

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan jenis pembangkit listrik yang memanfaatkan energi panas dari pembakaran bahan bakar fosil, adapun bahan bakar fosil yang paling banyak digunakan yaitu batu bara. Batu bara yang dibakar untuk memanaskan air didalam boiler akan menghasilkan uap dan uap tersebut digunakan untuk menggerakkan turbin uap yang kemudian menghasilkan listrik. Secara umum, proses kerja PLTU terdiri dari empat tahap utama: pembakaran bahan bakar, pengubahan air menjadi uap, penggerakan turbin oleh uap, dan konversi energi mekanik menjadi energi listrik menggunakan generator.

PLTU sering digunakan karena mampu menghasilkan daya listrik dalam jumlah besar dan stabil, sehingga cocok untuk memenuhi kebutuhan dasar (*base load*) sistem tenaga listrik. Namun, penggunaan batubara sebagai bahan bakar utama menimbulkan beberapa dampak negatif, terutama emisi gas rumah kaca (GRK) seperti karbon dioksida (CO₂), sulfur dioksida (SO₂), dan nitrogen oksida (NO_x), yang berkontribusi terhadap perubahan iklim dan pencemaran udara.

2.1.1 Teknologi PLTU Superkritikal

PLTU dengan teknologi superkritikal seperti yang digunakan di PLTU MT Sumsel-8, merupakan pengembangan dari teknologi PLTU konvensional. Pada PLTU superkritikal, uap air dipanaskan hingga berada di atas titik kritisnya (di atas 374°C dan tekanan 22,1 MPa), sehingga efisiensi pembakaran meningkat dan emisi GRK yang dihasilkan dapat dikurangi. Teknologi ini dikenal sebagai salah satu solusi untuk meminimalisir dampak lingkungan dari penggunaan batu bara. Penelitian terdahulu mengenai PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap) dengan teknologi superkritikal banyak dilakukan untuk mengeksplorasi efisiensi energi dan pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK). Nikam et al (2020) menemukan bahwa PLTU dengan teknologi superkritikal terbukti memiliki teknologi yang lebih baik dibandingkan dengan PLTU dengan teknologi

subkritikal. Hal ini dibuktikan dengan variabel eksergo-lingkungan untuk PLTU teknologi superkritikal menawarkan potensi tinggi untuk mengurangi dampak lingkungan karena adanya unit pengolahan gas buang. Penelitian tersebut memperkuat hasil penelitian Rocha dan Silva (2019) yang mana PLTU dengan teknologi ultra-superkritikal mampu mendorong terciptanya energi yang ramah lingkungan karena adanya penggabungan peralatan pengolahan gas buang, seperti penghilangan partikulat, desulfurisasi gas, dan penghilangan nitrogen oksida, dapat secara signifikan mengurangi dampak lingkungan dari sistem tersebut.

Meskipun teknologi superkritikal lebih efisien, masih terdapat tantangan besar terkait limbah padat berupa *fly ash and bottom ash* yang harus dikelola dengan baik. FABA ini memerlukan ruang penyimpanan yang luas dan berpotensi menimbulkan masalah lingkungan jika tidak diolah secara tepat.

2.1.2 Fly Ash and Bottom Ash (FABA)

Ketika memproduksi listrik, PLTU berbahan bakar batu bara akan menghasilkan limbah sisa dari pembakaran berupa FABA. Pada masa lalu FABA sendiri tidak memiliki manfaat yang berarti, yang mana abu tersebut dilepaskan ke atmosfer, namun hal ini berdampak negatif pada kualitas udara, sehingga diperlukan peralatan untuk menangkap dan mengontrol *fly ash and bottom ash* tersebut menggunakan *Bag filter/Electrostatic Precipitator* dan sejenisnya dan saat ini setelah dikumpulkan *fly ash and bottom ash* tersebut dikumpulkan dan disimpan pada *landfill*.

FABA dapat dikatakan sebagai Limbah Non-Bahan Berbahaya dan Beracun (NB3). FABA memiliki variasi dalam komposisi kimia dan mineralogi tergantung pada sifat intrinsik batubara (mineralogi yang bergantung pada sumber batu bara), kondisi pembakaran (jenis fasilitas, suhu pembakaran, lama waktu di tungku, dll.), pengolahan gas buang, metode dan periode pengumpulan, dan durasi pengendapan (Adinugroho et al., 2022). Selain sifat intrinsiknya, terdapat variasi dalam praktik industri,

regulasi/kebijakan, skema pajak, biaya/harga, lokasi geografis dari sumber abu hingga pabrik pengolahan, dan ketersediaan alternatif, yang membuat pemanfaatan menghadapi tantangan yang kompleks (Kruger, 2017).

Pemanfaatan FABA di Indonesia baru mencapai 0-0,96% untuk *fly ash* dan 0,05-1,98% untuk *bottom ash* karena baru beberapa PLTU nasional yang sudah mengantongi izin pemanfaatan (Sinaga et al, 2023). Begitu pula dengan izin penimbunan yang dilakukan di tempat pembuangan akhir (TPA) B3 yang kapasitasnya juga terbatas. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat pemanfaatan FABA masih lebih rendah dibandingkan dengan jumlah produksinya yang mana hal ini akan mengancam lingkungan ekologis di sekitar PLTU.

