energi listrik dalam jumlah besar, kemudian melepaskan energi listrik pada saat dibutuhkan untuk memasok kebutuhan beban listrik. Proses discharge baterai (DOD) pada umumnya dapat dilakukan sampai 80% dari kapasitas baterai. Proses DOD pada baterai tidak diperbolehkan lebih tinggi dari 80% karena dapat memperpendek usia pakai baterai tersebut. Berbeda dengan mode otomotif di mana baterai harus memasok energi yang besar dengan cepat untuk mengasot mesin penggerak dengan beban yang berat. Untuk mode penyimpanan energi, baterai hanya perlu memasok energi yang cukup dalam rentang waktu yang lama untuk memenuhi kebutuhan beban listrik.

### 2.2.5.3 State of Health

*State of health* (SOH) adalah indikator yang menyatakan kondisi baterai saat ini dibandingkan dengan kondisi idealnya. Nilai SOH 100% berarti kondisi baterai sama dengan spesifikasi baterai. Pada umumnya, baterai baru memiliki SOH 100% dan nilai SOH nya akan menurun seiring dengan waktu pemakaian. Nilai SOH adalah parameter penting dalam strategi migrasi baterai dari MO ke MP, karena nilai SOH menentukan kondisi kelayakan baterai dan dapat memprediksi usia pemakaian baterai. Nilai ambang batas SOH yang layak tergantung jenis aplikasi yang menggunakan baterai. Untuk aplikasi MO, nilai SOH yang layak adalah minimal antara 60%-70%, sedangkan untuk MP diperlukan SOH minimal antara 30%-40%. Untuk menentukan SOH dari baterai diperlukan parameter lain dari baterai yang diperoleh dari hasil pengukuran, yaitu: resistansi internal, kapasitas, tegangan, discharge rate dan jumlah siklus chargedischarge. Lama waktu pemakaian baterai dapat diukur berdasarkan jumlah siklus charge-discharge. Parameterparameter tersebut berubah nilainya seiring dengan waktu lamanya pemakaian baterai. Semakin lama waktu pemakaian baterai dan dengan meningkatnya discharge rate, maka nilai resistansi dalam baterai akan meningkat (konduktivitas menurun), serta terjadi pelemahan kapasitas dan tegangan baterai. Perubahan nilai parameter-parameter tersebut mempengaruhi perubahan nilai SOH baterai.

### 2.2.5.4 Pengisian dengan Tegangan Konstan (*Constant Voltage Charging*)

Metode ini, yang biasa disingkat CV, memungkinkan baterai SLA diisi secara efisien dan cepat. Efisiensi Arus-Pengisian adalah perbandingan nilai arus yang dipergunakan untuk proses konversi energi elektro-kimia terhadap nilai arus pengisian baterai. Grafik tegangan pengisian terhadap nilai efisiensi arus-pengisian untuk metode CV ditunjukkan Gambar 2.12, yang mengindikasikan bahwa nilai efisiensi akan mendekati 100% pada rentang tegangan 2,2V sampai 2,4V.



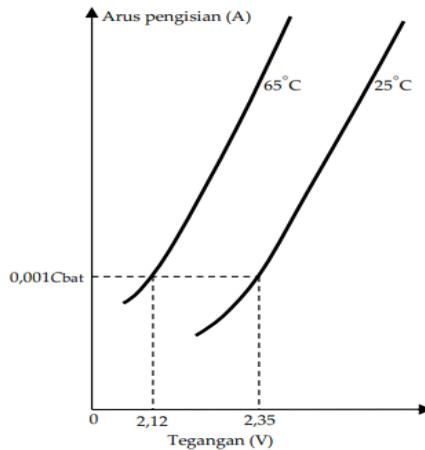
**Gambar 2.12** Grafik tegangan pengisian terhadap nilai efisiensi arus-pengisian pada metode CV

*Sumber :Setiaji (2019)*

### 2.2.5.5 Pengisian *Float* (*Float Charging*)

Jika baterai SLA diaplikasikan sebagai baterai cadangan (*back-up*) dalam suatu sistem, maka baterai tersebut diisi dengan cara *float charging*. Agar baterai berumur panjang, tegangan baterai harus berada di antara 2,3 sampai 2,4V.

