

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Yang Relevan

Terdapat sejumlah penelitian yang terkait dengan Analisa Perbandingan Kinerja Fotovoltaik Jenis Monokristalin dan Bifasial Untuk Peningkatan Efisiensi Energi antara lain :

1. Pada tahun 2022, Hendi Bagja Nurjaman dan Trisna Purnama, dalam jurnal “Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Sebagai Solusi Energi Terbarukan Rumah Tangga” Vol 06 no 02, hal 136-142, e-ISSN: 2548-8260, membahas mengenai walaupun PLTS memberikan keunggulan dalam hal keandalan dan efisiensi biaya, masih banyak masyarakat yang belum memahami perbedaan serta manfaatnya dibandingkan dengan listrik dari PT PLN (Persero). Oleh sebab itu, dibutuhkan upaya edukasi untuk menjelaskan aspek teknis dan ekonomis penggunaan PLTS, serta mengatasi berbagai kendala agar masyarakat lebih terbuka terhadap pemanfaatan energi yang ramah lingkungan. Penulis menegaskan bahwa perencanaan dan analisis yang cermat sangat penting dalam perancangan sistem PLTS agar mampu memenuhi kebutuhan energi rumah tangga secara efisien dan berkelanjutan.
2. Pada tahun 2018, Aas Wasri Hasanah, Tony Kurniawan, dan Yuliansyah, dalam jurnal “Kajian Kualitas Daya Listrik PLTS Sistem *Off-Grid* di STT-PLN” Vol 10 no 02, hal 93-101, e-ISSN: 2655-5042, membahas mengenai kualitas daya listrik pada sistem PLTS *off-grid* di STT-PLN dengan fokus pada analisis total harmonik distorsi arus (THDi) dan variasi tegangan yang berpotensi memengaruhi kinerja serta keamanan peralatan listrik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai THDi dan total harmonik distorsi tegangan (THDv) masih melebihi batas standar IEEE 519-1992, yaitu 5%. Penulis menyoroti pentingnya menjaga kualitas daya listrik guna mencegah kerusakan peralatan dan menjamin keandalan sistem tenaga surya, serta merekomendasikan peningkatan kegiatan pengukuran dan pemantauan untuk pengendalian harmonik pada sistem *off-grid*.
3. Menurut Retno Aita Diantari, Erlina, dan Christine Widyastuti dalam jurnal “Studi Penyimpanan Energi Pada Baterai PLTS” Vol 09 no 02, hal 101-179, e-ISSN: 1979-0783, Pembahasan mencakup dampak negatif penggunaan bahan bakar fosil terhadap

lingkungan, seperti terjadinya pemanasan global dan pencemaran, serta menekankan pentingnya transisi menuju energi terbarukan, khususnya energi surya. Penulis turut menjelaskan prinsip kerja sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS), termasuk proses pengisian baterai dan efisiensi energi yang dihasilkan. Selain itu, meskipun biaya investasi awal PLTS tergolong tinggi, sistem ini memiliki keunggulan karena tidak menimbulkan polusi dan dapat beroperasi di wilayah terpencil.

2.2. Landasan Teori

2.2.1. Pembangkit Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) bekerja berdasarkan prinsip efek fotovoltaiik, yaitu proses mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik. Ketika permukaan sel surya (*solar cell*) menerima sinar matahari, energi dari foton akan membebaskan elektron pada material semikonduktor. Aliran elektron melalui sambungan antara lapisan tipe-n dan tipe-p inilah yang menghasilkan arus listrik.[5],[7]

Untuk menyediakan listrik di wilayah pedesaan terpencil yang memiliki potensi sinar matahari melimpah namun sulit mendapatkan bahan bakar, PLTS menjadi salah satu solusi pembangkit listrik berbasis energi terbarukan yang direkomendasikan. Terdapat beberapa alasan pemanfaatan teknologi PLTS antara lain, yang pertama sumber energinya melimpah dan tidak memerlukan biaya. Yang kedua, energi dapat dimanfaatkan secara lokal. Yang ketiga, biaya operasi dan pemeliharaannya relatif rendah. Yang keempat, tidak membutuhkan perawatan rutin dan dapat dikelola oleh operator lokal yang terlatih. Yang kelima, bersifat ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi gas maupun limbah berbahaya.[1],[8]

