

## **BAB II**

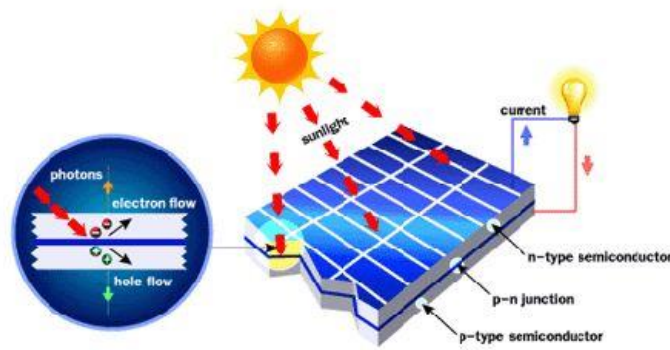
### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 PLTS**

Berdasarkan SNI 8395:2017, PLTS adalah sistem pembangkit listrik yang energinya bersumber dari radiasi matahari, melalui konversi sel fotovoltaik. Sistem fotovoltaik mengubah radiasi sinar matahari menjadi listrik. Semakin tinggi intensitas radiasi (iradiasi) matahari yang mengenai sel fotovoltaik, semakin tinggi daya listrik yang dihasilkannya. Dengan kondisi penyinaran matahari di Indonesia yang terletak di daerah tropis dan berada di garis khatulistiwa, PLTS menjadi salah satu teknologi penyediaan tenaga listrik yang potensial untuk diaplikasikan. (Panduan Perencanaan dan Pemanfaatan PLTS Atap di Indonesia, 2020)

##### **2.1.1 Sel Surya**

Sel surya adalah sebuah p-n junction dari sebuah silicon kristal tunggal. Menggunakan peristiwa photo-electric effect yang terbuat dari bahan semikonduktor, sel surya dapat mengkonversi sinar matahari menjadi listrik searah (DC). Saat sel surya terkena sinar matahari, akan muncul electron dan hole. Electron dan hole ini akan melintasi p-n junction sehingga timbul beda potensial pada kedua ujung sel surya. Jika pada kedua ujung sel surya diberi beban maka akan muncul aliran listrik melalui beban. (Nugroho Arif, 2020)

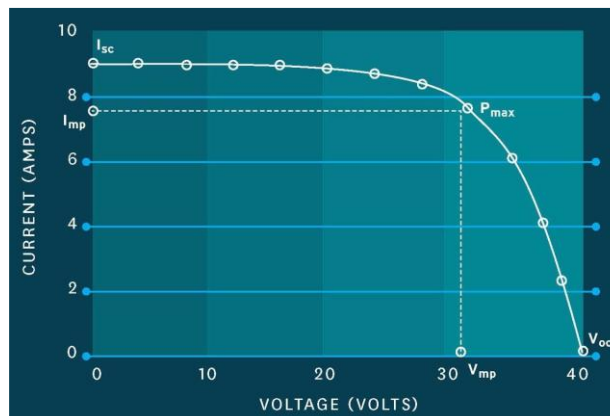


Gambar 2. 1 Ilustrasi cara kerja sel surya dengan prinsip p-n junction

Ketika disinari, umumnya satu sel surya menghasilkan tegangan sebesar 0,5 – 1 Volt (Bagus Ramadhani, 2018), dan arus short-circuit dalam skala miliampere per cm<sup>2</sup>. Untuk mendapat tegangan yang lebih besar, sel surya akan disusun secara seri untuk membentuk modul surya (Hidayat & Fadil, 2017). Sebuah modul surya dapat disusun secara seri atau paralel untuk memperbesar tegangan dan arus outputnya sesuai kebutuhan.

### 2.1.2 Karakteristik Modul Surya

Kinerja Modul surya digambarkan dengan karakteristik kurva Arus Listrik (I) terhadap Tegangan (V). Modul surya akan menghasilkan arus listrik maksimum apabila tidak ada komponen Tahanan (R) pada rangkaian. Arus maksimum biasa disebut dengan Arus hubung Singkat ( $I_{sc}$ ) dimana terjadi pada saat tegangan Modul Surya sama dengan nol ( $V = 0$ ).



Gambar 2. 2 Kurva I-V sel surya

Sebaliknya tegangan maksimum dihasilkan pada saat rangkaian tidak terhubung. Tegangan ini disebut sebagai Tegangan Terbuka ( $V_{oc}$ ), pada saat ini tahanan ( $R$ ) sangatlah besar sehingga tidak ada arus yang mengalir karena rangkaian listrik tidak terhubung atau dengan kondisi terbuka.

Besaran daya listrik dari modul surya disebut dengan satuan Watt. Watt didapatkan dengan cara mengalikan tegangan dan arus listrik.

$$P = V \times I \quad (2.1)$$

Daya maksimum umumnya disebut daya puncak dengan notasi  $m_p$ , sehingga arus listrik pada maksimum sebagai ( $I_{mp}$ ) dan tegangan sebagai ( $V_{mp}$ ).

Faktor pengisian sel surya merupakan perbandingan antara daya keluaran maksimum terhadap perkalian antara ( $V_{oc}$ ) dan ( $I_{sc}$ ).

$$ff = \frac{P_{mp}}{P_{th}} = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.2)$$

Kualitas dari sel surya biasanya dinyatakan dengan nilai *fill factor* ( $ff$ ) yang menunjukkan besarnya kemampuan sel surya menyerap cahaya yang diterimanya, atau sering juga dinyatakan dengan nilai

efisiensi. Semakin besar nilai *fill factor* atau efisiensinya maka sel tersebut semakin baik.

### 2.1.3 Rangkaian Modul Surya

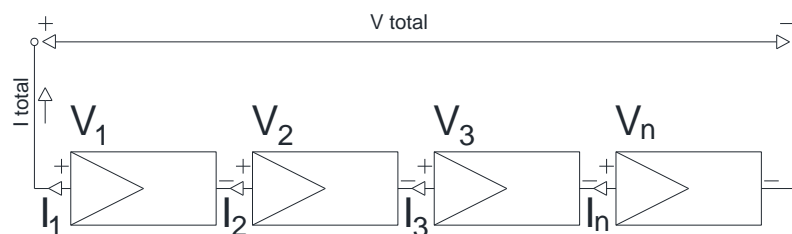
Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dibuat berdasarkan kebutuhan catu daya dan sistem tegangan yang diinginkan oleh beban. Modul surya dapat dihubungkan secara seri, paralel atau seri-paralel.

