BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Dalam melaksanakan sebuah penelitian, tentu didalamnya tidak lepas dari sebuah referensi dasar yang digunakan untuk memperkuat kerangka penelitian. Terutama untuk memperoleh gambaran mengenai perkembangan ilmu pengetahuan pada bidang terkait yang relevan. Berdasarkan pada penelitian terdahulu yang telah dilakukan terkait pemanfaatan teknologi PLTS *on-grid*, banyak literatur yang menunjukkan bahwa penelitian mengenai PLTS *on-grid* tidak lagi hanya menekankan pada potensi produksi energi surya. Diketahui bahwa juga semakin menyoroti kesesuaian profil beban dengan produksi PV serta kinerja sistem melalui parameter seperti *performance ratio* dan *losses* yang dihasilkan. Berikut merupakan beberapa penelitian yang relevan yang sesuai dengan topik penelitian tesis ini:

a. Penelitian yang dilakukan oleh (Alsmadi et al., 2017) meneliti terkait pemanfaatan sistem PV berkapasitas 2 MWp yang digunakan untuk mensuplai kebutuhan energi tambahan pada pembangkit listrik konvensional Jordan IPP3 yang berkapasitas 573 MW. Penelitian dilakukan dengan mengevaluasi aspek teknis dan ekonomi dari penerapan PV terhadap pemakaian energi internal pembangkit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa saat unit tidak beroperasi, pembangkit tetap mengimpor energi sekitar 48 MWh per hari dari jaringan transmisi nasional. Dengan dilakukan implementasi sistem PV terbukti menurunkan ketergantungan terhadap energi impor, dengan *payback period* sekitar 5 tahun berdasarkan penghematan energi impor. Penelitian ini relevan karena membahas pemanfaatan PV untuk *auxiliary energy demand* pada pembangkit listrik konvensional.
b. Penelitian yang dilakukan oleh (Omari & Ayadi, 2017) mencoba untuk memberikan usulan metode baru dengan model hibrida untuk mengintegrasikan solar PV ke jaringan listrik Jordan secara tidak langsung yang melalui pembangkit listrik konvensional. Memanfaatkan energi surya yang digunakan untuk mensuplai beban internal pembangkit saat radiasi matahari tersedia. Kemudian hasil dari simulasi

menggunakan PVsyst 6.40 pada sistem PV berkapasitas 8 MWp menunjukkan bahwa model ini tidak mengalami kendala teknis dan lebih unggul secara ekonomi dibandingkan dengan sistem PV yang langsung terhubung ke jaringan. Skema hibrida ini menghasilkan IRR sebesar 13,2%, *payback period* 7 tahun, dan NPV sebesar USD 16.841.528. Nilai tersebut lebih baik dibandingkan sistem *grid-connected* biasa yang IRRnya hanya 9,9%, *payback period* 9 tahun, dan NPV USD 12.120.193. Selain itu, model ini juga mampu menghindari biaya transmisi sebesaar USD 2.095.000 dan menghemat bahan bakar sebesar USD 782.248 per tahun. Penelitian ini relevan karena penelitian tersebut juga membahas pemanfaatan PLTS sebagai sumber daya listrik pendukung untuk pemakaian sendiri. Dimana energi matahari digunakan untuk mensuplai *in-house load* pembangkit listrik konvensional sehingga dapat mengurangi konsumsi energi dari sistem utama.

c. Penelitian yang dilakukan oleh (Xin-gang & Yi-min, 2019) menunjukkan bahwa PLTS atas skala kecil di China masih memiliki kinerja ekonomi yang baik meskipun terjadi penurunan subsidi. Dengan menggunakan model analisis biaya-manfaat yang mempertimbangkan inflasi terhadap arus kas, hasil studi menunjukka bahwa proyek PLTS atas memiliki *payback period* yang singkat, risiko investasi yang rendah, IRR di atas 10%, serta LCOE sebesar 0,2727-0,5573 CNY/kWh. Penelitian ini juga menegaskan bahwa dalam analisis keekonomian PLTS atap, faktor seperti nilai waktu uang dan inflasi perlu diperhitungkan selain daripada aspek teknis dan biaya investasi. Relevansi dari penelitian Xin-gan & Yi-min adalah kesamaan fokus dalam menilai kelayakan ekonomi terhadap pemanfaatan PLTS yang terhubung ke jaringan untuk menyuplai beban lokal.
d. Penelitian yang dilakukan oleh (Jiang et al., 2019) membahas mengenai usulan integrasi PV ke dalam PLTU batubara sebagai upaya untuk menggantikan sebagian *auxiliary power* dengan energi listrik terbarukan. Hasil studi di wilayah barat laut China menunjukkan bahwa sistem ini mampu menurunkan konsumsi daya internal pembangkit sekaligus mengurangi emisi karbon. Selain itu, karena PV terintegrasi langsung dengan sistem pembangkit, maka tidak terjadi *curtailment* energi, berbeda dengan sistem PV yang berdiri sendiri. Dari sisi ekonomi, biaya investasi dan O&M juga dinilai layak dibandingkan instalasi PV lainnya. Penelitian ini relevan karena

menunjukkan bahwa integrasi PLTS pada sistem internal pembangkit dapat mengurangi baban pemakaian sendiri, menekan konsumsi energi dari sumber utama, dan memeberikan manfaat teknis serta ekonomis.

e. Penelitian yang dilakukan oleh (Cavalcante et al., 2019) adalah mengevaluasi kinerja PLTS berkapasitas 3 MWp yang dirancang untuk memberikan kompensasi energi listrik pada kantor cabang bank di Mogi Mirim, Brasil. Dengan menggunakan PVsyst, penelitian menganalisis keluaran energi efektif, energi yang diinjeksi ke jaringan, *performance ratio*, dan produksi energi per kWp yang terpasang. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan energi sekitar 4.677 MWh/tahun, dengan 4560 MWh/tahun diinjeksikan ke jaringan, *performance ratio* sekitar 76%, dan produksi energi yang dapat dimanfaatkan sebesar 3,82 kWh/kWp/hari. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kinerja sistem sangat dipengaruhi oleh kondisi lokasi dan iklim yang mendukung. Penelitian tersebut relevan karena juga membahas penerapan dari PLTS *on grid* sebagai sumber energi listrik yang terhubung dengan sistem eksisting untuk menekan konsumsi listrik dari sumber utama.
f. Penelitian yang dilakukan oleh (Rodríguez-Martinez & Rodríguez-Monroy, 2021) membahas kelayakan ekonomi PLTS atap untuk *self-consumption* pada sektor industri dengan mengembangkan model numerik dan metodologi perhitungan untuk memperkirakan daya maksimum yang terpasang, produksi energi, biaya instalasi, dan LCOE berdasarkan lokasi fasilitas dan luas atap. Hasil analisis menegaskan bahwa profitabilitas instalasi PLTS dipengaruhi oleh beberapa variabel teknis utama, seperti *tilt*, lokasi, teknologi modul, dan luas area yang tersedia. Penelitian ini relevan karena terdapat kesamaan dalam mengkaji kelayakan teknis dan ekonomi PLTS *on-grid* untuk pemakaian sendiri, terutama dalam menentukan kapasitas optimal, produksi energi, biaya investasi, dan LCOE sebagai dasraa pengurangan konsumsi listrik dari sumber eksternal.
g. Penelitian yang dilakukan oleh (Albar et al., 2022) membahas tentang integrasi PLTS *on-grid* 689 kWp pada PLTU 615 MW sebagai upaya untuk mengurangi *auxiliary load*, menekan konsumsi bahan bakar, dan menurunkan emisi lingkungan. Sistem PLTS tersebut dibangun di area *ash disposal* seluas 5.000 m^2 dengan menggunakan

