

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Beberapa penelitian terdahulu yang relevan antara lain sebagai berikut :

2.1.1 Khalil, L., Bhatti, KL, Awan, MAI, Riaz, M., Khalil, K., & Alwaz, N. (2021). Optimasi dan perancangan sistem tenaga hibrida menggunakan HOMER pro.

HOMER adalah singkatan dari Hybrid Optimization Model for Electric Renewables. Midwest Research Institute memiliki hak cipta atas perangkat lunak ini. Perangkat lunak ini dikembangkan oleh National Renewable Energy Laboratory (NREL) Amerika Serikat. HOMER digunakan untuk membantu perancangan berbagai konfigurasi pembangkit listrik. Perangkat lunak ini memiliki berbagai komponen bawaan seperti panel PV, turbin angin, beban utilitas berbagai jenis, generator, konverter, dan cadangan baterai, dll. HOMER digunakan untuk mensimulasikan berbagai skema pembangkit listrik, dan kemudian skema tersebut disimulasikan untuk menemukan konfigurasi pembangkit listrik yang paling optimal terkait dengan biaya operasional, biaya bersih saat ini (NPC), emisi gas, dan perbandingan ekonomi, dll. Permintaan listrik meningkat di seluruh dunia. Diperlukan perancangan beberapa sistem energi terbarukan baru yang inovatif yang dapat mengurangi ketergantungan pada sumber energi konvensional. Sistem hibrida dirancang untuk Pantai Baluchistan di mana perancangan jaringan listrik mencakup instalasi angin, surya, dan konverter yang mengurangi jumlah pembayaran ke jaringan listrik. Dengan menganalisis berbagai kasus, kita dapat mengevaluasi pembangkitan daya, emisi gas polutan, biaya bersih saat ini, dan biaya produksi listrik rata-rata menggunakan perangkat lunak HOMER Pro. Terdapat empat jenis hasil yang diberikan dalam hasil optimasi. Untuk visualisasi yang lebih baik, hasil simulasi disajikan dalam bentuk grafik dan tabel. Hasil diurutkan sedemikian rupa sehingga desain sistem hibrida yang diusulkan adalah yang paling ekonomis dalam hal biaya operasional, biaya bersih saat ini, dan emisi gas.

2.1.2 Patiung, L., Hasanah, A. W., & Yogiarto, A. A. (2022). *ANALISIS PERENCANAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) SISTEM OFF GRID DENGAN KAPASITAS 4 kWp MENGGUNAKAN BEBAN SKALA RUMAH TANGGA AREA PEMANIKAN* (Doctoral dissertation, ITPLN).

Potensi energi terbarukan yang cukup besar untuk dikembangkan di Indonesia terutama pada bidang pembangkit listrik tenaga surya (PLTS), dengan posisi Indonesia di garis khatulistiwa sehingga sangat mendukung dalam pemasangan pembangkit listrik tenaga surya. Dalam analisis kelayakan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) di Desa Pemanikan menggunakan sistem off grid dengan memasang 18 unit modul yang berkapasitas 150Wp, 24 unit baterai 12V 100Ah, 1 buah inverter 2000 Watt dan 1 buah SCC. Untuk pemakaian beban total dari rata-rata keseluruhan beban harian untuk 3 rumah dibutuhkan adalah 3,04 kWh. Dalam rencana ini menggunakan perangkat lunak homer pro untuk memperoleh data iradiasi matahari yang terintegrasi dari NASA dan menganalisis optimasi dari bidang ekonomi, melalui perangkat lunak homer pro biaya investasi awal yang dibutuhkan sebesar Rp 186,149,800,00 hasil simulasi optimasi dan ekonomi pada perangkat lunak Homer Pro dilihat dari sisi teknis, yaitu energi yang dihasilkan adalah 4,241 kWh/tahun, jika dibandingkan dengan penggunaan diesel dengan harga investasi awal Rp 43.430.212.614,98 yang mana harga energi Rp 1.844.746,00/kWh, sehingga dapat dikatakan pemasangan PLTS off grid dengan kapasitas 4 kWp dapat dikerjakan dan lebih efisien dibandingkan dengan solar. Potensi energi terbarukan di Indonesia cukup besar untuk dikembangkan, terutama di bidang pembangkit listrik tenaga surya, dengan posisi Indonesia di garis khatulistiwa yang sangat mendukung pemasangan pembangkit listrik tenaga surya. Dalam analisis kelayakan pembangkit listrik tenaga surya di Desa Pemanikan menggunakan sistem off grid dengan memasang 18 unit modul berkapasitas 150Wp, 24 unit baterai 12V 100Ah, 1 unit inverter 2000Watt, dan 1 unit SCC. Untuk total konsumsi beban rata-rata harian keseluruhan untuk 3 rumah yang dibutuhkan adalah 3,04 kWh. Dalam desain ini, digunakan perangkat lunak Homer Pro untuk memperoleh data radiasi matahari terintegrasi dari NASA dan menganalisis optimasi dari segi ekonomi. Melalui perangkat lunak Homer Pro,

biaya investasi awal yang dibutuhkan adalah Rp 186.149.800,00. Hasil simulasi kelayakan optimasi dan ekonomi dalam perangkat lunak Homer Pro secara teknis menunjukkan bahwa energi yang dihasilkan adalah 4.241 kWh/tahun, dibandingkan dengan penggunaan diesel dengan harga investasi awal Rp 43.430.212.614,98, di mana harga energinya adalah Rp 1.844.746,00/kWh. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa instalasi pembangkit listrik tenaga surya off-grid dengan kapasitas 4 kWp dapat dilakukan dan lebih efisien daripada diesel.

2.1.3 Purba, C. B., & Suyanto, H. (2022). *ANALISA KINERJA INVERTER PLTS ON GRID DI LABORATORIUM PLTS IT-PLN* (Doctoral dissertation, ITPLN).

Seperti yang diketahui potensi yang dimiliki oleh sumber daya alam Indonesia cukup tinggi dalam hal energi surya bila dimanfaatkan dengan terukur. Dengan memanfaatkan energi tersebut, pemakaian energi listrik melalui PLN akan berkurang atau terbantu dalam hal pasokan listrik sehingga dapat mengurangi pasokan terhadap beban yang ada. Pengaruh temperatur dari sistem fotovoltaik berdampak pada keluaran arus maupun tegangan sehingga output yang dihasilkan akan optimal ataupun tidak. Berdasarkan data iradiasi juga berpengaruh pada keluaran daya oleh inverter. Inverter juga akan bekerja dengan layak ketika nilai standar dari spesifikasi inverter akan bekerja ketika nilai tegangan minimum berada di kisaran 400V-800V dan terbaca dengan baik diatas 800 V sesuai percobaan dan arus dinyatakan sebesar 12,5A sampai 33A dengan data yang diperoleh diatas 12A sehingga kinerja inverter dalam kondisi maksimalnya, namun ketika kondisi menurunnya kinerja inverter akan berkurang dapat dilihat dari daya yang dihasilkan. Temperatur yang diukur berdasarkan data input dari inverter menunjukkan nilai diatas 250C akan membuat kerja inverter sesuai standar. Ketika efisiensi kerja inverter menurun maka daya output tidak akan optimal, namun ketika parameter dari sistem PV mulai temperatur hingga tingkat iradiasi optimal maka input dan output inverter juga bekerja maksimal. Seperti diketahui, potensi sumber daya alam Indonesia cukup tinggi dalam energi surya jika dimanfaatkan secara maksimal. Dengan memanfaatkan energi ini, penggunaan energi listrik melalui PLN akan berkurang atau terbantu dalam hal pasokan listrik sehingga dapat mengurangi pasokan beban yang ada. Pengaruh suhu dari sistem fotovoltaik