#### 1) Rangkaian Seri

Rangkaian seri merupakan penghubungan kutub positif (+) dari satu modul ke kutub negatif (-) modul berikutnya. Hasil dari rangkaian seri adalah menambah tegangan sementara arus listrik tetap sama.

$$V_{total} = V_1 + V_2 + V_3 + V_n \quad (2.3)$$

$$I_{total} = I_1 = I_2 = I_3 = I_n \quad (2.4)$$



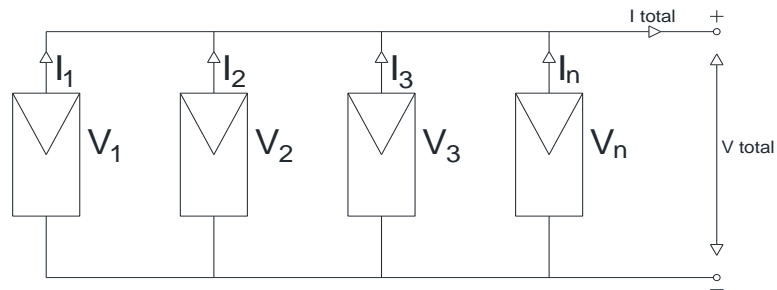
Gambar 2. 3 Rangkaian seri modul surya

#### 2) Pararel

Rangkaian paralel merupakan penghubungan kutub positif (+) modul surya dari string secara bersama-sama dan kutub negatif (-) modul surya dari string secara bersama-sama. Hasil dari rangkaian paralel adalah tegangan tetap sama sementara arus listrik akan bertambah.

$$V_{total} = V_1 = V_2 = V_3 = V_n \quad (2.5)$$

$$I_{total} = I_1 + I_2 + I_3 + I_n \quad (2.6)$$

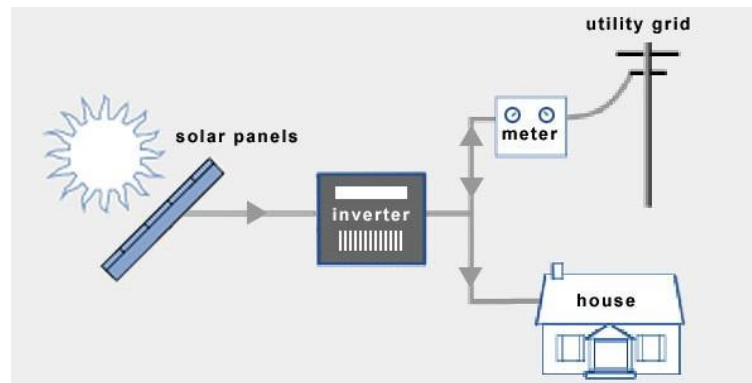


Gambar 2. 4 Rangkaian Pararel

## 2.2 Konfigurasi PLTS

### 2.2.1 Sistem PLTS *On-grid*.

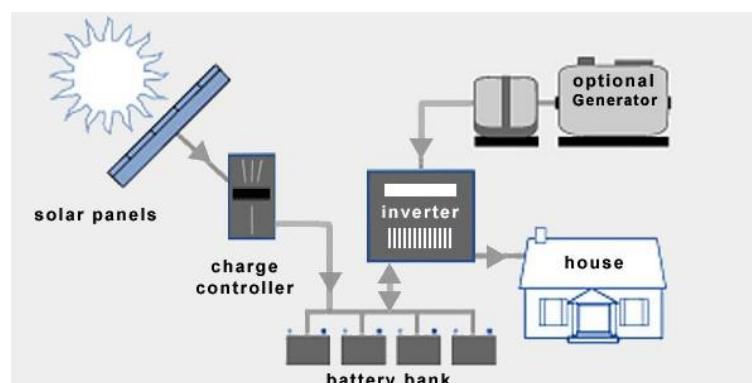
Sistem *On-grid* merupakan sistem PLTS yang terhubung dengan jaringan utilitas. Sistem ini tidak menggunakan baterai dalam susunannya dan menjadikan jaringan utilitas sebagai cadangan. Ketika pembangkit menghasilkan daya lebih besar daripada kebutuhan daya beban, maka daya lebih akan di *export* ke jaringan. Ketika kebutuhan daya beban lebih besar daripada output pembangkit maka sistem secara otomatis menggunakan listrik dari jaringan untuk memenuhi beban. Saat malam hari beban listrik akan dilayani secara penuh oleh jaringan utilitas.



Gambar 2. 5 Sistem PLTS On-grid

### 2.2.2 Sistem PLTS Off-grid

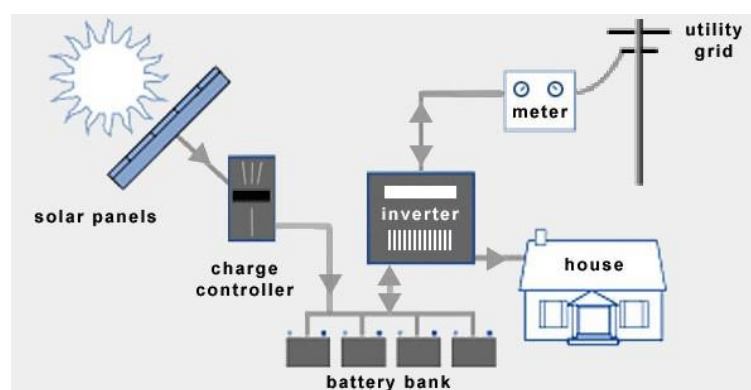
Sistem *Off-grid* merupakan sistem PLTS yang bekerja tanpa terhubung jaringan utilitas. Sistem ini menggunakan baterai untuk menyimpan energi yang dihasilkan pembangkit. Sistem ini tidak memberi daya secara langsung dari pembangkit. Daya dari pembangkit mengisi baterai dengan dikendalikan oleh *SCC* (*Solar Charge Controller*). Saat siang hari baterai menyimpan energi dari pembangkit dan pada malam hari baterai akan memenuhi kebutuhan beban listrik. Sistem ini juga dapat memperoleh daya cadangan dari *generator set* (Genset).



