

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teori Dasar

2.1.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah sebuah sistem yang memiliki kemampuan untuk mengubah energi matahari menjadi listrik. Sinar matahari secara langsung dimanfaatkan sebagai energi termal (panas) atau melalui penggunaan *sel fotovoltaik* dalam panel surya dan kaca *fotovoltaik* transparan. Teknologi *solar-electric* atau yang umum disebut *photovoltaics* (PV) mengubah sinar matahari langsung menjadi listrik. PV dapat menyediakan listrik dalam arus DC atau dikonversi menggunakan inverter menjadi arus AC untuk bangunan perumahan dan komersial, termasuk daya untuk lampu keamanan dan sistem pendingin. Dewasa ini menurut Ardian (2021), teknologi PV telah digunakan untuk untuk memompa air, penerangan jalan dan sebagai PLTS atap untuk mengurangi biaya energi. Menurut Safitri et al (2019) Terdapat 2 (dua) jenis panel surya yang umum dijumpai di pasaran, yaitu panel *monokristalin* dan *polikristalin*, selain kedua jenis tersebut terdapat pula jenis lain yang agak jarang digunakan yakni panel thin film. Panel surya *monokristalin* dibuat dengan wafer silikon yang dipotong dari kristal tunggal, oleh karena itu disebut dengan nama *monokristalin*. Panel surya jenis ini umumnya mampu menyediakan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan panel *polikristalin* karena panel surya jenis ini biasanya menggunakan tingkat silikon yang lebih tinggi. Panel surya *polikristalin*, seperti juga jenis monokristalin, juga terbuat dari silikon. Perbedaan utama adalah bahwa

sel surya polikristalin dibuat dengan melelehkan banyak fragmen silikon dan bukan dari kristal silikon tunggal. Kekurangan panel surya polikristalin adalah umumnya efisiensi panel jenis ini lebih rendah dari panel jenis monokristalin, namun harga mereka cenderung lebih ekonomis.

Dalam dekade terakhir, energi listrik menjadi perhatian penting di semua negara. Kehidupan manusia dan gaya hidup di zaman modern memiliki hubungan yang sangat erat dengan ketersediaan energi dan kualitasnya. Di Indonesia, berdasarkan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Republik Indonesia, menyatakan bahwa konsumsi listrik per kapita nasional pada tahun 2019 mengalami peningkatan sebesar 2,26 % dari tahun sebelumnya dengan kenaikan mencapai 1.084 kWh per kapita. Sedangkan, pada tahun 2020 mengalami peningkatan sebesar 1.089 kWh per kapita dan pada kuartal III tahun 2021 mengalami peningkatan sebesar 1.109 kWh per kapita. Nilai ini setara dengan 92,22 % dari target yang ditetapkan pada tahun 2021 yakni sebesar 1.203 kWh per kapita (Vika Azkiya Dihni, 2021).

Di sisi lain, ketersediaan tenaga listrik di Indonesia masih tidak cukup untuk memenuhi kebutuhan masyarakat. Pencapaian tingkat elektrifikasi di Indonesia baru mencapai 71,2 % dan di bawah beberapa negara ASEAN seperti di Singapura dan Malaysia yang mencapai persentase di 100% dan 85%. Dengan kata lain, masih ada sekitar 28,8% masyarakat Indonesia yang belum teraliri listrik (Adam, 2016). Dengan adanya permasalahan krisis energi sebagaimana dijelaskan di atas, penggunaan energi terbarukan menjadi solusi yang sangat tepat. Energi terbarukan sendiri yaitu energi yang dapat dengan cepat dipulihkan

kembali secara alami dan prosesnya berkelanjutan. Salah satunya yaitu energi matahari melalui perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Huda, 2018).