Faktor-faktor yang berdampak pada kinerja sistem PLTS :

1. Iradiasi Matahari

Iradiasi matahari, yaitu intensitas cahaya matahari yang mengenai permukaan panel surya, merupakan faktor utama yang memengaruhi keluaran daya pada PLTS. Semakin tinggi tingkat iradiasi, semakin banyak foton yang mengenai sel surya, sehingga lebih banyak elektron terbebas dan menghasilkan arus listrik yang lebih besar. Variasi iradiasi dapat dipengaruhi oleh waktu dalam sehari (pagi, siang, sore), perubahan musim (karena perbedaan sudut matahari), kondisi cuaca (cerah, berawan,

hujan), serta letak geografis. Dengan demikian, daerah yang memiliki rata-rata iradiasi tinggi sepanjang tahun memiliki potensi produksi energi surya yang lebih besar.

2. Suhu Operasional Panel

Walaupun sinar matahari merupakan sumber energi utama bagi panel surya, panas berlebih justru dapat menurunkan efisiensi kerjanya. Ketika suhu panel meningkat melebihi Kondisi Uji Standar ($STC = 25^{\circ}C$), tegangan *open-circuit* (V_{oc}) akan menurun sementara arus *short-circuit* (I_{sc}) sedikit meningkat. Namun, penurunan tegangan yang lebih signifikan menyebabkan daya keluaran dan efisiensi panel secara keseluruhan berkurang. Umumnya, setiap kenaikan suhu $1^{\circ}C$ di atas $25^{\circ}C$ dapat menurunkan efisiensi panel silikon kristalin sebesar 0,3% hingga 0,5%. Oleh karena itu, penerapan sistem pendingin pasif seperti sirkulasi udara di bawah panel, atau desain yang mendukung pelepasan panas secara optimal, sangat diperlukan untuk menjaga kinerja panel tetap stabil.

3. Sudut Kemiringan (*Tilt Angle*) dan Azimuth Panel

Efisiensi penyerapan sinar matahari pada panel surya sangat dipengaruhi oleh sudut kemiringan, yaitu posisi miring panel terhadap bidang horizontal. Untuk memperoleh produksi energi tahunan yang maksimal, panel umumnya dipasang dengan kemiringan yang sebanding dengan lintang geografis lokasi dan diarahkan ke arah ekuator (ke utara bagi wilayah di Belahan Bumi Selatan dan ke selatan bagi wilayah di Belahan Bumi Utara). Namun, penyesuaian sudut kemiringan dapat dilakukan untuk optimasi musiman atau peningkatan produksi pada waktu tertentu. Kesalahan dalam menentukan sudut kemiringan maupun arah azimuth dapat mengurangi penyerapan sinar matahari, sehingga menurunkan daya keluaran sistem.

4. Bayangan (*Shading*)

Bayangan, bahkan yang berukuran kecil seperti dari pohon, bangunan, antenna, atau kotoran burung, dapat memberikan pengaruh besar dan tidak sebanding terhadap daya keluaran total dari rangkaian panel. Hal ini terjadi karena sel-sel pada satu string terhubung secara seri, sehingga performa keseluruhan string ditentukan oleh sel dengan kinerja terendah atau yang tertutup bayangan. Oleh sebab itu, perancangan sistem harus mempertimbangkan untuk meminimalkan kemungkinan terjadinya bayangan sepanjang hari maupun sepanjang tahun.

5. Akumulasi Debu dan Kotoran (*Soiling*)

Debu, polusi, kotoran burung, daun, dan berbagai material lain yang menumpuk di permukaan panel surya dapat membentuk lapisan yang menghambat masuknya sinar matahari ke sel fotovoltaik. Penumpukan tersebut secara langsung mengurangi intensitas iradiasi yang diserap panel, sehingga menurunkan output energi yang dihasilkan. Besarnya penurunan kinerja akibat kotoran (*soiling*) bergantung pada kondisi lokasi seperti wilayah berdebu, area perkotaan dengan tingkat polusi tinggi, atau daerah pertanian serta frekuensi hujan dan jadwal pembersihan. Oleh karena itu, pembersihan panel secara rutin sangat penting untuk menjaga performa optimal dalam jangka panjang.

