

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya atau PLTS adalah sebuah sistem yang digunakan untuk mengubah energi Cahaya matahari menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip efek *photovoltaic*. *Photovoltaic* sendiri merupakan fenomena fisika yang terjadi pada permukaan sel surya (*solar cell*) ketika menerima Cahaya matahari. Selanjutnya, Cahaya yang diterima diubah menjadi energi listrik. Hal ini disebabkan karena adanya energi foton cahaya yang membebaskan electron-elektron sehingga mengalir dalam sambungan semikonduktor tipe n dan p yang pada akhirnya menimbulkan energi Listrik. Pembangkit Listrik Tenaga Surya akan menghasilkan tegangan searah (arus AC). Panel surya menjadi komponen utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya, hasil output dari panel surya akan berbentuk energi listrik searah yang akan diubah menjadi energi listrik bolak-balik menggunakan alat yang disebut dengan inverter (Anise et al., 2021).

2.2 Jenis-jenis Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Terdapat 3 jenis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) diantaranya, PLTS *Off Grid*, PLTS *On Grid* dan PLTS *Hybrid*. Berikut penjelasan mengenai ketiga jenis Pembangkit Listrik Tenaga Surya tersebut:

2.2.1 PLTS OFF GRID

PLTS *Off Grid* merupakan system PLTS yang tidak terhubung dengan jaringan PLN. Sistem ini disebut juga *System Stand Alone* karena system ini hanya mengandalkan energi matahari sebagai satu-satunya sumber energi utama dengan menggunakan rangkaian modul surya untuk menghasilkan energi Listrik sesuai dengan kebutuhan (Hasanah, 2021).

2.2.2 PLTS ON GRID

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah sistem yang mengonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik dengan memanfaatkan prinsip efek *photovoltaic*. Sistem PLTS ini menyediakan sumber energi yang ramah lingkungan. Selain itu, PLTS sangat diminati karena sinar matahari mudah diperoleh di Indonesia, negara tropis yang hampir sepanjang tahun menerima sinar matahari. Penggunaan PLTS sebagai sumber energi selaras dengan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) tahun 2021-2030, yang mendukung upaya pemerintah untuk mencapai kecukupan tenaga listrik melalui program 35 GW serta kebijakan pengembangan Energi Baru Terbarukan (EBT) (Nurjaman & Purnama, 2022).

2.2.3 PLTS HYBRID

PLTS sistem *hybrid* ini dapat didefinisikan sebagai pembangkit Listrik yang memadukan sumber energi matahari dengan sumber lainnya. PLTS *hybrid* menghilangkan segala kelemahan sistem *on grid* maupun *off grid* serta memadukan kelebihan keduanya menjadi satu. PLTS *on grid* dihubungkan dengan jaringan Listrik PLN, namun energi dari panel surya menuju baterai tidak disimpan. Sebaliknya,

sistem *off grid* tidak dihubungkan dengan PLN, tetapi daya menuju baterai bisa disimpan. Keistimewaan dari kedua sistem ini dapat dipadukan menjadi satu, inilah yang dinamakan PLTS sistem *Hybrid* (Rahmatulloh & Andriawan, n.d.).

2.3 Sistem PLTS Atap

Sistem PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) atap adalah sistem panel surya yang dipasang di atap bangunan untuk menghasilkan listrik dari energi matahari. Komponen Panel surya atau modul *photovoltaic* adalah komponen utama yang menangkap energi matahari dan mengubahnya menjadi listrik DC (arus searah) lalu diubah menjadi listrik AC (arus bolak-balik) menggunakan inverter agar bisa digunakan oleh peralatan listrik di rumah atau Gedung. Panel surya dipasang di atap menggunakan sistem pemasangan khusus yang aman dan efisien. Ini mencakup struktur penyangga, klip pengunci, dan komponen lainnya untuk menahan panel surya.

2.4 Jenis-Jenis Panel Surya

2.4.1 *Monocrystalline*

Panel surya *monocrystalline* yakni panel yang paling efektif yang dihasilkan dengan teknologi kekinian dan memberikan energi listrik per-satuan luas paling tinggi. Kristal Tunggal disusun untuk program yang memerlukan penerapan tegangan besar pada daerah dengan iklim ekstrim. Panel surya ini mempunyai efektivitas 15%. Kekurangan dari panel ini adalah tak akan melangsungkan kinerja dengan baik pada tempat dengan minim cahaya matahari. Keefektifan nya nanti

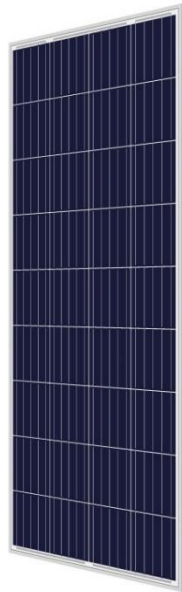
mengalami pengurangan dalam suasana yang mendung (Amelia Widyastuti et al., 2024).



Gambar 2. 1 Panel Jenis *monocrystalline* (Blog, 2018)

2.4.2 *Polycrystalline*

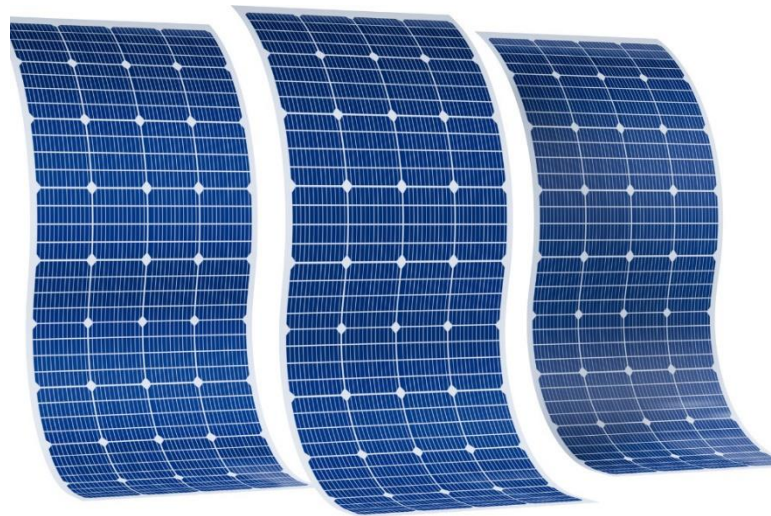
Panel surya *polycrystalline* merupakan panel surya dengan rancangan kristal acak sebab dikembangkan menerapkan cara pengecoran. Jenis berikut memerlukan Lokasi yang lebih besar dibandingkan tipe kristal Tunggal untuk memberikan Listrik yang serupa. Panel surya tipe berikut tidak terlalu efisien daripada tipe *monocrystalline* yang menyebabkan dananya agak rendah (Amelia Widyastuti et al., 2024).