Sejumlah studi epidemiologi telah menggarisbawahi dampak kesehatan yang merugikan dari Abu Terbang Batu Bara (CFA), produk sampingan dari pembakaran batu bara, yang mengungkap sifat karsinogenik, mengganggu neuroendokrin, dan racun kardiorespirasi (Amster, 2021). Penelitian terkini juga menunjukkan terdapat hubungan antara paparan abu terbang di lingkungan dan masalah masa kanak-kanak berupa aktivitas berlebihan, perhatian, pengendalian impuls, dan peningkatan risiko gangguan hiperaktivitas defisit perhatian (ADHD) (Sears dan Zierold, 2017, Sears et al., 2020). Satu survei lintas sektor mengungkapkan bahwa 36% anak yang tinggal di dekat lokasi penyimpanan abu batu bara diidentifikasi menderita ADHD, dibandingkan dengan 16% pada kelompok yang tidak terpapar (Zhang et al., 2022). Selain itu, Daftar Periksa Perilaku Anak mengungkapkan bahwa anak-anak dengan abu terbang di rumah mereka menunjukkan kinerja sekolah yang lebih buruk daripada teman sebayanya yang tidak terpapar (Zierold et al., 2023).

Dampak lingkungan dari PLTU umumnya dikaitkan dengan emisi udara CO₂, CO, SO_x, NO_x, PM, dan CCP. Namun, pembakaran batu bara dan pemanfaatan limbah dapat berdampak pada kontaminasi tanah dan air, penyebaran debu, dan bahkan racun yang memasuki rantai makanan. Majlis et al (2022) menyelidiki dampak lingkungan dan kesehatan dari pembangkit

listrik tenaga batu bara Barapukuria di Bangladesh dan menemukan bahwa jumlah unsur tanah jarang yang terdeteksi secara signifikan lebih tinggi daripada bagian dunia lainnya, India, dan Tiongkok. Namun, indeks risiko ekologi dan radiologi menyiratkan risiko sedang dari FA dan risiko rendah dari BA. Barton et al (2022) mengukur risiko lingkungan dari pembangkit listrik tenaga batu bara di Turki. Hasilnya menunjukkan bahwa semua pembangkit listrik tenaga batu bara yang diteliti di Turki memiliki polutan di atas batas (PM10, SO₂, dan NO_x), yang menunjukkan potensi risiko kesehatan yang tinggi. Kalkreuth et al (2014) menyelidiki pembangkit listrik tenaga batu bara Figueira di Paran , Brasil, dan melaporkan karakteristik tanah di lima lokasi sampel dengan konsentrasi As di atas batas dan peningkatan konsentrasi Co dan Sb. Selain itu, konsentrasi PAH yang lebih tinggi di beberapa lokasi dalam radius 600m.

PLTU MT Sumsel-8 saat ini dapat memproduksi limbah FABA sebanyak 400.000 ton pertahun dengan luas lahan yang tersedia sebesar 36 Ha, yang mana berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 mengenai Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, limbah tersebut harus dikelola dengan baik agar terhindar dari kerusakan lingkungan. Pemangku kepentingan PLTU MT Sumsel-8 memutuskan untuk menyimpan limbah FABA tersebut di gudang *Ash Yard* yang berlokasi jauh dari pemukiman warga dan kawasan produktif sehingga diharapkan langkah tersebut mampu memberikan kontribusi dalam hal pencemaran lingkungan dan kesehatan pada lingkungan sekitar.

2.2 Energi Baru dan Terbarukan

Berdasarkan Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2007 mengenai Energi, sumber energi baru didefinisikan sebagai sumber energi yang dihasilkan melalui teknologi baru, baik yang berasal dari sumber energi terbarukan maupun yang tidak terbarukan. Sumber energi terbarukan sendiri adalah energi yang berasal dari sumber daya yang dapat diperbaharui dan berkelanjutan jika dikelola dengan baik. Saat ini, Indonesia menghadapi tantangan dalam sektor energi, yaitu penurunan

cadangan bahan bakar fosil dan keterbatasan akses masyarakat terhadap energi, terutama di wilayah yang kurang berkembang, terpencil, dan perbatasan. Dari segi cadangan, penurunan produksi minyak bersamaan dengan meningkatnya permintaan bahan bakar minyak (BBM) akan mengakibatkan peningkatan impor minyak mentah dan BBM. Dari segi akses, perlu adanya pengembangan energi untuk wilayah yang kurang berkembang, terpencil, dan perbatasan. Oleh karena itu, pemanfaatan energi terbarukan yang tersedia dan dapat digunakan secara berkelanjutan menjadi solusi untuk mengatasi permasalahan ini. (BPPT, 2016).

Sesuai dengan Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 mengenai Kebijakan Energi Nasional, ditetapkan bahwa target penggunaan bauran energi baru dan terbarukan (EBT) di Indonesia pada tahun 2025 adalah minimal 23%. Sumber EBT yang dapat dimanfaatkan untuk mencapai target bauran energi tersebut mencakup energi panas bumi, energi angin, bioenergi, energi surya, energi dari aliran dan terjunan air, energi gerakan, serta perbedaan suhu lapisan laut. Selain itu, juga termasuk teknologi baru untuk sumber energi tidak terbarukan seperti nuklir, hidrogen, gas metana dari batu bara (*coal bed methane*), batu bara tercairkan (*liquified coal*), dan batu bara tergaskan (*gasified coal*).

