

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konsep Energi Terbarukan

Energi terbarukan merupakan sumber energi yang berasal dari proses alam yang dapat diperbarui secara berkelanjutan, seperti energi matahari, angin, air, biomassa, dan panas bumi. Berbeda dengan energi fosil yang bersifat terbatas dan berdampak negatif terhadap lingkungan melalui emisi gas rumah kaca, energi terbarukan dapat dimanfaatkan secara terus-menerus tanpa mengalami penurunan signifikan dalam jangka panjang.

Meningkatnya kebutuhan energi listrik di Indonesia mendorong perlunya pemanfaatan sumber energi baru terbarukan yang tersedia melimpah di alam sebagai alternatif pengganti energi konvensional [15]. Potensi energi surya Indonesia sangat besar dengan rata-rata radiasi harian 4,8 kWh/m²/hari, namun pemanfaatannya baru mencapai sekitar 0,3% dari total potensi teknis yang tersedia [3].

2.1.1 Pemanfaatan Energi Matahari sebagai Sumber Listrik

Energi matahari dapat dimanfaatkan sebagai sumber listrik melalui teknologi fotovoltaik (*Photovoltaic*/PV). Teknologi ini menggunakan sel surya yang terbuat dari material semikonduktor untuk mengubah energi cahaya matahari secara langsung menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Sistem PLTS terdiri dari beberapa komponen utama: modul surya, *Solar Charge Controller* (SCC), baterai (untuk sistem *off-grid*), dan beban listrik.

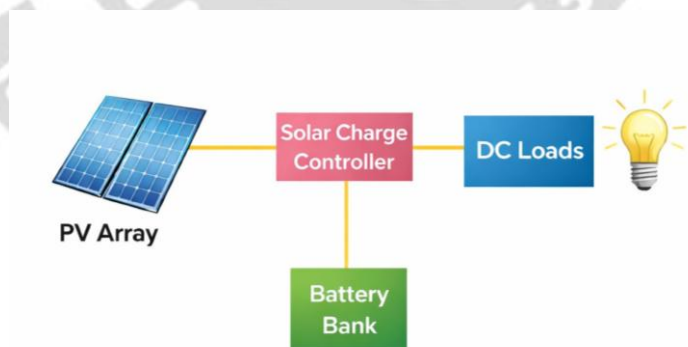
Pemanfaatan PLTS di Indonesia terus mengalami peningkatan dalam beberapa tahun terakhir sebagai bagian dari upaya transisi menuju energi bersih. Meskipun potensi energi surya sangat besar, pemanfaatannya masih relatif kecil dibandingkan dengan potensi yang tersedia. Hingga beberapa tahun terakhir, kapasitas terpasang pembangkit listrik tenaga surya masih berada pada skala ratusan megawatt, sehingga pengembangannya masih memiliki peluang yang sangat besar di masa mendatang [16].

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem konversi energi yang mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik melalui prinsip efek fotovoltaiik. Mengingat posisi geografisnya, Indonesia memiliki potensi energi matahari yang signifikan. Berdasarkan data radiasi matahari dari 18 titik di Indonesia, penyinaran matahari di Kawasan Barat Indonesia rata-rata 4,5 kWh/m²/hari dengan fluktuasi bulanan sekitar 10%. Di Kawasan Timur Indonesia, radiasi matahari rata-rata 5,1 kWh/m²/hari dengan fluktuasi bulanan sekitar 9%. Dengan data tersebut, penyinaran matahari untuk seluruh Indonesia adalah sekitar 4,8 kWh/m²/hari dengan fluktuasi bulanan sekitar 9%.

Matahari memancarkan energi ke permukaan bumi dengan intensitas yang besar. Saat cuaca cerah, sekitar 1.000 W energi matahari diterima setiap meter persegi permukaan bumi. Hanya sekitar 30% dari energi ini yang dipantulkan kembali ke angkasa sedangkan sisanya dikonversi menjadi panas, digunakan untuk berbagai proses alami di bumi, atau disimpan melalui proses fotosintesis oleh tumbuhan yang kemudian berkontribusi pada formasi bahan bakar fosil seperti batubara dan minyak bumi [17].

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya *Off Grid*



Gambar 2. 1 Sistem PLTS *Off Grid*. [18]

Sistem PLTS *off-grid* atau sistem PV mandiri (*standalone*) memanfaatkan radiasi matahari untuk memproduksi listrik secara mandiri melalui modul fotovoltaiik. Tidak seperti sistem *on-grid*, sistem *off-grid* tidak memerlukan konektivitas dengan jaringan listrik PLN karena menyimpan energi yang diproduksi

ke dalam baterai [4]. Konfigurasi ini memungkinkan sistem tetap beroperasi tanpa gangguan saat terjadi pemadaman pada jaringan utama, sehingga cocok untuk kebutuhan industri, daerah terpencil, maupun pengujian mandiri.

2.3 Komponen Sistem PLTS

2.3.1 Modul Surya

Modul surya merupakan perangkat yang terdiri dari beberapa sel fotovoltaik yang memanfaatkan efek fotovoltaik untuk mengubah energi cahaya matahari secara langsung menjadi energi listrik. Sel surya umumnya terbuat dari bahan semikonduktor silikon, yang dilengkapi elektroda positif dan negatif. Struktur p-n junction pada sel surya membentuk medan listrik internal yang memisahkan pasangan elektron dan hole saat foton diserap, menghasilkan arus listrik [6].