2.120 PV modul dan 11 grid inverter. Dari hasil simulai dengan helioscope menunjukkan potensi produksi energi listrik sebesar 977.442 kWh/tahun dengan *performance ratio* sebesar 79,3%. Sedangkan hasil operasi aktual tahun 2021 mencapai 1.096.105 kWh/tahun, produksi tersebut lebih tinggi dari hasil estimasi simulasi. Dari implementasi PLTS ini mampu menurunkan *auxiliary power load* sebesar 0,4932% serta dapat menghemat 263,065 kl diesel per tahun dan 386,634-ton batubara per tahun lau mengurangi emisi CO_2 sebesar 920,729 ton per tahun. Penelitian ini relevan karena juga membahas terkait integrasi PLTS *on grid* ke dalam sistem kelistrikan internal pembangkit untuk mensuplai beban pemakaian sendiri.

h. Penelitian yang dilakukan oleh (Burhandono et al., 2022) membahas tentang perencanaan PLTS *rooftop on-grid* pada gedung kantor PLTU Amurang sebagai upaya dalam mengurangi konsumsi listrik internal yang masih disuplai dari unit pembangkit utama. Sistem yang direncanakan terdiri dari 6 panel surya berkapasitas 300 Wp dan 1 inverter 2000 W, dengan estimasi biaya investasi sebesar Rp 71.500.000. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa implementasi PLTS dapat berpotensi menghemat energi rata-rata sebesar 133 kWh per bulan serta menurunkan NPHR minimal 20,15 kCal/kWh per bulan, sehingga efisiensi pembangkit utama dapat meningkat. Relevansi dari penelitian ini adalah bahwa terdapat kesamaan yang membahas pemanfaatan PLTS *on grid* sebagai sumber energi listrik untuk beban pemakaian sendiri di lingkungan pembangkit, dan bukan untuk tujuan utama menjual energi ke luar sistem pembangkit.

i. Penelitian yang dilakukan oleh (Syafriansyah et al., 2024) membahas tentang perencanaan PLTS di PLTU Labuan PT PLN (Persero) untuk mengurangi konsumsi listrik pemakaian sendiri pada pembangkit. Sistem dirancang pada area seluas 7.200 m^2 dan dianalisis melalui survei lapangan, pengukuran *shading*, serta simulasi menggunakan PVsyst dengan membandingkan skema *on-grid* dan *off-grid*. Hasil peneltian menunjukkan bahwa PLTS *on grid* lebih layak secara teknis dan ekonomis, dengan BCR sebesar 1,20 dan *payback period* selama 16,93 tahun. Selain itu, implementasi sistem ini berpotensi menurunkan emisi karbon sebesar 84,187-ton CO_2e per tahun. Penelitian tersebut relevan karena adanya kesamaan dalam mengkaji

kelayakan teknis dan ekonomi terhadap penerapan PLTS *on grid* pada lingkungan pembangkit untuk pemakaina energi listrik sendiri.

j. Penelitian yang dilakukan oleh (Ekacitta & Iyi, 2025) mengkaji kelayakan teknis dan ekonomi PLTS *ground-mounted* di ibu kota baru Indonesia yang terletak di Kabupaten Penajam Paser. Dimana pada area tersebut memiliki potensi iradiasi dengan GHI sebesar 1.753 kWh/m^2/ tahun dan potensi energi surya sebesar 13.749 MW. Desain sistem dianalisis menggunakan Helioscope dan PVsyst, sedangkan kelayakan ekonomi dievaluasi berdasarkan dua skema tarif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain optimal memiliki kapasitas 14,79 MWp dan mampu menghasilkan 22,4 GWh/tahun. Dari sisi ekonomi, sistem ini dinilai layak dengan IRR 22,99%, NPV of GBP 6.083.060, *payback period* 8,4 tahun, dan LCOE of GBP 0,056/kWh. Penelitian ini relevan karena sama-sama menilai kelayakan teknis dan ekonomi sistem PLTS melalui analisis desain, estimasi produksi energi, serta indikator keekonomian seperti IRR, NPV, *payback period*, dan LCOE.

k. Penelitian yang dilakukan oleh (Prabawa & Sidqi, 2025) menganalisis potensi energi surya, desain teknis PLTS hibrida, dan penerapan *solar tracker* di Pulau Padang Tikar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pulau ini memiliki potensi surya yang tinggi dengan radiasi rata-rata 5,3 kWh/m^2/hari, sehingga mendukung pengembangan PLTS. Untuk memenuhi kebutuhan energi masyarakat sebesar 700 kWh/hari, dirancanglah sistem PLTS hibrida dengan kapasitas 978 kWp, baterai 875 kWh, dan PLTD *back up* 10% dengan LCOE sebesar Rp 4.099/kWh. Kemudian penggunaan *solar tracker* satu sumbu berpotensi meningkatkan efisiensi hingga ±25% dengan tambahan investasi Rp 300 juta dan *payback period* 6 tahun. Sedangkan dari sisi lingkungan, proyek ini mampu menurunkan emisi karbon bersih sebesar 474 ton CO_2 per tahun atau 11.850 ton CO_2 selama 25 tahun, serta berpotensi memberikan tambahan pendapatan dari perdagangan karbon. Penelitian ini relevan karena sama-sama melakukan pemanfaatan energi surya untuk menurunkan biaya pembangkitan energi dan mengurangi ketergantungan pada pembangkitan listrik berbasis bahan bakar fosil.