Pengisian dengan tegangan di atas 2,4V menyebabkan terjadinya korosi pada *grid* baterai. Gambar 2.13 menunjukkan perkiraan tegangan baterai saat mengalami float charging pada suhu 25°C dan 65°C. Arus Cbat pada gambar adalah besarnya arus pengisian dalam A, yang nilainya sama dengan besarnya Cbat dalam Ah.



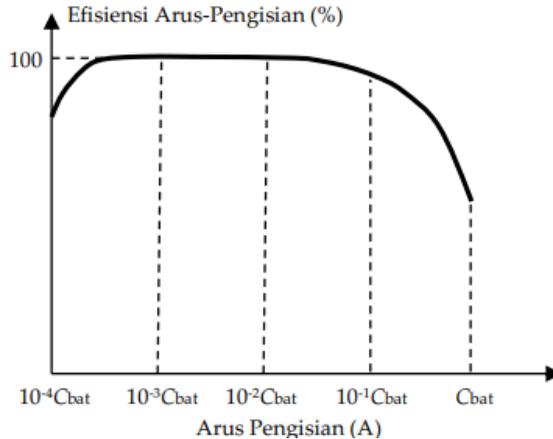
**Gambar 2.13** Grafik nilai arus pengisian terhadap tegangan baterai dengan metode *float charging*

*Sumber : Setiaji (2019)*

Gambar 2.13 menunjukkan bahwa pada suhu 25°C, baterai yang sudah penuh namun diisi terus dengan arus kecil (*trickle current*) 0,001C maka bertegangan 2,35V. Namun pada suhu 65°C, dengan arus yang sama, tegangannya hanya 2,12V yang berarti tidak memenuhi persyaratan.

#### **2.2.5.6 Pengisian dengan Arus Konstan (*Constant Current Charging*)**

Pengisian dengan metode ini, yang biasa disingkat CI, juga termasuk pengisian baterai SLA yang efisien. Grafik efisiensi arus-pengisian terhadap arus pengisian ditunjukkan Gambar 2.14.



**Gambar 2.14** Grafik efisiensi arus-pengisian terhadap nilai arus pengisian pada metode CI

*Sumber : Setiaji (2019)*

Gambar 2.14 menunjukkan arus pengisian sebesar  $C_{bat}/1000$  sampai  $C_{bat}/100$  menghasilkan efisiensi mendekati 100%. Jika arus pengisian diperbesar maka efisiensi menurun karena pada saat sel sudah penuh, energi listrik yang diterima baterai tidak dapat disimpan lagi, melainkan digunakan untuk menghasilkan gas  $O_2$  dan  $H_2$  yang akhirnya harus dibuang baterai. Pada nilai arus pengisian yang rendah, efisiensi juga menurun karena nilai arus tersebut setara dengan arus bocor (*parasitic*) baterai sehingga tegangan baterai akan mendekati nilai hubung bukanya. Tiga metode standar di atas memiliki kelemahan masing-masing. Metode CI beresiko menghasilkan gas berlebih ketika baterai penuh, sedangkan CV mengakibatkan terjadinya arus yang besar pada saat awal pengisian baterai. Sedangkan float charging dapat menimbulkan pengisian berlebihan (*overcharging*). Untuk itu dikembangkan metode yang menggabungkan keduanya (metode CICV), CI digunakan pada awal pengisian dan CV digunakan pada saat baterai mendekati penuh. Untuk melaksanakan metode tersebut dibutuhkan catu daya yang ‘cerdas’, seperti yang digunakan pada, yang memungkinkan pengguna memasukkan data rentang kapasitas baterai yang akan diisi. Hasil pengukuran menunjukkan pada saat awal pengisian baterai diisi dengan arus konstan untuk waktu yang lama, setelah baterai penuh maka