Gambar 2. 2 Modul Panel Surya. [27]

2.3.1.1 Jenis-jenis Modul Surya

Modul surya memiliki beberapa jenis yang dimana jenis-jenis panel surya tersebut adalah *Monocrystalline Silicone*, *polycrystalline Silicone*, dan *Thin Film Solar Cell*.



Gambar 2. 3 Jenis - jenis panel surya *monocrystalline*, *polycrystalline*, dan *thin-film solar panel*. [28]

- *Monocrystalline Silicone*

Modul surya *monocrystalline* merupakan jenis sel surya yang dibuat dari batangan kristal silikon murni tunggal yang diiris tipis. Modul ini dirancang khusus untuk penggunaan di lokasi yang memerlukan konsumsi listrik besar serta area dengan iklim ekstrem. Modul monokristalin memiliki tingkat efisiensi komersial tertinggi, yaitu antara 12% hingga 14% [6]. Namun, karakteristik panel ini cenderung sangat rentan terhadap bayangan (*shading*) apabila salah satu sel surya terhalang bayangan, kinerja keseluruhan panel dapat mengalami penurunan secara drastis.
- *Polikristalin (Poly-Crystalline)*

Polycrystalline silicone terbuat dari banyak batang kristal silikon yang dicairkan bersamaan kemudian dimasukkan ke dalam cetakan berbentuk persegi. Tingkat kemurnian silikonnya lebih rendah dibandingkan tipe monokristalin. Akibatnya, jenis ini membutuhkan luas permukaan yang lebih besar untuk menghasilkan daya listrik yang setara. Efisiensi modul polikristalin berkisar antara 10% hingga 12%, namun menawarkan keunggulan berupa harga yang lebih ekonomis [6].
- *Thin Film Solar Cell*

Thin Film Solar Cell merupakan jenis sel surya ini diproduksi dengan cara

menambahkan satu atau lebih lapisan tipis material fotovoltaik (seperti silikon amorf atau kadmium tellurida) ke atas lapisan dasar wafer. Karakteristik utamanya adalah fisik yang sangat tipis, ringan, dan fleksibel. Meskipun memiliki fleksibilitas tinggi, efisiensi konversinya tergolong yang paling rendah, yaitu sekitar 4% hingga 6% [6].

2.3.2 Solar Charge Controller

Solar Charge Controller (SCC) merupakan perangkat elektronik yang berfungsi mengatur proses pengisian energi listrik dari modul surya ke dalam baterai. SCC dipasang di antara panel surya dan baterai untuk mengontrol arus serta tegangan pengisian agar baterai tidak mengalami pengisian berlebih (*overcharging*) maupun pengosongan berlebih (*overdischarging*) [4]



Gambar 2. 4 Solar Charge Controller [29]

Selain menjaga stabilitas sistem dan memperpanjang umur pakai baterai, SCC juga memantau parameter kelistrikan seperti tegangan, arus, dan akumulasi energi yang dihasilkan oleh modul surya. Dua jenis SCC yang umum digunakan adalah PWM (*Pulse Width Modulation*) dan MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). Jenis PWM lebih ekonomis namun efisiensinya lebih rendah, sedangkan MPPT memiliki efisiensi lebih tinggi karena mengoptimalkan titik daya maksimum modul secara adaptif [22].

2.3.3 Baterai

Baterai merupakan komponen penyimpanan energi listrik dalam sistem PLTS *off-grid*. Komponen ini berfungsi menyimpan energi listrik yang dihasilkan

oleh modul surya pada siang hari agar dapat disalurkan ke beban pada malam hari atau saat intensitas radiasi rendah [4]. Satuan kapasitas energi yang disimpan pada baterai dinyatakan dalam *Ampere-hour* (Ah), yang merepresentasikan arus maksimum yang dapat dikeluarkan oleh baterai dalam jangka waktu satu jam [5]. Dalam penelitian ini digunakan baterai Tianneng 12V 14Ah.



Gambar 2. 5 Baterai [30]

2.4 Prinsip Kerja Sel Fotovoltaik

Sel fotovoltaik bekerja berdasarkan prinsip efek fotolistrik, yaitu fenomena pelepasan elektron dari material semikonduktor akibat terpapar radiasi cahaya. Ketika foton dari cahaya matahari mengenai lapisan semikonduktor, energi foton yang diserap akan membebaskan elektron dari atom silikon, sehingga memicu pembentukan pasangan elektron dan *hole*.

Adanya medan listrik internal pada sambungan p-n junction menyebabkan elektron bergerak menuju terminal negatif (n) dan hole bergerak menuju terminal positif (p), yang pada akhirnya menghasilkan beda potensial dan aliran arus listrik DC [18]. Secara umum, satu sel surya tunggal menghasilkan tegangan DC berkisar antara 0,5 V hingga 0,6 V, sehingga beberapa sel harus dirangkai secara seri di dalam satu modul.