Indonesia memiliki kapasitas energi terbarukan yang mencapai 3686 GW. Meskipun demikian, hingga tahun 2022, penggunaan energi terbarukan di Indonesia hanya mencapai 2,5% atau sekitar 12,54 GW. Secara keseluruhan, rasio antara potensi dan pemanfaatan energi terbarukan (EBT) di Indonesia hingga tahun 2022 dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Sumber : (Kementerian ESDM, 2022)

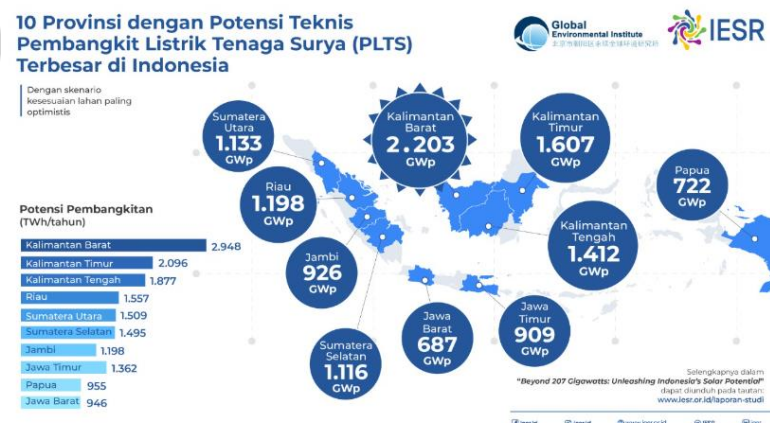
Gambar 2.1. Potensi dan pemanfaatan energi terbarukan di Indonesia

2.3 Energi Surya

Energi matahari adalah salah satu sumber energi terbarukan yang saat ini menjadi perhatian utama dalam pengembangan oleh pemerintah Indonesia. Menurut Widayana (2012), Energi matahari adalah sumber utama yang memancarkan jumlah energi yang sangat besar ke permukaan bumi. Dalam kondisi cuaca yang cerah, permukaan bumi dapat menerima sekitar 1.000 watt energi matahari per meter persegi. Secara umum, energi matahari dapat dimanfaatkan secara langsung dalam bentuk panas (energi termal) maupun sebagai listrik (fotovoltaik). Energi matahari dapat diubah menjadi energi listrik yang dapat digunakan untuk mengoperasikan berbagai perangkat elektronik, seperti menyalakan lampu, menggerakkan motor, dan lain-lain (Aryza et al., 2017). Energi surya memiliki beberapa keunggulan, di antaranya adalah ketersediaannya yang melimpah, dampak lingkungan yang minimal, kesesuaian untuk berbagai kondisi geografis, serta kemudahan dalam instalasi, pengoperasian, dan perawatan. Selain itu, energi listrik yang dihasilkan dari sumber ini dapat disimpan dalam baterai (Hasan, 2012).

2.3.1 Potensi Energi Surya di Indonesia

Indonesia adalah salah satu negara di dunia yang memiliki potensi sumber energi surya yang sangat besar. Menurut data dari Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), potensi pembangkitan energi surya di Indonesia diperkirakan dapat mencapai 207,89 GW dengan intensitas sebesar 4,80 kWh/m²/hari.



Gambar 2.2. Provinsi Dengan Potensi Teknis PLTS Terbesar di Indonesia

Berdasarkan hal tersebut, pemerintah Indonesia telah menetapkan target pemanfaatan energi surya yang diharapkan dapat mencapai 6,5 GW pada akhir tahun 2025 dan 45 GW pada akhir tahun 2050, yang setara dengan 22% dari total potensi sinar matahari yang tersedia di Indonesia. Potensi energi surya di Indonesia tersebar merata di hampir seluruh provinsi. Menurut data dari Global Environmental Institute (2022), provinsi dengan potensi energi sinar matahari terbesar adalah Kalimantan Barat, dengan kapasitas pembangkitan mencapai 2.948 TWh per tahun, diikuti oleh Kalimantan Timur dengan 2.096 TWh per tahun, Kalimantan Tengah 1.877 TWh per tahun, Riau 1.557 TWh per tahun, dan Sumatera Selatan 1.495 TWh per tahun.

2.3.2 Potensi Energi Surya di Sumatera Selatan

Potensi energi matahari di Indonesia sangat signifikan, mencapai sekitar 7.714,6 GW (Gigawatt). Provinsi Sumatera Selatan memiliki potensi energi matahari sekitar 17.233 Megawatt-peak (MWp). Namun, sebagian besar dari potensi ini masih belum dimanfaatkan, hal ini disebabkan Sejumlah tantangan masih mendera, seperti keterbatasan lahan dan investasi yang relatif belum menguntungkan. Namun, pembangkit listrik tenaga surya atau PLTS diharapkan tumbuh setidaknya dari atap-atap untuk kebutuhan kelistrikan mandiri. Berdasarkan data Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Sumsel, kapasitas terpasang energi surya di Sumsel saat ini sebesar 7,75 megawatt-peak (MWp). Jumlah tersebut masih jauh di bawah potensi energi surya di Sumsel sebesar 17.233 MWp.

2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Menurut Boxwell (2017), Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah sistem pembangkit yang memanfaatkan energi matahari sebagai sumber utama melalui penggunaan sel surya (fotovoltaik) untuk mengubah radiasi sinar matahari menjadi energi listrik. Sel surya terdiri dari lapisan-lapisan tipis yang terbuat dari

bahan semikonduktor silikon (Si) murni serta bahan semikonduktor lainnya. PLTS menghasilkan listrik arus searah (DC) dari sinar matahari, yang dapat diubah menjadi listrik arus bolak-balik (AC) jika diperlukan. Teknologi PLTS dapat diterapkan di berbagai lokasi, dan proses instalasi, pengoperasian, serta pemeliharaannya relatif sederhana, sehingga mudah diadopsi oleh masyarakat (Kementerian ESDM, 2016). Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah sumber energi yang bersih dan ramah lingkungan, tidak memiliki komponen yang berputar, tidak menghasilkan suara bising, serta tidak menciptakan limbah yang dapat merusak lingkungan sekitarnya.