Agar daya yang dihasilkan oleh PLTS menuju jaringan eksisting bernilai maksimum diperlukan alat yaitu *power conditioning*. Selain itu, alat ini berfungsi menyesuaikan proses perubahan tegangan DC menjadi tegangan AC dengan parameter yang ada pada jaringan eksisting. Salah satu bagian dari alat *power conditioning* tersebut adalah inverter (Nahela et al., 2020). Pemasangan GTI *On-Grid* memerlukan perubahan konfigurasi pada rangkaian panel instalasi milik PLN dengan memperhitungkan tegangan output yang dibutuhkan (Nahela et al., 2020). Hasil pengujian PLTS dengan sistem *On Grid* berkapasitas panel 65Wp mampu menghasilkan arus dengan nominal 0.7A di mana radiasi matahari menyentuh angka 859.9/m². Adapun GTI yang dipakai berkapasitas 1kW dan mempunyai range tegangan antara 10.5V sampai dengan 28VDC dengan beban terbaca 344W serta 1.19A (Haerurrozi, Abdul Natsir, 2019).

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem konversi energi yang mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik melalui modul fotovoltaik (PV). Prinsip kerja sel surya didasarkan pada efek fotovoltaik, yaitu fenomena di mana foton dari cahaya matahari diserap oleh material semikonduktor dan menghasilkan pasangan elektron-hole yang dapat menghasilkan arus listrik searah (DC) (Handayani & Muslimin, 2021).

Modul surya tersusun dari sejumlah sel surya yang dihubungkan secara seri dan paralel untuk menghasilkan tegangan dan arus sesuai kebutuhan sistem. Jenis modul yang paling umum digunakan adalah silikon monokristalin dan

polikristalin. Efisiensi konversi modul surya komersial berkisar antara 15% hingga 22%, tergantung pada teknologi dan kondisi lingkungan (Rahman et al., 2023).

2.2 Sistem pembangkit listrik tenaga Surya *Off Grid*

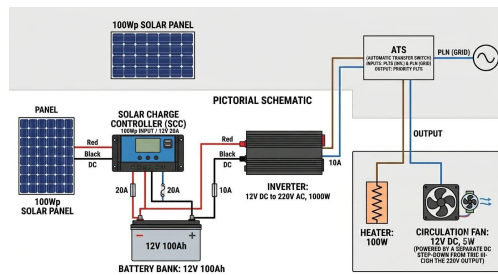
Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga surya (PLTS) Saat sinar matahari menyinari panel surya, elektron pada pita valensi akan melompat ke pita konduksi. Jika sel surya dihubungkan dengan rangkaian luar maka akan terjadi pergerakan elektron. Arus listrik yang dihasilkan pada sel surya adalah arus DC. Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) pada umumnya dapat bekerja jika menerima cahaya foton dari matahari dan cahaya foton tersebut diterima oleh sel surya dimana sel surya tersebut dapat mengubah energi foton menjadi energi listrik . Proses mengubah atau mengubah sinar matahari menjadi listrik ini dimungkinkan karena bahan penyusun sel surya *fotovoltaik* adalah semikonduktor. Sel surya tersusun dari dua lapisan semikonduktor dengan muatan berbeda. Lapisan atas sel surya bermuatan negatif (n) sedangkan lapisan bawah bermuatan positif (p).

Sistem *Automatic Transfer Switch* (ATS) Sistem ATS (*Automatic Transfer Switch*) merupakan alat yang berfungsi untuk memindahkan hubungan antara sumber tegangan listrik satu dengan sumber tegangan listrik lainnya secara otomatis. Atau bisa juga disebut dengan *Automatic COS (Change Over Switch)* . Berdasarkan penjelasan tersebut dapat kita asumsikan bahwa fungsi utama ATS pada PLTS adalah memindahkan beban dari PLTS ke PLN apabila sumber PLTS tidak mampu memikul beban secara otomatis, begitu pula sebaliknya. Dalam

implementasinya, ATS berbentuk panel yang berisi komponen-komponen daya listrik.