Gambar 2. 2 Panel Jenis *polycrystalline* (Sistem, 2023)

2.4.3 *Thin Film Photovoltaic*

Panel surya *Thin Film Photovoltaic* merupakan panel surya (lapisan ganda) dengan struktur silicon mikrokristalin dan film tipis amorf dengan keefektifan modul sampai 8,5% sehingga Lokasi yang diperlukan untuk masing-masing watt Listrik yang dihasilkan lebih massif dibandingkan panel monokristalin dan polikristalin. Suatu inovasi paling baru ialah Film Tipis Persimpangan Tiga *Photovoltaic* (Tiga lapis). Panel surya berikut dapat efektif pada udara berawan dan bisa memberikan tegangan sampai 45% lebih massif dibandingkan panel lainnya dengan watt yang serupa (Amelia Widyastuti et al., 2024).



Gambar 2. 3 Panel Jenis *Thin Film Photovoltaic* (Solar, 2023)

2.5 Komponen-komponen Penyusun PLTS

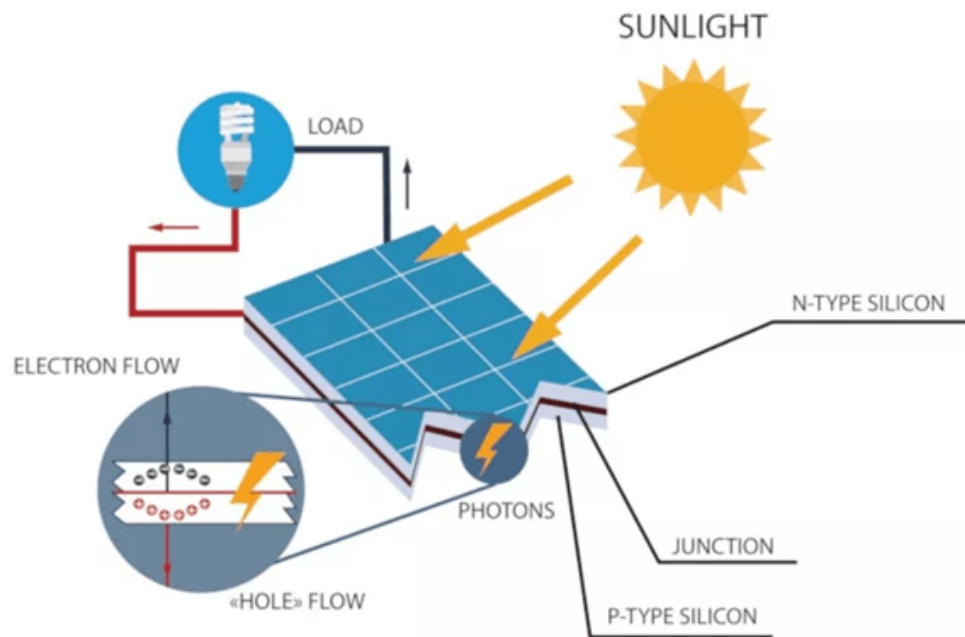
Photovoltaic adalah suatu alat yang dapat mengubah energi surya (foton) menjadi listrik arus searah (Arus DC). Kemudian listrik arus searah diubah menjadi arus bolak-balik sesuai dengan sistem tegangan dan frekuensi setempat. PLTS tidak memiliki daya konstan (*non capacity value generation system*) karena kapasitas keluarannya tergantung pada tingkat radiasi matahari yang selalu berubah setiap waktu. PLTS dinilai dari seberapa banyak energi yang dihasilkan, bukan seberapa besar dayanya, kecuali pada system yang memiliki *storage system*. Oleh sebab itu, kapasitas suatu PLTS ditentukan oleh besarnya konsumsi energi suatu beban dalam suatu periode, yaitu dengan menggunakan harga rata-rata suatu beban pada suatu lokasi dalam periodenya. Kapasitas komponen utama ditentukan sesuai tipe dan desain dari PLTS yang akan dibangun. Sistem PLTS memiliki komponen utama yaitu: modul surya, *inverter*, *solar charge controller* (SCC) dan *storage system*/Baterai (Sianipar, 2017).

2.5.1 Modul Surya

Bagian terkecil dari *Photovoltaic* adalah sel surya yang pada dasarnya sebuah foto dioda yang besar dan dapat menghasilkan daya listrik. *Photovoltaic* terdiri dari dua jenis bahan berbeda yang disambungkan melalui suatu bidang junction yang jika sinar jatuh pada permukaannya akan diubah menjadi listrik arus searah

Untuk mendapatkan daya yang cukup besar diperlukan banyak sel surya. Biasanya sel-sel surya itu sudah disusun sehingga berbentuk panel, dan dinamakan modul surya. Kapasitas modul surya yang dinyatakan dalam Wp dan tersedia dalam beberapa ukuran. Untuk penggunaan pembangkit, ukuran modul yang lazim digunakan adalah 80 – 300 Wp permodul. Untuk mendapatkan tegangan yang lebih besar, modul disusun secara seri dan untuk mendapatkan arus yang besar, modul disusun secara paralel. Berikut adalah cara kerja modul surya mengubah cahaya panas matahari menjadi listrik.