Hambatan utama dalam pasar Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah tingginya biaya investasi per Watt daya yang dihasilkan, serta ketergantungan pada impor beberapa bahan baku komponen PLTS, terutama sel surya (Kementerian ESDM, 2021). Oleh karena itu, pengembangan industri sel surya lokal menjadi sangat penting untuk kemajuan PLTS di masa depan. Selain itu, kebijakan tarif pembelian listrik yang menarik bagi para investor juga merupakan faktor krusial dalam mendorong pertumbuhan investasi swasta dalam pembangunan PLTS. Menurut Kementerian ESDM (2016), beberapa keunggulan PLTS antara lain:

- a. Energi matahari dapat ditemukan di berbagai lokasi di permukaan bumi dengan ketersediaan yang melimpah, sehingga tidak pernah menimbulkan konflik sosial terkait pemanfaatan sumber energi ini;
- b. Teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) memiliki tingkat pemahaman yang tinggi di kalangan masyarakat umum, dapat dipasang oleh tenaga kerja lokal, serta dapat dioperasikan oleh pengguna dengan perawatan yang minimal dan bersifat lokal;
- c. Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) memiliki dampak positif terhadap lingkungan, karena tidak menghasilkan emisi gas, beroperasi dengan tingkat kebisingan yang rendah, berfungsi pada suhu ruangan, serta tidak menimbulkan risiko bencana bagi keselamatan manusia maupun lingkungan;

- d. Perangkat Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) kini telah banyak tersedia di pasaran dengan berbagai pilihan daya, harga, dan kualitas.

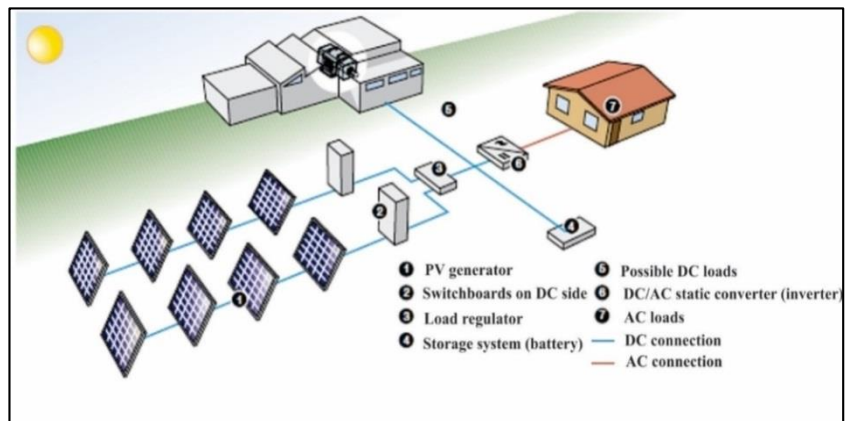
Menurut (Yuwono et al, 2021) terdapat sejumlah faktor yang berpengaruh terhadap efisiensi daya keluaran sel surya, antara lain: radiasi matahari, suhu sel surya, orientasi panel surya, sudut kemiringan panel surya, serta dampak dari bayangan. Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dapat dibedakan menjadi beberapa kategori, yaitu:

- a. Berdasarkan lokasi instalasi, sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dapat dikategorikan menjadi dua jenis, yaitu sistem tersebar (*distributed PV plant*) dan sistem terpusat (*centralized PV plant*) (Setiawan et al., 2014)
- b. Dari segi kapasitas daya yang dihasilkan, sistem PLTS dibagi menjadi tiga kategori, yaitu: PLTS skala kecil dengan kapasitas maksimum 10 kW atau kurang, skala menengah dengan kapasitas antara 10 kW hingga 500 kW, dan skala besar dengan kapasitas di atas 500 kW (Omran, 2010)
- c. Berdasarkan teknologi yang diterapkan pada bangunan terintegrasi BIPV, sistem PLTS dapat dibedakan menjadi PLTS yang dipasang di atap (*PLTS rooftop*) dan PLTS yang dipasang pada dinding bangunan (*PLTS fasade*) (Biyik et al., 2017)
- d. Berdasarkan aplikasi dan konfigurasinya, sistem PLTS dapat dibagi menjadi tiga jenis, yaitu PLTS yang tidak terhubung ke jaringan (*off grid PV plant*), sistem PLTS yang terhubung ke jaringan (*on grid PV plant*), dan kombinasi dengan sistem pembangkit listrik lainnya yang dikenal sebagai *PLTS hybrid* (Setiawan et al., 2014).