Gambar 2. 6 Sistem PLTS Off-grid

### 2.2.3 Sistem PLTS Hybrid

Sistem ini menggabungkan cara kerja sistem *On-grid* dengan *Off-grid*. Pembangkit dapat mengisi baterai dan meng *export* daya ke jaringan utilitas bila ada daya berlebih. Saat beban membutuhkan lebih banyak daya daripada yang dihasilkan oleh pembangkit, sistem akan menggunakan jaringan utilitas atau baterai untuk memenuhi kebutuhan beban. Ketika jaringan mengalami pemadaman, baterai akan memenuhi kebutuhan daya ke subpanel beban kritis.



Gambar 2. 7 Sistem PLTS Hybrid

## 2.3 Komponen PLTS On-grid

### 2.3.1 Modul Surya

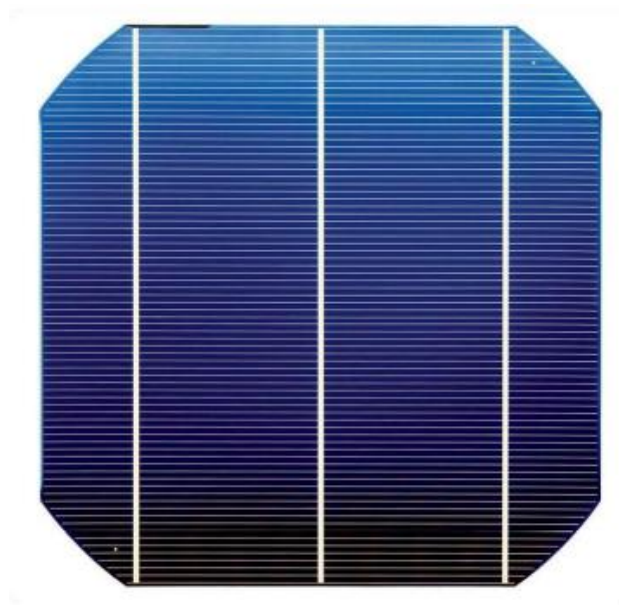
Modul surya merupakan kumpulan sel surya yang disusun secara seri maupun paralel untuk mendapatkan output tegangan dan arus sesuai kebutuhan. Terdapat tiga jenis sel surya yang sering digunakan yaitu *Monocrystalline*, *Polycrystalline*, dan *Thin Film*.

#### 1) *Monocrystalline*

Jenis ini terbuat dari batangan kristal silikon murni yang diiris tipis-tipis, sehingga akan dihasilkan kepingan sel surya yang identik satu sama lain dan berkinerja tinggi. Sel surya ini adalah jenis yang paling

efisien dibandingkan jenis sel surya lainnya, efisiensinya sekitar 15% - 20%.

*Monocrystalline* merupakan panel yang paling efisien yang dihasilkan dengan teknologi terkini dan menghasilkan daya listrik persatuan luas yang paling tinggi. *Monocrystalline* dirancang untuk penggunaan yang memerlukan konsumsi listrik besar pada tempat-tempat yang beriklim ekstrim dan dengan kondisi alam yang sangat ganas. Kelemahan dari panel jenis ini adalah tidak akan berfungsi baik ditempat yang cahayanya matahari kurang (teduh), efisiensinya akan turun drastis dalam cuaca berawan. (Purwoto et al., 2018)



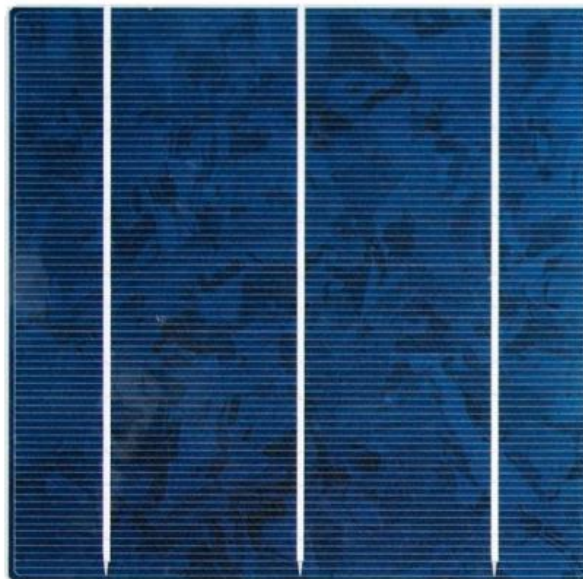
*Gambar 2. 8 Modul Surya Monocrystalline*

## 2) *Polycrystalline*

Jenis ini terbuat dari beberapa batang kristal silikon yang dilebur kemudian dituangkan dalam cetakan yang berbentuk persegi. Kemurnian kristal silikonnya tidak sempurna pada sel surya



monocrystalline, karenanya sel surya yang dihasilkan tidak identik satu sama lain dan efisiensinya lebih rendah, sekitar 13% - 16%. Tampilannya nampak seperti ada motif pecahan kaca di dalamnya. Tipe ini memerlukan luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan jenis *monocrystalline* untuk menghasilkan daya listrik yang sama. Akan tetapi dengan potongan yang berbentuk persegi, *polycrystalline* dapat disusun lebih rapat dari pada *monocrystalline*, sehingga mengurangi ruang kosong antar sel surya. Selain itu *polycrystalline* mempunyai toleransi terhadap suhu yang rendah. Sehingga dalam performanya *polycrystalline* tidak menyerap panas dan suhu permukaan *polycrystalline* tidak panas dan tetap bekerja secara maksimal. (Purwoto et al., 2018)

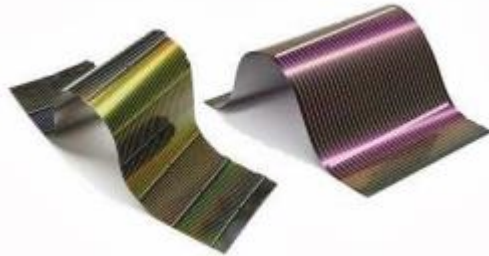


Gambar 2. 9 Modul Surya Polycrystalline

### 3) *Thin Film*

Jenis sel surya ini diproduksi dengan cara menambahkan satu atau beberapa lapisan material sel surya yang tipis ke dalam lapisan dasar.