Sistem Proteksi Gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik sangat beragam besarannya dan jenisnya. Gangguan dalam sistem tenaga listrik adalah keadaan yang tidak normal. Keadaan ini dapat mengakibatkan terganggunya kontinuitas pelayanan tenaga listrik. Gangguan dalam operasi sistem tenaga listrik merupakan kejadian yang dapat menyebabkan operasi pengaman tenaga listrik. Gangguan pada suatu sistem tenaga listrik atau penyediaan listrik tidak dikehendaki, tetapi gangguan merupakan kenyataan yang tidak dapat dihindarkan. Gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik khususnya pada PLTS seringnya terjadi drop tegangan pada baterai sehingga suplay dari baterai tidak mampu untuk memberikan tegangan maksimal kepada inverter sebagai

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terpusat (*Off-Grid*) merupakan system pembangkit listrik yang memanfaatkan radiasi matahari tanpa terhubung dengan jaringan PLN atau dengan kata lain satu satunya sumber pembangkitnya yaitu hanya menggunakan radiasi matahari dengan bantuan panel surya atau *photovoltaic*. Untuk dapat menghasilkan energi listrik system PLTS *Off-Grid* sendiri juga hanya dimanfaatkan untuk daerah yang tidak terjangkau pasokan listrik dari PLN seperti daerah pedesaan.



Gambar 1. Skema sistem PLTS Off Grid

2.3 Komponen pembangkit listrik tenaga surya off grid

2.3.1 Panel Surya

Solar Module (*Modul Photovoltaics*) Sel surya atau sel *photovoltaic* merupakan suatu alat yang dapat mengubah energi radiasi matahari secara langsung menjadi energi listrik. Sel surya *photovoltaic* dibuat dari bahan semi konduktor yang diproses sedemikian rupa sehingga menghasilkan listrik arus searah (DC). Secara umum ada 3 jenis panel surya yang dapat ditemukan di pasaran yaitu; pertama *Monocrystalline Silicon* merupakan panel surya yang menggunakan material silikon sebagai bahan utama penyusun sel surya. Material silikon ini diiris tipis menggunakan teknologi khusus. Panel sel surya berjenis *crystalline* tunggal memiliki efisiensi yang tinggi, secara fisik dapat dikenali dari warna sel hitam gelap dengan model terpotong pada tiap sudutnya; kedua *Polycrystalline* terbuat dari beberapa batang kristal silikon yang dicairkan, setelah itu dituangkan dalam cetakan yang berbentuk persegi. Kristal silikon dalam jenis panel surya ini tidak sempurna pada sel surya *monocrystalline* sehingga sel surya yang dihasilkan tidak identik antara satu sama lainnya, efisiensinya pun lebih rendah dari *monocrystalline*; dan yang ketiga Thin Film Solar Cell (TFSC). Jenis panel surya ini dibuat dengan cara menambahkan sel surya yang tipis ke dalam

sebuah lapisan dasar. Karena bentuk dari TFSC ini tipis, maka panel surya ini sangat ringan dan fleksibel. Ketebalan lapisannya bisa diukur mulai dari nanometers hingga micrometers.(saodah siti dan utami sri, : 2019)



Gambar 2 . Solar Panel

2.3.2 Solar Control Charger (SCC)

Solar Charge Controller (SCC) adalah perangkat elektronik yang digunakan dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) untuk mengatur aliran energi dari panel surya ke baterai dan dari baterai ke beban. Fungsi utama SCC adalah menjaga agar baterai tidak mengalami pengisian berlebihan (*overcharging*) maupun pengosongan berlebihan (*deep discharging*) yang dapat merusak baterai dan memperpendek umur pakainya. Selain itu, SCC mencegah arus balik dari baterai ke panel surya pada malam hari, yang bisa menyebabkan kehilangan energi dan kerusakan pada sistem. Dengan adanya SCC, proses penyimpanan dan pemanfaatan energi surya menjadi lebih aman, stabil, dan efisien.