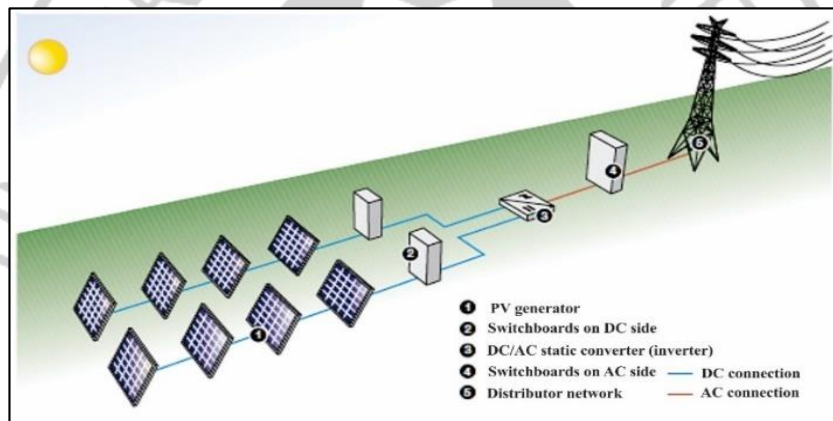
Tabel 2.1. Jenis-jenis PLTS

	PLTS <i>off grid</i>	PLTS <i>on grid</i>	PLTS <i>Hybrid</i>
Deskripsi	Sistem PLTS yang <i>output</i> daya listriknya secara mandiri menyuplai listrik ke jaringan distribusi pelanggan atau tidak terhubung dengan jaringan listrik PLN.	Bisa beroperasi tanpa baterai, karena <i>output</i> listriknya disalurkan ke jaringan distribusi yang telah disuplai pembangkit lainnya (misalnya jaringan PLN).	Gabungan dari sistem PLTS dengan pembangkit yang lainnya, misalnya: PLTD (Pembangkit Listrik Tenaga Diesel), PLTB (Pembangkit Listrik Tenaga Bayu).
Baterai	Ya, supaya bisa memberikan suplai listrik sesuai kebutuhan beban.	Tidak.	Bisa <i>off grid</i> (pakai baterai) atau <i>on grid</i> (tanpa baterai).
Manfaat	Untuk menjangkau daerah yang belum ada jaringan listrik PLN.	Untuk berbagi beban atau mengurangi beban pembangkit lain yang terhubung pada jaringan yang sama.	Memaksimalkan penyediaan energi dari berbagai potensi sumber daya.
PLTS terpusat	PLTS yang memiliki sistem jaringan distribusi untuk menyalurkan daya listrik ke beberapa rumah pelanggan. Keuntungan dari PLTS terpusat adalah penyaluran daya listrik dapat disesuaikan dengan kebutuhan beban yang berbeda-beda di setiap rumah pelanggan.		
PLTS tersebar/ terdistribusi	PLTS yang tidak memiliki sistem jaringan distribusi, sehingga setiap rumah pelanggan memiliki sistem PLTS tersendiri.		
	Contoh PLTS <i>off grid</i> tersebar: Solar Home Sistem (SHS)	Contoh PLTS <i>on grid</i> tersebar: Solar PV <i>Rooftop</i>	

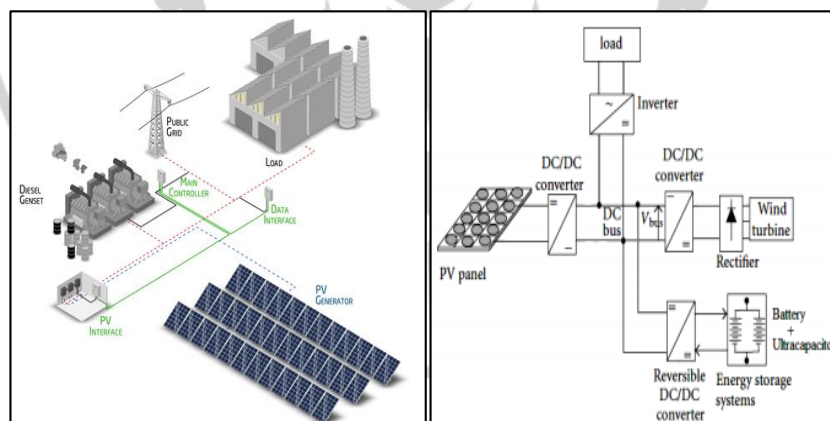
Sumber: (Budi Prasetyo et al., 2018)



Gambar 2.3. Prinsip Kerja PLTS *Off Grid* (ABB, 2014)



Gambar 2.4. Prinsip Kerja PLTS *On Grid* (ABB, 2014)



Gambar 2.5. Skema PLTS *Hybrid* (Djellad et al., 2014)

Meskipun beberapa kemajuan pada sistem PV telah dibuat, namun memastikan akses menyeluruh penggunaan listrik tetap menjadi tantangan utama di berbagai negara. Berbagai kajian literatur berlomba-lomba untuk mengkaji bagaimana kinerja sistem solar PV agar dapat memberikan gambaran efisiensi dan keandalan sistem dalam dunia nyata. Wassie & Ahlgren (2022) melakukan analisis kinerja dan keandalan sistem mini-grid PV di daerah pedesaan di Afrika tropis, di dalam penelitiannya mereka menggunakan indikator *Performance Ratio (PR)*, *module efficiency*, *capacity factor* dan *overall system efficiency*. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa sistem mini-grid PV berkinerja buruk dengan nilai PR 42% hal ini menunjukkan bahwa energi yang dihasilkan oleh *mini-grid* PV tidak dapat memenuhi kebutuhan energi hariannya. Dengan menggunakan indikator kinerja yang sama, Bhuvaneswari et al (2018) mengkaji analisis kinerja pada 15kW *off grid* solar PV selama 3 bulan, hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem PV tersebut memperoleh nilai PR sebesar 78% dengan energi total tahunan yang dihasilkan sebesar 6500 Kwh. Kinerja dan efisiensi solar PV sangat di pengaruhi berbagai faktor baik secara endogen maupun eksogen. Menurut Fauzi dan Wicaksono (2023) energi yang dihasilkan oleh sistem solar PV tergantung pada berbagai faktor. Beberapa faktor penting yang dinilai pada area termasuk kondisi komponen sistem, intensitas radiasi matahari, orientasi dan kemiringan array PV, faktor bayangan dan kebersihan perangkat.