Berdasarkan berbagai studi yang telah dilakukan tersebut, dapat dipahami bahwa tren penggunaan energi terbarukan dalam rangka mengurangi konsumsi energi berbasis fosil

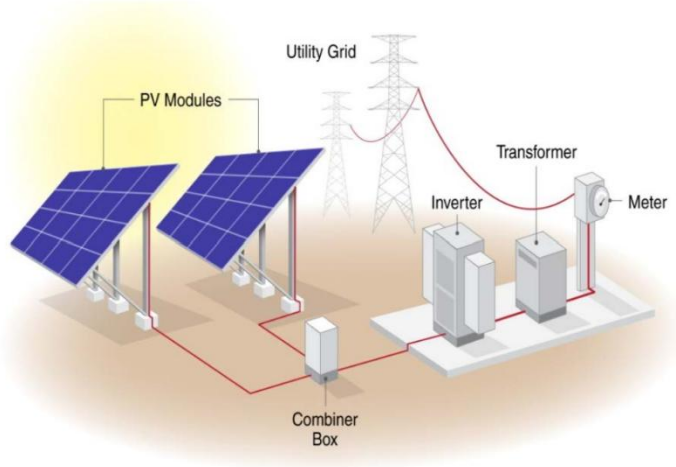
serta menekan biaya impor listrik mengarah pada kombinasi maupun integrasi energi terbarukan. Hal tersebut juga tidak terlepas dari dorongan kebijakan yang mendukung adanya transisi energi serta upaya dekarbonisasi di level nasional maupun internasional. PLTS dipilih karena berbagai pertimbangan, salah satunya karena potensi iradiasi yang melimpah diseluruh belahan dunia, serta fleksibilitas dalam implementasinya. Selain itu, dalam perancangan teknis sistem PLTS dapat dilakukan melalui simulasi dengan menggunakan *software* PVsyst, setelah itu terkait kelayakan ekonominya dapat dianalisis menggunakan indikator seperti NPV, IRR, DPP, dan LCOE. Dengan mempelajari dan memahami terkait beberapa penelitian terdahulu yang telah dilakukan, penelitian ini diharapkan dapat mengisi maupun melengkapi terkait adanya gap penelitian, khususnya dalam konteks pemakaian energi listrik sendiri di lingkungan pembangkit listrik yang berada di Indonesia.

2.2 Landasan Teori

Landasan teori merupakan fondasi konseptual yang menempatkan penelitian dalam kerangka ilmiah yang jelas, dimana melalui landasan teori, peneliti dapat menghimpun, menyeleksi, serta mensintesis teori, konsep, serta temuan terdahulu yang paling relevan untuk menjelaskan masalah penelitian, mempertegas arah analisis, dan menunjukkan hubungan logis antarkonsep yang sedang dikaji. Selanjutnya, landasan teori tidak hanya berfungsi sebagai kumpulan definisi semata, melainkan sebagai dasar yang membenarkan terhadap alasan suatu masalah penting diteliti, pengetahuan apa yang hendak ditambahkan, serta bagaimana desain penelitian selaran dengan persoalan yang diangkat. Oleh karena itu, keberadaan landasan teori membantu peneliti agar dapat menjaga ketajaman fokus serta membangun argumentasi akademik yang kuat. Dengan demikian, landasan teori dapat dipahami sebagai dasar intelektual yang menjembatani antara masalah penelitian, tujuan penelitan, metode yang dipilih, hingga temuan yang dihasilkan.

2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Secara umum, Pembangkit Listrik Tenaga Surya dapat didefinisikan sebagai sebuah sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan energi matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Efek ini terjadi ketika foton dari cahaya matahari mengenai permukaan sel surya, kemudian memicu pergerakan elektron pada material semikonduktor sehingga menghasilkan arus listrik searah atau *direct current* (DC). Dengan demikian, PLTS berbasis fotovoltaik merupakan sistem konversi energi yang secara langsung mengubah energi cahaya menjadi energi listrik tanpa melalui proses pembakaran maupun pergerakan mekanis seperti pada pembangkit listrik konvensional (Ali et al., 2025).



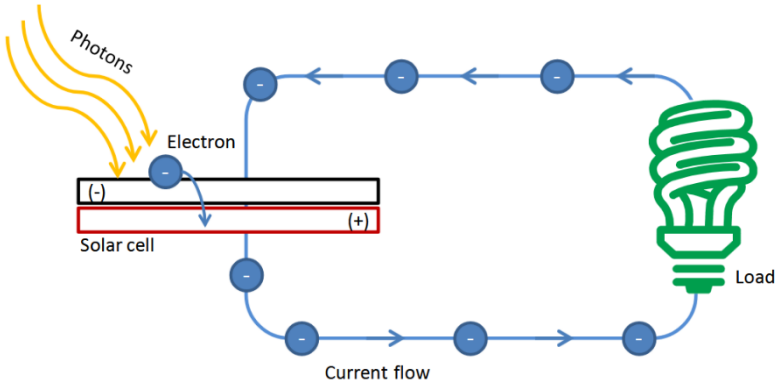
Gambar 2.1 PLTS beserta komponennya (Kiatreungwattana et al., 2016)

Dalam praktiknya, PLTS tidak hanya terdiri atas panel surya saja, tetapi merupakan satu kesatuan sistem yang melibatkan berbagai komponen pendukung agar energi listrik yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara optimal. Unit terkecil dalam PLTS adalah sel surya, yang kemudian dirangkai menjadi sebuah modul. Beberapa modul disusun menjadi string, dan sejumlah string membentuk array untuk mencapai kapasitas daya tertentu sesuai dengan kebutuhan beban (Pijoh et al., 2024). Oleh karena itu, pengertian PLTS perlu dipahami tidak semata-mata sebagai kumpulan panel, melainkan sebagai sistem energi yang tersusun dari komponen konversi, pengendalian, proteksi, dan distribusi yang bekerja secara terintegrasi (Kiatreungwattana et al., 2016).