6. Jenis Panel Surya

Setiap jenis teknologi panel surya memiliki karakteristik kinerja yang berbeda. Panel monokristalin umumnya menawarkan efisiensi tertinggi di antara panel berbasis silikon kristalin dan menunjukkan performa optimal pada kondisi cuaca cerah. Panel polikristalin memiliki biaya yang lebih rendah, namun efisiensinya sedikit di bawah monokristalin. Sementara itu, panel bifasial memiliki keunggulan khusus karena dapat menghasilkan listrik dari kedua sisi yaitu bagian depan dan belakang dengan memanfaatkan pantulan cahaya dari permukaan di bawahnya. Kemampuan ini dapat meningkatkan total output energi secara signifikan dibandingkan dengan panel monofasial, terutama ketika dipasang di atas permukaan yang reflektif.

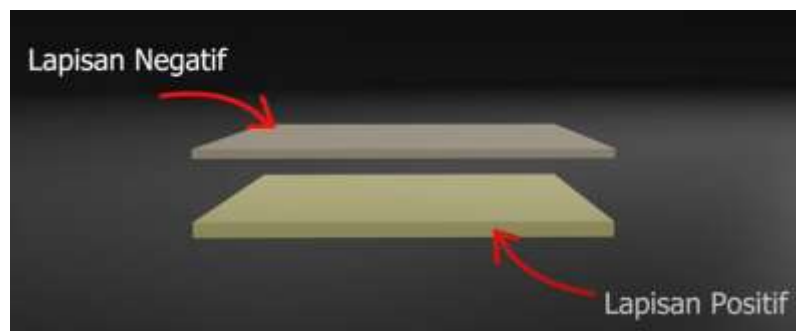
2.2.2. Solar Cell

Sel surya (*solar cell*) dibuat dari salah satu unsur paling melimpah di bumi selain cahaya matahari, yaitu pasir. Pasir tersebut harus melalui proses pemurnian bertahap hingga mencapai kemurnian 99,99% silikon kristal agar dapat digunakan dalam pembuatan sel surya, dimulai dari silikon mentah, silikon murni, hingga terbentuk kristal silikon (baik monokristalin maupun polikristalin). Beberapa sel surya yang disusun secara seri dan paralel membentuk modul surya, yang berfungsi meningkatkan tegangan dan arus agar cukup untuk menyuplai daya ke beban. Permukaan modul surya perlu diarahkan langsung ke matahari untuk menghasilkan energi listrik maksimal. Modul, yang merupakan rangkaian dari beberapa sel fotovoltaik, menjadi komponen utama dalam sistem tenaga surya fotovoltaik. Meskipun pembuatan sel fotovoltaik memerlukan teknologi tinggi, modul fotovoltaik berbasis kristal dapat diproduksi dengan teknologi

yang relatif sederhana. Modul ini terdiri atas sejumlah sel fotovoltaik yang dihubungkan secara seri dan paralel.[2],[9]

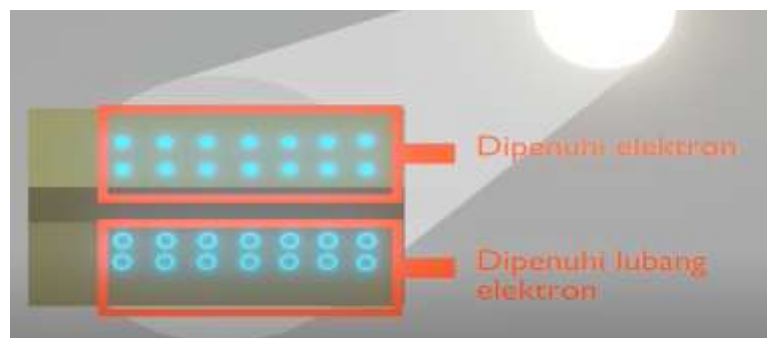
2.2.3. Efek Fotovoltaik

Efek fotovoltaik merupakan proses di mana cahaya atau foton yang mengenai material semikonduktor dapat menghasilkan energi listrik. Prinsip inilah yang menjadi dasar kerja sel surya (*solar cell*). Sel surya sendiri terdiri atas dua lapisan utama, yaitu lapisan negatif yang berada di bagian atas dan lapisan positif yang terletak di bagian bawah.[10],[11]