2.4.1 Proses Konversi Energi Surya Menjadi Energi Listrik

Panel fotovoltaik (*photovoltaic/PV*) merupakan perangkat semikonduktor yang mengubah energi radiasi matahari secara langsung menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik (*photovoltaic effect*). Efek ini terjadi ketika foton dari

cahaya matahari diserap oleh material semikonduktor, sehingga menghasilkan pasangan elektron-hole yang kemudian dipisahkan oleh medan listrik internal pada sambungan p-n (p-n junction). Pergerakan elektron melalui rangkaian luar menghasilkan arus listrik searah (*Direct Current/DC*) yang selanjutnya dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik [23].

Proses konversi energi surya menjadi energi listrik berlangsung melalui empat tahapan utama, yaitu penyerapan foton, pembangkitan pasangan elektron-hole, pemisahan muatan oleh medan listrik sambungan p-n, dan pengaliran arus listrik pada rangkaian eksternal.

Tahap pertama adalah penyerapan foton. Ketika cahaya matahari mengenai permukaan sel surya, foton dengan energi yang sama atau lebih besar daripada energi celah pita (*band gap*) silikon akan diserap oleh material semikonduktor. Material silikon memiliki energi celah pita sekitar 1,11–1,12 eV, sehingga hanya foton yang memiliki energi sama atau lebih besar dari nilai tersebut yang mampu membebaskan elektron dari pita valensi menuju pita konduksi. Foton yang memiliki energi lebih rendah tidak dapat diserap, sedangkan kelebihan energi foton akan berubah menjadi energi panas (*thermalization*) yang meningkatkan temperatur operasi panel [25].

Tahap kedua adalah pembangkitan pasangan elektron-hole. Elektron yang memperoleh energi akan berpindah dari pita valensi menuju pita konduksi sehingga terbentuk pasangan elektron-hole sebagai pembawa muatan bebas. Jumlah pasangan elektron-hole yang dihasilkan dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari, sehingga semakin besar irradiansi yang diterima panel, semakin besar pula arus fotolistrik yang dihasilkan.

Tahap ketiga adalah pemisahan muatan oleh medan listrik internal pada sambungan p-n. Daerah sambungan antara semikonduktor tipe-p dan tipe-n membentuk medan listrik permanen yang memisahkan elektron menuju sisi-n dan hole menuju sisi-p. Pemisahan muatan ini menghasilkan beda potensial pada kedua terminal sel surya sehingga memungkinkan terbentuknya tegangan keluaran.

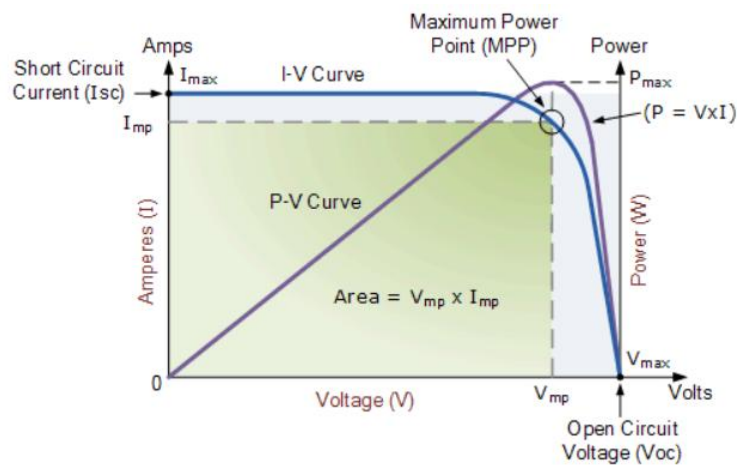
Tahap keempat adalah pengaliran arus listrik melalui rangkaian eksternal. Elektron yang telah terpisah mengalir dari sisi-n menuju sisi-p melalui beban

sehingga menghasilkan arus listrik searah (DC). Satu sel surya silikon umumnya menghasilkan tegangan sekitar 0,5–0,7 V, sehingga beberapa sel disusun secara seri untuk meningkatkan tegangan dan secara paralel untuk meningkatkan arus hingga membentuk satu modul fotovoltaik [23].

Karakteristik listrik sel surya ditunjukkan melalui hubungan antara arus (*Current–Voltage Characteristic* atau kurva I–V) dan daya terhadap tegangan (*Power–Voltage Characteristic* atau kurva P–V) pada Gambar 2.6. Kurva I–V menggambarkan perubahan arus keluaran terhadap tegangan pada kondisi iradiasi dan temperatur tertentu, sedangkan kurva P–V menunjukkan perubahan daya keluaran terhadap tegangan serta memperlihatkan titik daya maksimum (*Maximum Power Point* atau MPP). Besarnya arus keluaran panel surya dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari, sedangkan tegangan keluaran lebih sensitif terhadap perubahan temperatur. Oleh karena itu, peningkatan iradiasi umumnya akan meningkatkan arus dan daya keluaran, sedangkan peningkatan temperatur dapat menurunkan tegangan rangkaian terbuka (*Open Circuit Voltage/Voc*) sehingga daya maksimum panel berkurang. Karakteristik ini menjadi dasar dalam menganalisis pengaruh variasi sudut kemiringan, kondisi *partial shading*, serta perbedaan konfigurasi pemasangan *Ground-mounted* dan *Rooftop* terhadap performa panel surya pada penelitian ini.