Seiring meningkatnya kebutuhan energi bersih dan dorongan global terkait transisi energi dan upaya dekarbonisasi, PLTS menjadi salah satu pilihan yang paling banyak dikembangkan karena bersifat modular sehingga praktis, relatif mudah dipasang, serta dapat diterapkan pada berbagai skala mulai rumah tangga hingga sistem kelistrikan skala utilitas (Mdallal et al., 2025). Selain ramah lingkungan, PLTS juga memiliki keunggulan dalam hal kemudahan integrasi dengan sistem kelistrikan eksisting. Teknologi ini dapat dirancang sebagai sistem mandiri, *grid-connected*, maupun dikombinasikan dengan sumber energi lain dalam bentuk sistem hibrida. Dalamm konteks sisem tenaga listrik modern, PLTS tidak hanya dipandang sebagai sumber energi alternatif, tetapi juga sebagai bagian penting dari strategi peningkatan efisiensi energi, diversifikasi pasokan listrik, dan pengurangan ketergantungan pada bahan bakar fosil. Oleh karena itu, pemahaman mengenai prinsip dasar, cara kerja, jenis serta komponen utama PLTS menjadi sangt penting dalam mendukung analisis teknis maupun ekonomi pada suatu penelitian (Morey et al., 2023). Dalam penelitian yang dilakukan ini, PLTS berfungsi sebagai sumber energi terbarukan yang hasil produksinya digunakan sebagai *auxiliary power* pada LV bus PDC GT.

2.3.1 Prinsip Kerja PLTS

Pada dasarnya cara kerja dari PLTS dimulai dari proses penyerapan energi matahari oleh sel surya. Kemudian pada saat permukaan sel surya menerima cahaya matahari, foton yang tertangkap akan mentransfer energinya kepada elektron dalam material semikonduktor. Dari kondisi tersebut menyebabkan elektron terlepas dan bergerak membentuk arus listrik. Proses ini menghasilkan listrik dalam bentuk arus searah (DC). Besarnya energi listrik yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain intensitas radiasi matahari, temperatur PV modul, sudut pemasangan, *shading*, hingga kondisi kebersihan modul. Dengan kata lain, performa PLTS sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, iklim, serta kualitas instalasi sistem (Mukhtar, 2025).

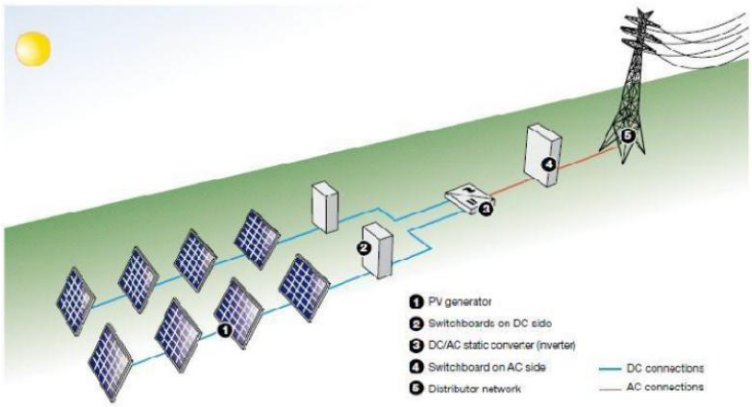


Gambar 2.2 Pembangkitan listrik dari sel PV (Kiatreungwattana et al., 2016)

Selanjutnya arus DC yang telah dihasilkan oleh modul surya kemudian dialirkan menuju perangkat pengkondisi daya, terutama inverter yang akan diubah menjadi arus bolak-balik (AC) agar dapat digunakan oleh beban listrik konsumen atau dihubungkan pada *grid*. Pada sistem modern, proses ini biasanya dilengkapi dengan teknologi MPPT, yaitu metode pengendalian yang menjaga agar modul sury tetap bekerja pada titik daya maksimum meskipun iradiasi dan temperatur berubah-ubah. Dengan adanya MPPT dan inverter yang sesuai, PLTS dapat beroperasi lebih efisien, stabil, sesuai dengan karakteristik sistem tenaga yang digunakan (Guanghua et al., 2025).

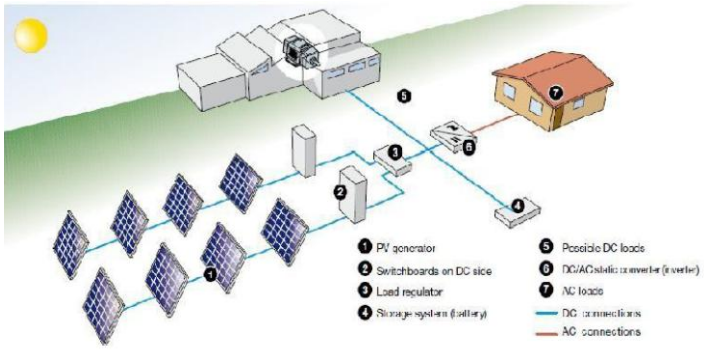
2.3.2 Jenis – Jenis PLTS

Berdasarkan konfigurasi dari sistem integrasinya, PLTS secara umum dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu PLTS *on-grid, off-grid,* dan *hybrid* (Samsurizal, dkk., 2021). PLTS *on-grid* merupakan sistem yang dihubungkan langsung dengan jaringan listrik, sehingga energi yang dihasilkan panel surya dapat langsung digunakan untuk mensuplai beban, serta pada konsisi tertentu dapat berinteraksi dengan *grid*. Sistem ini banyak digunakan pada bangunan, fasilitas komersial, dan industri karena tidak memerlukan penyimpanan energi utama dalam bentuk baterai, sehingga biaya investasi awal cenderung lebih rendah.



Gambar 2.3 PLTS *on grid* (Samsurizal, dkk., 2021)

Dalam banyak kasus, PLTS *on grid* dipilih karena pertimbangan untuk menekan konsumsi listrik dan *grid* dan meningkatkan pemanfaatan energi listrik sendiri (Putty Yunesti, Fino Agustian Jourdan Gamas, FX Nugroho Soelami, 2025).



Gambar 2.4 PLTS *off grid* (Samsurizal, dkk., 2021)

Sementara itu, PLTS *off grid* merupakan sistem yang bekerja secara mandiri tanpa terhubung dengan jaringan listrik, sehingga umumnya memerlukan baterai sebagai media untuk menyimpan energi listrik ketika matahari tersedia dan memasok beban saat malam hari atau saat cuaca mendung. PLTS jenis ini biasanya diterapkan pada daerah terpencil yang belum terjangkau oleh jaringan listrik. Adapaun PLTS *hybrid* adalah sebuah sistem yang menggabungkan PLTS dengan sumber energi lain, seperti baterai, genset, atau jaringan listrik. Tujuannya adalah untuk meningkatkan keandalan suplai dan fleksibilitas operassi. Perkembangan sistem *hybrid* sendiri menunjukkan bahwa integrasi beberapa sumber energi dapat menjadi solusi yang efektif untuk menghadapi variabilitas radias matahari sekaligus menjaga kontinuitas pasokan daya (Basnet et al., 2023).