Gambar 2. 1 Lapisan Positif & Negatif pada Solar Cell

Lapisan negatif pada sel surya dibuat dari campuran silikon dan fosfor, yang menghasilkan kelebihan elektron. Sementara itu, lapisan positif terbentuk dari campuran silikon dan boron, sehingga memiliki kekurangan elektron. Ketika kedua lapisan ini disatukan, elektron dari lapisan negatif akan bergerak mengisi kekosongan elektron pada lapisan positif. Proses ini menciptakan suatu area baru di antara keduanya yang disebut zona deplesi (*depletion zone*). Zona ini bersifat netral karena seluruh lubang elektron telah terisi oleh elektron.[10]



Gambar 2. 2 Area Deplesi / Depletion Zone

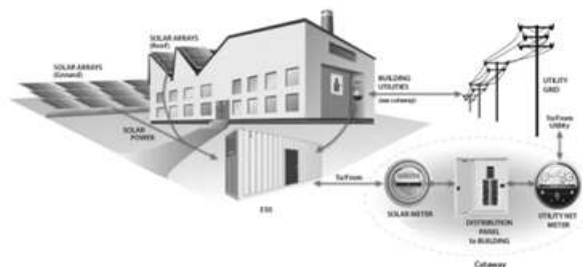
Sinar matahari mengandung partikel energi yang disebut foton. Saat sel surya menerima cahaya matahari, foton tersebut akan menumbuk area deplesi dan melepaskan elektron dari lubangnya. Elektron kemudian bergerak menuju lapisan negatif, sedangkan lubang elektron bergerak ke arah lapisan positif. Ketika kedua lapisan dihubungkan dengan kabel, elektron akan mengalir menuju lapisan positif yang kekurangan elektron untuk menutup lubang yang ada. Pada saat yang sama, energi cahaya matahari terus memisahkan elektron baru di area deplesi. Proses ini berlangsung secara berulang dan menghasilkan aliran elektron atau listrik, yang dikenal sebagai efek fotovoltaiik.[12]

2.2.4. Konfigurasi PLTS

Sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dapat dikonfigurasi dalam tiga jenis hubungan dengan jaringan listrik. Pertama, PLTS yang terhubung langsung ke jaringan PLN, dikenal sebagai PLTS *On-Grid*. Kedua, PLTS yang beroperasi secara mandiri tanpa koneksi ke jaringan PLN, disebut PLTS *Off-Grid*. Ketiga, PLTS *Hybrid*, yaitu sistem yang menggabungkan PLTS dengan sumber pembangkit energi lainnya.[13],[14]

1. PLTS *On-Grid*

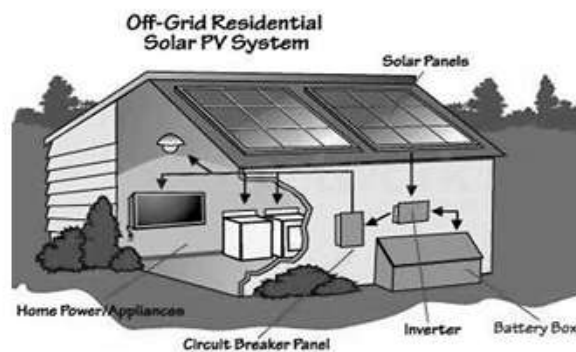
Sistem PLTS terinterkoneksi (*On-Grid*) atau sistem photovoltaic terhubung jaringan merupakan sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan radiasi matahari untuk menghasilkan energi listrik. Sesuai dengan namanya, sistem ini terhubung langsung ke jaringan PLN dan mengoptimalkan penggunaan modul surya atau modul fotovoltaiik untuk produksi listrik. Selain bebas emisi dan ramah lingkungan, sistem PLTS *On-Grid* juga menjadi solusi energi hijau bagi masyarakat perkotaan baik di sektor perumahan maupun perkantoran dengan tujuan menekan biaya listrik dari PLN sekaligus memberikan nilai tambah bagi penggunaannya.[13]