berdampak pada arus dan tegangan keluaran sehingga keluaran yang dihasilkan akan optimal atau tidak. Berdasarkan data, radiasi juga memengaruhi daya keluaran inverter. Inverter juga akan bekerja dengan baik ketika nilai standar spesifikasi inverter akan bekerja ketika nilai tegangan minimum berada dalam kisaran 400V-800V dan terbaca jauh di atas 800 V menurut percobaan dan arus dinyatakan 12,5 A hingga 33 A dengan data yang diperoleh di atas. Sehingga kinerja inverter berada dalam kondisi maksimal, tetapi ketika kondisi radiasi menurun, kinerja inverter akan menurun, yang dapat dilihat dari daya yang dihasilkan. Suhu terukur berdasarkan data masukan dari inverter menunjukkan nilai di atas 25°C akan membuat inverter bekerja sesuai standar. Ketika efisiensi kerja inverter menurun, daya keluaran tidak akan optimal. Namun, ketika parameter sistem PV mulai dari suhu hingga tingkat iradiasi optimal, masukan dan keluaran inverter juga bekerja secara optimal.

2.1.4 Toni, M. A., & Pahiyanti, N. G. (2024). *ANALISA PENGGUNAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) DENGAN SISTEM OFF GRID SEBAGAI CATU DAYA PADA BASE TRANSCEIVER STATION (BTS) DI SITE CAMAR BULAN KALIMANTAN BARAT (Doctoral dissertation, ITPLN).*

Bidang teknologi industri telekomunikasi berkembang sangat pesat di Indonesia, Dalam memenuhi keperluan jaringan yang dilaksanakannya dengan membangun sebuah infrastruktur jaringan yaitu Tower BTS. dalam pembangunan BTS 4G di kawasan 3T (Terluar, Terdepan, Tertinggal) dengan pemanfaatan energi terbarukan dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya tanpa adanya aliran listrik dari PLN. Tower BTS camar bulan berdiri sejak November 2018, dengan adanya penambahan perangkat 4G yang awalnya hanya 2G & 3G maka perlunya dilakukan analisa kelistrikannya, penelitian ini untuk mengetahui kondisi kelistrikan yang ada masih layak untuk mencatu daya Tower BTS camar bulan dari jumlah dan kapasitas dari komponen modul surya, baterai, dan SCC, dengan kondisi kelistrikan Solar Panel canadian CS6U -320P jumlah 14 buah (320 Wp) total daya 4480 Wp, SCC MPPT Outback FLEXmax FM60 2 buah 60 A, baterai NAGOYA VRLA OPzV2-1000 Kapasitas 1000 Ah jumlah 24 buah. Sesuai perhitungan penelitian kebutuhan

beban pada Mei 2024 Solar Panel canadian CS6U -320P jumlah 10 buah, (320 Wp) total daya 3200 Wp dengan perhitungan energi total beban harian sebesar 9.385,4 Wh/hari, SCC MPPT Outback FLEXmax FM60 1 buah 60 A dengan total arus 46,3 A, baterai NAGOYA VRLA OPzV2-700 Kapasitas sebesar 700 Ah jumlah 24 buah. Jadi kondisi kelistrikan existing layak dengan penambahan perangkat. Sektor teknologi industri telekomunikasi di Indonesia berkembang sangat pesat. Untuk memenuhi kebutuhan jaringan, hal ini dilakukan dengan membangun infrastruktur jaringan, yaitu Menara BTS. Dalam pembangunan BTS 4G di daerah 3T (Terpencil, Terdepan, dan Kurang Mampu) dilakukan dengan memanfaatkan energi terbarukan dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya tanpa listrik dari PLN. Menara BTS Seagull Moon didirikan pada November 2018, dengan penambahan perangkat 4G yang awalnya hanya 2G & 3G. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis kelistrikan. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan apakah kondisi kelistrikan yang ada masih sesuai untuk memasok daya ke Menara BTS Seagull Moon berdasarkan jumlah dan kapasitas komponen modul surya, baterai, dan SCC, dengan kondisi kelistrikan yang ada berupa Panel Surya Canadian CS6U-320P sebanyak 14 unit. (320 Wp) daya total 4480 Wp, SCC MPPT Outback FLEXmax FM60 2 buah 60 A, baterai NAGOYA VRLA OPzV2-1000 Kapasitas 1000 Ah, jumlah 24 buah. Menurut perhitungan riset kebutuhan beban pada Mei 2024, jumlah Panel Surya Canadian CS6U -320P adalah 10 unit, (320 Wp) daya total 3200 Wp dengan perhitungan energi beban harian total 9.385,4 Wh/hari, SCC MPPT Outback FLEXmax FM60 1 unit 60 A dengan arus total 46,3 A, baterai NAGOYA VRLA OPzV2-700 kapasitas 700 Ah, 24 unit. Jadi kondisi kelistrikan yang ada layak dengan penambahan perangkat tersebut.

Dari studi-studi tersebut dapat disimpulkan bahwa masih terdapat research gap dalam mengevaluasi kinerja smart microgrid berbasis PV dengan pendekatan simulasi efisiensi energi menggunakan *HOMER Pro*, khususnya dalam konteks Indonesia.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 *Smart Microgrid*

Smart Microgrid adalah sistem kelistrikan berskala kecil yang dapat berdiri sendiri (*off-grid*) maupun terhubung ke jaringan listrik utama (*on-grid*), dengan kemampuan pengelolaan energi yang cerdas (*smart control*). Komponen utama *microgrid* meliputi sumber energi terbarukan (seperti fotovoltaik), unit penyimpanan energi (baterai), sistem kendali, serta jaringan distribusi yang melayani beban listrik. Keunggulan *smart microgrid* terletak pada fleksibilitasnya dalam mengatur pasokan dan permintaan listrik, integrasi energi terbarukan, serta kemampuannya meningkatkan keandalan dan efisiensi energi.