2.3.3 Komponen Utama PLTS

Komponen utama dalam sisem PLTS pada dasarnya terdiri atas modul surya, struktur penyangga (*mounting*), inverter, kabel dan sistem proteksi, serta perangkat monitoring. Modul surya memiliki fungsi sebagai komponen utama yang menagkap radiasi matahari dan mengubahnya menjadi listrik DC. Struktur penyangga berperan dalam menopang modul agar terpasang kuat, aman, dan berada pada sudut kemiringan serta orientasi yang sesuai terhadap arah datangnya sinar matahari. Selain itu, instalasi PLTS juga memerlukan kabel, *combiner box*, proteksi arus lebih, *grounding*, dan sistem pengaman lain untuk memastikan keandalan operasi dan keselamatan instalasi (Abdulla et al., 2024).



Gambar 2.5 PV modul dan inverter (Samsurizal, dkk., 2021)

Pada sisi konversi daya, inverter merupakan salah satu komponen penting karena berfungsi untuk mengubah listrik DC menjadi AC dan mengatur sinkronisasi dengan beban maupun jaringan listrik. Pada beberapa sistem, inverter juga dilengkapi dengan fungsi MPPT untuk memaksimalkan daya keluaran dari modul surya. Dalam sisem *off-grid* atau *hybrid*, baterai dan *charge controller* turut menjadi komponen penting karena berfungsi untuk menyimpan energi dan mengatur proses pengisian serta pelepasan daya. Dengan demikian, keberhasilan operasi PLTS tidak hanya ditentukan oleh kualitas panel surya, tetapi juga oleh kesesuaian seluruh komponen sistem. Dimulai dari sisi pembangkitan, konversi, proteksi hingga pengendalian dan pemantauan performa dari sistem PLTS tersebut (Boscaino et al., 2024).

2.4 PDC

Power Distribution Center (PDC) merupakan sebuah panel pusat distribusi daya tegangan rendah yang secara fungsional setara dengan LVMDP, PHB-TR, atau panel utama tegangan rendah. Pada literatur yang berasal dari Indonesia, menjelaskan bahwa LVMDP adalah panel utama distribusi yang mendistribusikan aliran listrik menuju beban yang berada pada panel-panel yang lebih kecil. Berisi pemutus daya utam dan pemutus-pemutus beban yang tersambung ke panel subdistribusi. Sementara itu, PHB-TR didefinisikan sebagai panel yang memuat satu atau lebih perlengkapan hubung bagi beserta alat metering, pengaman, dan pengendali yang saling terhubung untuk membagi dan melindungi penyaluran tenaga listrik. Dengan dasar ini, PDC dapat diposisikan sebagai panel pusat yang menerima daya dari trafo pada level tegangan rendah yang kemudian didistribusikan ke sistem beban yang berada di bawahnya (Deni Hendarto, 2016).



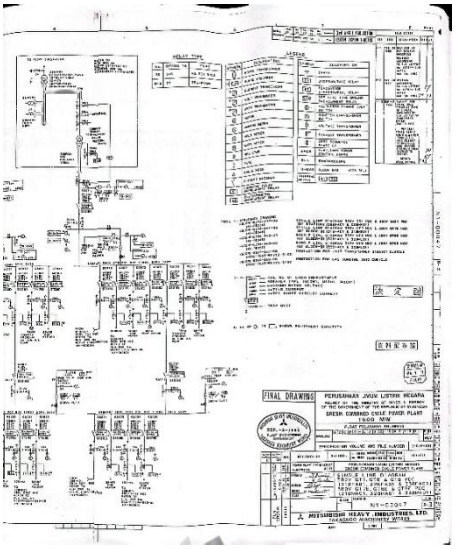
Gambar 2.6 Panel PDC (Dok. Pribadi, 2026)

Fungsi utama dari PDC sendiri mencakup penerimaan daya, pembagian daya melalui *outgoing feeder*, proteksi sistem kelistrikan, isolasi saat pemeliharaan, serta pada sistem modern dapa digunakan juga sebagai monitoring dan pengendalian. Hubungan antara LVMDP dan SDP dalam literatur menunjukkan hirarki distribusi yang jelas, dimana panel utama menyalurkan daya ke panel subdistribusi untuk area atau unit yang lebih kecil. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa performa komponen proteksi seperti pada ACB, kondisi kabel dan sambungan, serta pemantauan kualitas daya pada panel distribusi sangat menentukan keandalan dari operasional seluruh sistem. Karena itu, dalam penelitian ini, PDC pada sisi LV dapat dipahami sebagai simpul distribusi utama yang

menghubungkan sumber power dengan beban pemakain peralatan sendiri, sekaligus menjadi titik penting dalam integrasi suplai baru seperti PLTS *on-grid* (Ayodya & Arrosyid, 2023).

2.5 Pemakaian Listrik Sendiri (PS)

Secara umum pemakaian energi listrik sendiri merupakan bagian dari proses penggunaan energi listrik yang bertujuan untuk menjalankan seluruh *auxiliary equipment* yang membuat proses pembangkitan listrik tetap berlangsung. Jadi energi listrik yang dihasilkan oleh pembangkita tidak dikirim ke jaringan, melainkan digunakan untuk menunjang operasi internal pembangkit itu sendiri. Dalam literatur internasional, konsep ini lazim disebut dengan *auxiliary power consumption, auxiliary load,* ataupun *internal consumption*. Secara teknis, pemakaian sendiri mencakup kebutuhan listrik bagi peralatan



Gambar 2.7 SLD PDC GT 3.3 (Dokumen Unit, 1992)

bantu seperti motor pompa, fan, *cooling system*, sistem kontrol, sistem pencahayaan, sistem instrumentasi, dan peralatan utilitas lain yang wajib *running* agar unit pembangkit tetap dapat beroperasi. Karena dipakai secara internal, pemakaian sendiri pada akhirnya akan mengurangi keluaran *netto* pembangkit, sehingga nilai penjualan listrik *net output* selalu lebih kecil daripada nilai *gross output* (Mandi & Yaragatti, 2014).

Dari sisi kinerja pembangkit, semakin besar jumlah pemakaian energi listrik sendiri, maka akan semakin kecil energi *netto* yang tersedia untuk dijual atau disalurkan ke jaringan. Sejumlah studi pun juga menunjukkan bahwa tingkat *auxiliary power consumption* dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti jenis pembangkit, beban operasional,

efisiensi peralatan bantu, kualitas bahan bakar, cara pengoperasian unit, hingga strategi kontrol yang diterapkan. Oleh karena itu, pemakaian sendiri bukan hanya parameter pencatatan operasi melainkan juga indikator penting dalam melakukan evaluasi performa dan efisiensi pembangkit (Mandi & Yaragatti, 2014).