Efisiensi konversi energi panel surya dihitung sebagai perbandingan antara daya keluaran terhadap daya radiasi matahari yang diterima permukaan panel dihitung menggunakan persamaan (2.3). Modul fotovoltaik *monocrystalline* umumnya memiliki efisiensi sekitar 17–22% pada kondisi *Standard Test Condition* (STC). Sebagian energi matahari yang diterima panel dikonversi menjadi energi listrik, sedangkan sisanya berubah menjadi energi panas yang meningkatkan temperatur operasi modul. Peningkatan temperatur tersebut dapat menurunkan tegangan keluaran dan daya maksimum panel sehingga memengaruhi kinerja sistem fotovoltaik [27].

Karakteristik elektrik dari modul surya dianalisis menggunakan kurva hubungan Arus-Tegangan ($I - V$) dan Daya-Tegangan ($P - V$). Kurva ini memetakan performa keluaran panel pada variasi kondisi operasi tertentu.



Gambar 2. 6 Kurva I–V dan P–V pada Panel Surya (PV) [18]

Dari kurva karakteristik tersebut, terdapat tiga parameter utama yang menentukan kualitas performa modul surya [18]:

1. Tegangan Rangkaian Terbuka (*Open Circuit Voltage / Voc*)

Merupakan tegangan maksimum yang dihasilkan oleh panel surya ketika tidak terhubung dengan beban atau ketika arus keluaran bernilai nol. Nilai V_{oc} dipengaruhi oleh temperatur sel dan karakteristik material semikonduktor yang digunakan.

2. Arus Hubung Singkat (*Short Circuit Current / Isc*)

Merupakan arus maksimum yang dihasilkan oleh panel surya ketika kedua terminal panel dihubungkan secara langsung tanpa beban sehingga tegangan keluaran menjadi nol. Nilai I_{sc} sangat dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari yang diterima panel.

3. Daya Maksimum (*Maximum Power / Pmax*)

Merupakan daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh panel surya pada titik operasi tertentu yang disebut sebagai Maximum Power Point (MPP). Nilai daya maksimum ini diperoleh dari hasil perkalian antara tegangan maksimum (V_{mp}) dan arus maksimum (I_{mp}) [24].

Dalam penelitian ini, daya keluaran panel digunakan sebagai parameter utama untuk membandingkan performa sistem *Roof-top* dan *Ground-mounted* pada

berbagai kondisi pengujian, analisis difokuskan pada daya modul dan efisiensi sistem yang dihitung berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus pada sistem PLTS.

Daya Output sistem P_{out} sistem dihitung menggunakan persamaan:

$$P_{out} = V \times I \quad (2.1)$$

Daya Input sistem P_{in} dihitung menggunakan persamaan:

$$P_{in} = A \times G \quad (2.2)$$

dimana:

- A = Luas permukaan panel (meter²)
- G = Intensitas radiasi matahari (W/m²)
- P = Daya keluaran (W)
- V = Tegangan (V)
- I = Arus (A)

Sedangkan efisiensi konversi modul (η) dihitung menggunakan persamaan:
modul dihitung menggunakan persamaan:

$$\eta = \frac{P_{out} \times 100\%}{G \times A} \quad (2.3)$$

di mana:

- η = Efisiensi sistem (%)
- P_{out} = Daya keluaran panel (W)
- G = Intensitas radiasi matahari (W/m²)
- A = Luas permukaan panel (m²)

Nilai efisiensi dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti temperatur modul, *shading*, sudut kemiringan panel, serta kondisi lingkungan sekitar pemasangan panel surya.

2.5 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Panel Surya

Daya keluaran pada sebuah panel surya dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor yakni sebagai berikut :

2.5.1 Intensitas Radiasi Matahari

Radiasi matahari pada panel surya diukur dalam satuan W/m^2 , dan nilainya dapat berubah tergantung pada posisi matahari serta lokasi pemasangan panel. Intensitas radiasi yang diterima panel pada pagi dan sore hari cenderung lebih rendah karena sudut datang cahaya matahari belum tegak lurus terhadap permukaan panel. Sementara itu, pada siang hari intensitas radiasi matahari mencapai nilai maksimum karena posisi matahari lebih tegak lurus terhadap panel surya. Semakin besar radiasi matahari yang diterima dan diserap oleh panel, maka semakin besar pula daya listrik yang dihasilkan oleh sistem PLTS.

2.5.2 Sudut Kemiringan (*Tilt angle*)

Sudut kemiringan (*tilt angle*) adalah sudut antara permukaan modul fotovoltaik dan bidang horizontal. Penentuan sudut kemiringan merupakan salah satu parameter penting yang memengaruhi jumlah energi matahari yang dapat diterima oleh permukaan modul fotovoltaik. Besarnya energi radiasi yang diterima panel tidak hanya ditentukan oleh intensitas radiasi matahari, tetapi juga oleh sudut datang sinar matahari terhadap permukaan panel (*incident angle*). Sudut yang terlalu tegak dapat menyebabkan radiasi yang diterima tidak maksimal sepanjang hari. Oleh karena itu, setiap lokasi memiliki sudut kemiringan optimal yang bergantung pada lintang geografis dan pola pergerakan matahari.