2.5 Kebijakan Pengembangan PLTS

Indonesia telah mengimplementasikan sejumlah kebijakan untuk mendukung peralihan menuju energi hijau, di antaranya melalui Rencana Umum Energi Nasional (RUEN). Rencana ini bertujuan untuk mencapai target proporsi energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025. Selain itu, pemerintah juga telah mengeluarkan berbagai regulasi untuk mendorong pengembangan energi terbarukan, termasuk Peraturan Presiden No. 22 Tahun 2017 mengenai RUEN, yang menetapkan komposisi energi dan mendorong pemanfaatan energi terbarukan.

Peraturan Menteri ESDM No. 49 Tahun 2018 mengenai pemanfaatan PLTS atap bertujuan untuk memberikan kemudahan bagi masyarakat, industri, dan sektor

komersial dalam memanfaatkan energi surya sebagai sumber energi alternatif. Selain itu, terdapat kebijakan lain yang mendukung peralihan menuju energi hijau, yaitu peluncuran Grand Strategy Energy Nasional (GSEN) yang menekankan pada diversifikasi sumber energi dan upaya mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Rencana Umum Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021-2030 juga menjadi bagian penting dari kebijakan ini, dengan fokus pada pengembangan energi terbarukan dan pengurangan penggunaan batubara, termasuk di dalamnya energi surya.

Energi matahari adalah salah satu sumber energi terbarukan yang saat ini menjadi perhatian utama dalam pengembangan oleh pemerintah Indonesia. Menurut Widayana (2012), Energi surya merupakan sumber energi utama yang memancarkan sejumlah besar energi ke permukaan bumi. Dalam kondisi cuaca yang cerah, setiap meter persegi permukaan bumi dapat menerima sekitar 1.000 watt energi surya. Secara umum, energi ini dapat dimanfaatkan baik secara langsung dalam bentuk panas (energi termal) maupun dalam bentuk listrik melalui teknologi fotovoltaik. Energi surya yang dihasilkan dapat diubah menjadi listrik yang selanjutnya digunakan untuk mengoperasikan berbagai perangkat elektronik, seperti lampu, motor, dan peralatan lainnya (Aryza, dkk., 2017). Beberapa keunggulan energi surya menurut Hasan (2012) seperti akses yang mudah, ramah lingkungan, kesesuaian untuk berbagai kondisi geografis, serta kemudahan dalam instalasi, pengoperasian, dan pemeliharaan. Di samping itu, energi listrik yang dihasilkan dari sumber energi surya dapat disimpan dalam baterai untuk digunakan di waktu yang akan datang.

2.6 Dampak Lingkungan dari Penggunaan PLTS

Penggunaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), khususnya dalam sistem *off grid*, memiliki potensi besar untuk memberikan dampak positif bagi lingkungan. Energi surya adalah sumber energi terbarukan yang bersifat ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca (GRK) yang dapat memperburuk perubahan iklim. Di Indonesia, yang memiliki potensi energi surya yang melimpah, penerapan PLTS *off grid* dapat menjadi solusi yang efektif untuk

mengurangi ketergantungan pada energi fosil, yang selama ini menjadi penyebab utama polusi udara dan emisi karbon (Kementerian ESDM, 2020).

Sistem PLTS *off grid*, yang digunakan secara mandiri tanpa terhubung dengan jaringan listrik utama, menawarkan solusi yang berkelanjutan, terutama di daerah-daerah terpencil yang belum terjangkau oleh jaringan listrik. Dengan memanfaatkan energi matahari, sistem ini dapat mengurangi pembakaran bahan bakar fosil yang biasa digunakan dalam pembangkit listrik diesel atau pembangkit energi konvensional lainnya, yang dikenal sebagai penyumbang utama emisi CO₂. Pengurangan emisi ini berkontribusi langsung terhadap penurunan tingkat polusi udara dan perubahan iklim global (International Renewable Energy Agency [IRENA], 2021). Eka (2012) dalam penelitian ini, dilakukan uji skenario untuk menghitung dampak lingkungan serta perbandingan kandungan emisi pada beberapa Pembangkit Listrik Tenaga Konvensional. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) selama 25 tahun dengan input produksi listrik yang setara dapat mengurangi emisi CO₂ hingga 93% dibandingkan dengan pembangkit listrik berbahan bakar batubara, 90% dibandingkan dengan pembangkit listrik berbahan bakar minyak bumi, dan 89% dibandingkan dengan pembangkit listrik berbahan bakar gas LNG.

Menurut Zhang et al. (2021) dalam penelitiannya tentang dampak lingkungan PLTS di kawasan Asia Tenggara, penerapan PLTS dapat mengurangi emisi karbon secara signifikan. Setiap kWh energi yang dihasilkan dari sistem PLTS dapat mengurangi emisi CO₂ hingga 0,85 kg/kWh dibandingkan dengan pembangkit listrik berbasis batubara. Di Indonesia, yang masih mengandalkan batu bara sebagai sumber energi utama, transisi ke energi surya dapat menghasilkan pengurangan emisi yang substansial dalam jangka panjang. Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Wang et al. (2022) menunjukkan bahwa penggunaan PLTS dapat menurunkan polusi udara, terutama di daerah-daerah yang sebelumnya bergantung pada pembangkit listrik diesel atau berbasis batubara. PLTS tidak menghasilkan polutan udara berbahaya seperti sulfur dioksida (SO₂), nitrogen oksida (NO_x), atau partikel halus (PM₁₀), yang sering ditemukan pada pembangkit listrik konvensional. Dengan mengurangi pembakaran bahan bakar fosil, PLTS

berkontribusi langsung pada peningkatan kualitas udara di daerah yang mengimplementasikan teknologi ini.