Pada kondisi operasi normal, sebagian daya dari generator pembangkit dialirkan kepada sistem pemakaian sendiri melalui transformator bantu unit atau UAT. Daya ini kemudian didistribusikan ke bus pemakaian sendiri untuk melayani beban-beban tegangan menengah maupun tegangan rendah. Studi yang pernah dilakukan di Indonesia tentang UAT menjelaskan bahwa keluaran generator awalnya terlalu tinggi untuk langsung dipakai oleh beban internal, sehingga perlu diturunkan tegangannya oleh UAT agar sesuai dengan kebutuhan motor, pompa, sistem kontrol, dan peralatan bantu lainnya. Disisi lain, pada saat *shutdown* maupun *start up* unit sebelum generator dapat menghasilkan daya sendiri, pasokan untuk beban-beban peralatan bantu biasanya berasal dari jaringan yang melalui *station service transformer*. Pola seperti ini juga dijelaskan pada literatur bahwa *auxiliary power* diambil dari UAT saat unit normal operasi dan *station service transformer* saat unit *shutdown* ataupun sedang *start up* (Pebrianty et al., 2022).

2.6 *Software* PVsyst

PVsyst merupakan perangkat lunak simulasi fotovoltaik yang banyak digunakan untuk perancangan, analisis, dan evaluasi kinerja sistem PV, terutama pada sistem *grid-connected*. Dalam keterangan dokumen resiminya, PVsyst menempatkan *Project design and Simulation* sebagai inti *software*, yang mencakup pemilihan data meteorologi, desain sistem, studi *shading*, penentuan *losses*, dan evaluasi ekonomi. Simulasi pada PVsyst dilakukan selama satu tahun dengan langkah waktu per jam, lalu menghasilkan laporan rinci dan hasil yang detail. Dalam studi evaluasi *software* PV terkini, PVsyst juga termasuk salah satu *software* yang paling sering dibandingkan dengan SAM, HOMER, dan RETScreen, sehingga posisinya sudah mumpuni dalam praktik desain PLTS (PVsyst, 2026).

Secara umum, alur kerja PVsyst dimulai dari pembuatan *project*, lalu dilanjutkan ke *variant* sistem yang akan disimulasikan. Pengguna atau *user* terlebih dahulu menentukan lokasi dan *wheater* data, kemudian mendefinisikan orientasi modul, luas area yang tersedia, jenis modul PV, inverter, konfigurasi string, dan parameter sistem lainnya. Setelah desain dasar terbentuk, simulasi dijalankan untuk menghasilkan laporan yang memuat parameter utama, nilai-nilai hasil bulanan, hingga *arrow loss diagram* yang menunjukkan neraca energi dan rugi-rugi sepanjang sistem. Dari dokumen resmi yang diberikan PVsyst juga menekankan bahwa diagram rugi-rugi ini sangat berguna untuk mendeteksi kesalahan sizing dan kualitas desain (PVsyst, 2026).



Gambar 2.8 Perangkat lunak PVsyst (PVsyst.com, 2026)

Pada level model, PVsyst memanfaatkann basis data komponen dan data meteorologi, lalu menjalankan simulasi tahunan berbasis kondisi iklim setempat. Pada artikel jurnal dari Uganda menjelaskan bahwa Pvsys menggunakan *long-term monthly worldwide meteorological databases*, *sizing* otomatis berbasis komponen yang dipilih, dan model *five-parameter single-diode*. Disisi lain, studi dari Nigeria juga menjelaskan bahwa PVsyst menerima input rinci seperti *meteorological data*, *shading, tilt, orientation, module and inverter specifications, and load profiles*. Lalu menghitung indikator seperti *enegy yield, system losses,* dan *performance ratio* (Katongole et al., 2024).

Salah satu kelebihan PVsyst adalah kekuatan pada simulasi teknis yang rinci, khususnya untuk estimasi *energy yield, loss analysis, performance ratio,* dan pemodelan *shading*. Salah satu jurnal oleh (Islam et al., 2025) menunjukkan bahwa kriteria penting dalam pemilihan *software* PV meliputi *modelling capabilities, economic modeling, solar database accessibility, reporting options,* dan *ease of use*. Dimana pada konteks ini PVsyst konsisten digunakan sebagai salah satu *benchmark* utama. Pada studi lainnya, PVsyst bahkan dinilai lebih baik dalam memodelkan *shading, temperature effect, and losses* dibanding beberap tool yang lebih ringan untuk studi awal.

Untuk konteks perancangan PLTS *on grid*, PVsyst bisa dikatakan relevan karena secara eksplisit menyediakan mode *grid-connected*, selain *standalone* dan *solar pumping*. Mode *grid-connected* ini memungkinkan bagi pengguna untuk membangun desain sistem yang terhubung ke jaringan, termasuk pilihan *self consumption profile*, jika diperlukan dapat ditambahkan integrasi baterai dengan beberapa strategi operasi. Oleh karena itu, PVsyst sangat cocok digunakan pada studi yang menekankan estimasi produksi energi, *performance ratio, spesific yield,* dan rugi-rugi sistem sebelum proyek dibangun.

2.7 Analisa Teknis

Analisis teknis pada studi kelayakan PLTS merupakan proses untuk menilai apakah suatu sistem fotovoltaik dapat dirancang dan dioperasikan secara layak dari sisi sumber energi surya, konfigurasi sistem, kualitas instalasi, dan kemampuan sistem dalam menghasilkan energi listrik sesuai dengan kebutuhan. Pada PLTS *on grid*, analisis teknis tidak hanya menilai besarnya kapasitas terpasang, melainkan juga mencakup evaluasi terhadap potensi radiasi matahari, temperatur lingkungan, orientasi modul, *shading*, konfigurasi string-inverter, serta rugi-rugi energi yang muncul sepanjang proses konversi dari sisi DC hingga AC. Kemudian literatur internasional juga menegaskan bahwa performa PLTS *on grid* sangat dipengaruhi oleh kondisi meteorologi dan kondisi instalasi, sehingga studi kelayakan teknis juga harus berbasis pada parameter lapangan yang representatif.