Sel surya jenis ini sangat tipis karenanya sangat ringan dan fleksibel. Jenis ini dikenal juga dengan TFPV (Thin Film Photovoltaic). Memiliki efisiensi sekitar 6% - 12%. (Purwoto et al., 2018)



Gambar 2. 10 Modul Surya Thin Film

### 2.3.2 Inverter

Inverter merupakan komponen elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC). PLTS berkapasitas besar pada umumnya menggunakan inverter PV terpusat, sementara pembangkit listrik yang lebih kecil beroperasi lebih baik dengan inverter PV tersebar (*string*) karena fleksibilitas dan keandalannya. Namun, tidak ada pendekatan yang paling tepat dalam penentuan desain sistem terpusat atau tersebar karena banyaknya faktor kondisi dan lokasi yang perlu dipertimbangkan (M. Afkar Gunitang Et al., 2020). Terdapat tiga jenis inverter yang sering digunakan yaitu *String Inverter*, *Central Inverter*, dan *Micro Inverter*.

#### 1) *String Inverter*

*String Inverter* biasanya digunakan untuk pemasangan jaringan tersambung skala kecil (10 kW atau kurang). Biasanya kapasitas *String Inverter* ialah 1 kW sampai kira-kira 12 kW, ketika PLTS berkapasitas diatas 5 kW maka inverter multi

string atau inverter terpusat dapat digunakan sebagai inverter alternatif. Setiap inverter *On-grid* memiliki fungsi sebagai MPPT dan tegangan DC inputnya bias mencapai 1000 VDC.

## 2) *Central Inverter*

Inverter terpusat ini biasanya digunakan untuk daya PLTS yang besar, sebagai contoh inverter ini digunakan pada daya dari 30 kWp (fronius) dan dari 100 kWp (SMA). Inverter terpusat ini sama halnya dengan inverter *string* dan *multi-string* namun yang membedakan dengan inverter terpusat adalah *array* pada PLTS dapat dibagi menjadi beberapa *sub-array*.

## 3) *Micro Inverter*

*Micro Inverter* atau biasa juga disebut inverter modul dipasang dibagian belakang setiap modul surya. Inverter ini diproduksi dikisaran 100-300 W. keuntungan inverter mikro adalah menggunakan kabel DC yang sedikit karena keluaran dari modular merupakan daya AC yang langsung diparalelkan pada setiap modul dan kemudian disambungkan ke jaringan. Keuntungan lainnya adalah, apabila penambahan daya maka dengan hanya menambahkan modul surya dan inverternya saja sehingga tidak perlu membongkar instalasi.

### 2.3.3 KWh Meter Exim

KWh Meter *Expor-Import* merupakan sebuah alat yang berfungsi untuk mencatat jumlah energi yang dihasilkan dari sistem modul surya

yang di ekspor ke Penyedia Listrik serta mencatat jumlah energi yang di konsumsi dari Penyedia Listrik.

## **2.4 Mounting System**

### **2.4.1 *Ground Mounting***

Merupakan sebuah rangka yang dipasang tepat ke tanah. Sistem ini memerlukan lahan yang luas dan tidak ada pepohonan disekitarnya, Pemasangan sistem ini ekonomis. Salah satu kelebihan menggunakan *ground-mounting* adalah bahwa panel mudah diakses untuk pemeliharaan dan pembersihan. (M. Afkar Gunitang Et al., 2020)

### **2.4.2 *Pole Mounting***

Merupakan rangka untuk memasang modul PV dengan disambungkan pada suatu tiang atau lebih. Kelebihan dari system ini adalah pada lebih sedikitnya ruang permukaan tanah yang dibutuhkan. Tiang akan menempatkan panel beberapa meter di udara. (M. Afkar Gunitang Et al., 2020)

### **2.4.3 *Roof Mounting***

Merupakan tipe paling umum dari mounting sistem PV skala perumahan, biasanya digunakan pada perumahan dan bangunan. Prosedur instalasinya dinilai lebih rumit dan berbahaya. Instalasi *roof-mounting* lebih memakan waktu daripada memasang panel pada tiang (*pole-mounting*) atau *ground-mounting*. (M. Afkar Gunitang Et al., 2020)

## 2.5 Faktor Yang Mempengaruhi PLTS

Sel surya dalam mengkonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik sehingga menghasilkan daya keluaran dipengaruhi beberapa faktor. Faktor tersebut antara lain temperatur sel, radiasi matahari, kecepatan angin, keadaan atmosfer, orientasi panel, dan posisi sel surya itu sendiri. Radiasi matahari, temperatur sekitar, kecepatan dan arah angin, komposisi material panel, dan struktur pemasangan mempengaruhi temperatur operasi sel surya. (Armstrong & Hurley, 2010)

### 2.5.1 Radiasi

Iradiasi matahari adalah jumlah energi matahari yang diterima oleh suatu tempat setiap  $m^2$ /hari. Semakin besar iradiasi yang diterima oleh modul fotovoltaik, maka akan menghasilkan arus yang semakin besar dengan tegangan yang semakin kecil.

Data iradiasi kelurahan karuripan tasikmalaya yang didapat menurut Metronorm 8.0 hasil dari *Global Irradiation*, Radiasi total pada lokasi tersebut rata-rata sebesar 4,85 kwh/ $m^2$  per hari. Selain radiasi didapat juga Diffuse Irradiation atau radiasi hambur dengan rata-rata 2,49 kwh/ $m^2$ . (Moch. Rasid Jaelani et al., 2022)

### 2.5.2 Sudut Kemiringan

Pada ketinggian matahari bervariasi sepanjang tahun, sudut optimal untuk mempertahankan kinerja tinggi ditentukan berdasarkan rata-rata ketinggian matahari di musim yang berbeda. Sudut kemiringan atau sudut inklinasi dapat ditentukan oleh garis lintang lokasi (Bagus Ramadhani, 2018).

Untuk negara seperti Indonesia yang dekat khatulistiwa, datangnya sinar matahari hampir tegak lurus. Sudut kemiringan  $0^\circ$  merupakan sudut paling optimal untuk menangkap radiasi langsung. Akan tetapi, sudut  $0^\circ$  atau sudut yang relatif datar sehingga dapat menyebabkan genangan atau penumpukan debu di permukaan panel. Maka, untuk mendapatkan mekanisme pembersihan diri modul surya ditempatkan dengan sudut kemiringan minimal  $10^\circ$  (Bagus Ramadhani, 2018).