Selain itu, penggunaan PLTS juga dapat mengurangi kerusakan lingkungan yang terkait dengan proses ekstraksi dan pembakaran bahan bakar fosil, serta dampak negatif lain yang ditimbulkan oleh pembangkit listrik berbasis batubara, seperti deforestasi, pencemaran tanah, dan kontaminasi air (Peters et al, 2020). Oleh karena itu, PLTS *off grid* tidak hanya menyediakan solusi energi yang lebih bersih tetapi juga mendukung upaya pelestarian lingkungan dalam jangka panjang (World Bank, 2020).

Namun demikian, meskipun teknologi ini menawarkan banyak manfaat, perlu diperhatikan bahwa dalam proses produksi dan pembuangan komponen-komponen PLTS, seperti panel surya dan baterai penyimpanan, juga dapat menimbulkan dampak lingkungan tertentu. Oleh karena itu, pengelolaan limbah dan daur ulang komponen PLTS perlu menjadi perhatian utama agar manfaat ekologis yang ditawarkan tetap optimal (United Nations Environment Programme [UNEP], 2021).

2.7 Aspek Ekonomi

Pemasangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off grid* menawarkan sejumlah keuntungan ekonomi, meskipun investasi awal yang tinggi sering menjadi hambatan utama bagi banyak pengguna. Namun, dalam jangka panjang, penggunaan PLTS dapat mengurangi biaya energi dan memberikan potensi penghematan yang signifikan.

2.7.1 Biaya Investasi Awal

Penelitian yang dilakukan oleh Vian et al. (2020) di kawasan Afrika Sub-Sahara menunjukkan bahwa meskipun biaya modul surya dan inverter telah menurun, biaya total untuk sistem PLTS *off grid* tetap mahal, terutama karena kebutuhan untuk menyimpan energi dalam baterai. Dalam sistem *off grid*, baterai penyimpanan energi yang berkualitas tinggi sangat penting untuk memastikan pasokan listrik yang stabil. Namun, biaya untuk baterai

seperti lithium-ion dan teknologi penyimpanan energi lainnya masih tergolong tinggi. Penelitian ini juga menyoroti bahwa biaya investasi yang mahal menjadi salah satu hambatan utama bagi masyarakat di daerah terpencil yang ingin beralih ke energi surya.

Fadhil et al. (2021) dalam penelitiannya yang mengkaji sistem PLTS *off grid* di Indonesia juga mencatat bahwa meskipun biaya per watt dari panel surya semakin terjangkau, total biaya investasi untuk sistem PLTS *off grid* yang mencakup panel surya, inverter, dan baterai tetap cukup tinggi, dan dapat mencapai antara IDR 15 juta hingga IDR 25 juta per kWp untuk kebutuhan rumah tangga. Meskipun sistem ini dapat mengurangi biaya operasional dalam jangka panjang, biaya awal yang tinggi sering kali menjadi faktor penentu dalam keputusan investasi, terutama di daerah yang memiliki pendapatan rendah atau terbatasnya akses ke pembiayaan.

Selain itu, Chen et al. (2020) dalam studi mereka mengenai biaya PLTS di kawasan Asia Tenggara menyebutkan bahwa biaya awal investasi yang tinggi sering kali membuat banyak konsumen lebih memilih untuk tetap bergantung pada sumber energi konvensional, seperti generator diesel atau pembangkit listrik berbasis fosil. Meskipun penggunaan energi surya *off grid* dapat menghasilkan penghematan dalam jangka panjang, tingginya biaya modal awal membuat teknologi ini kurang menarik bagi sebagian besar rumah tangga yang memiliki anggaran terbatas.

2.7.2 Biaya Penghematan Energi

PLTS *off grid* dapat menghasilkan penghematan energi yang signifikan dalam jangka panjang. Rosen et al. (2021) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa dengan menggunakan sistem PLTS *off grid*, rumah tangga dapat menghemat hingga 70% dari total biaya energi bulanan dibandingkan dengan menggunakan pembangkit listrik berbasis diesel atau listrik PLN di daerah terpencil. Dalam beberapa kasus, sistem PLTS dapat menghasilkan penghematan lebih besar apabila dikombinasikan dengan teknologi penyimpanan energi, seperti baterai, yang dapat mengurangi

ketergantungan pada sumber energi konvensional. Sulaiman et al. (2020) berpendapat mengenai penerapan PLTS *off grid* pada skala komunitas di wilayah Indonesia Timur menunjukkan bahwa penggunaan PLTS untuk pemenuhan energi di desa-desa terpencil dapat menghasilkan penghematan biaya energi yang signifikan, hingga 50-60%. Komunitas yang sebelumnya bergantung pada generator diesel untuk penerangan dan pemenuhan kebutuhan energi lainnya, dapat menggantikan sistem tersebut dengan energi surya, yang jauh lebih murah dalam operasional jangka panjang.

2.7.3 Biaya Operasional dan Pemeliharaan

Beberapa Penelitian mengungkapkan bahwa biaya operasional dan pemeliharaan untuk sistem PLTS *off grid* relatif rendah. Peters et al. (2020) menunjukkan bahwa biaya pemeliharaan tahunan untuk sistem PLTS biasanya berkisar antara 1-2% dari biaya awal pemasangan, yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan biaya pemeliharaan pembangkit listrik berbasis fosil yang membutuhkan bahan bakar dan perawatan mesin yang lebih sering. Oleh karena itu, sistem PLTS dapat menawarkan biaya operasional yang stabil dan tidak terpengaruh oleh fluktuasi harga bahan bakar fosil. Sistem PLTS *off grid* di China menunjukkan bahwa biaya pemeliharaan tahunan untuk sistem PLTS relatif rendah, berkisar antara 1-2% dari total biaya instalasi. Penelitian ini mencatat bahwa sistem PLTS *off grid* tidak memerlukan bahan bakar dan memiliki komponen yang relatif sedikit dibandingkan dengan pembangkit listrik berbasis mesin pembakaran, yang memerlukan perawatan rutin yang lebih intensif dan biaya bahan bakar yang tinggi. Panel surya hanya memerlukan pembersihan berkala dan pemeriksaan sistem inverter serta baterai untuk memastikan kinerja yang optimal (Wang et al, 2020).