Secara umum, *Smart microgrid* merupakan sistem kelistrikan terintegrasi yang mampu beroperasi secara mandiri maupun terhubung dengan jaringan utama. Konsep ini memungkinkan integrasi sumber energi terbarukan, sistem penyimpanan energi, dan manajemen beban secara optimal (Mariño et al., 2023). Sistem ini tidak hanya mendistribusikan energi listrik, tetapi juga mampu mengoptimalkan aliran daya, menjaga kualitas tegangan dan frekuensi, serta mengatur prioritas sumber energi secara *real-time*. Microgrid merupakan sistem kelistrikan terintegrasi yang dapat beroperasi secara grid-connected maupun off-grid dengan kombinasi berbagai sumber energi terbarukan (Shezan et al., 2023). Karena kecerdasannya, microgrid jenis ini dapat menyesuaikan diri terhadap perubahan kondisi cuaca, variasi beban, serta gangguan jaringan listrik eksternal. Pengembangan sistem microgrid berbasis energi surya terus meningkat seiring dengan kebutuhan sistem energi berkelanjutan (Binmahfouz et al., 2025)

Dalam operasionalnya, Smart Microgrid menerapkan sistem manajemen energi (*Energy Management System / EMS*) yang berfungsi untuk mengatur aliran daya secara optimal antara sumber energi terbarukan, unit penyimpanan, dan beban. EMS memungkinkan pengambilan keputusan secara otomatis berdasarkan kondisi sistem, seperti tingkat iradiasi matahari, status pengisian baterai (*State of Charge*), serta kebutuhan beban pada waktu tertentu. Dengan adanya EMS, Smart Microgrid dapat memaksimalkan pemanfaatan energi terbarukan dan meminimalkan ketergantungan terhadap jaringan listrik utama atau sumber energi

konvensional(Sapkota et al., 2025).

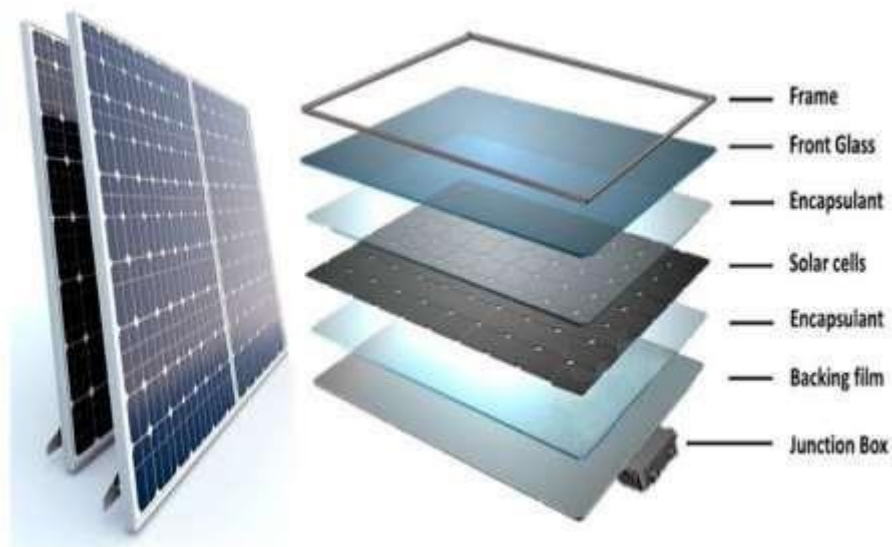
Selain itu, Smart Microgrid memiliki kemampuan *islanding*, yaitu kemampuan untuk beroperasi secara mandiri ketika terjadi gangguan atau pemadaman pada jaringan listrik utama. Fitur ini sangat penting dalam meningkatkan keandalan pasokan listrik, terutama pada area dengan kualitas jaringan yang kurang stabil atau pada fasilitas vital seperti kampus, rumah sakit, dan kawasan industri. Ketika kondisi jaringan kembali normal, sistem Smart Microgrid dapat melakukan sinkronisasi ulang secara otomatis tanpa mengganggu kontinuitas pasokan energi ke beban.

Penerapan Smart Microgrid juga memberikan manfaat signifikan dari sisi efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan. Integrasi sumber energi terbarukan seperti fotovoltaik dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dan konsumsi energi fosil. Selain itu, pengelolaan beban secara cerdas memungkinkan pengurangan puncak beban (*peak shaving*) dan peningkatan faktor daya sistem. Dengan berbagai keunggulan tersebut, Smart Microgrid menjadi solusi strategis dalam pengembangan sistem kelistrikan modern yang andal, efisien, dan berkelanjutan, serta mendukung transisi menuju sistem energi yang lebih bersih.

2.2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Fotovoltaik

a. Pengertian PLTS Fotovoltaik

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Fotovoltaik adalah sistem pembangkit listrik yang mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik secara langsung menggunakan efek fotovoltaik. Perancangan PLTS berbasis simulasi memungkinkan optimasi kapasitas dan biaya energi secara lebih akurat (Seminar & Mipa, 2019). Efek ini terjadi Ketika sinar matahari mengenai permukaan sel surya (*solar cell*), yang menyebabkan elektron dalam material semikonduktor berpindah dan menghasilkan arus listrik searah (DC). Sistem fotovoltaik (PV) mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Evaluasi sistem PV skala 5 kWp telah banyak dikaji dalam berbagai penelitian berbasis simulasi (Mehta & Basak, 2020).

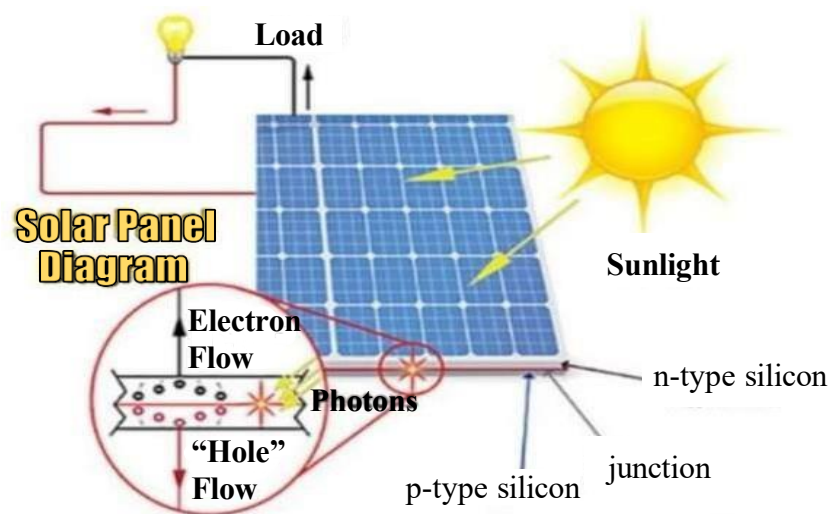


Gambar 2. 1 Diagram Striktur Keseluruhan Modul Fotovoltaik

Teknologi fotovoltaik (PV) merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang paling cepat berkembang di dunia karena sifatnya yang bersih, tidak menghasilkan emisi karbon, dan dapat diterapkan di berbagai skala mulai dari rumah tangga hingga industri besar.