Menurut teori fotovoltaik, radiasi efektif yang diterima oleh panel surya dapat dinyatakan dengan Persamaan:

$$G_{eff} = G \cos(\theta) \quad (2.4)$$

dimana :

G_{eff} = radiasi efektif yang diterima panel (W/m^2)

G = intensitas radiasi matahari yang datang (W/m^2)

θ = sudut datang radiasi matahari terhadap garis normal permukaan panel ($^\circ$)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa semakin kecil sudut datang radiasi (θ), maka nilai $\cos(\theta)$ akan semakin mendekati 1 sehingga radiasi efektif yang diterima panel menjadi semakin besar. Sebaliknya, semakin besar sudut datang radiasi, maka sebagian energi matahari akan dipantulkan kembali ke lingkungan sehingga energi yang diserap panel menjadi lebih kecil.

Pada kondisi ideal, daya keluaran maksimum akan diperoleh ketika sinar matahari datang tegak lurus terhadap permukaan panel ($\theta = 0^\circ$). Pada kondisi ini nilai $\cos(0^\circ) = 1$, sehingga seluruh radiasi yang datang dapat dimanfaatkan secara optimal oleh modul fotovoltaik.

Penentuan sudut kemiringan panel surya biasanya disesuaikan dengan posisi geografis suatu wilayah serta lintasan pergerakan matahari sepanjang tahun. Di wilayah tropis seperti Indonesia, sudut kemiringan panel surya umumnya berada pada kisaran 0° hingga 20° agar panel dapat menerima radiasi matahari secara optimal sepanjang tahun [20].

Pada wilayah tropis seperti Indonesia, posisi matahari berada relatif tinggi di langit sepanjang tahun sehingga radiasi langsung (*beam radiation*) yang diterima permukaan panel dengan sudut kemiringan kecil cenderung lebih besar dibandingkan panel dengan sudut kemiringan yang lebih besar. Kondisi ini menyebabkan energi surya yang diterima permukaan panel menjadi lebih optimal sehingga meningkatkan arus, tegangan, dan daya keluaran sistem fotovoltaik.

Menurut Messenger dan Ventre (2004) [23], sudut kemiringan optimum panel surya tetap (*fixed tilt angle*) dapat diperkirakan menggunakan hubungan:

$$\beta_{opt} = 0,9\phi \quad (2.5)$$

dengan:

- β_{opt} = sudut kemiringan optimum panel ($^\circ$)
- ϕ = lintang geografis lokasi ($^\circ$)

Untuk lokasi penelitian di Jakarta Timur yang memiliki lintang sekitar $6,2^\circ$ LS, diperoleh:

$$\beta_{opt} = 0,9 \times 6,2^\circ$$

$$\beta_{opt} = 5,58^\circ$$

Nilai tersebut menunjukkan bahwa sudut kemiringan optimum berada pada kisaran 0° – 10° . Dalam praktiknya, sudut kemiringan panel di wilayah tropis umumnya dipilih antara 5° hingga 20° untuk mengoptimalkan penerimaan radiasi matahari sepanjang tahun sekaligus mempermudah pembersihan permukaan panel dari debu dan air hujan.

Selain itu, Messenger dan Abtahi (2017) [24] menjelaskan bahwa penyimpangan orientasi panel hingga sekitar $\pm 22,5^\circ$ dari arah optimum hanya menyebabkan penurunan penerimaan radiasi tahunan yang relatif kecil, yaitu kurang dari sekitar 2% pada wilayah dengan lintang rendah hingga menengah. Di daerah tropis, pengaruh penyimpangan sudut menjadi lebih kecil karena posisi matahari sepanjang tahun berada pada sudut elevasi yang tinggi sehingga variasi sudut datang radiasi terhadap permukaan panel tidak berubah secara ekstrem.

Selain itu, penelitian lain juga menunjukkan bahwa optimasi sudut kemiringan panel dapat meningkatkan jumlah radiasi matahari yang diterima oleh panel sehingga menghasilkan produksi energi listrik yang lebih besar. Dengan demikian, secara teoritis panel surya yang dipasang pada sudut kemiringan rendah akan menerima radiasi matahari lebih efektif dibandingkan panel dengan sudut kemiringan yang lebih besar. Oleh karena itu, penentuan sudut kemiringan yang optimal merupakan salah satu aspek penting dalam perancangan sistem PLTS [12]. Hal ini menjelaskan mengapa perbedaan performa antara sudut 10° , 20° dan 30° dalam penelitian ini, meskipun signifikan secara statistik, masih berada dalam rentang yang dapat diprediksi oleh teori radiasi pada permukaan miring.

2.5.3 Shading Effect

Shading atau bayangan terjadi ketika sebagian permukaan modul fotovoltaik tertutup oleh objek seperti pohon, bangunan, atau struktur lainnya. Kondisi ini dapat menyebabkan penurunan energi yang dihasilkan oleh modul surya. Pada sistem fotovoltaik yang tersusun dalam rangkaian seri maupun paralel, *shading* dapat menimbulkan ketidaksesuaian arus (*mismatch*) antar modul. Akibatnya, keberadaan bayangan pada sebagian modul dapat menyebabkan penurunan daya keluaran sistem secara keseluruhan serta menurunkan efisiensi sistem fotovoltaik.