Cara kerja sel surya yaitu ketika sinar matahari (cahaya) yang mengenai sel surya menghasilkan elektron dengan muatan positif dan *hole* yang bermuatan negative, selanjutnya elektron dan *hole* mengalir membentuk arus listrik searah, elektron akan meninggalkan sel surya dan mengalir pada rangkaian luar, sehingga timbul arus listrik, prinsip ini disebut *photoelectric* (Irawati et al., 2023)(Galuh Prawestri Citra Handani et al., 2023).



Gambar 2. 4 Skema modul surya (Technology, 2020)

Kebutuhan kapasitas (kWp) panel surya ditentukan oleh besar energi (kWh) yang dibutuhkan beban dalam satu periode dan tingkat radiasi matahari di lokasi. Beberapa faktor dapat mempengaruhi efisiensi panel seperti temperatur, koneksi kabel, inverter, baterai, dan lain-lain, sehingga secara praktek hasil perhitungan yang diperoleh dikoreksi dengan faktor derating yang umumnya sekitar 0,67%. Kapasitas kWp dihitung dengan rumus sebagai berikut (Sianipar, 2017).

$$\text{kWp} = \frac{I_o}{H_o} \cdot \frac{E_o}{\eta_{sm}} \cdot Cf = \frac{E_o}{PSH \times \eta_{sm}} \cdot Cf \quad (2.1)$$

Dimana:

E_o = Energi yang ingin diproduksi (kWh),

H = : tingkat radiasi matahari di lokasi (kWh/m² /hari)

I_o = standard iradiasi ($1 \text{ kW}/m^2$)

Cf = faktor koreksi temperatur ($1,1 - 1,5$)

Dimana E_o : energi yang ingin diproduksi (kWh), H : tingkat radiasi matahari di lokasi (kWh/m^2 /hari), I_o : standard iradiasi ($1 \text{ kW}/m^2$), H : efisiensi sistem modul (%), Cf : faktor koreksi temperatur ($1,1 - 1,5$), PSH : *peak sun hour* (jam/hari) minimum dalam periode, η_{sm} : efisiensi total sistem (Sianipar, 2017).

Untuk menghitung luas area instalasi PLTS array dapat menggunakan persamaan berikut: (Bagus Widyo Astomo et al., 2022)

$$PV \text{ Area} = \frac{E_L}{G_{AV} \times N_{pv} \times TCF \times n_{out}} \quad (2.2)$$

Dengan:

E_L = Besar pemakaian energy per hari (kWh/hari).

G_{AV} = Insolansi harian matahari rata-rata (kWh/m^2).

N_{pv} = Besar efisiensi panel surya.

TCF = *Temperature Correction Factor*.

n_{out} = Indeks efisiensi converter yang digunakan.

Untuk menghitung daya yang dihasilkan oleh PLTS ditunjukkan dengan persamaan berikut

$$P \text{ Watt Peak} = \text{Area array} \times PSI \times n_{pv} \quad (2.3)$$

Dengan:

PSI = *Peak Solar Insolation* bernilai $1000\text{W}/\text{m}^2$

n_{pv} = Efisiensi Panel Surya.

Untuk menghitung energy yang dihasilkan dari *array* dengan PSH (*peak Sun Hour*) ditunjukkan dengan persamaan berikut; (Bien Kasim dan Wibowo, 2008:41 pada buku Mark Hankins, 1991:68)

$$PSH = \frac{G_{av}}{I_{r_{STC}}} \quad (2.4)$$

$$E_{out} \times PSH \times \text{rugi-rugi system} \quad (2.5)$$

Dengan:

E_{out} = Energi yang dihasilkan system (kWh)

PSH = *Peak Sun Hour*

rugi-rugi daya = Rugi-rugi system

2.5.2 Inverter

Inverter adalah alat elektronik yang mengubah daya aliran searah (Direct Current) dari baterai atau papan sel berbasis tenaga matahari menjadi aliran listrik bolak-balik (*Alternating Current*). Pemanfaatan Inverter dari dalam Pembangkit Listrik (PLTS) bermanfaat untuk memperbesar tegangan 220 Volt AC, misalnya berguna untuk berbagai perangkat keras elektronik seperti PC, peralatan korespondensi, TV, dan sebagainya. dimanfaatkan untuk perangkat keras elektronik rumah tangga dan semua tempat yang membutuhkan penguatan (power) yang

mempunyai kemampuan untuk menggantikan aset kelistrikan PLN (Irawati et al., 2023).

Cara kerja inverter mengkonversi arus listrik DC (searah) menjadi arus listrik AC (bolak-balik) yaitu dengan cara arus DC di *chop* (diputus-putus) dengan frekuensi tinggi, lalu diformat menjadi gelombang kotak(*square wave*) lalu dilewatkan ke filter dan transformer untuk membentuk gelombang sinus AC murni (*pure sine wave*)



Gambar 2. 5 Inverter (Energi, 2021)

2.5.3 Battery

Baterai adalah suatu proses yang dapat menyimpan dan melepaskan energi listrik. Baterai pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) mendapatkan sumber energi dari proses perubahan sinar matahari menjadi energi listrik yang terjadi dipanel surya (*photovoltaic*). Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) akan

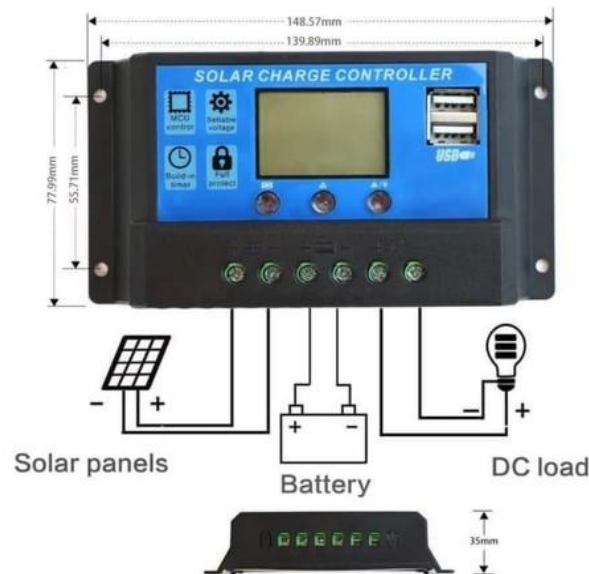
bekerja ketika panel surya menerima sinar matahari, hal ini menjadi kendala ketika sinar matahari sebagai sumber energi pada malam hari sudah tidak tersedia. Hal ini dapat diatasi ketika pada siang hari maka listrik yang dihasilkan oleh panel surya akan disimpan pada baterai menggunakan *Charge Controller*, dan ketika malam hari energi yang disimpan pada baterai dapat digunakan (Ridwan et al., 2021).