### **2.5.3 Sudut *Azimuth***

Sudut *azimuth* juga dikenal sebagai arah datangnya sinar matahari. Untuk mendapat hasil yang optimal modul surya diatur untuk menghadap khatulistiwa. Sudut *azimuth* berubah sepanjang hari sebagaimana ditunjukkan pada animasi di bawah. Pada saat ekuinoks, matahari terbit tepat dari timur dan terbenam tepat di barat, terlepas dari derajat lintangnya, sehingga sudut azimuth adalah  $90^\circ$  pada matahari terbit dan  $270^\circ$  pada matahari terbenam (Rimbawati et al., 2023).

Karena azimuth berbeda-beda menurut garis lintang dan waktu, di belahan bumi utara dimana garis lintang di atas  $0^\circ$ , arah hadap optimal modul fotovoltaik adalah  $180^\circ$  atau menghadap ke selatan. Di belahan bumi selatan atau di bawah garis khatulistiwa, modul fotovoltaik harus menghadap ke utara atau  $0^\circ$ . Arah hadap boleh menyimpang hingga  $45^\circ$  ke timur atau barat tanpa secara signifikan mengurangi energi yang dihasilkan (Bagus Ramadhani, 2018).

### 2.5.4 Temperatur

Kenaikan temperatur pada modul dapat menyebabkan berkurangnya efisiensi modul fotovoltaik sesuai dengan koefisien temperatur dari modul. Sel dapat mencapai suhu tinggi, misalnya ketika radiasi matahari paling kuat di musim panas sekitar tengah hari, sel dapat memanaskan hingga sekitar 70°C.

Sebuah Sel Surya dapat bekerja secara normal berada pada suhu 25°. Setiap kenaikan suhu sebesar 10°C dari suhu 25° dapat menurunkan keluaran daya efektif sistem PV sekitar 4% - 5 % (Regen Power, 2011).

$$T_m = E(e^{a+b(Ws)}) + T_a \quad (2.7)$$

*Dimana:*  $T_m$  : Suhu Modul Surya (°C)

$T_a$  : Suhu Ambient (°C)

$E$  : Radiasi Matahari pada Modul ( $W/m^2$ )

$WS$  : Kecepatan Angin

$a$  : koefisien batas suhu atas Modul

$b$  : koefisien penurunan suhu modul surya

### 2.5.5 Kecepatan Angin

Kecepatan angin bertiup disekitar lokasi sel surya akan sangat membantu terhadap pendinginan temperatur permukaan sel surya sehingga temperatur dapat terjaga dikisaran 25 derajat Celcius.

### **2.5.6 Keadaan Atmosfir Bumi**

Keadaan atmosfer bumi berawan, mendung, jenis partikel debu udara, asap, uap air udara, kabut dan polusi sangat menentukan hasil maksimum arus listrik dari sel surya.

### **2.5.7 Shading**

Bayangan (*Shading*) dapat mempengaruhi kinerja panel Surya. Umumnya PLTS yang dibangun berdekatan dengan bangunan terutama pada daerah perkotaan menyebabkan bayangan pada modul PLTS terutama yang dipasang di atap. Terkadang karena desain PLTS yang salah, bayangan antar modul sendiri juga dimungkinkan terjadi, Pepohonan di sekitarnya juga harus dianalisis dengan baik ketika sistem PLTS dirancang (Mansur, 2021).

### **2.5.8 Soiling**

Kotoran alami (*soiling*) pada permukaan modul PV yang disebabkan oleh debu dapat menyebabkan penghalangan sinar matahari menuju sel surya. Pada sebuah percobaan menunjukkan bahwa, kerugian karena debu yang tidak dibersihkan dapat mencapai 5,48%. Untuk meningkatkan efisiensi sistem, modul perlu dibersihkan secara teratur (Sujana et al., 2015).

Curah hujan alami dapat mencuci panel untuk mencegah penumpukan kotoran dalam jumlah besar, namun di daerah yang sangat berdebu dan kering, panel perlu dibersihkan secara manual menggunakan air jika terjadi penumpukan kotoran.



## 2.6 Rumus Perhitungan PLTS

### 2.6.1 Luas Array Modul Surya

Untuk menentukan Luas Array Modul surya, dapat dengan membagi penggunaan beban listrik dengan Intensitas matahari dikalikan efisiensi modul surya dan inverter.

$$PV_{area} = \frac{E_L}{G_{av} \times \eta_{PV} \times TCF \times \eta_{INV}} \quad (2.8)$$

dengan

$$TCF = \frac{P_{MPP} - (\text{temperature coefficient factor} \times P_{MPP} \times \Delta t)}{P_{MPP}} \quad (2.9)$$

Dimana:  $PV_{area}$  : Luas Array ( $m^2$ )

$E_L$  : Besar Konsumsi Energi (Kwh)

$G_{av}$  : Minimum Iradiasi Harian ( $kWh/m^2$ )

$\eta_{PV}$  : Efisiensi modul Surya

$\eta_{INV}$  : Efisiensi Inverter

$TCF$  : Temperature Correction Factor

### 2.6.2 Daya yang Dibangkitkan PLTS

Besar daya yang dibangkitkan array merupakan hasil kali besaran array dengan iradiasi STC dan efisiensi modul surya. Selain itu, dapat juga menggunakan perkalian antara besar daya modul surya dikalikan dengan jumlah modul surya.

$$P_{PV} = PV_{area} \times Ir_{STC} \times \eta_{Pv} \quad (2.10)$$

Atau

$$P_{PV} = P_{MPP} \times N \quad (2.11)$$

*Dimana:*  $P_{PV}$  : Daya Maksimal Array (Wp)  
 $PV_{area}$  : Luas Array (m<sup>2</sup>)  
 $\eta_{PV}$  : Efisiensi modul Surya  
 $I_{rSTC}$  : Iradiasi STC (1000 W/m<sup>2</sup>)  
 $P_{MPP}$  : Daya Maksimal Modul Surya (Wp)  
 N : Jumlah Modul Surya