2.5.3.1 Klasifikasi Jenis Shading

Berdasarkan karakteristik dan temporalnya, *shading* diklasifikasikan menjadi empat jenis:

- *Shading Parsial*

Shading parsial merupakan kondisi dimana hanya sebagian permukaan panel surya yang tertutup oleh objek tertentu, sementara bagian lainnya

tetap menerima radiasi matahari. Jenis *Shading* ini merupakan kondisi yang paling sering terjadi pada sistem PLTS di lapangan. Dampak utama dari *partial shading* adalah terjadinya ketidakseimbangan arus antar sel dalam satu modul (mismatch). Sel yang tertutup menghasilkan arus lebih kecil, sehingga membatasi arus total rangkaian. Akibatnya, daya keluaran sistem mengalami penurunan yang tidak linier terhadap luas area yang tertutup.

- *Shading* Total

Shading total terjadi ketika seluruh permukaan panel surya tertutup sehingga tidak menerima radiasi matahari sama sekali. Pada kondisi ini, panel tidak mampu menghasilkan energi listrik secara optimal karena tidak terjadi proses konversi energi cahaya menjadi energi listrik.

- *Shading* Statis

Shading statis merupakan jenis *shading* yang disebabkan oleh objek yang posisinya tetap, seperti bangunan, tembok, atau struktur permanen lainnya. Pola bayangan yang dihasilkan cenderung konstan dan dapat diprediksi berdasarkan pergerakan posisi matahari sepanjang hari. Dalam perancangan sistem PLTS, *shading* statis biasanya diperhitungkan sejak tahap awal untuk meminimalkan gangguan terhadap performa sistem.

- *Shading* Dinamis

Shading dinamis terjadi akibat objek yang bergerak atau berubah-ubah, seperti awan, daun pohon, atau bayangan yang berpindah seiring waktu. Jenis *shading* ini bersifat tidak tetap dan sulit diprediksi karena bergantung pada kondisi lingkungan yang berubah. Dampak utama *shading* dinamis adalah fluktuasi daya keluaran sistem yang tidak stabil. Hal ini dapat mempengaruhi kualitas energi yang dihasilkan serta efisiensi sistem secara keseluruhan.

Semakin besar *partial shading* pada sel surya maka daya keluaran yang dihasilkan semakin rendah, bergantung pada konfigurasi rangkaian sel [21]. Berdasarkan klasifikasi tersebut, penelitian ini difokuskan pada *shading* parsial terkontrol sebesar 50%. Metode ini dipilih karena memungkinkan kondisi pengujian yang konsisten, terukur, dan dapat dibandingkan secara langsung.

Dengan pendekatan ini, pengaruh *shading* terhadap parameter tegangan, arus, dan daya dapat dianalisis secara lebih akurat untuk menentukan konfigurasi sistem PLTS yang paling optimal.

Dalam perancangan dan instalasi sistem PLTS, analisis terhadap potensi *shading* sangat penting dilakukan untuk memastikan bahwa panel surya dapat menerima radiasi matahari secara optimal sepanjang hari. Oleh karena itu, penempatan panel surya harus mempertimbangkan kondisi lingkungan sekitar agar bayangan dari objek lain dapat diminimalkan sehingga kinerja sistem PLTS tetap optimal.

2.5.3.2 Penurunan Daya Akibat *Partial Shading*

Partial shading menyebabkan penurunan daya yang tidak proporsional terhadap luas area yang terhalang. Fenomena ini terjadi karena karakteristik rangkaian seri sel surya dalam modul. Ketika satu sel atau sekelompok sel terhalang bayangan, sel-sel tersebut menghasilkan arus yang lebih kecil dibandingkan sel-sel yang terkena sinar penuh. Karena sel-sel dalam sebuah modul dihubungkan secara seri, arus total modul dibatasi oleh sel yang menghasilkan arus terkecil (prinsip *current limiting*), sebagaimana ditegaskan oleh Messenger dan Ventre [23].

Bypass diode yang dipasang secara paralel pada setiap kelompok sel (biasanya 18–24 sel per bypass diode) berfungsi untuk memitigasi dampak *partial shading* dengan menyediakan jalur alternatif bagi arus, sehingga mencegah kondisi hot-spot akibat sel yang menjadi *forward-biased* ketika terhalang bayangan (Messenger dan Abtahi, 2017) [24]. Namun keberadaan *bypass* diode tidak dapat mengeliminasi seluruh kerugian daya; sementara sel yang terkena *shading* dilewati (*bypass*), kelompok sel tersebut tidak berkontribusi pada produksi daya sehingga daya total modul tetap berkurang secara proporsional dengan jumlah kelompok yang tertutup

2.5.4 Temperatur Lingkungan

Temperatur lingkungan merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kinerja sistem fotovoltaik. Peningkatan temperatur lingkungan dapat meningkatkan temperatur operasi modul surya sehingga berpotensi menurunkan tegangan keluaran dan efisiensi sistem.