2.5.4 Solar Charge Controller

Solar Charge Controller adalah peralatan elektronik yang digunakan untuk mengatur *overcharging* (kelebihan pengisian karena baterai sudah penuh). Kelebihan voltase dan pengisian akan mengurangi umur baterai. Jadi, tanpa *Solar Charge Controller*, baterai akan rusak oleh *overcharging* dan ketidakstabilan tegangan (Saputra & Kiswantono, 2020).

Beberapa fungsi detail dari *Solar Charge Controller* adalah sebagai berikut:

1. Mengatur arus untuk pengisian ke baterai, menghindari *overcharging*, dan *overvoltage*.
2. Mengatur arus yang dibebaskan/ diambil dari baterai agar baterai tidak *'full discharge'*, dan *overloading*.
3. *Monitoring* temperatur baterai
4. Umumnya menjaga baterai pada kondisi tegangan penuh.



Gambar 2. 6 *Solar Charge Controller* (Market, 2015)

2.6 Komponen Pendukung Pembangkit Listrik Tenaga Surya

2.6.1 Alat Proteksi dan Keamanan

MCB (*Miniature Circuit Breaker*) adalah bagian instalasi listrik yang berfungsi sebagai pengaman dalam instalasi listrik apabila terjadi beban berlebih atau arus hubung singkat. MCB berfungsi sebagai pengaman sekaligus pembatas daya pada pelanggan, MCB ini bekerja dengan mendeteksi arus yang melewatinya, sehingga apabila arus yang melewati MCB melebihi arus nominal yang tertera maka MCB akan trip. Oleh karena itu MCB yang dipasang oleh PLN disesuaikan dengan kapasitas daya dari permintaan pelanggan. Sebelum dipasang pada IML pelanggan, MCB harus dikalibrasi terlebih dahulu untuk mengetahui bahwa MCB sudah bekerja sesuai dengan standar PLN. Jika MCB tidak berfungsi

dengan benar maka hasil pengukuran dan pembatasan arus tidak sesuai dengan daya kontrak (Ummah et al., 2022).



Gambar 2. 7 MCB (*Miniature Circuit Breaker*) (Jiuces, 2024)

2.6.2 Box Panel

Box panel adalah perangkat yang mengelompokkan string PV yang masuk sesuai dengan jumlah instalasi PV untuk mencapai arus keluaran yang tinggi. Ada total tiga hingga dua puluh empat string input yang dapat diakomodasi oleh kotak penghubung. Kita dapat menyesuaikan tegangan sesuai kebutuhan dan membuatnya lebih mudah untuk dirawat dengan rakitan kotak penggabung, mencegah korsleting setelah pemutus sirkuit diperbaiki pelindung lonjakan arus memberikan perlindungan paling besar, terutama terhadap petir dan tegangan lebih akibat listrik statis (Naksabandi, 2018).



Gambar 2. 8 Box Panel (lite electricGrand, 2023)

2.6.3 Kabel Penghantar

Untuk menghubungkan bagian-bagian dalam PV yang lebih kecil dari kerangka yang diharapkan, diperlukan tautan. Kabel konduktor biasanya memiliki lapisan pelindung PVC atau tembaga ketika tujuan utamanya adalah untuk menghantarkan listrik. Semakin besar diameter kawat, semakin kecil nilai resistansinya. Saat memilih kabel konduktor, Anda harus memperhatikan spesifikasi kabel untuk mengurangi kemungkinan kerugian. Karena konduktor kabel di PV biasanya tidak melebihi tegangan pengenalan yang digunakan, tegangan pengenalan harus dipertimbangkan. Saat memilih kabel, luas penampang harus diperhatikan dengan mengacu pada kuat hantar arus (KHA) (Naksabandi, 2018).

2.7 Metode analisis kelayakan investasi dan perhitungan teknis

2.7.1 *Performance Ratio*

Performance Ratio atau rasio unjuk kerja merupakan tingkat performa dan kualitas suatu system PLTS, biasanya dinyatakan dalam bentuk persentase, *Performance Ratio* dikatakan layak berada pada persentase 70%-90%

(Ramadhan et al., 2021) secara matematis rasio unjuk kerja ini dirumuskan sebagai berikut;

$$PR = \frac{E_{OUT}}{E_{IDEAL}} \times 100\% \quad (2.6)$$

Dimana:

$$E_{IDEAL} = P_{PV} \times H_{TILT}$$

Dengan:

$$E_{OUT} = \text{Energi yang dihasilkan system (kWh)}$$

$$E_{IDEAL} = \text{Energi yang dihasilkan tanpa losses (kWh)}$$

$$H_{TILT} = \text{Rata – rata iradiasi harian (kWh/m}^2\text{)}$$

2.7.2 *Net Present Value (NPV) / Net Present Worth (NPW)*

Dengan Metode ini kelayakan suatu investasi awal atau pemilihan berbagai alternatif, semua proyeksi *cash flow* pada masa depan diharuskan dinyatakan pada nilai sekarnag yang ekivalen dengan besar tingkat suku bunga. Analisis nilai sekarang (*Present Worth Analysis*) paling sering digunakan untuk menentukan nilai tunai penerimaan dan pencairan uang di masa depan. Jika pendapatan masa depan dan biaya diketahui, menggunakan tingkat bunga yang sesuai, nilai sekarang dapat dihitung. Di dalam kasus, konsekuensi dari setiap alternatif harus dipertimbangkan untuk periode waktu.