Secara umum, terdapat dua jenis Solar Charge Controller yang banyak digunakan, yaitu PWM (*Pulse Width Modulation*) dan MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). SCC tipe PWM bekerja dengan cara menyesuaikan tegangan panel surya agar sesuai dengan tegangan baterai, sehingga strukturnya lebih sederhana dan harganya lebih terjangkau. Namun, efisiensinya lebih rendah

karena tidak dapat memaksimalkan daya keluaran panel. Sebaliknya, tipe MPPT menggunakan algoritma khusus untuk mencari dan mempertahankan titik daya maksimum dari panel surya, sehingga lebih efisien dan mampu menghasilkan daya lebih besar, terutama pada kondisi cuaca yang berubah-ubah atau pada sistem berkapasitas lebih besar. Karena itu, MPPT umumnya digunakan pada instalasi PLTS yang membutuhkan kinerja optimal.

Di samping pengaturan pengisian baterai, SCC juga biasanya dilengkapi dengan fitur proteksi lain seperti perlindungan terhadap hubung singkat (*short circuit*), kelebihan arus (*overcurrent*), dan kelebihan suhu (*overheating*). Beberapa SCC modern bahkan telah memiliki layar digital dan fitur komunikasi yang memungkinkan pengguna memantau tegangan, arus, kapasitas baterai, serta kinerja panel surya secara real-time. Oleh karena itu, penggunaan *Solar Charge Controller* yang sesuai dengan kapasitas panel, jenis baterai, dan kebutuhan beban sangat penting untuk memastikan sistem PLTS bekerja secara optimal dan memiliki umur pakai yang panjang.



Gambar 3. Solar Charger Controller

2.3.3 Baterai

Baterai pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berfungsi sebagai media penyimpanan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya. Energi yang dikonversi dari sinar matahari pada siang hari tidak selalu langsung digunakan, sehingga baterai menyimpannya agar dapat dipakai saat malam hari, saat cuaca mendung, atau ketika kebutuhan beban lebih besar daripada daya yang dihasilkan panel. Dengan adanya baterai, pasokan listrik dari PLTS menjadi lebih stabil dan kontinu, terutama pada sistem *off-grid* dan *hybrid*.

Dalam sistem PLTS, baterai juga berperan penting dalam menjaga keseimbangan antara produksi dan konsumsi energi. Ketika panel surya menghasilkan daya lebih besar dari kebutuhan beban, kelebihan energi akan dialirkan dan disimpan ke dalam baterai. Sebaliknya, ketika produksi panel lebih kecil, energi yang tersimpan di baterai akan digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban. Proses pengisian dan pengosongan ini diatur oleh Solar *Charge Controller* (SCC) agar berlangsung secara aman dan tidak merusak baterai akibat *overcharge* atau *deep discharge*.

Jenis baterai yang umum digunakan pada PLTS antara lain baterai timbal-asam (*lead-acid*) seperti flood, AGM, dan gel, serta baterai *lithium-ion* atau *lithium iron phosphate* (LiFePO₄). Baterai timbal-asam umumnya lebih murah dan banyak digunakan pada sistem skala kecil, namun memiliki umur pakai lebih pendek dan efisiensi lebih rendah. Sementara itu, baterai lithium lebih mahal tetapi menawarkan keunggulan dalam hal kepadatan energi yang tinggi, umur siklus yang lebih panjang, waktu pengisian lebih cepat, dan perawatan yang lebih

mudah. Pemilihan jenis baterai sangat bergantung pada kebutuhan sistem, biaya investasi, dan tingkat keandalan yang diinginkan.

Kapasitas baterai dalam PLTS biasanya dinyatakan dalam satuan *ampere-hour* (Ah) dan harus disesuaikan dengan kebutuhan energi harian (Wh), lama waktu cadangan (*days of autonomy*), serta kedalaman pengosongan yang diizinkan (*Depth of Discharge/DoD*). Oleh karena itu, perencanaan kapasitas baterai yang tepat sangat penting agar sistem PLTS mampu menyediakan listrik secara andal sekaligus mempertahankan umur baterai dalam jangka panjang.