Dalam konteks penelitian ini, PLTS fotovoltaik berfungsi sebagai sumber energi utama dalam sistem Smart Microgrid, di mana energi listrik yang dihasilkan akan digunakan secara langsung untuk beban atau disimpan ke baterai penyimpanan energi untuk digunakan pada waktu lain.

b. Prinsip Kerja Sistem Fotovoltaik



Gambar 2. 2 Cara Kerja Fotovoltaik

Prinsip kerja sistem fotovoltaik didasarkan pada efek fotolistrik, yaitu proses di mana energi cahaya matahari diubah menjadi energi listrik pada material semikonduktor. Ketika foton (partikel cahaya) mengenai permukaan sel surya, energi foton diserap oleh elektron pada lapisan semikonduktor (biasanya silikon). Energi ini membuat elektron berpindah dari pita valensi ke pita konduksi, menghasilkan aliran listrik dalam bentuk arus searah (DC) (Saumik et al., 2025).

Selain proses pembangkitan arus listrik searah (DC) pada sel surya, sistem fotovoltaik juga terdiri dari beberapa komponen pendukung yang bekerja secara terintegrasi untuk menghasilkan energi listrik yang dapat dimanfaatkan. Arus DC yang dihasilkan oleh modul fotovoltaik kemudian dialirkan menuju *charge controller* atau pengatur pengisian, yang berfungsi untuk mengatur tegangan dan arus agar sesuai dengan kebutuhan sistem serta melindungi baterai dari kondisi *overcharging* dan *deep discharging* (Shezan et al., 2023). Pada sistem dengan penyimpanan energi, listrik DC tersebut disimpan dalam baterai sebelum digunakan atau disalurkan lebih lanjut ke beban.

Selanjutnya, untuk memenuhi kebutuhan peralatan listrik yang umumnya menggunakan arus bolak-balik (AC), energi listrik DC dari modul fotovoltaik atau baterai dikonversi menjadi arus AC menggunakan inverter. Proses konversi ini memungkinkan sistem fotovoltaik terintegrasi dengan jaringan listrik konvensional maupun beroperasi secara mandiri dalam sistem off-grid atau hybrid. Efisiensi kerja sistem fotovoltaik dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti intensitas radiasi matahari, sudut kemiringan dan orientasi modul, suhu lingkungan, serta kualitas komponen sistem. Optimalisasi efisiensi panel surya sangat berpengaruh terhadap kinerja sistem PLTS skala rumah tangga maupun skala besar (Karjadi, 2025). Oleh karena itu, perancangan sistem fotovoltaik yang optimal menjadi faktor penting dalam memaksimalkan energi yang dihasilkan dan meningkatkan kinerja keseluruhan sistem.

c. Komponen Utama Sistem PLTS



Gambar 2. 3 Cara Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Sebuah sistem PLTS fotovoltaik terdiri atas beberapa komponen utama yang saling terhubung dan bekerja secara integratif untuk menghasilkan energi listrik, yaitu :

1) Modul Fotovoltaik (*PV Module*)

Merupakan Kumpulan sel surya yang dirangkai secara seri dan paralel untuk menghasilkan tegangan dan arus listrik sesuai kebutuhan. Modul PV menjadi komponen utama dalam menangkap energi matahari.

Modul fotovoltaik yang digunakan terbagi menjadi dua yaitu menggunakan panel surya monokristalin dan panel surya bifacial. Panel surya monokristalin menggunakan silikon Kristal tunggal murni, menawarkan efisiensi tinggi (20-25%) dan masa pakai lama, ideal untuk ruang terbatas. Panel surya bifacial (dua sisi) menyerap cahaya dari depan dan belakang, meningkatkan produksi energi 5-30%, terutama dipermukaan reflektif. Panel surya monokristalin digunakan sebagai sel dasar untuk panel bifacial.

Panel surya monokristalin terbuat dari silikon kristal tunggal yang dipotong menjadi lembaran tipis. Struktur kristal tunggal ini membuat jalur pergerakan elektron lebih teratur sehingga konversi energi cahaya menjadi listrik dapat berlangsung lebih efisien (Seminar & Mipa, 2019). Dari segi penampilan, panel monokristalin memiliki warna hitam pekat atau biru tua yang seragam, dengan sudut sel sedikit terpotong karena bentuk asli batang

silikonnya. Lapisan belakang panel monokristalin biasanya berupa backsheet solid berwarna putih atau hitam, sehingga hanya sisi depan panel yang aktif menangkap cahaya.

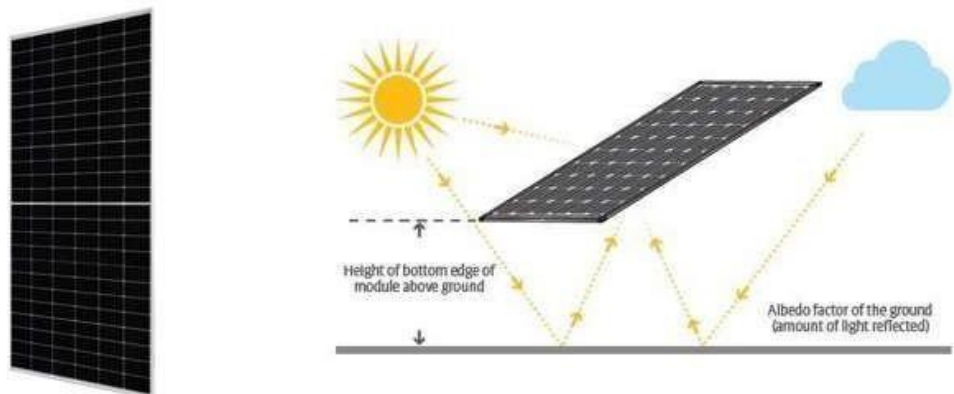
Berbeda dengan monokristalin, panel bifasial menggunakan teknologi sel surya yang juga berbasis monokristalin (umumnya tipe N atau PERC), tetapi dirancang agar kedua sisinya dapat menyerap cahaya. Bagian depan panel bekerja dengan menangkap sinar matahari langsung, sedangkan sisi belakangnya berbahan kaca atau backsheet transparan untuk memungkinkan penyerapan cahaya pantulan dari permukaan sisi depan dan belakang (Yenalem et al., 2020). Dengan desain ini, panel bifasial mampu menghasilkan listrik tambahan yang disebut bifacial gain, yang nilainya tergantung pada tingkat reflektivitas permukaan pemasangan. Pada sisi depan dan belakang dipasang kaca yang transparan berguna untuk menyerap cahaya dari arah manapun dan juga melindungi sel surya dari debu dan benturan. Sisi samping dari panel yang berwarna putih berfungsi untuk memfokuskan cahaya yang masuk ke panel agar menjadi satu arah.

Dari segi bahan, kedua jenis panel sama-sama menggunakan silikon kristalin berkualitas tinggi, namun panel bifasial memerlukan tambahan material transparan dan rangka yang dirancang terbuka agar cahaya dapat mencapai sisi belakang tanpa terhalang. Perbedaan struktur ini membuat panel bifasial sedikit lebih berat, tetapi memberi keunggulan produksi energi lebih besar pada lokasi dengan kondisi reflektivitas tinggi, seperti permukaan beton, pasir cerah, atau atap berwarna terang. Secara keseluruhan, perbedaan utama kedua jenis panel ini terletak pada sisi aktif penyerapan cahaya dan desain fisiknya. Panel monokristalin hanya memanfaatkan satu sisi untuk produksi energi, sedangkan panel bifasial mengoptimalkan kedua sisinya. Hal ini membuat panel bifasial berpotensi lebih efisien, namun efektivitasnya sangat bergantung pada kondisi pemasangan dan lingkungan di sekitar panel.