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{NCF_t}{(1-i)^t} - II \quad (2.7)$$

Dengan;

II = Investasi Awal (Initial Investment).

i = tingkat diskonto

n = periode dalam tahun (umur investasi).

Kriteria pengambilan keputusan yang diambil akan tergantung kepada situasi pemilihan alternatif investasi, yaitu sebagai berikut :

Net PV < 0 (negatif) = Tolak Investasi.

Net PV > 0 (positif) = Terima Investasi.

2.7.3 *Present Worth Factor (PWF)*

Present worth factor adalah perhitungan yang digunakan untuk mengetahui nilai dari seluruh biaya pemeliharaan tahunan selama sistem digunakan pada tahun ke sekian dengan menggunakan..

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

Dengan: PWF *Present Worth Factor*

r Tingkat bunga bank

n Jumlah tahun

2.7.4 *Discounted Payback Period (DPP)*

Discounted Payback period merupakan suatu metode untuk mengetahui berapa lama investasi modal akan kembali atau berapa lama waktu yang diperlukan kembali pengeluaran investasi Persamaan *payback period* jika aliran

kas dari rencana investasi suatu proyek sama jumlahnya pada setiap tahun terlihat pada Persamaan berikut.

$$\text{Discounted Payback Period} = \frac{\text{Initial Investment}}{NCF} \quad (2.8)$$

Discounted Payback period adalah periode lamanya waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan nilai investasi melalui penerimaan-penerimaan yang dihasilkan oleh proyek. *Discounted payback period* (DPP) adalah periode pengembalian uang yang dihitung dengan menggunakan *discount factor*. DPP dapat dicari dengan menghitung berapa tahun alur kas bersih nilai sekarang kumulatif yang ditaksir akan sama dengan investasi awal. Kriteria pengambilan keputusan apakah proyek yang ingin dijalankan layak atau tidak layak untuk metode ini adalah Investasi proyek akan dinilai layak apabila DPP memiliki periode waktu lebih pendek dari umur proyek.

2.7.5 Biaya Operasional dan Pemeliharaan

$$\text{O\&M cost total} = (1\% \text{ dari Initial Investment}) \times 25 \text{ tahun} \quad (2.9)$$

Dengan;

O&M cost = Biaya Operasional dan Pemeliharaan.

25 tahun = masa pakai PLTS

(1% dari *Initial Investment*) = hasil dari 1% dari *initial invest*

2.7.6 Life Cycle Cost Analysis (LCCA)

Life Cycle Cost (LCC) adalah jumlah total biaya yang dikeluarkan selama siklus hidup suatu sistem, produk, atau proyek, mulai dari perencanaan dan pengadaan, instalasi, operasi, pemeliharaan, hingga penghapusan atau

pembongkaran. LCC digunakan untuk menilai efisiensi ekonomi jangka panjang dari suatu sistem, dan bukan hanya biaya awal (*initial cost*). Ini sangat penting terutama untuk proyek infrastruktur, sistem energi (seperti PLTS), dan peralatan industri.

$$LCC = C + O\&M + R \quad (2.11)$$

Dimana:

LCC	: <i>Life Cycle Cost</i>
C	: Biaya investasi awal
$O\&M$: Operasional dan pemeliharaan
R	: Penggantian komponen

Biaya yang dikeluarkan selama periode hidup proyek, akan berbeda dari tahun ke tahun berikutnya. Untuk menghitung biaya yang sesuai dengan laju suku bunga bank Indonesia, digunakan persamaan berikut:

$$O\&M = O\&M_p \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad (2.12)$$

Dimana:

$O\&M$: Biaya <i>present value</i> $O\&M$
$O\&M_p$: Biaya $O\&M$ pertahun
n	: lama <i>lifetime</i> proyek
i	: tingkat bunga bank

Untuk tingkat bunga bank yang digunakan diambil dari aturan yang telah ditetapkan oleh Bank Indonesia yaitu sebesar 6%.

2.7.7 *Cash Flow Analysis (CFA).*

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

Cash Flow Benefit (CFB)

Cash Flow Benefit adalah aliran uang yang masuk di setiap tahun selama sistem berjalan.

$$CFB = \sum_{t=0}^n Cost(1 + i) \quad (2.13)$$

Cash Flow Cost (CFC)

$$CFC = \sum_{t=0}^n investasi - PWF \quad (2.14)$$

2.8 Menghitung kapasitas dan komponen PLTS atap

Untuk mengetahui rencana luasan yang akan dibangunnya plts, hal utama yang menentukan adalah luas areayang digunakan untuk mendapatkan penyusunan array yang tepat dan tidak memakan tempat yang berlebihan menggunakan persamaan berikut.

$$\text{Luas array} = \frac{ET}{Gav \times nPV \times FKT \times n \text{ out}} \quad (2.15)$$

Dengan:

Luas array = Luas permukaan array panel surya (m^2)

E_T = Total pemakaian energy (kWh/hari)

G_{av} = Intensitas Radiasi Matahari ($kWh/m^2/hari$)

n_{PV} = Efisiensi Panel Surya (%)

n_{out} = Efisiensi keluaran system (%)

FKT = Faktor Koreksi Temperatur (%)

Setelah mendapatkan nilai luas array modul surya, nilai PSI di Indonesia ($1000W/m^2$), dan nilai efisiensi panel surya yang akan digunakan. Untuk mengetahui besar kapasitas daya maksimum pembangkit yang akan dibangkitkan digunakan persamaan berikut.

$$P_{wattpeak} = \text{Luas array} \times \text{PSI} \times n_{PV} \quad (2.16)$$

Dengan:

$P_{wattpeak}$ = Daya yang akan dibangkitkan PLTS (wp)

PSI = *Peak Solar Insulation* ($1000W/m^2$)

Kapasitas daya maksimal panel surya ditentukan berdasarkan spesifikasi pabrikan untuk tipe modul surya yang diinginkan agar dapat memasok daya maksimal yang dapat dibangkitkan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\text{Jumlah panel} = \frac{P_{wattpeak}}{P_{max}} \quad (2.17)$$

P_{max} = Kapasitas Daya maksimal panel surya (Wp)

Untuk menghitung kapasitas kebutuhan *Solar Charge Controller*, maka harus diketahui terlebih dahulu karakteristik dan spesifikasi dari panel surya yang ingin digunakan. Berikut persamaan untuk menghitung kapasitas kebutuhan *Solar Charge Controller*:

$$\text{Kapasitas SCC} = \frac{P_{\text{mpp}} \times \text{Safety Factor}}{iV_{\text{mpp}}} \quad (2.18)$$

Dengan:

P_{mpp} = Daya keluaran maksimum panel surya.