Gambar 4. Baterai

2.3.4 Inverter

Inverter adalah converter tegangan arus searah (DC) ke tegangan bolak balik (AC). Fungsi dari sebuah inverter adalah untuk mengubah tegangan masukan DC menjadi tegangan keluaran AC yang simetris dengan besar magnitude dan frekuensi yang diinginkan.

Jenis-jenis inverter pada PLTS

1. *Stand-Alone* Solar Panel Inverter ini adalah jenis solar inverter yang berfungsi mengubah arus DC yang berasal dari panel surya atau baterai menjadi arus AC.

Jenis inverter ini banyak digunakan untuk sistem *off grid* dan dapat berfungsi tanpa harus terkoneksi dengan jaringan listrik lainnya. Untuk dapat berfungsi secara optimal, jenis inverter ini harus digunakan berdampingan dengan Solar Charge Controller (SCC), baik tipe PWM ataupun MPPT, Sebuah alat berfungsi untuk mengatur charge dan discharge sebuah sistem listrik surya.

2. *Inverter On Grid* sistem Inverter ini memiliki fungsi yang sama dengan *stand alone solar inverter*, namun sumber utama arus DC nya adalah hanya solar panel dan hanya dapat berfungsi hanya jika terhubung dengan jaringan listrik utama (PLN). (Hutagalung S, N & Panjaitan M. 2017)



Gambar 5.. Inverter

2.4 Efisiensi Panel Surya

Efisiensi panel surya adalah rasio daya listrik output terhadap daya matahari input (iradiasi) yang diterima. Efisiensi ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya adalah suhu operasional, di mana peningkatan suhu di atas STC dapat menurunkan kinerja (Darmawan dkk., 2024)

2.5 Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Untuk mengevaluasi kinerja sistem PLTS perlu menghitung dan menganalisis data monitoring yang telah dikumpulkan dari waktu tertentu. Dimana perhitungan dan analisis data tersebut akan digunakan sebagai kriteria untuk menentukan apakah PLTS dalam kondisi yang baik.

Marion dalam Winasis dkk. (2014) menyatakan bahwa parameter unjuk kerja sistem PV mengacu pada standar yang ditetapkan oleh International Energy Agency (IEA) Photovoltaic Power Systems Program yang tercantum dalam standar IEC 6174. Tiga parameter unjuk kerja standar IEC 6174 dapat digunakan untuk menjelaskan unjuk kerja sistem secara keseluruhan yang mana terkait dengan 13 produksi energi, sumber daya matahari dan keseluruhan rugi sistem yaitu :

2.5.1 Produksi Final Sistem PV atau Final Yield (Y_f)

Total energi AC yang dihasilkan oleh sistem PV selama periode waktu tertentu dibagi dengan daya keluaran sistem PV terpasang dikenal sebagai produksi final sistem PV. Ini menunjukkan berapa lama sistem PV perlu dijalankan dengan daya penuh setiap hari untuk menghasilkan jumlah energi yang sama seperti yang diukur (Carmo de Lima, 2017: 81).

2.5.2 Rasio Performa (PR)

Rasio performa (PR) adalah hasil energi akhir dari sistem PV atau produksi final sistem PV dibagi dengan hasil referensi. Rasio kinerja (PR) menunjukkan efek kerugian secara keseluruhan pada output daya normal array PV.

Itu sangat mewakili jumlah energi yang benar-benar tersedia setelah memperhitungkan kehilangan energi. (Carmo de Lima , 2017: 81).