### 2.6.3 Kapasitas Inverter

Untuk menghasilkan daya yang optimal, pemilihan inverter harus diperhitungkan. Nilai ini harus berada pada nilai (0,9 - 1,3) dari nilai daya Array modul yang terpasang. Nilai ini merupakan nilai perbandingan antara kapasitas daya yang dibangkitkan Array dengan Kapasitas Inverter.

$$DC - AC \text{ RATIO} = \frac{P_{PV}}{P_{INV}} \quad (2.12)$$

*Dimana:*  $P_{PV}$  : Daya Maksimal Array (Wp)  
 $P_{INV}$  : Kapasitas Daya Inverter (kW)

### 2.6.4 Jumlah Maksimal Modul dalam String

Jumlah maksimum modul dalam sebuah string merupakan hasil pembagian tegangan open sirkuit modul terhadap maksimum tegangan input Inverter dengan factor pengaman sebesar 2%.

$$\text{Modul per String} = \frac{V_{INV} \times 0.98}{V_{OC}} \quad (2.13)$$

Dimana:  $V_{INV}$  : Input Tegangan Maksimal (V)  
 $V_{OC}$  : Tegangan open circuit (V)

### 2.6.5 Energi yang Dihasilkan

Energi yang dihasilkan diaptkan dengan pengalihan daya yang dibangkitkan Array dengan PSH (*Peak Sun Hour*) lokasi dan total efisisensi system. Asumsi rugi – rugi (losses) pada sistem PLTS dianggap sebesar 14% - 21% (Agus Wibowo, 2022). Maka nilai rugi-rugi yang digunakan adalah nilai yang cukup tinggi yaitu sebesar 20%.

$$E_{out} = P_{PV} \times PSH \times Losses \quad (2.14)$$

dengan

$$PSH = \frac{G_{av}}{I_{rSTC}} \quad (2.15)$$

Dimana:  $E_{out}$  : Energi yang dihasilkan sistem (kWh)  
 $PSH$  : *Peak Sun Hour*  
 $Losses$  : Rugi-rugi system

### 2.6.6 Performance Ratio

Rasio Performa (PR) merupakan sebagai rasio dari jumlah sebenarnya energi yang dihasilkan dalam jangka waktu tertentu dengan jumlah teoritis energi yang dihasilkan oleh modul PV dibawah kondisi uji standar (STC).

$$PR = \frac{E_{out}}{E_{ideal}} \times 100\% \quad (2.16)$$

dimana

$$E_{ideal} = P_{PV} \times H_{Tilt} \quad (2.17)$$

Dimana:  $E_{Out}$  : Energi yang dihasilkan sistem (kWh)

$E_{Ideal}$  : Energi yang dihasilkan tanpa *losses* (kWh)

$H_{Tilt}$  : rata-rata iradiasi harian (kWh/m<sup>2</sup>)

## 2.7 Aspek Ekonomi

Energi yang dihasilkan oleh matahari merupakan energi yang gratis dan memang telah disediakan oleh alam. Namun, hal ini tidak berarti bahwa tidak ada dana yang digunakan untuk membayar produksi energi matahari. Harga sebuah sistem yang digunakan untuk memanfaatkan energi matahari menjadi sebuah energi listrik inilah yang membuat sistem PLTS mahal. Dimana didalamnya terdapat modul, inverter, pemasangan dan peralatan pendukung agar PLTS dapat beroperasi dengan sempurna.

### 2.7.1 Life Cycle Cost Analysis (LCCA)

Pada analisis *Life Cycle Cost*, semua biaya sekarang dan di masa depan berhubungan dengan sistem PLTS yang dibangun. Biaya tersebut dijumlahkan selama sistem PLTS bekerja, namun biaya tersebut tidak hanya energi yang dihasilkan, pemasangan, operasi dan perawatan, perbaikan, biaya pekerja, inflasi dan laju diskon selama investasi. Perbandingan antara *Life Cycle Cost* dengan alternatif menentukan sebuah sistem memiliki biaya yang efektif atau tidak. (Hajar & Sara, 2022)

$$LCC = C + O\&M + R \quad (2.18)$$

Dimana:  $LCC$  : *Life Cycle Cost*

$C$  : Biaya Investasi Awal

$O\&M$  : Biaya Operasioanl dan Maintenance

$R$  : Biaya Penggantian Komponen

Biaya yang dikeluarkan selama periode hidup proyek, akan berbeda dari tahun ke tahun. Untuk menghitung biaya yang sesuai dengan laju bunga Bank Indonesia, digunakan perhitungan sebagai berikut.

$$O\&M = O\&M_p \left[ \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad (2.19)$$

*Dimana:*  $O\&M$  : Biaya Present value  $O\&M$

$O\&M_p$  : Biaya  $O\&M$  per tahun

$n$  : Lama life time proyek

$i$  : Tingkat bunga Bank

Untuk tingkat Bunga Bank yang digunakan diambil dari aturan yang telah ditetapkan oleh Bank Indonesia yaitu sebesar 6% dan nilai suku bunga terkecil adalah sebesar 3,5%.

### 2.7.2 Present Worth Factor (PWF)

PWF adalah metode perhitungan yang digunakan untuk menghitung nilai dari seluruh biaya pemeliharaan tahunan selama sistem digunakan pada tahun ke sekian dengan menggunakan.

$$PWF = LCC \frac{1}{(1+r)^n} \quad (2.20)$$

*Dimana:*  $PWF$  : Present Worth Factor

$r$  : tingkat bunga bank

$n$  : Jumlah tahun

### 2.7.3 Cash Flow Analysis (CFA)

*Cash Flow Analysis* adalah laporan besarnya kas masuk dan kas keluar selama satu periode dari aktivitas operasi, investasi dan pembiayaan.

#### 1. Cash Flow Benefit (CFB)

*Cash Flow Benefit* adalah aliran uang masuk disetiap tahun selama sistem berjalan.

$$CFB = \sum_{t=1}^n \frac{CashFlow}{(1+i)^n} \quad (2.21)$$

#### 2. Cash Flow Cost (CFC)

*Cast Flow Cost* adalah aliran uang keluar disetiap tahun selama sistem bekerja.

$$CFC = \sum_{t=1}^n \frac{Cost}{(1+i)^n} \quad (2.22)$$

### 2.7.4 Net Present Value (NPV)

*Net Present Value (NPV)* menyatakan bahwa seluruh aliran kas bersih dinilai sekarang atas dasar faktor diskonto (*diccount factor*). Teknik ini menghitung selisih antara seluruh kas bersih nilai sekarang dengan investasi awal yang ditanamkan.