tegangan pengisian secara otomatis menjadi konstan dan arus pengisian mengecil menjadi sekitar  $C_{bat}/90$ . Metode CICV mempunyai kelemahan yaitu setelah baterai penuh, baterai terus diisi sehingga mengalami overcharged, walaupun dengan arus yang relatif kecil dibanding menggunakan metode CI saja. Metode selanjutnya adalah CICVCV, yaitu pengisian dengan CI, diikuti CV dengan tegangan relatif tinggi dan diakhiri dengan CV menggunakan tegangan lebih rendah. Peralihan antar CV tersebut dilakukan dengan syarat tertentu, misalnya jika CV yang pertama telah dilaksanakan selama delapan jam. Metode ini tetap membuat baterai mengalami overcharged meskipun tidak sebesar pada CICV. Metode yang lebih baru untuk menghindari masalah tersebut adalah IC (*Intermittent Charge*) yang mempunyai dua mode pengisian yaitu CI dan IC. Pada saat awal pengisian digunakan mode CI, yaitu pengisian menggunakan arus konstan. Setelah tegangan baterai mencapai batas atas tertentu maka mode beralih ke IC. Pada mode IC baterai diisi dengan arus kecil konstan dengan durasi pendek, lalu dibiarkan terbuka (*open circuit*) sampai tegangannya meluruh ke batas bawah tertentu yang memicu pengisian dengan arus kecil konstan lagi. Mode IC ini akan mengurangi tingkat overcharging dibandingkan CICVCV. Pengembangan selanjutnya adalah metode ICC (*Intermittent Charge Control*) yang ditujukan untuk mencegah terjadinya undercharging pada mode IC. Terdapat pula metode yang menggunakan lima tahap pengisian baterai untuk mengatasi masalah yang muncul pada awal pengisian (adanya arus besar) dan pada akhir pengisian, yaitu adanya stratifikasi atau penumpukan asam timbal di dasar baterai, akibat float charging. Setelah baterai diisi dan dikosongkan berulang kali, terdapat mekanisme yang akan memperpendek umur baterai yang disebut sulfasi, yang merupakan efek lanjutan dari stratifikasi. Sulfasi mengakibatkan baterai kehilangan material aktif untuk reaksi elektrokimia sehingga kapasitasnya menurun. Maka dibutuhkan proses desulfasi untuk mengembalikan sebagian kapasitasnya, salah satunya dengan metode Pressure Feedback Control Charging. Terdapat banyak metode sulfasi, hasil komparasinya mengarah pada kesimpulan bahwa metode sulfasi selanjutnya sebaiknya memanfaatkan AI (*Artificial Intelligent*). Pengisian baterai merupakan proses yang gayut waktu (*time dependent*) dan nonlinear sehingga sulit dipenuhi menggunakan teknik kendali standar. Oleh sebab itu strategi pengisian baterai juga dikembangkan menggunakan kendali samar (*fuzzy control*) seperti pada dengan hasil yang memuaskan, meskipun belum memasukkan unsur suhu sebagai

masuk ke sistem kendali. Permasalahan utama pengisian baterai adalah menentukan nilai *State Of Charge* (SOC) yang akurat, yaitu berapa persen Cbat telah diisi. Metode Coulomb Counting yang sering digunakan untuk memprediksi nilai SOC ternyata memiliki ralat besar karena menghasilkan pengukuran kapasitas baterai yang terlalu rendah dibanding nilai sesungguhnya. Salah satu perbaikan adalah dengan memodifikasi metode tersebut. Sedangkan untuk sistem baterai yang lebih kompleks, maka diperlukan pemodelan yang lebih tepat, yang berhasil menerapkan algoritma Particle Swarm Optimization and Perturbation untuk memodelkan SOC battery bank yang terdiri dari 24 baterai. Berdasarkan tinjauan pustaka-pustaka di atas maka akan diteliti metode pengisian mana yang dipakai oleh charger pada produk lampu, yang semuanya menggunakan baterai SLA.

### 2.2.5.7 Model Matematis Baterai

Pemodelan baterai dilakukan dengan terlebih dahulu memodelkan kapasitas baterai menggunakan model matematis sebagai berikut:

$$Cb = \frac{W \times AD}{DOD \times Vs} \times 1000 \quad (2.10)$$

Dimana :

- Cb = Kapasitas Baterai
- W = Total Beban
- DOD = *Deep of Discharge* (80%)
- AD = *Autonom Days*
- Vs = Tegangan sistem

Setelah memodelkan kapasitas baterai, persamaan berikut dapat digunakan untuk menghitung jumlah baterai secara matematis:

$$\text{Jumlah Baterai yang digunakan} = \frac{Cb}{Ab} \quad (2.11)$$

Dimana :

- Cb = Total Kapasitas Baterai (Ah)
- Ab = Baterai yang digunakan (Ah)

### 2.2.6 Beban Listrik

Beban total listrik adalah jumlah keseluruhan total daya yang di gunakan sebagai langkah awal untuk perancangan sistem *Off Grid*. Beban total terdiri dari daya terpasang, beban terpasang, dan jumlah beban terpasang. Beban total inilah yang akan digunakan untuk perancangan sistem *Off Grid* pada penelitian ini.