Gambar 2. 4 Panel Surya *Monocrystalin*

Panel monokristalin adalah yang paling efisien, dibuat dengan teknologi terbaru, dan menghasilkan daya listrik tertinggi per satuan luas. Panel monokristalin dirancang untuk aplikasi yang membutuhkan konsumsi listrik besar, terutama di daerah yang iklimnya ekstrem dan kondisi lingkungan yang keras. Panel ini memiliki efisiensi mencapai 15%. Namun adapun kelemahan dari panel jenis ini adalah performanya akan menurun secara signifikan di tempat yang kurang mendapatkan sinar matahari (teduh) dan juga dalam kondisi cuaca mendung.



Gambar 2. 5 Panel Surya *Bifacial*

Panel surya bifacial adalah panel surya inovatif yang dapat menghasilkan listrik dari sisi depan dan belakangnya, memanfaatkan cahaya

matahari langsung serta cahaya yang dipantulkan (albedo) dari permukaan di bawahnya, seperti tanah, atap putih, atau air, sehingga meningkatkan efisiensi dan total energi yang dihasilkan dibandingkan panel surya biasa (Ukoima et al., n.d.). Panel ini biasanya memiliki desain transparan atau kaca ganda di belakang, menjadikannya pilihan ideal untuk instalasi skala besar, PLTS terapung, atap komersial, dan bahan carport karena efisiensi tinggi dan estetika modern.

2) Inverter (*DC to AC Converter*)

Berfungsi mengubah arus searah (DC) dari modul PV atau baterai menjadi arus bolak-balik (AC) yang sesuai dengan peralatan listrik rumah tangga atau sistem jaringan.

Selain berfungsi sebagai pengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC), inverter juga berperan penting dalam menjaga kualitas daya listrik yang dihasilkan oleh sistem fotovoltaik. Inverter mengatur parameter keluaran listrik seperti tegangan, frekuensi, dan bentuk gelombang agar sesuai dengan standar peralatan listrik dan sistem jaringan. Pada umumnya, inverter modern menghasilkan gelombang sinus murni (*pure sine wave*), sehingga aman digunakan untuk berbagai peralatan elektronik yang sensitif. Kinerja inverter sangat memengaruhi efisiensi keseluruhan sistem, karena kehilangan energi pada proses konversi dapat berdampak langsung pada jumlah daya yang tersedia untuk beban.

Selain itu, inverter pada sistem fotovoltaik modern dilengkapi dengan berbagai fitur proteksi dan kontrol cerdas. Fitur-fitur tersebut meliputi perlindungan terhadap hubung singkat, kelebihan beban, suhu berlebih, serta fluktuasi tegangan. Pada sistem *grid-connected*, inverter juga berfungsi untuk menyinkronkan tegangan dan frekuensi keluaran dengan jaringan listrik PLN, sedangkan pada sistem *off-grid* atau *hybrid*, inverter bekerja bersama baterai untuk memastikan kontinuitas pasokan energi (Ukoima et al., n.d.). Dengan adanya fungsi kontrol dan proteksi ini, inverter tidak hanya berperan sebagai alat konversi energi, tetapi juga sebagai komponen kunci dalam menjaga keandalan, keamanan, dan stabilitas sistem fotovoltaik secara keseluruhan.

Dalam sistem fotovoltaik, inverter juga memiliki peran strategis dalam optimasi pemanfaatan energi yang dihasilkan modul PV. Pada inverter yang dilengkapi dengan fitur *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), inverter mampu menyesuaikan titik operasi modul PV agar selalu bekerja pada daya maksimum meskipun terjadi perubahan iradiasi matahari dan suhu lingkungan. Dengan kemampuan ini, energi listrik yang dihasilkan sistem dapat dimanfaatkan secara lebih optimal, sehingga meningkatkan efisiensi dan performa keseluruhan sistem fotovoltaik.

Selain itu, pemilihan kapasitas dan jenis inverter harus disesuaikan dengan karakteristik beban dan konfigurasi sistem yang digunakan. Kapasitas inverter yang terlalu kecil dapat menyebabkan keterbatasan pasokan daya, sedangkan kapasitas yang terlalu besar dapat menurunkan efisiensi operasi dan meningkatkan biaya investasi. Oleh karena itu, perancangan inverter yang tepat menjadi faktor penting dalam menjamin kestabilan sistem, memperpanjang umur komponen, serta mendukung pengoperasian sistem fotovoltaik baik dalam skema off-grid, on-grid, maupun hybrid.



Gambar 2. 6 Inverter

3) Sistem Penyimpanan Energi (*Battery Storage*)

Baterai bergungsi untuk menyimpan energi listrik dari PV saat produksi berlebih, yang kemudian dapat digunakan saat beban lebih tinggi atau saat tidak ada cahaya matahari. Jenis baterai yang umum digunakan pada sistem

microgrid antara lain *Lead Acid*, *Lithium-Ion*, dan *Flow Battery*, masing-masing dengan karakteristik kapasitas, efisiensi siklus, umur pakai, dan biaya berbeda.



Gambar 2. 7 Sistem Penyimpanan Energi (*Battery Storage*)

a. Pengertian Sistem Penyimpanan Energi

Sistem penyimpanan energi atau *Energy Storage System (ESS)* adalah sistem yang berfungsi untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh sumber energi terbarukan, seperti fotovoltaik (PV), agar dapat digunakan pada saat produksi energi menurun atau beban meningkat. Dalam konteks sistem *Smart Microgrid*, komponen penyimpanan energi ini menjadi elemen vital yang memastikan kestabilan suplai daya, kontinuitas energi, serta efisiensi pemanfaatan energi terbarukan.

Baterai merupakan jenis sistem penyimpanan energi yang paling umum digunakan pada sistem PLTS dan *microgrid* karena kemampuannya untuk menyimpan energi listrik dalam bentuk kimia, kemudian melepaskannya kembali dalam bentuk listrik sesuai kebutuhan. Dengan demikian, baterai berperan penting dalam menyeimbangkan perbedaan waktu antara produksi dan konsumsi energi listrik.

b. Fungsi Baterai dalam Sistem *Smart Microgrid*

Dalam sistem *Smart Microgrid*, baterai memiliki beberapa fungsi

utama, yaitu :

1) Menyimpan Energi Surplus

Ketika produksi energi dari PV melebihi kebutuhan beban, kelebihan energi tersebut disimpan dalam baterai. Energi ini akan digunakan kembali saat intensitas cahaya matahari rendah atau pada malam hari.