1. Jika nilai NPV yang didapatkan adalah positif maka proyek tersebut layak dilaksanakan karena hal itu mengindikasikan bahwa perhitungan investasi proyek itu telah mencapai kondisi yang mampu memberi keuntungankeuntungan sampai periode yang diperhitungkan.

2. Jika nilai NPV yang didapatkan adalah negatif maka proyek tersebut tidak layak dilaksanakan karena hal itu mengindikasikan bahwa perhitunganninvestasi proyek itu belum mencapai kondisi yang mampu memberi keuntungan sampai periode yang diperhitungkan.
3. Jika nilai NPV yang didapatkan adalah 0 maka itu berarti dalam sepanjang periode perhitungan investasi yang dilakukan maka proyek tersebut telah memberikan hasil yang sebanding dengan nilai investasi yang dikeluarkan.

$$NPV = \sum_{t=0}^n CFB - CFC \quad (2.23)$$

*Dimana:*  $CFB$  : *Cash Flow Benefit*

$CFC$  : *Cash Flow Cost*

### **2.7.5 Internal Rate of Return (IRR)**

IRR merupakan nilai discount rate yang membuat nilai NPV suatu proyek sama dengan nol. Berdasarkan perhitungan IRR, apabila nilai IRR lebih besar daripada tingkat bunga relevan (tingkat keuntungan yang disyaratkan), maka investasi dikatakan menguntungkan. Sebaliknya jika nilai IRR lebih kecil tingkat bunga relevan maka investasi dikatakan merugikan dan tidak layak untuk dilaksanakan

$$IRR = i_1 + \left( \frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} \right) \times (i_2 - i_1) \quad (2.24)$$

*Dimana:*  $IRR$  : *Internal rate of return (%)*

$NPV_1$  : net present value tingkat bunga rendah

$NPV_2$  : net present value tingkat bunga tinggi

$i_1$  : tingkat bunga yang kecil (%)

$i_2$  : tingkat bunga yang besar (%)

### 2.7.6 *Simple Payback*

*Simple payback* adalah Pengembalian modal adalah analisis ekonomi pada sistem PV *grid-connected* metode paling mudah untuk dipahami. Dalam PLTS *simple payback* bertujuan menghitung jumlah waktu yang diperlukan untuk memulihkan biaya Investasi berdasarkan penghematan biaya energi tahunan.

$$T = \frac{C}{S} \quad (2.25)$$

*Dimana:*  $T$  : Periode dana kembali dalam 1 tahun

$C$  : biaya modal bersih Sistem PLTS

$S$  : Biaya energy listrik terjual

## 2.8 Aspek Emisi

Analisis potensi reduksi emisi CO<sub>2</sub> melalui pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Surya dilakukan dengan mengurangi jumlah energi listrik dari pembangkit berbahan bakar fosil dan mengganti dengan PV. Pada penelitian (Budi & Suparman, 2013) pembangkit listrik tenaga uap batubara memiliki rata-rata faktor emisi sebesar 1,05 kg/kWh. Artinya untuk menghasilkan energi listrik 1 kWh melalui pembangkit berbahan bakar fosil dihasilkan emisi CO<sub>2</sub> sebesar 1,05 kg/kWh.



Berikut perhitungan pengurangan emisi akibat mengganti bahan bakar fosil dengan energi terbarukan:

$$eCO_2 = kWh \times ef \quad (2.26)$$

Dimana:  $eCO_2$  : Emisi  $CO_2$  ( $CO_2$ )

$kWh$  : Produksi energi listrik pertahun ( $kWh$ )

$ef$  : Faktor emisi (kg/kWh)

## 2.9 Helioscope

Perangkat lunak HelioScope adalah perangkat lunak berbasis web, sehingga penggunaannya melalui dilakukan melalui *web browser* dan mengharuskan terhubung dengan internet. Kelebihan dari perangkat lunak ini adalah cukup ringan karena berbasis web, praktis dalam menentukan data potensi energi matahari, tersedia berbagai data PV dan inverter. HelioScope tidak dapat mensimulasikan sistem *off grid* atau *standalone*. Data potensi energi Matahari sudah terhubung langsung dengan database Meteororm sehingga lebih praktis walaupun pengguna dapat juga memasukkan data cuaca secara manual. (Karuniawan, 2021)

Helioscope memiliki fitur untuk mengimpor peta resolusi tinggi dan berkualitas tinggi dari lokasi geografis mana pun dari Google Earth. Perangkat ini menyajikan tata letak atau topografi yang tepat dari setiap lokasi yang diperiksa, dapat mengedit dan memodifikasi gambar, serta dapat membuat model PV di atasnya. Perancangan sistem PV dengan perangkat Helioscope dapat secara akurat memperkirakan efek bayangan objek (Shading). Software ini juga dapat menghitung luas lokasi untuk perancangan

PV yang diusulkan. Perangkat ini menggunakan karakteristik fisik modul surya dan inverter, informasi cuaca, analisis bayangan, hambatan kawat, dan faktor lain untuk melakukan simulasinya. (Tamoor et al., 2022)

## 2.10 Penelitian Terkait

Pada penelitian ini didapat dari studi literatur yang bersumber dari penelitian terdahulu tentang pemanfaatan PLTS sebagai sumber energi listrik yang telah dilakukan oleh beberapa pihak.

Pada penelitian yang berjudul “Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya *On-grid* di Atap Gedung Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Ambon”. Penelitian bertujuan menghasilkan rancangan system PLTS *On-grid* dan biaya investasi awal. Penelitian ini menghasilkan rancangan PLTS dengan kapasitas 64,708 kWp untuk mengurangi beban harian sebesar 320.700 kWh. Sistem PLTS dapat menghasilkan energy sebesar 294,9 kWh perhari dengan biaya investasi sebesar Rp540.935.880,00 (Latupono et al., 2021).