Selain itu, kondisi pemasangan panel juga mempengaruhi temperatur operasi modul. Sistem *Ground-mounted* umumnya memiliki sirkulasi udara yang lebih baik sehingga pelepasan panas berlangsung lebih efektif. Sebaliknya, sistem *Rooftop* cenderung menerima radiasi panas tambahan dari permukaan atap yang dapat menyebabkan temperatur operasi panel lebih tinggi. Secara umum, kenaikan temperatur operasi modul sebesar 1°C dapat menurunkan daya keluaran modul sekitar 0,4–0,5% tergantung pada spesifikasi modul fotovoltaik yang digunakan [9]. Oleh karena itu, kondisi lingkungan dan konfigurasi pemasangan panel yang mempengaruhi temperatur operasi modul dapat berdampak pada kinerja sistem PLTS, penelitian ini membandingkan konfigurasi *Ground-mounted* dan *Rooftop* untuk mengetahui pengaruh kondisi pemasangan terhadap kinerja sistem PLTS.

Peningkatan temperatur lingkungan pada kondisi radiasi tinggi menyebabkan kenaikan temperatur sel surya secara signifikan, sehingga tegangan rangkaian terbuka (Voc) menurun. Penurunan Voc inilah yang menjadi penyebab utama mengapa daya puncak (Pmax) tidak dapat mencapai nilai maksimumnya meskipun intensitas radiasi matahari sedang tinggi. Hal ini sejalan dengan penjelasan Messenger dan Ventre [23] bahwa tegangan rangkaian terbuka sel silikon kristal turun sekitar $2,3 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ setiap kenaikan temperatur, setara dengan penurunan daya sekitar $-0,4\%/^{\circ}\text{C}$.

Goswami [25] menambahkan penjelasan fisis bahwa efisiensi sel PV menurun seiring peningkatan temperatur karena meningkatnya laju rekombinasi pembawa muatan (*elektron-hole*) dan penurunan tegangan termal (kT/q) pada persamaan dioda sel surya. Pada kondisi operasi aktual di lapangan, terutama di daerah tropis seperti Jakarta, temperatur sel dapat melebihi $55\text{--}60^{\circ}\text{C}$, jauh di atas kondisi STC (25°C), sehingga estimasi performa yang hanya menggunakan data STC tanpa koreksi temperatur akan cenderung overestimate produksi energi aktual.

2.6 Peak Sun Hour (PSH)

Peak Sun Hour (PSH) merupakan parameter yang menyatakan jumlah energi radiasi matahari harian dalam bentuk jam ekuivalen pada intensitas radiasi standar $1000 \text{ W}/\text{m}^2$. PSH digunakan sebagai indikator untuk memperkirakan

potensi energi surya yang dapat dihasilkan sistem fotovoltaik pada suatu lokasi dalam satu hari [19].

Nilai PSH dapat dinyatakan sebagai:

$$PSH = \frac{H}{1000} \quad (2.5)$$

di mana:

PSH = *Peak Sun Hour* (hour)

H = Total radiasi matahari harian (Wh/m²)

Dalam perancangan dan analisis kinerja sistem PLTS, nilai PSH sering digunakan untuk memperkirakan potensi energi harian yang dapat dihasilkan oleh modul fotovoltaik berdasarkan kapasitas daya yang terpasang.

Energi teoritis sistem PLTS dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$E = P_{rata-rata} \times t \quad (2.6)$$

di mana:

E = Energi (Wh)

P = Daya rata-rata (W)

t = Waktu pengukuran (hour)

Sebagai contoh, untuk modul 40 Wp dengan nilai PSH Jakarta Timur 4,8 jam, maka energi teoritis yang dapat dihasilkan adalah:

$$40 \text{ W} \times 4,8 \text{ Jam} = 192 \text{ Wh}$$

2.7 Perbandingan Sistem *Ground-mounted* dan *Rooftop*

Karakteristik instalasi fisik PLTS sangat dipengaruhi oleh pemilihan lokasi penempatan modul, yang secara umum dibagi menjadi dua sistem:

2.7.1 Sistem PLTS *Ground-Mounted*

Sistem PLTS *Ground-mounted* (dipasang di tanah) menggunakan struktur penyangga yang ditanam atau diikat ke permukaan tanah. Sistem *Ground-mounted* menawarkan beberapa keunggulan teknis dibandingkan sistem *Rooftop*, antara lain:

- (1) Fleksibilitas orientasi penuh sudut azimuth dan kemiringan panel dapat dioptimalkan tanpa terkendala struktur bangunan.
- (2) Sirkulasi udara lebih baik posisi panel di atas tanah terbuka memungkinkan

aliran udara dari semua arah sehingga pendinginan modul berlangsung lebih efektif.

(3) Aksesibilitas perawatan teknisi dapat dengan mudah melakukan inspeksi, pembersihan, dan perbaikan pada modul dan komponen sistem.

(4) Potensi bayangan parsial obyek di sekitar seperti pepohonan dan gedung dapat menciptakan pola bayangan yang bervariasi sepanjang hari.

Dari sisi termal, sistem *Ground-mounted* cenderung beroperasi pada temperatur modul yang lebih rendah dibandingkan sistem *Rooftop*. Hal ini dikarenakan tidak adanya permukaan penyerap panas di sekitar modul (seperti atap beton atau genteng) yang dapat memancarkan kembali radiasi termal ke modul. Perbedaan temperatur operasi antara sistem *Ground-mounted* dan *Rooftop* dapat mencapai beberapa derajat *Celsius*, yang berimplikasi pada perbedaan efisiensi sistem sesuai dengan koefisien suhu modul yang digunakan.