2) Menjaga Stabilitas Sistem

Baterai membantu menyeimbangkan fluktuasi daya akibat perubahan mendadak pada beban atau produksi PV. Dengan adanya baterai, sistem tetap stabil tanpa gangguan tegangan atau frekuensi.

3) Meningkatkan Efisiensi Energi

Dengan strategi pengisian dan pengosongan (*charging-discharging*) yang optimal, baterai dapat meningkatkan *Renewable Fraction (RF)* dan menurunkan *Unmet Load (UL)*, sehingga efisiensi keseluruhan sistem meningkat.

4) Mendukung Operasi Mandiri (*Islanded Mode*)

Saat sistem microgrid terputus dari jaringan utama (PLN), baterai berfungsi sebagai sumber daya cadangan agar suplai listrik tetap tersedia.

Dengan fungsi-fungsi tersebut, baterai menjadi komponen penting dalam mendukung keberlanjutan dan keandalan sistem *Smart Microgrid* berbasis energi surya.

c. Peran Sistem Penyimpanan Energi dalam Efisiensi Energi

Dalam konteks penelitian ini, baterai berperan penting dalam meningkatkan efisiensi energi (*energy efficiency*) sistem *Smart Microgrid*. Energi yang disimpan dalam baterai memungkinkan sistem untuk memanfaatkan energi surya secara maksimal dan mengurangi ketergantungan pada sumber eksternal (*grid*).

Baterai juga membantu mengurangi nilai *Unmet Load (UL)* dan *System Losses* dengan cara menyimpan energi berlebih saat siang hari dan menyuplai energi saat malam hari. Melalui simulasi *HOMER Pro*, variasi kapasitas baterai diuji untuk menentukan konfigurasi penyimpanan energi

paling efisien, yang memberikan *renewable fraction* tertinggi dan losses terendah.

4) *Solar Charge Controller*

Mengatur proses pengisian baterai dan mencegah pengisian berlebih (overcharging) serta pengosongan berlebih (*deep discharging*).

Selain berfungsi mengatur proses pengisian baterai, *solar charge controller* berperan penting dalam menjaga kestabilan tegangan dan arus yang mengalir dari modul fotovoltaik ke baterai. Perangkat ini memastikan bahwa energi yang dihasilkan modul PV disesuaikan dengan karakteristik dan kapasitas baterai, sehingga proses pengisian berlangsung secara optimal dan aman. Dengan pengaturan yang tepat, *solar charge controller* dapat meningkatkan efisiensi sistem fotovoltaik serta memperpanjang umur baterai sebagai komponen penyimpanan energi utama.

Berdasarkan metode kerjanya, *solar charge controller* umumnya terbagi menjadi dua jenis, yaitu Pulse Width Modulation (PWM) dan Maximum Power Point Tracking (MPPT). Controller tipe PWM bekerja dengan cara menyesuaikan tegangan modul PV agar sesuai dengan tegangan baterai, sedangkan tipe MPPT mampu melacak titik daya maksimum modul PV sehingga energi yang diserap baterai menjadi lebih optimal, terutama pada kondisi iradiasi yang berubah-ubah. Penggunaan *solar charge controller* tipe MPPT umumnya memberikan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan PWM, sehingga banyak diterapkan pada sistem fotovoltaik skala kecil hingga menengah, termasuk sistem off-grid dan hybrid.

Selain fungsi pengaturan pengisian, *solar charge controller* juga berperan dalam sistem proteksi baterai terhadap kondisi operasi yang tidak normal. Perangkat ini umumnya dilengkapi dengan mekanisme pemutusan otomatis ketika tegangan baterai berada di luar batas aman, baik pada kondisi tegangan terlalu tinggi maupun terlalu rendah. Proteksi ini sangat penting untuk mencegah kerusakan permanen pada baterai serta menjaga kestabilan sistem secara keseluruhan, khususnya pada sistem fotovoltaik yang beroperasi secara off-grid atau hybrid.

Dalam penerapannya pada sistem Smart Microgrid, *solar charge controller* bekerja secara terintegrasi dengan inverter dan sistem manajemen energi untuk mengoptimalkan distribusi daya. Informasi seperti tegangan, arus, dan *State of Charge* (SoC) baterai dapat dipantau secara real-time untuk mendukung pengambilan keputusan pengoperasian sistem. Dengan integrasi ini, sistem fotovoltaik mampu beradaptasi terhadap perubahan kondisi beban dan iradiasi matahari, sehingga meningkatkan efisiensi, keandalan, dan keberlanjutan operasional sistem energi secara keseluruhan.



Gambar 2. 8 Solar Charge Controller

5) Beban (*Load*)

Merupakan perangkat atau sistem yang menggunakan energi listrik dari PV, seperti peralatan elektronik, penerangan, dan sistem pendingin.

Selain sebagai pengguna akhir energi listrik, beban (*load*) merupakan komponen penting dalam perancangan dan evaluasi kinerja sistem fotovoltaik. Karakteristik beban, seperti besar daya, jenis arus, serta pola penggunaan energi harian, sangat memengaruhi kapasitas modul PV, baterai,

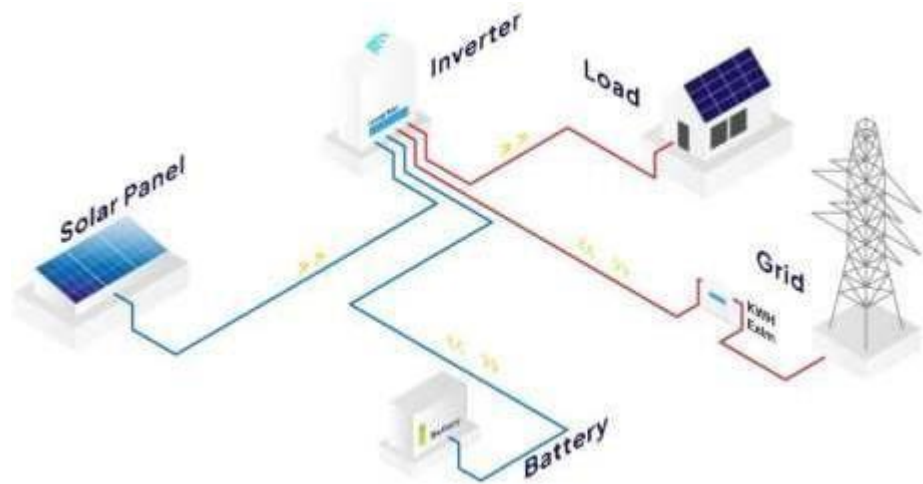
dan inverter yang dibutuhkan. Oleh karena itu, analisis beban menjadi tahap awal yang krusial dalam perencanaan sistem agar pasokan energi dapat memenuhi kebutuhan secara optimal tanpa terjadi kelebihan atau kekurangan daya.

Beban listrik dalam sistem fotovoltaik dapat diklasifikasikan berdasarkan jenis penggunaannya, antara lain beban penerangan, beban peralatan elektronik, dan beban mekanis seperti sistem pendingin atau pompa listrik. Setiap jenis beban memiliki karakteristik konsumsi energi yang berbeda, baik dari segi daya awal (*starting power*), durasi pemakaian, maupun faktor daya. Beban dengan daya awal tinggi, seperti pendingin ruangan atau motor listrik, memerlukan perhatian khusus karena dapat memengaruhi kapasitas inverter dan kestabilan sistem secara keseluruhan.