Gambar 2. 3 PLTS *On-Grid*

2. PLTS *Off-Grid*

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terpusat tipe *Off-Grid* memanfaatkan radiasi matahari sebagai satu-satunya sumber energi tanpa terhubung ke jaringan listrik PLN. Dengan kata lain, sistem ini sepenuhnya bergantung pada panel surya atau modul fotovoltaik untuk menghasilkan listrik. PLTS *Off-Grid* umumnya diterapkan di wilayah yang belum terjangkau pasokan listrik dari jaringan PLN, seperti daerah terpencil atau daerah yang sulit diakses.[13]



Gambar 2. 4 PLTS *Off Grid*

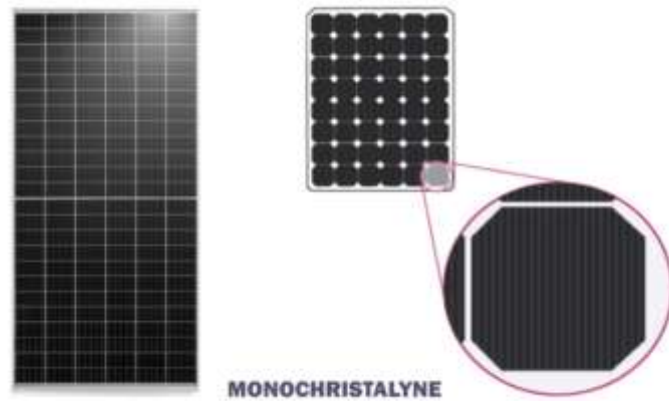
2.2.5. Jenis-Jenis Panel Surya

Jenis panel surya terdiri atas tiga tipe utama, yaitu polycrystalline, monocrystalline, dan bifacial. Ketiganya memiliki perbedaan dalam struktur kristal, tingkat efisiensi, serta kemampuan dalam menangkap cahaya matahari. Panel monocrystalline dibuat dari kristal silikon murni, sedangkan panel polycrystalline menggunakan silikon yang tidak sepenuhnya murni, sehingga menghasilkan efisiensi energi yang sedikit lebih rendah. Sementara itu, panel bifacial memiliki keunggulan karena mampu menyerap cahaya dari kedua sisi yaitu bagian depan dan belakang, sehingga dapat menghasilkan daya tambahan dari pantulan cahaya di sekitar pemasangannya.[15]

1. Panel Surya Monokristalin

Panel surya monokristalin tersusun dari sel fotovoltaik yang menggunakan satu kristal silikon utuh. Ciri khas panel ini adalah warnanya yang hitam pekat dan bentuknya yang umumnya persegi atau persegi panjang dengan sudut-sudut membulat. Dibandingkan dengan panel polikristalin, panel monokristalin memiliki efisiensi konversi energi yang lebih tinggi karena terbuat dari kristal silikon tunggal, meskipun harganya cenderung lebih mahal. Selain itu, panel jenis ini juga memiliki kinerja lebih

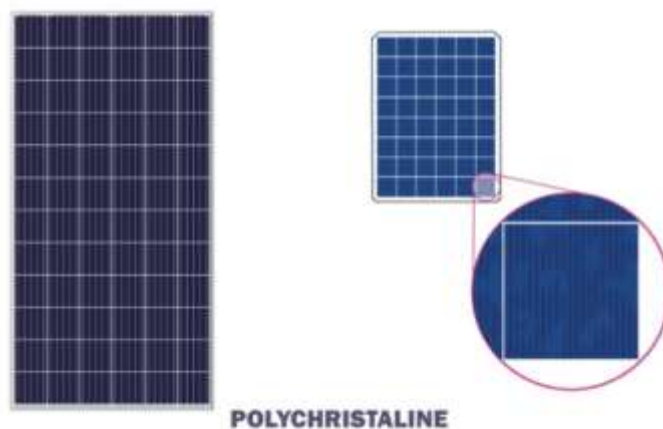
baik pada kondisi cuaca kurang ideal, sehingga cocok digunakan di lingkungan dengan intensitas sinar matahari yang rendah.[16],[17]