V_{mpp} = Tegangan keluaran maksimum panel surya.

Safety Factor = Faktor keamanan (1,25 atau 125%)

Untuk menghitung kapasitas Inverter yang digunakan, maka total kebutuhan maksimum dikalu dengan 1,25 atau 125%. Pertimbangan memilih inverter supaya sesuai dengan kebutuhan maka menggunakan persamaan berikut.

$$\text{Kapasitas Inverter} = P_{\text{mpp}} \times \text{Safety Factor} \quad (2.19)$$

Dengan

P_{mpp} = Daya keluaran maksimum panel surya

Safety Factor = Faktor keamanan (1,25 atau 125%)

Menentukan kapasitas optimal sistem PLTS atap ada dua input data yaitu energi harian siang dan data iradiasi matahari setempat (kWh/kWp) menggunakan persamaan berikut

$$\text{Kapasitas (kWp)} = \frac{\text{Rata-rata energi harian siang}}{\text{PV out harian}} \quad (2.20)$$

Menghitung daya puncak system ada dua input data yaitu kapasitas optimal PLTS atap dan rata-rata rugi-rugi system (%) menggunakan persamaan berikut

$$\text{Daya puncak} = \text{kapasitas optimal} + (\text{kapasitas optimal} \times \text{rugi-rugi sistem}) \quad (2.21)$$

Menghitung kebutuhan jumlah modul surya ada dua input data yaitu daya puncak system PLTS atap dan daya output pemodul surya menggunakan persamaan berikut

$$\text{Jumlah modul} = \frac{\text{Daya puncak sistem PLTS atap}}{\text{Wp/modul}} \quad (2.22)$$

Menghitung luas area efektif modul surya ada dua input data nilai efisiensi modul surya dan puncak system PLTS atap menggunakan persamaan berikut

$$\text{Luas area} = \frac{\text{kWp}}{\text{Efisiensi modul surya}} \quad (2.23)$$

Dalam memilih inverter sesuai daya yang terpasang ada dua input data yaitu daya puncak system PLTS atap dan daya yang tersambung pelanggan saat ini

$$\text{Jumlah Inverter} = \frac{\text{Daya yang tersambung}}{\text{Kapasitas Inverter}} \quad (2.24)$$

Luas atap yang dibutuhkan dalam pemasangan panel surya menggunakan persamaan berikut;

$$\text{Luas atap modul surya} = 1 \text{ unit dimension PV} \times \text{jumlah panel surya} \quad (2.25)$$

Orientasi dan kemiringan modul surya untuk mencari orientasi PV modul dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut;

$$\alpha = 90^\circ - \text{lat} + \delta \text{ (N hemisphere)} \quad (2.26)$$

Dengan:

Lat = (*latitude*) atau garis lintang lokasi.

δ = sudut deklinasi matahari (23,45)

Untuk menghitung keuntungan yang didapatkan oleh PLTS selama 25 tahun dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut;

$$\text{Keuntungan} = \text{cash in} - \text{cash out} \quad (2.27)$$

2.9 Penelitian terkait

Pada penelitian ini perencanaan PLTS *Off grid* menggunakan *PVsyst* sudah banyak dilakukan sebelumnya. Beberapa penelitian yang terkait dengan penulis terdapat pada **Tabel 2.1**

Tabel 2. 1 Penelititan Terkait

No	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat Penelitian	Pembahasan Jurnal
1.	Perancangan PLTS Atap di	Krisda Bimas Persada, I	Kampus Sekolah Tinggi	Jurnal ini membahas perancangan

Kampus Sekolah Tinggi Ekonomi Widya Gama Lumajang	Nyoman Setiawan dan I Wayan Arta Wijaya,	Ekonomi Widya Gama Lumajang	Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap di Kampus Sekolah Tinggi Ilmu Ekonomi Widya Gama Lumajang. PLTS ini memanfaatkan energy matahari untuk menghasilkan energy listrik dengan luas atap gedung kampus sebesar 2698,4 m^2 . Desain Sistem menggunakan 100 modul surya tipe Vertex TSM- DE18M(II) 500Wp dan 1 unit Inverter <i>SUNNY TRIPOWER</i> <i>CORE1</i> dengan kapasitas 53Kva. Proyeksi produksi
---	---	-----------------------------------	--

				<p>listrik mencapai 83.322,2 kWh/tahun untuk menyuplai daya listrik ke kampus.</p> <p>Modal Investasi sebesar Rp.567.005.500 dengan biaya pemeliharaan 1% dari investasi dan <i>payback period</i> diperkirakan selama 14 tahun 8 bulan dengan inflasi 4,25%. Jurnal ini menunjukkan potensi penggunaan energy</p>
2.	<p>Simulasi Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Gedung Advance Research</p>	<p>Marcel Bonifacio Tirta Wijata</p>	<p>Gedung <i>Advance Research Laboratory</i> Universitas Udayana</p>	<p>Penelitian ini mengevaluasi desain dan kinerja sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) atap di Gedung Advanced Research</p>

	Laboratory Universitas Udayana			Laboratory Universitas Udayana menggunakan perangkat lunak <i>PVsyst</i> . Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem dapat menghasilkan energi efektif sebesar 156.18 MWh/tahun dan energi yang diumpankan ke jaringan sebesar 153.83 MWh/tahun. Parameter kinerja mencakup iradiasi horizontal global tahunan sebesar 2014.6 kWh/m ² dan rasio kinerja (PR) tahunan sekitar 78.5%. Kerugian daya disebabkan oleh
--	--------------------------------------	--	--	--