Selain itu, beban juga dapat diklasifikasikan berdasarkan sifat pengoperasiannya, yaitu beban kontinu dan beban intermiten. Beban kontinu adalah beban yang bekerja dalam waktu lama atau terus-menerus, seperti penerangan umum dan sistem jaringan komputer, sedangkan beban intermiten bekerja secara periodik atau tidak terus-menerus, seperti peralatan dapur atau mesin tertentu. Pola operasional beban ini sangat berpengaruh terhadap profil beban harian dan strategi pengelolaan energi dalam sistem Smart Microgrid. Dalam sistem Smart Microgrid, pengelolaan beban (*load management*) menjadi aspek penting untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem. Pengaturan waktu penggunaan beban, prioritas beban, serta pemanfaatan energi pada saat produksi PV maksimum dapat mengurangi ketergantungan terhadap baterai dan menekan nilai *Unmet Load*. Dengan manajemen beban yang baik, sistem dapat beroperasi lebih stabil dan umur komponen penyimpanan energi dapat diperpanjang.

Lebih lanjut, pemodelan beban yang akurat sangat diperlukan dalam simulasi sistem fotovoltaik menggunakan perangkat lunak seperti HOMER Pro. Data beban yang realistis memungkinkan analisis kinerja sistem secara lebih tepat, termasuk evaluasi kebutuhan kapasitas PV, baterai, serta estimasi keandalan dan efisiensi energi. Oleh karena itu, pemahaman yang baik

mengenai karakteristik dan perilaku beban menjadi kunci dalam perancangan sistem fotovoltaik yang efisien, berkelanjutan, dan sesuai dengan kebutuhan pengguna.



Gambar 2. 9 Beban (*Load*)

Semua komponen ini terhubung dalam satu sistem terpadu yang memungkinkan pengaliran energi dari sumber (matahari) ke pengguna secara efisien dan aman.

d. Perhitungan Daya dan Energi PV

Energi listrik yang dihasilkan oleh sistem fotovoltaik dapat dihitung dengan persamaan dasar :

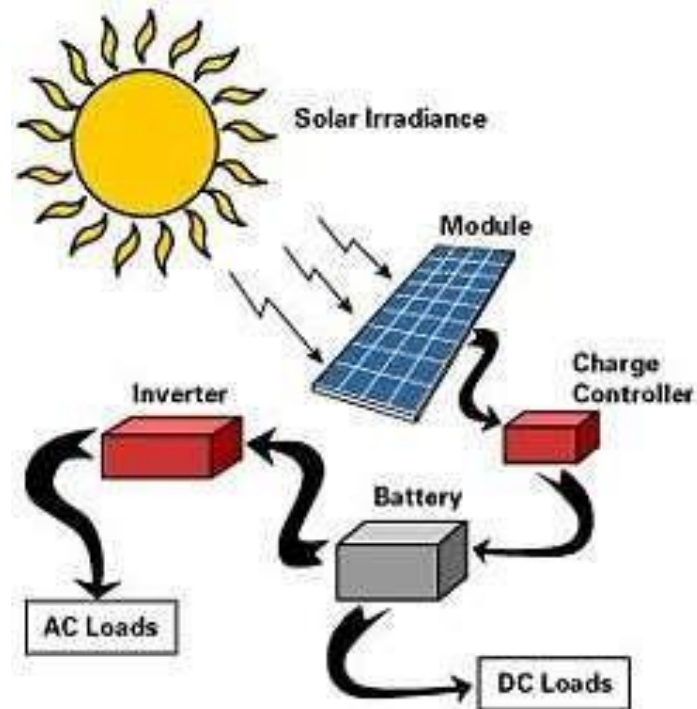
$$E_{PV} = G_t \times A_{PV} \times \eta_{PV} \times T$$

Keterangan :

- 1) E_{PV} = Energi listrik yang dihasilkan (kWh)
- 2) G_t = Intensitas radiasi matahari rata-rata (kW/m²)
- 3) A_{PV} = Luas permukaan modul PV (m²)
- 4) η_{PV} = Efisiensi modul fotovoltaik (%)
- 5) T = Lama penyinaran efektif (jam/hari)

Persamaan ini menjadi dasar dalam perhitungan input energi pada perangkat lunak *HOMER Pro*, yang digunakan dalam penelitian ini untuk mensimulasikan produksi energi berdasarkan data iradiasi matahari di lokasi penelitian.

e. Peran PLTS Fotovoltaik dalam Sistem *Smart Microgrid*



Gambar 2. 10 Sistem Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

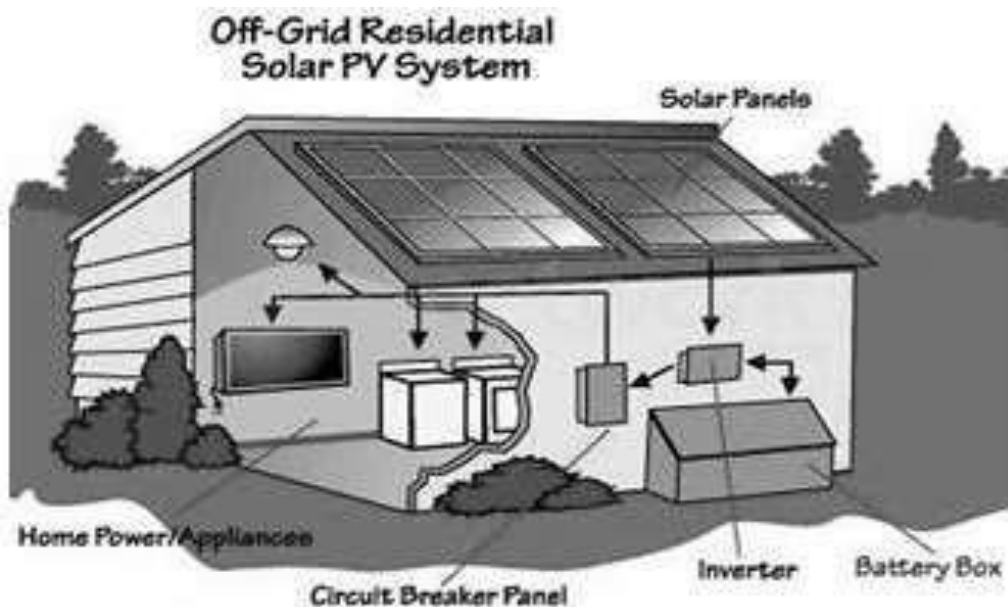
Dalam sistem *Smart Microgrid*, PLTS fotovoltaik berfungsi sebagai sumber energi utama yang bersih dan berkelanjutan. Energi listrik yang dihasilkan PV tidak hanya digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban langsung, tetap juga disimpan dalam sistem baterai untuk menjaga kontinuitas suplai energi(Karjadi, 2025).