Nilai PR biasanya dilaporkan secara bulanan atau tahunan. Nilai yang dihitung untuk interval yang lebih kecil, seperti mingguan atau harian, mungkin berguna untuk mengidentifikasi kejadian kegagalan komponen. Kerugian karena suhu modul PV, nilai PR lebih besar di musim dingin daripada di musim panas dan biasanya berada dalam kisaran 0,6 hingga 0,8. Jika kekotoran modul PV bersifat musiman, hal itu juga dapat berdampak pada perbedaan PR dari musim panas ke musim dingin. Menurunnya nilai tahunan dapat menunjukkan kerugian permanen dalam kinerja. (Marion, B. et all, 20018)

2.6 Kajian Pustaka

Tabel 2.1 Penelitian Terkait Terdahulu

No	Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1	Rahman, M. A., & Zainuddin, A. (2023)	Analisis Perbandingan Sistem Pengering Berbasis PLTS untuk Produk Pertanian di Indonesia	Penggunaan energi surya pada sistem pengering produk pertanian mampu menghemat energi hingga 35% dan mempercepat waktu pengeringan sebesar 40% dibandingkan dengan sistem konvensional berbahan bakar fosil.
2	Suherman, S. (2024)	Analisis Energi dan Kinerja Ekonomi Sistem Pengering Hibrida Berbasis PLTS untuk Biji Kopi	Sistem pengering biji kopi berbasis PLTS menunjukkan efisiensi energi sebesar 32%, dengan hasil biji kopi memiliki kadar air

			akhir 12–13% serta aroma yang lebih baik.
3	Siagian, P. (2024)	Pengaruh Variasi Aliran Udara pada Kolektor Surya terhadap Kinerja Pengering Kopi	Variasi kecepatan aliran udara dalam kolektor surya meningkatkan efisiensi termal sebesar 28–30% dan mendistribusikan suhu secara lebih merata di ruang pengering.
4	Setiawan, D., & Hasan, F. (2022)	Optimasi Sistem Pengering Kopi Tenaga Surya dengan Kontrol Otomatis Berbasis Mikrokontroler	Sistem kontrol otomatis berbasis mikrokontroler Arduino mampu menjaga suhu pengering pada kisaran 45–55°C, meningkatkan efisiensi energi hingga 25% dan mengurangi kesalahan manusia.
5	Kebede, A. Y., et al. (2025)	Evaluasi Kinerja Pengering Kopi Tenaga Surya Skala Kecil di Ethiopia	Sistem PLTS meningkatkan efisiensi proses pengeringan hingga 33%, dengan hasil biji kopi yang lebih cerah dan kadar air lebih stabil.
6	Yusrijal, Y. (2025)	Peningkatan Efisiensi Rantai Produksi Petani Kopi Toraja melalui Sistem Pengering Otomatis Berbasis PLTS	Penerapan sistem pengering otomatis berbasis PLTS meningkatkan produktivitas petani sebesar 20% dan menurunkan ketergantungan terhadap kondisi cuaca.
7	Pratama, R., & Nugroho, B. (2022)	Pengembangan Sistem Pengering Kopi Berbasis PLTS dan IoT	Penerapan Internet of Things (IoT) memungkinkan pemantauan suhu dan kelembapan secara real time, sehingga efisiensi

			pengeringan meningkat hingga 30%.
8	Lestari, D., & Wibowo, H. (2023)	Analisis Efisiensi Termal Pengereng Hibrida Bertenaga Surya dan Listrik untuk Biji Kopi	Sistem pengereng hibrida berbasis PLTS menghasilkan efisiensi termal sebesar 34% dan menurunkan konsumsi listrik dari jaringan PLN hingga 45%.
9	Wahyuni, F., & Kadir, S. (2021)	Studi Eksperimen Pemanfaatan Energi Surya pada Proses Pengeringan Biji Kopi	Pemanfaatan energi surya langsung meningkatkan efisiensi pengeringan sebesar 29% serta mempertahankan kualitas rasa dan warna biji kopi.
10	Dewantara, R., & Firmansyah, L. (2024)	Perbandingan Kinerja Sistem Pengereng Kopi Manual dan Otomatis Berbasis PLTS	Sistem otomatis berbasis PLTS mempercepat proses pengeringan sebesar 25% dan menghasilkan kadar air akhir yang lebih seragam dibandingkan sistem manual.