Jumadi (2015) menyatakan dalam sistem kelistrikan arus bolak-balik (AC) Karakteristik beban listrik dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu :

#### a. Beban Resistif

Suatu beban dengan karakteristik resistif akan memiliki karakteristik yang sama dengan resistor (R). Jika beban teraliri arus listrik maka arus yang mengalir melalui beban merupakan arus nominal pada beban tersebut, dan mempunyai nilai yang tetap, sehingga tidak akan diaktifkan. Contoh beban listrik resistif adalah lampu pijar (penerangan), setrika, ketel listrik dan alat pemanas lainnya.

#### b. Beban Induktif

Beban induktif mempunyai karakteristik yang sama dengan induktor (L). Arus yang mengalir melalui beban akan disimpan dalam bentuk medan magnet, karena arus yang mengalir akan diinduksi dan diubah menjadi medan magnet, sehingga dapat disimpan. Misalnya pada saat motor digerakkan oleh arus listrik maka nilai arus start akan menjadi 3 kali lipat dari arus nominal, dan pada saat motor berjalan maka nilai arusnya akan sama dengan nilai arus nominal. Contoh beban listrik induktif adalah kipas angin, blender, pompa air dan perangkat yang menggunakan energi listrik untuk menghasilkan energi sebagai tenaga penggerak utamanya.

#### c. Beban Kapasitif

Beban kapasitif memiliki karakteristik yang sama dengan kapasitor (C). Hampir sama dengan induktor yang menyimpan energi listrik, hanya saja beban kapasitifnya menyimpan energi listrik murni. Industri besar yang menggunakan motor listrik membutuhkan kapasitor untuk menghemat daya.

#### 2.2.6.1 Model Matematis Beban

Berdasarkan teori transmisi daya maksimum, persamaan resistansi harus sesuai dengan resistansi (R) panel surya untuk mendapatkan nilai transmisi daya maksimum. Persamaan matematis hambatan beban dari konverter dapat dijelaskan sebagai berikut:

$$R_{eq} = \frac{\eta RL}{D^2} \quad (2.12)$$

$$V = \left( \frac{\eta RL}{D^2} \right) I \quad (2.13)$$

Dimana :

$\eta$  = Efisiensi Inverter

RL = Hambatan Beban

$R_{eq}$  = Beban Impedansi

### 2.2.7 Perhitungan Rencana Anggaran Biaya PLTS

Perhitungan biaya PLTS terbagi menjadi dua, yaitu :

#### 1. Biaya Tetap PLTS

Biaya tetap PLTS dihitung berdasarkan kebutuhan konsumsi energi listrik dalam gedung, dan pemasangan PLTS dihitung berdasarkan konsumsi energi yang dibutuhkan dalam gedung. Biaya modal meliputi biaya pembelian dan pemasangan komponen pembangunan PLTS. Biaya yang ditentukan adalah biaya sejak awal pembangunan hingga PLTS dapat digunakan.

#### 2. Biaya Tidak Tetap PLTS

Biaya tidak tetap adalah biaya yang wajib dikeluarkan, tergantung dari permasalahan yang dihadapi PLTS. Termasuk juga biaya perawatan pada PLTS. Biaya perawatan PLTS dilakukan setiap 3-5 tahun sekali dalam bentuk penggantian inverter, kontroler, dan baterai. Untuk mempermudah perhitungan penggantian peralatan dilaksanakan dalam jangka waktu 5 tahun. Untuk menghitung biaya operasional dan pemeliharaan (OP) tahunan PLTS ditunjukkan pada persamaan 2.11 Hendra *et. all* (2019).

$$OP = 1\% \times IA \quad (2.11)$$

Dimana :

OP = Biaya Operasional dan Pemeliharaan

IA = Investasi Awal

Dan kemudian untuk menghitung biaya jangka panjang untuk Operasional dan Pemeliharaan ( $OP_{PW}$ ) bisa ditunjukkan pada persamaan 2.12.

$$OP_{PW} = OP \left( \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right) \quad (2.12)$$

Dimana :

- $OP_{PW}$  = biaya jangka panjang untuk Operasional dan Pemeliharaan  
 $OP$  = Biaya Operasional dan Pemeliharaan  
 $n$  = Jumlah Tahun  
 $i$  = Tingkat Suku Bunga