2.7.2 Sistem PLTS *Rooftop*

Sistem *Rooftop* menginstalasi modul memanfaatkan struktur atap datar maupun miring dari suatu bangunan gedung. Keunggulan utamanya adalah efisiensi pemanfaatan lahan karena tidak menyita ruang terbuka hijau. Namun, karakteristik termal pada *Rooftop* (khususnya atap dak beton) memiliki kapasitas penyimpanan panas yang tinggi, yang dapat memantulkan kembali energi termal ke lingkungan sekitar modul dan memicu kenaikan temperatur operasi sel pada siang hari. Beberapa karakteristik teknis sistem *Rooftop* yang perlu diperhatikan meliputi:

(1) Keterbatasan sudut kemiringan pada banyak kasus, sudut kemiringan panel mengikuti kemiringan atap yang sudah ada (*fixed tilt*).

(2) Pengaruh termal atap material atap (terutama dak beton atau baja gelombang) menyimpan panas dan memancarkannya kembali ke modul, meningkatkan temperatur operasi.

(3) Potensi bayangan parsial obyek di sekitar atap seperti menara air, antenna, dan dinding parapet dapat menciptakan pola bayangan yang bervariasi sepanjang hari.

Keunggulan utama sistem *Rooftop* terletak pada pengurangan biaya transmisi dan distribusi karena listrik yang dihasilkan langsung dikonsumsi di titik produksi (*self-consumption*), sehingga lebih ekonomis untuk aplikasi gedung komersial dan institusi. Namun, kondisi lingkungan perkotaan dengan efek urban heat island dapat

menambah tantangan dalam pengelolaan temperatur operasi sistem *Rooftop*, khususnya pada bangunan bertingkat di kawasan padat.

2.7.3 Perbandingan Parameter Kinerja *Ground-mounted* dan *Rooftop*

Secara umum, perbedaan kinerja antara sistem *Ground-mounted* dan *Rooftop* dapat dirangkum dalam beberapa parameter utama: efisiensi konversi, temperatur operasi, kemudahan instalasi, biaya lahan, dan potensi integrasi dengan bangunan. Pemilihan konfigurasi yang tepat bergantung pada tujuan instalasi, ketersediaan lahan, dan karakteristik beban yang akan dilayani.

Pada penelitian ini, komparasi dilakukan di mana sistem *Rooftop* ditempatkan pada ketinggian sekitar ± 10 meter (lantai atas Gedung FT UKI) dari permukaan tanah untuk meninjau korelasi perbedaan ketinggian dan sirkulasi angin terhadap performa daya yang dihasilkan. Perbandingan kedua konfigurasi dilakukan dalam kondisi terkontrol dengan dimensi dan spesifikasi modul yang identik, sehingga perbedaan performa yang terukur dapat diatribusikan secara langsung pada pengaruh konfigurasi instalasi dan kondisi lingkungan masing-masing lokasi pemasangan, bukan pada perbedaan komponen sistem.

2.8 Simulasi Sistem Menggunakan *PVsyst*

Simulasi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan salah satu metode yang digunakan untuk memperkirakan kinerja sistem sebelum dilakukan implementasi atau sebagai pembandingan terhadap hasil pengukuran lapangan. Dalam penelitian ini, simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak *Pvsyst*, yang merupakan software khusus untuk perancangan, analisis, dan evaluasi sistem fotovoltaik secara komprehensif.

Pvsyst mampu mensimulasikan berbagai parameter sistem PLTS, seperti produksi energi, radiasi matahari, variasi sudut kemiringan, modul, serta berbagai faktor kerugian (*losses*) yang terjadi dalam sistem. Selain itu, perangkat lunak ini juga dapat digunakan untuk menganalisis pengaruh kondisi lingkungan dan parameter desain terhadap performa sistem.

Dalam penelitian ini, simulasi dilakukan dengan memasukkan parameter

sesuai kondisi nyata di lokasi penelitian, meliputi:

- Lokasi geografis (Jakarta Timur)
- Data radiasi matahari (berdasarkan PVGIS)
- Kapasitas modul, baterai dan beban
- Sudut kemiringan panel (10° , 20° , dan 30°)
- Sistem *off-grid*

Simulasi digunakan untuk memperoleh data keluaran berupa:

- *Energy Load*
- *Energy User*

Analisis dilakukan secara deskriptif untuk melihat kesesuaian tren dan perbedaan nilai antara hasil simulasi dan kondisi nyata di lapangan. Pada penelitian ini, kondisi *shading* tidak dimodelkan secara kompleks dalam simulasi, melainkan difokuskan pada hasil tanpa *shading* sebagai pembanding. Hal ini dikarenakan pengaruh *shading* dianalisis secara langsung melalui pengujian lapangan dengan metode *partial shading* terkontrol sebesar 50% pada permukaan panel surya.

Dengan demikian, penggunaan simulasi dalam penelitian ini berfungsi sebagai alat bantu untuk memberikan gambaran aktual performa teoritis sistem PLTS serta sebagai pembanding terhadap hasil eksperimen, sehingga dapat diperoleh analisis yang lebih komprehensif mengenai kinerja sistem pada kondisi aktual.