Dalam konteks penelitian ini, analisis teknis berfungsi untuk memastikan bahwa rancangan PLTS bukan saja hanya mampu menghasilkan energi listrik, tetapi juga mampu beroperasi secara kompatibel dengan sistem kelistrikan internal pembangkit. Dengan demikian, analisis teknis harus dapat menjawab beberapa pertanyaan seperti: berapa potensi energi tahunan yang dapat dihasilkan, bagaimana kualitas performa sistem, seberapa besar rugi-rugi yang terjadi, serta sejauh mana keluaran energi tersebut dapa mendukung beban pemakaian sendiri pada sisi LV bus PDC unit GT. Pendekatan seperti ini sejalan dengan studi pada PLTS *on grid* industri dan pembangkit yang menggunakan hasil simulasi PVsyst sebagai dasar evaluasi desain (Sánchez-Jiménez et al., 2025).

2.7.1 Jenis Analisis Teknis pada Studi PLTS *On Grid*

Secara umum, analisis teknis pada PLTS *on grid* dapat dibagai ke dalam beberapa kelompok. Pertama adalah analisis sumber energi surya, yang mencakup evaluasi *irradiance global*, temperatur lingkungan, dan karakteristik cuaca lokasi. Lalu yang kedua adalah desain sistem yang meliputi luas area yang digunakan, orientasi dan kemiringan modul, pemilihan jenis modul dan inverter, serta konfigurasi string. Kemudian yang ketiga adalah analisis performa energi, dimana fokus pada potensi produksi energi tahunan, *spesific yield*, dan *performance ratio*. Sedangkan yang keempat adalah analisis *losses* yang terjadi mulai dari *shading loss, thermal loss,* hingga inverter *loss* (PVsyst, 2026).

Pada praktik penelitian berbasis PVsyst, jenis analisis teknis tersebut tercermin langsung pada keluaran simulasi. Dimana PVsyst menyediakan hasil berupa *irradiance* pada bidang modul, energi DC dari array, energi AC pada keluaran inverter atau ke jaringan, serta diagram rugi-rugi energi. Oleh karena itu, PVsyst tidak hanya dipakai untuk memperkirakan produksi energi, tetapi juga untuk membaca perilaku teknis dari sistemm secara menyeluruh.

2.7.2 Hubungan Analisis Teknis dengan PS

Untuk penelitian yang berfokus pada pemkaian energi listrik sendiri yaitu keluaran teknis PVsyst perlu dihubungkan dengan profil beban internal yang akan disuplai. Artinya, hasil seperti E_grid, *annual production*, dan *spesific yield* tidak cukup untuk dibaca sebagai angka produksi semata, tetapi harus diterjemahkan menjadi potensi substitusi terhadap konsumsi listrik eksisting pada sisi LV bus PDC unit GT. Di dalam konteks penelitian ini, analisis teknis menjadi jembatan antara potensi energi PLTS dengan kebutuhan nyata dari sistem internal pembangkit seperti penelitian yang pernah dilakukan oleh (Nainggolan et al., 2022).

2.7.3 Posisi PVsyst dalam Analisis Teknis Penelitian

Dalam studi kelayakan PLTS *on grid,* PVsyst bisa dikatakan sebagai alat utama untuk simulasi energi, evaluasi performa, dan analisi *losses*. *Software* ini sangat kuat untuk memperkirakan produksi energi tahunan, membaca indikator teknis, serta

menganalisis pengaruh *shading* dan *losses*. Namun, secara metodologis hasil PVsyst tetap perlu disesuaikan dengan konteks sistem aktual. Artinya keputusan teknis akhir tidak hanya didasarkan pada *performance ratio* atau *annual energy*, tetapi juga pada kesesuaian terhadap sistem dan kebutuhan beban internal. Dengan kata lain, PVsyst menyediakan *evidence* teknis berbasis simulasi

2.8 Analisa Keekonomian

Analisis keekonomian merupakan bagian penting dalam studi kelayakan PLTS karena digunakan untuk menilai apakah sebuah proyek yang akan didanai dengan dana investasi mampu memberikan manfaat finansial yang memadai selama umur proyek. Pada sistem PLTS *on grid*, analisis ini umumnya dilakukan dengan membandingkan seluruh biaya siklus hidup proyek, seperti biaya investasi awal, biaya operasi dan pemeliharaan, biaya penggantian komponen, hingga pengurangan biaya energi. Dalam literatur terbaru, studi kelayakan PLTS ini lazim menggunakan kombinasi indikator seperti NPV, IRR, DPP dan LCOE untuk menilai proyek tersebut secara komprehensif (Bus et al., 2025).

Dalam konteks penelitian Studi Kelayakan Teknis dan Ekonomi PLTS *On Grid* yang terintegrasi pada LV Bus PDC Unit GT untuk Pemakaian Energi Listrik Sendiri, analisis keekonomian berfungsi untuk menjawab apakah penerapan PLTS mampu memberikan keuntungan finansial melalui pengurangan konsumsi listrik dari sumber eksternal. Karena sistem dirancang untuk *self consumption* atau pemakaian sendiri, sehingga manfaat ekonomi yang utama tidak selalu berasal dari penjualan energi saja, melainkan bisa dari *avoided cost*. Yaitu biaya listrik yang dapat dihemat karena sebagian kebutuhan beban internal telah dipenuhi oleh PLTS (Syaifullah Prasetyo & Seto Wibowo, 2025). Oleh sebab itu, analisis keekonomian pada penelitian ini perlu dikaitkan langsung dengan keluaran energi dari hasil simulasi teknis serta profil beban pemakaian sendiri pada LV bus PDC unit GT.

2.8.1 *Net Present Value* (NPV)

Net Present Value merupakan nilai sekarang dari seluruh arus kas bersih proyek selama umur investasi. Secara sederhana, NPV menunjukkan selisih antara nilai sekarang terhadap manfaat ekonomi dan nilai sekarang terhadap biaya proyek. Jika NPV bernilai

positif, maka proyek dinilai mampu menghasilkan manfaat finansial yang melebihi seluruh biayanya. Sebaliknya, jika NPV bernilai negatif, maka proyek dianggap belum layak secara ekonomi. Karena mempertimbangkan *time value of money*, NPV menjadi salah satu indikator penting dalam studi investasi PLTS (Paradongan et al., 2024).

Secara umum, untuk menghitung nilai NPV dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$NPV = \sum_{t=0}^{n} \frac{CF_t}{(1+i)^t} \tag{2.1}$$

Dimana CF_t adalah arus kas bersih pada tahun ke-*t*, kemudian i adalah tingkat diskonto, dan n adalah umur proyek. Dalam studi PLTS, arus kas bersih umumnya diperoleh dari penghematan biaya listrik tahunan dikurangi biaya operasi dan pemeliharaan. semakin besar nilai NPV, semakin besar nilai tambah ekonomi proyek tersebut. Pada studi PLTS yang dilakukan di Indonesia, indikator ini juga sering dipakai sebagai parameter utama dalam menilai kelayakan investasi proyek tersebut (Delapedra-Silva et al., 2022).