				<p>ketidakcocokan modul dan efisiensi inverter. Penelitian ini menyoroti pentingnya energi surya dalam mengurangi emisi gas rumah kaca dan meningkatkan ketahanan energi di Indonesia, serta menunjukkan bahwa sistem PLTS yang dirancang layak dan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pasokan energi.</p>
3.	<p>Perencanaan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya <i>Off-grid</i></p>	<p>Deni herliyanto, Ojak Abdul Rojak</p>	<p>Perpustakaan Universitas Pamulang</p>	<p>Perencanaan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid untuk suplai daya perpustakaan Universitas Pamulang</p>

	Sebagai Suplai Daya Listrik Perpustakaan Universitas Pamulang			telah dianalisis secara teknis dan ekonomis menggunakan perangkat lunak <i>PVSyst</i> , <i>Homer</i> , dan ETAP. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem PLTS yang dirancang mampu menghasilkan energi sebesar 4.045,2 kWh/tahun dengan rasio kinerja (<i>performance ratio</i>) sebesar 111,5% serta solar fraction sebesar 2,3%. Dari segi ekonomi, analisis menggunakan <i>Homer</i> menunjukkan nilai <i>Net Present Value</i> (NPV) sebesar Rp 5.615.443.996, nilai
--	---	--	--	--

				<p><i>Cost of Energy</i> (COE) Rp 2.316,83/kWh, dan <i>Benefit-Cost Ratio</i> (BCR) sebesar 39,25. Selain itu, nilai <i>Life Cycle Cost</i> (LCC) sebesar Rp 639.942.945 serta <i>Capital Recovery Factor</i> (CRF) 0,0837 menunjukkan bahwa proyek ini layak secara ekonomi.</p> <p>Analisis aliran daya menggunakan ETAP menunjukkan bahwa energi listrik yang dihasilkan dari panel surya dan mengalir ke inverter adalah sebesar 2,666 kW dengan arus sebesar 6,9 A. Berdasarkan</p>
--	--	--	--	--

				<p>seluruh hasil analisis teknis dan ekonomi, dapat disimpulkan bahwa perencanaan PLTS off-grid untuk perpustakaan Universitas Pamulang layak untuk diimplementasikan karena mampu memenuhi kebutuhan daya beban dan memberikan keuntungan finansial dalam jangka panjang.</p>
4.	<p>Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terpusat OFF-GRID System Pada</p>	<p>Yanolanda S, Muhamad H J, Adhadi K, Bambang Istijono</p>	<p>Gedung LAB Terpadu II Fakultas Teknik Universitas Bengkulu</p>	<p>Penelitian ini merancang sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) <i>Off grid</i> untuk Gedung Laboratorium Terpadu II Fakultas</p>

	<p>Gedung LAB Terpadu II Fakultas Teknik Universitas Bengkulu.</p>			<p>Teknik Universitas Bengkulu sebagai pusat energi terbarukan. Hasil analisis menunjukkan bahwa gedung ini memiliki total beban listrik sebesar 17.496 W yang tersebar di empat lantai, dengan variasi penggunaan lampu, AC, dan komputer.</p> <p>Perancangan PLTS <i>Off Grid</i> dilakukan dengan menggunakan 324 panel surya yang dipasang secara seri dan paralel, 184 baterai 12V 100Ah, <i>solar charge controller</i> dengan</p>
--	--	--	--	--

				<p>kapasitas 311A, dan inverter berkapasitas 2 kW. Simulasi dengan perangkat lunak HOMER menunjukkan bahwa sistem ini mampu menghasilkan daya maksimal sebesar 44.000 W, cukup untuk memenuhi kebutuhan listrik gedung laboratorium.</p> <p>Dari segi ekonomi, hasil simulasi menunjukkan biaya produksi listrik (<i>Cost of Energy/COE</i>) sebesar Rp 4.139,89/kWh, dengan total modal awal Rp 475.057.377</p>
--	--	--	--	--

				<p>dan nilai <i>Net Present Value</i> (NPV) sebesar Rp 488.131.500.</p> <p>Dengan hasil ini, PLTS off-grid yang dirancang terbukti layak untuk diimplementasikan sebagai sumber energi terbarukan yang dapat mengurangi ketergantungan terhadap jaringan listrik utama serta meningkatkan efisiensi penggunaan energi di Universitas Bengkulu.</p>
5.	Perencanaan PLTS atap off grid rumah sakit dharma kerti di desa	I Putu Sutaryasa	rumah sakit dharma kerti di desa dauh peken tabanan	<p>Berdasarkan hasil perhitungan dan simulasi menggunakan perangkat lunak</p>

	<p>dauh peken</p> <p>tabanan</p> <p>menggunakan</p> <p>software</p> <p>PVsyst</p>			<p><i>PVsyst</i>, perancangan</p> <p>PLTS atap dengan</p> <p>sistem off-grid untuk</p> <p>Rumah Sakit Dharma</p> <p>Kerti telah berhasil</p> <p>dilakukan. Sistem ini</p> <p>menggunakan 24</p> <p>panel surya LONGI</p> <p>LR5-72HPH 550M</p> <p>dengan kapasitas</p> <p>masing-masing 550</p> <p>Wp yang disusun</p> <p>dalam 4 string dengan</p> <p>konfigurasi seri 6 unit</p> <p>per string. Sistem ini</p> <p>juga menggunakan 1</p> <p>inverter Growatt</p> <p>MOD 9000TL3-X</p> <p>serta 10 unit baterai</p> <p>Shoto 100Ah 48V</p> <p>yang dirangkai seri</p> <p>sebanyak 5 unit. Hasil</p> <p>simulasi</p>
--	---	--	--	--

				<p>menunjukkan bahwa sistem PLTS ini mampu menghasilkan energi sebesar 16.375,05 kWh per tahun dan dapat menopang sekitar 42% kebutuhan listrik di rumah sakit. Dari analisis ekonomi, sistem ini memiliki <i>Life Cycle Cost</i> (LCC) sebesar Rp 542.061.917, yang mencakup biaya investasi awal, biaya operasi dan pemeliharaan, serta penggantian inverter dan baterai selama 25 tahun. Perhitungan ekonomi menunjukkan bahwa</p>
--	--	--	--	---