Pada Penelitian yang berjudul “Potensi Pengurangan Emisi Gas Kabron dengan Perencanaan PLTS Atap pada Gedung Fakultas Teknik 03 Untidar”. Perencanaan PLTS bertujuan agar untuk mengurangi emisi gas karbon. Dengan kapasitas PLTS sebesar 124,740 kWp dapat membangkitkan energy sebesar 135,30 MWh dalam setahun. Perencanaan ini memiliki potensi pengurangan emisi karbon sebesar 135.299,287 ton CO<sub>2</sub> per tahun (Amrullah et al., 2023).

Pada penelitian “Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Rooftop untuk Kawasan Perumahan di Kota Mataram Berdasarkan Pemetaan

Potensi Iradiasi” dihasilkan rata-rata iradiasi pada kota mataram sebesar 5,235 kWh/m<sup>2</sup>/hari. Dengan kapasitas PLTS 5,399 kWp dapat memperoleh keluaran sebesar 28 kWh per hari dan penghematan tagihan listrik sebesar 14 kWh per hari dengan Penghematan tagihan listrik sebesar Rp23.319.650,00 (Wibawanto et al., 2018).

Pada penelitian “Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Kapasitas 100 kW pada Gedung Fakultas Teknik UNISKA MAB Banjarmasin dengan Sistem *On-grid*” Diperoleh Jumlah produksi energi pertahun sebesar 170,96 MWh dengan perhitungan dan dengan menggunakan software PVsyst sebesar 147,5 MWh per tahun (Mardiansyah et al., 2023).

Pada Penelitian “Perencanaan dan Analisis Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Rooftop dengan Sistem On Grid sebagai Catu Daya Tambahan pada RSUD Kabupaten Mimika”. PLTS direncanakan untuk memenuhi 60% dari kebutuhan beban puncak sebesar 211,2 kWh. Dengan kapasitas 63 kWp, PLTS rooftop dapat menghasilkan energy listrik sebesar 242,874 kWh/hari dan 90,474 MWh/tahun. Dengan biaya investasi sebesar Rp1.193.074.000,00 memperoleh Discounted Payback Period (DPP) masih dibawah umur proyek 25 tahun yaitu 24 tahun 8 bulan (Kariongan et al., 2022).

Penelitian berjudul “Feasibility Study dan Detail Engineering Design Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) komunal di Universitas Teknologi Sumbawa” membahas mengenai perancangan PLTS untuk memenuhi beban 14 gedung dengan kebutuhan energi harian sebesar 513,836 kWh. Diperlukan kapasitas pembangkit minimal 308,4 Kwp untuk memenuhi beban tersebut

dan diperlukan baterai bank sebanyak 189 buah dengan kapasitas arus 1000 Ah dan kapasitas energi 2 kWh (Aryanto et al., 2022).

Pada Penelitian “Studi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Skala Kecil Rumah Tangga” untuk memenuhi beban harian sebesar 14 kWh dibutuhkan kapasitas panel surya sebesar 2800 Wp dengan kapasitas baterai sebesar 400Ah 48 Volt. Biaya Investasi sebesar Rp69.493.500,00 dan biaya Maintenance sebesar Rp694.935,00 pertahun. Proyek PLTS ini berpotensi mengalai payback periode pada tahun ke 9 bulan 4 (Simamora et al., 2023).

Pada Penelitian “Optimal Capacity of Solar PV and Battery Storage for Australian Grid-Connected Households” Melakukan perencanaan optimal pemenuhan beban rumah tangga menggunakan Modul surya tanpa baterai dan dengan baterai. Dengan besar rata-rata radiasi harian Australia sebesar 5,4 kWh/m<sup>2</sup>/day dan suhu *ambient* 17.9°. PV dengan kapasitas sebesar 9 kWp mampu menyumbang energy sebesar 11,13 MWh ke grid dan memenuhi 2,49 MWh kebutuhan listrik rumah tangga setiap tahunnya (tanpa baterai). Sistem ini dapat mengurangi biaya listrik sebesar 40%, dan total keuntungan dari sistem dengan biaya \$350/kWh selama masa proyek (20 Tahun) adalah sekitar \$42.000 (Khezri et al., 2020).

Pada penelitian “Perancangan dan Simulasi PLTS Atap 1 kWp Menggunakan Helioscope” didapati bahwa prinsip kerja dari simulasi ini menggunakan data input berupa spesifikasi teknis PLTS seperti teknologi panel surya, jenis inverter, jumlah dan jenis modul yang dipilih dan luas lahan, sedangkan data lokasi sistem PLTS meliputi koordinat, jenis atap

bangunan, lingkungan sekitar PLTS dan data meteorologi. PLTS atap 1 kWp ini mampu menghasilkan energi listrik rata-rata harian 5,48 kWh, mingguan 41,07 kWh, bulanan 164,29 kWh, dan tahunan 1971,5 kWh. Investasi awal yg diperlukan utk membangun PLTS atap 1 kWp adalah Rp20.000.000,00 (Brahma et al., 2021).

Penelitian “Grid-connected PV system design option for nearly Zero Energy Building in reference building in Hanoi” bertujuan untuk meningkatkan efisiensi energy dan pengurangan biaya konsumsi listrik bangunan dengan kapasitas PV sebesar 15 kWp. Penelitian ini menggunakan *software* PVSYST dengan data meteorologi Hanoi periode 1991 – 2010 dari Meteororm. Kemiringan optimal modul PV yang dipasang di atap gedung di Cau Giay-Hanoi untuk mendapatkan hasil maksimal adalah 15°. Hasil tahunan sistem PV 15 kWp menggunakan Modul surya XL SW-335 mono-kristal yang dihubungkan ke *Central Inverter* Ingecon Sun 15 TL M adalah 19,348 MWh. Rata-rata daya puncak bulanan berkisar 9 kW (pada bulan Juli dan Agustus) atau rata-rata hanya menghasilkan 60 % dari kapsitas dayanya (Truong et al., 2016).

Pada Penelitian “A Feasibility Study of PV Installation: Case Study at Shaqra University” bertujuan untuk pengurangan konsumsi energi listrik dari Shaqra University dengan memanfaatkan lahan sebesar 500m<sup>2</sup> dan rata-rata Iradiasi di kota Shaqra sebesar 2300 kWh/m<sup>2</sup>. Sistem ini dapat menghasilkan energy sekitar 178 MWh. Sistem juga dapat mengurangi 42% konsumsi tagihan listrik pada 3 bulan pertama (Hafez & Alblawi, 2018). BAB III METODE PENELITIAN.