2.8.2 *Internal Rate of Return* (IRR)

Internal Rate of Return adalah tingkat diskonto yang membuat niali NPV = 0. Dengan kata lain, IRR menunjukkan tingkat pengembalian efektif pada suatu proyek berdasarkan arus kas yang dihasilkannya. Suatu investasi umumnya dinilai menarik dan layak apabila nilai IRR melampaui biaya modal (*cost of capital*), karena hal itu mengindikasikan bahwa proyek mampu memberikan imbal hasil yang lebih tinggi daripada tingkat minimum yang disyaratkan untuk menutup biaya pendanaan dan memenuhi ekspektasi investor. Oleh karena itu, IRR digunakan untuk menunjukkan tingkat daya tarik proyek dari sisi pengembalian investasi (Bus et al., 2025).

Secara matematis, nilai dari IRR dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$0 = \sum_{t=0}^{n} \frac{CF_t}{(1 + IRR)^t} \quad (2.2)$$

Jika IRR lebih tinggi daripada biaya modal, proyek layak diterima karena tingkat pengembalian yang dihasilkan proyek dinilai mampu melampaui ketentuan minimum imbal hasil yang disyaratkan investor. Sebaliknya, jika IRR lebih rendah daripada biaya modal, proyek sebaiknya ditolak karena pengembaliannya tidak cukup untuk menutup biaya pendanaan dan tidak memenuhi ekspektasi return yang diharapkan (Gitman & Zutter, 2015).

2.8.3 *Discounted Payback Period* (DPP)

Discounted Payback Period adalah periode waktu yang dibutuhkan agar akumulasi arus ks bersih yang telah didiskontokan sama dengan nilai investasi awal. Berbeda dengan *simple payback period*, DPP memperhitungkan nilai waktu uang (*time value of money*), sehingga lebih tepat digunakan untuk proyek enrgi dengan umur panjang seperti PLTS. Indikator ini penting karena dapat menunjukkan kapan modal awal benar-benar kembali dalam nilai sekarang, bukan hanya dalam nilai nominal (Bus et al., 2025).

Secara matematis DPP dapat ditentukan dengan persamaan:

$$DPP_k = Y_k + \frac{|NPV_{kY}|}{CF_{k(Y+1)}} \quad (2II.3)$$

Dimana DPP_k adalah *discounted payback period* yang ditetapkan untuk opsi ke-k, dalam satuan tahun. Sedangakan Y_k merupakan jumlah tahun penuh sebelum tercapainya pengembalian investasi total untuk opsi ke-k dalam satuan tahun. Lalu $CF_{k(Y+1)}$ adalah arus kas terdiskonto pada tahun ke-$(Y + 1)$ untuk opsi ke-k, dan NPV_{kY} adalah sisa pengeluaran yang belum tertutup pada awal tahun ke-$(Y + 1)$ untuk opsi ke-k. Semakin kecil nilai DPP, maka semakin cepat proyek tersebut dalam mengembalikan investasinya. Pada studi-studi yang terkait PLTS di Indonesia, DPP sering digunakan bersama NPV dan IRR sebagai indikator standar kelayakan finansial (Hidayat et al., 2019).

2.8.4 *Levelized Cost of Electricity* (LCOE)

Levelized Cost of Electricity adalah biaya rata-rata pembangkitan listrik per satuan energi selama umur proyek (Rianto & T. Adi, 2024). LCOE digunakan untuk mengukur seberapa kompetitif biaya listrik yang dihasilkan oleh PLTS dibandingkan dengan tarif listrik dari jaringan atau teknologi pembangkitan lain. Dalam literatur solar PV, LCOE merupakan indikator ekonomi yang sangat penting karena memungkinkan evaluasi berbasis biaya listrik aktual yang dihasilkan oleh sistem, bukan hanya berdasarkan besaran nilai investasi awal. Penelitian yang dilakukan oleh (Branker et al., 2011) menekankan bahwa LCOE merupakan pendekatan utama dalam membandingkan keekonomian PLTS dengan teknologi lain.

Secara umum, LCOE dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^{n} \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{n} \frac{E_t}{(1+r)^t}} \tag{2.4}$$

Dimana C_t adalah seluruh biaya pada tahun ke–*t,* E_t sendiri adalah energi listrik (kWh) yang dihasilkan pada tahun ke-*t,* sedangkan r adalah tingkat diskonto, kemudian n adalah umur proyek. Pada proyek PLTS, biaya yang diperhitungkan biasanya mencakup CAPEX, O&M, serta biaya penggantian inverter atau komponen lainnya. Semakin rendah nilai LCOE, maka semakin kompetitif biaya listrik PLTS tersebut. Pada akhirnya LCOE sangat berguna dalam membandingkan antara biaya produksi listrik PLTS dengan tarif listrik yang dikenakan melalui mekanisme pemakaian sendiri.

2.8.5 Keterkaitan Analisis Keekonomian dengan Penelitian

Pada penelitian ini analisis ekonomi digunakan untuk tidak hanya menjawab apakah proyek yang direncanakan tersebut layak atau tidak, namun juga memberikan gambaran mengenai kualitas dari finansial proyek dari beberapa sudut pandang sekaligus (Moses Allo & Tri Wahyu, 2026). Kemudian dari indikator-indikator ekonomi yang digunakan, keempat indikator tersebut bersifat saling melengkapi satu dengan yang lainnya. Misalnya, NPV digunakan untuk melihat besarnya manfaat ekonomi bersih proyek dalam nilai saat ini. Lalu IRR digunakan untuk menilai tingkat pengembalian investasi dalam

bentuk persentase. Sedangkan DPP digunakan untuk mengetahui lama waktu yang dibutuhkan untuk pengembalian modal dengan mempertimbangkan nilai waktu uang. Sementara itu, LCOE digunakan untuk menghitung biaya rata-rata energi listrik yang dihasilkan selama umur proyek. Dalam studi kelayakan PLTS ini, keempat indikator tersebut sangat penting karena mampu memberikan gambaran yang lebih utuh mengenai apakah proyek yang direncanakan layak, menarik, pengembalian modal cepat, dan kompetitif secara dari sisi biaya energi yang dibangkitkan.