				<p>sistem ini memiliki <i>Net Present Value</i> (NPV) sebesar Rp 49.248.477,25, <i>Internal Rate of Return</i> (IRR) sebesar 9,09%, serta <i>Payback Period</i> selama 9 tahun 7 bulan. Dengan hasil tersebut, perencanaan PLTS <i>Off Grid</i> di Rumah Sakit Dharma Kerti dikategorikan layak (<i>feasible</i>) untuk diimplementasikan sebagai solusi energi terbarukan yang dapat mengurangi ketergantungan pada listrik konvensional serta meningkatkan efisiensi energi rumah sakit.</p>
--	--	--	--	--

6.	Perencanaan PLTS off grid di PT.Tirta Samudra Bali menggunakan sunny design	Anak Gunung Gede Agung Pradnyana Putra	PT. Tirta Samudra Bali	Jurnal ini membahas tentang perencanaan plts pada PT. Samudra bali dengan menggunakan data meteorologi dan profil beban energi. Rata-rata iradiasi matahari sebesar 5,325 kWh/m ² /day menjadi dasar dalam menghitung kapasitas baterai dan kebutuhan energi. Diperlukan 122 panel surya Maysun MS510MB- 50H dengan daya total 44.860,62 Wp untuk memenuhi kebutuhan listrik, terutama bagi pompa sirkulasi. Hasil simulasi
----	--	--	---------------------------	--

				<p>menunjukkan bahwa sistem PLTS ini mampu menghasilkan total energi sekitar 99.412 kWh per tahun, dengan puncak produksi terjadi pada bulan Oktober (9.476 kWh) dan produksi terendah di bulan Januari (7.070 kWh). Energi ini sebagian besar digunakan langsung, sementara sebagian lainnya disimpan dalam baterai untuk penggunaan malam hari atau saat cuaca mendung. Dari segi ekonomi, proyek ini membutuhkan investasi awal sebesar</p>
--	--	--	--	--

				<p>Rp 953.346.518, dengan biaya operasional dan pemeliharaan sekitar Rp 7.513.944 per tahun. Namun, dengan tarif listrik PLN Rp 972/kWh, analisis ekonomi menunjukkan bahwa proyek ini belum menguntungkan. Nilai Net Present Value (NPV) sekitar -Rp 256.693.242 dan Profitability Index (PI) sebesar 0,491, yang berarti investasi ini belum layak secara finansial. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa</p>
--	--	--	--	---

				<p>penerapan PLTS Off-Grid memiliki potensi dalam penyediaan energi terbarukan, tetapi perlu kajian lebih lanjut untuk meningkatkan kelayakan ekonominya.</p>
7.	<p>Perencanaan pembangkit listrik tenaga surya rooftop pensuplai kandang ayam pedaging dengan system on grid di desa tegalharjo trangkil pati</p>	<p>Ahmad Firna Nariyana, Ida Widiastuti, dan Dedi Nugroho.</p>	<p>desa tegalharjo trangkil pati</p>	<p>Jurnal ini membahas perencanaan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) on-grid untuk kandang ayam broiler di Desa Tegalharjo Trangkil, Pati. Tujuan penelitian adalah untuk mengukur konsumsi listrik di kandang, menentukan kapasitas panel surya berdasarkan luas atap,</p>

				<p>dan merancang sistem PLTS yang memenuhi kebutuhan listrik dengan pola pembebanan 50% dari PLTS dan 50% dari PLN. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kebutuhan daya listrik di kandang ayam adalah 12,15 kW, yang dapat dipenuhi dengan 30 panel surya berkapasitas 405 Wp. Rata-rata iradiasi matahari di lokasi penelitian adalah 5,43 kWh/m²/hari, dengan nilai terendah di bulan Januari (4,38 kWh/m²/hari). Dokumen ini juga menjelaskan tiga jenis</p>
--	--	--	--	--

				<p>sistem PLTS: <i>Off-Grid, On-Grid, dan Hybrid</i>, serta komponen utama dari sistem PLTS On-Grid. Metode penelitian mencakup pengumpulan data iradiasi matahari dan konsumsi energi, dengan konsumsi energi di kandang ayam broiler mencapai 2.601,6 kWh per bulan. Desain sistem memastikan pemanfaatan energi surya secara optimal di kandang ayam.</p>
8.	Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga	Ramadhan dan Rangkuti.	Gedung Harry Hartanto	<p>Dokumen ini membahas analisis biaya dan investasi</p>

	<p>Surya Di Atap Gedung Harry Hartanto Universitas Trisakti.</p>		<p>Universitas Trisakti.</p>	<p>untuk pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Indonesia, khususnya di atap Gedung Harry Hartanto Universitas Trisakti. Total biaya investasi awal untuk PLTS adalah Rp 2.869.777.544, dengan biaya pemeliharaan dan operasional tahunan sebesar Rp 28.697.775. Jika panel surya memiliki usia 25 tahun, total biaya pemeliharaan selama periode tersebut mencapai Rp 717.444.375, sehingga total</p>
--	--	--	----------------------------------	---

				<p>investasi menjadi Rp 3.587.221.919.</p> <p>Pendapatan tahunan dari PLTS diperkirakan sebesar Rp 426.504.325, dengan Pay Back Period (PP) sekitar 8 tahun 5 bulan. Net Present Value (NPV) dari investasi ini positif, menunjukkan bahwa proyek ini layak dan menguntungkan.</p> <p>PLTS ini direncanakan menggunakan 312 panel surya berkapasitas 300 WP dan 5 inverter berkapasitas 20 kW, dengan daya output</p>
--	--	--	--	---

				<p>yang dihasilkan diperkirakan mencapai 131.232,1 kWh per tahun. Proyek ini diharapkan dapat memenuhi kebutuhan energi dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.</p>
--	--	--	--	---