Gambar 2. 5 Panel Surya Monokristalin

2. Panel Surya Polikristalin

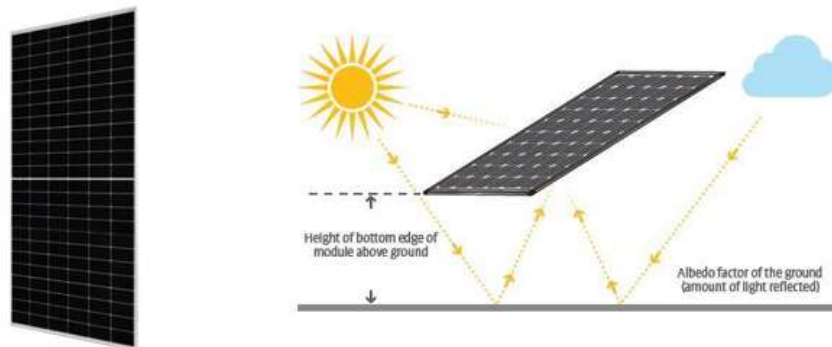
Panel surya polikristalin merupakan jenis panel yang lebih mudah diproduksi dan memiliki harga lebih terjangkau dibandingkan panel monokristalin. Panel ini dibuat dari campuran beberapa kristal silikon yang dilebur menjadi satu, sehingga permukaannya tampak seperti potongan kristal yang berpadu. Meskipun efisiensinya sedikit lebih rendah dari panel monokristalin, kinerjanya tetap cukup baik untuk digunakan di daerah dengan intensitas sinar matahari tinggi. Panel polikristalin memiliki warna khas biru dan umumnya diaplikasikan pada sistem rumah tangga maupun proyek berskala besar dengan keterbatasan anggaran.[16],[17]



Gambar 2. 6 Panel Surya Polikristalin

3. Panel Surya *Bifacial*

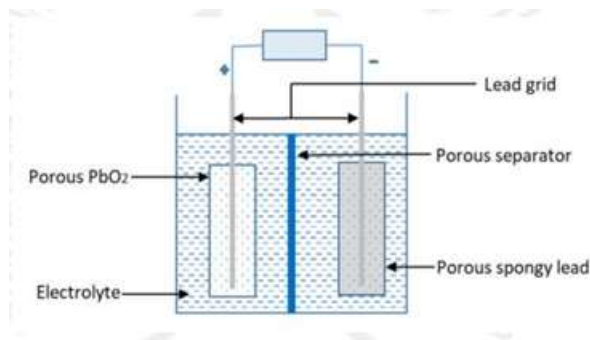
Panel surya bifasial merupakan jenis panel fotovoltaik yang dapat menyerap cahaya matahari dari kedua sisi yaitu bagian depan dan belakang untuk menghasilkan energi listrik. Bagian depan berfungsi menangkap sinar matahari langsung (*direct sunlight*), sementara bagian belakang memanfaatkan cahaya yang dipantulkan dari permukaan di bawah panel (*reflected sunlight*). Umumnya, panel ini menggunakan sel surya kristalin berbasis monokristalin tipe N karena memiliki efisiensi tinggi dan ketahanan terhadap degradasi. Struktur panel bifasial dilengkapi dengan lapisan kaca di kedua sisinya serta rangka terbuka, sehingga bagian belakang tetap dapat menerima pantulan cahaya tanpa terhalang bayangan atau struktur pendukung.[18],[19]