Menurut Huang et al. (2021), dalam penelitian mereka tentang implementasi PLTS di daerah pedesaan, biaya pemeliharaan sistem PLTS *off grid* jauh lebih rendah daripada pembangkit berbasis diesel. Mereka menyatakan bahwa meskipun ada biaya awal yang tinggi, dalam jangka

panjang PLTS *off grid* mengurangi pengeluaran untuk bahan bakar dan perawatan mesin yang memerlukan penggantian suku cadang secara rutin. Biaya pemeliharaan tahunan untuk sistem PLTS hanya mencakup penggantian komponen seperti baterai, yang umumnya memiliki umur 5 hingga 10 tahun, sedangkan pembangkit diesel memerlukan penggantian mesin, suku cadang, dan pengisian bahan bakar secara teratur.

Sulaiman et al. (2021) yang mengkaji penerapan PLTS *off grid* di wilayah Indonesia Timur menunjukkan bahwa dengan perkembangan teknologi terbaru, biaya pemeliharaan sistem PLTS semakin berkurang. Penggunaan inverter dan baterai yang lebih efisien serta teknologi panel surya yang lebih tahan lama mengurangi frekuensi penggantian dan perawatan komponen, sehingga mengurangi biaya operasional. Sistem dengan teknologi terbaru juga lebih efisien dalam menghasilkan energi, sehingga memperpanjang umur sistem dan mengurangi kebutuhan pemeliharaan secara keseluruhan.

2.8 Studi Evaluatif

Evaluasi, menurut Sukmadinata (2009), adalah proses pengumpulan informasi mengenai kinerja suatu program atau kegiatan yang kemudian digunakan untuk menentukan alternatif yang tepat dalam pengambilan keputusan. Fungsi utama evaluasi adalah menyediakan informasi yang berguna bagi pengambil keputusan untuk merumuskan kebijakan berdasarkan hasil evaluasi tersebut. Penelitian evaluatif bertujuan untuk mengukur dan menentukan apakah suatu program atau kegiatan telah berjalan sesuai dengan harapan melalui prosedur ilmiah yang sistematis, termasuk pengumpulan, analisis, dan peninjauan pelaksanaan secara objektif. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk merumuskan kebijakan dengan mempertimbangkan nilai-nilai positif dan keuntungan dari suatu program (Hayati, 2021).

Arikunto (2012) menyebutkan empat jenis kebijakan yang dapat diambil berdasarkan hasil evaluasi:

1. Menghentikan Program: Jika program dianggap kurang menguntungkan atau tidak berjalan sesuai harapan.
2. Merevisi Program: Jika terdapat kekurangan pada beberapa aspek yang perlu diperbaiki.
3. Melanjutkan Program: Jika program berjalan sesuai rencana dan memberikan manfaat yang baik.
4. Desimilasi: Menyebarkan program ke lembaga atau unit lain yang dianggap berhasil dilaksanakan.

2.9 Studi Exploratif & Keberlanjutan

Creswell, 2014 Studi eksploratif bertujuan untuk memahami fenomena yang belum banyak diteliti atau belum sepenuhnya dipahami. Pendekatan ini sering digunakan untuk menggali wawasan awal, membangun hipotesis, atau mengidentifikasi variabel-variabel yang relevan. Metodologi yang sering digunakan meliputi pendekatan kualitatif, seperti wawancara mendalam, focus group discussion (FGD), atau observasi partisipatif.

Basiago (1999) menyapaikan bahwa pembangunan berkelanjutan dapat didefinisikan sebagai suatu proses yang memenuhi kebutuhan generasi saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka. Program Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) menegaskan bahwa pembangunan berkelanjutan merupakan tujuan global yang diharapkan dapat menciptakan masa depan yang lebih baik. Wulf dan rekan-rekannya (2018) menjelaskan bahwa SDGs berfungsi sebagai indikator yang disepakati secara internasional untuk menilai keberhasilan suatu negara dalam mencapai pembangunan berkelanjutan, yang terdiri dari 17 tujuan, termasuk menjamin kesehatan yang baik, akses terhadap energi yang berkelanjutan, serta pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan.

Sathaye, dkk. (2011) menyatakan bahwa pengembangan energi terbarukan berkontribusi signifikan terhadap pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan melalui:

1. Pembangunan Ekonomi dan Sosial: Mendorong pertumbuhan ekonomi dan peningkatan kesejahteraan sosial.
2. Peningkatan Akses Energi: Memperluas akses energi yang bersih dan terjangkau.
3. Peningkatan Ketahanan Energi: Mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil.
4. Mitigasi Perubahan Iklim: Mengurangi emisi gas rumah kaca dan dampak negatif terhadap kesehatan dan lingkungan.

Pemanfaatan energi terbarukan, seperti energi surya, mencakup aspek ekonomi, lingkungan, dan sosial sesuai dengan definisi pembangunan berkelanjutan oleh Basiago (1999) dan (Boyer et al., 2016)

BAB III