Gambar 2. 7 Panel Surya *Bifacial*

2.2.6. Baterai

Sistem sel surya dilengkapi dengan baterai yang berfungsi sebagai penyimpan energi cadangan. Baterai ini menyimpan energi listrik arus searah (DC) yang dihasilkan oleh panel surya untuk digunakan ketika panel tidak dapat memproduksi listrik, seperti pada malam hari atau saat cuaca mendung. Dengan adanya baterai, tegangan keluaran sistem menjadi lebih stabil. Jenis baterai yang paling umum digunakan dalam sistem sel surya adalah baterai timbal-asam (*lead-acid*), karena memiliki kapasitas *ampere-hour* (Ah) yang memadai dan harga yang relatif terjangkau.



Gambar 2. 8 Rancangan Skematis Baterai Lead – Acid

Baterai timbal-asam (*lead-acid*) memiliki energi spesifik yang relatif rendah, sekitar 35–40 Wh/kg, akibat tingginya densitas timbal. Baterai ini umumnya menggunakan timbal dioksida (PbO_2) sebagai elektroda positif, timbal (Pb) sebagai elektroda negatif, serta asam sulfat (H_2SO_4) sebagai larutan elektrolit. Untuk meningkatkan kestabilan mekanis dan mencegah terjadinya hubungan arus pendek, digunakan pemisah di antara elektroda-elektroda tersebut. Pemisah ini bersifat permeabel, sehingga memungkinkan perpindahan ion positif dan negatif dengan mudah.[20]

2.2.7. Perbedaan Panel Monokristalin dan Bifasial

Panel surya monokristalin dibuat dari satu kristal silikon utuh yang dipotong menjadi lembaran tipis. Struktur kristal tunggal ini memungkinkan aliran elektron bergerak lebih teratur, sehingga proses konversi cahaya matahari menjadi energi listrik berlangsung dengan efisiensi tinggi. Secara visual, panel jenis ini memiliki warna hitam pekat atau biru tua yang seragam, dengan sudut sel sedikit terpotong akibat bentuk asli batang silikon. Bagian belakang panel biasanya menggunakan backsheet padat berwarna putih atau hitam, sehingga hanya sisi depan yang berfungsi untuk menangkap cahaya matahari.

Berbeda dari panel monokristalin, panel bifasial menggunakan teknologi sel surya berbasis monokristalin (biasanya tipe N atau PERC) yang dirancang agar kedua sisinya mampu menyerap cahaya. Sisi depan panel menangkap sinar matahari langsung, sedangkan sisi belakang yang menggunakan bahan kaca atau backsheet transparan menyerap cahaya pantulan dari permukaan di bawahnya. Desain dua sisi ini memungkinkan panel menghasilkan energi tambahan yang dikenal sebagai bifacial gain, dengan besarnya dipengaruhi oleh tingkat reflektivitas permukaan tempat panel dipasang. Kaca transparan pada kedua sisi berfungsi untuk menangkap cahaya dari berbagai arah

sekaligus melindungi sel surya dari debu dan benturan, sementara sisi samping berwarna putih membantu memfokuskan cahaya agar lebih terarah ke dalam panel.

Dari sisi material, kedua jenis panel sama-sama menggunakan silikon kristalin berkualitas tinggi. Namun, panel bifasial membutuhkan tambahan lapisan transparan serta rangka dengan desain terbuka agar cahaya dapat menembus dan mencapai sisi belakang. Perbedaan struktur ini membuat panel bifasial sedikit lebih berat, tetapi mampu menghasilkan energi lebih besar di lokasi dengan tingkat reflektivitas tinggi, seperti di atas permukaan beton, pasir terang, atau atap berwarna cerah. Secara keseluruhan, perbedaan utama antara keduanya terletak pada jumlah sisi aktif dalam penyerapan cahaya dan bentuk fisiknya. Panel monokristalin hanya memanfaatkan satu sisi untuk menghasilkan energi, sedangkan panel bifasial mengoptimalkan kedua sisinya. Oleh karena itu, panel bifasial memiliki potensi efisiensi lebih tinggi, meskipun kinerjanya sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan cara pemasangannya.