Kinerja sistem PLTS yang stabil dan efisien sangat menentukan nilai efisiensi energi (*energi efficiency*) dan rasio kinerja sistem (*performance ration*) dari keseluruhan *Smart Microgrid*. Memulai simulasi menggunakan *HOMER PRO*, kontribusi energi PV terhadap *renewable fraction* dan *unmet load* dapat dianalisis untuk menemukan konfigurasi sistem yang paling efisien dan andal. PLTS fotovoltaik merupakan komponen utama dalam sistem *Smart Microgrid* yang berperan mengubah energi matahari menjadi energi listrik(Windarta et al., 2020). Kinerja sistem ini sangat dipengaruhi oleh faktor radiasi, efisiensi modul, dan desain sistem penyimpanan energi. Melalui pendekatan simulasi dengan *HOMER PRO*(Windarta et al., 2020), kinerja PLTS dapat dianalisis secara menyeluruh untuk menentukan strategi energi terbaik dalam sistem *Microgrid*.

Selain sebagai sumber energi utama, PLTS fotovoltaik dalam sistem *Smart Microgrid* juga berperan dalam mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi konvensional berbasis fosil. Dengan memanfaatkan energi matahari yang bersifat melimpah dan terbarukan, sistem *Microgrid* dapat menurunkan emisi ini menjadi semakin penting dalam konteks pembangunan berkelanjutan dan pengembangan sistem kelistrikan yang ramah lingkungan.

PLTS fotovoltaik juga berkontribusi dalam pengaturan keseimbangan antara pasokan dan permintaan energi di dalam *Smart Microgrid*. Melalui integrasi dengan sistem manajemen energi, daya yang dihasilkan oleh modul PV dapat dimanfaatkan secara optimal pada saat produksi maksimum, misalnya pada siang hari. Strategi ini memungkinkan pengurangan beban baterai serta peningkatan efisiensi pemanfaatan energi surya, sehingga kinerja sistem secara keseluruhan menjadi lebih stabil dan efisien.

2.2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Menggunakan Sistem Off Grid



Gambar 2. 11 PLTS *Off-Grid*

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terpusat (PLTS) Off-Grid hanya menggunakan radiasi matahari sebagai sumber daya, tanpa terhubung ke jaringan PLN. Dengan kata lain, sistem PLTS Off-Grid hanya menggunakan radiasi matahari melalui panel surya atau photovoltaic. Sistem ini hanya digunakan di daerah yang tidak dapat memperoleh listrik dari PLN, seperti

daerah yang tidak dapat memperoleh listrik dari jaringan PLN(Kautsar & Rahayu, 2022).

Prinsip kerja PLTS off-grid didasarkan pada konversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik arus searah (DC) melalui efek fotovoltaiik. Energi listrik yang dihasilkan kemudian diatur oleh solar charge controller sebelum disimpan ke dalam baterai penyimpanan energi. Baterai berfungsi sebagai media penyimpanan energi untuk digunakan saat intensitas cahaya matahari rendah atau pada malam hari. Selanjutnya, inverter mengubah energi listrik DC menjadi arus bolak-balik (AC) agar dapat digunakan oleh peralatan listrik sesuai kebutuhan beban.

Sistem PLTS off-grid memiliki beberapa keunggulan, antara lain mampu menyediakan energi listrik secara mandiri, ramah lingkungan, dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Selain itu, sistem ini bersifat modular sehingga kapasitasnya dapat dikembangkan sesuai kebutuhan(Windarta et al., 2020). Namun demikian, PLTS off-grid juga memiliki keterbatasan, seperti biaya investasi awal yang relatif tinggi, terutama pada komponen baterai, serta ketergantungan pada kondisi cuaca dan intensitas radiasi matahari.

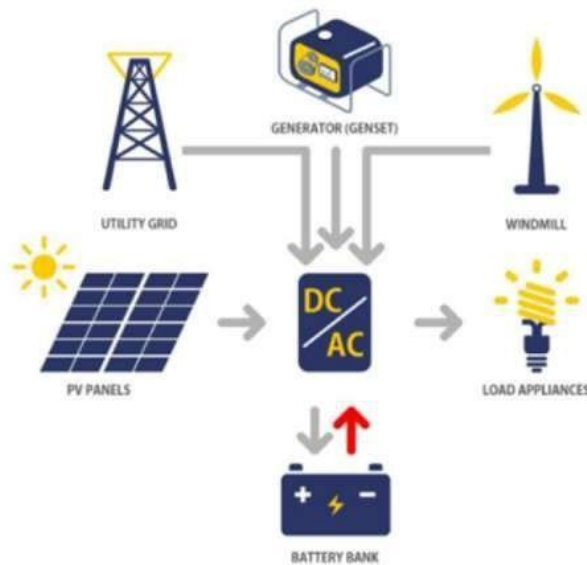
Dalam penerapannya, PLTS off-grid memerlukan perencanaan dan perancangan sistem yang tepat agar dapat beroperasi secara optimal dan efisien. Penentuan kapasitas modul fotovoltaiik, baterai, dan inverter harus disesuaikan dengan profil beban dan kondisi lingkungan setempat. Dengan perancangan yang baik, sistem PLTS off-grid dapat menjadi solusi energi terbarukan yang andal, berkelanjutan, dan mendukung kemandirian energi di berbagai sektor.

2.2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Menggunakan Sistem Hybrid

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dengan sistem hybrid merupakan sistem pembangkit listrik yang mengombinasikan energi surya dengan sumber energi lain, seperti jaringan listrik PLN atau generator konvensional (diesel), dalam satu sistem terintegrasi. Sistem ini dirancang untuk meningkatkan keandalan pasokan energi listrik dengan memanfaatkan keunggulan masing-masing sumber energi. PLTS hybrid banyak diterapkan pada bangunan komersial, fasilitas industri, dan kawasan dengan kebutuhan energi

tinggi yang memerlukan kontinuitas pasokan listrik. Hybrid Renewable Energy System (HRES) mampu meningkatkan keandalan sistem melalui kombinasi beberapa sumber energi seperti PV, angin, dan genset (Rifki Kafil & Pawenary, 2024).

SISTEM PLTS HYBRID



Gambar 2. 12 Sistem PLTS Hybrid

Prinsip kerja PLTS hybrid didasarkan pada pengelolaan energi secara cerdas antara modul fotovoltaik, sistem penyimpanan energi (baterai), dan sumber energi cadangan. Pada saat radiasi matahari mencukupi, energi listrik yang dihasilkan oleh modul fotovoltaik digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban dan mengisi baterai. Ketika produksi energi surya tidak mencukupi, sistem secara otomatis akan memanfaatkan energi dari baterai atau beralih ke jaringan listrik PLN atau generator sebagai sumber pendukung.

Komponen utama sistem PLTS hybrid meliputi modul fotovoltaik, inverter hybrid, baterai penyimpanan energi, sistem kontrol, serta sumber energi tambahan seperti grid atau generator. Inverter hybrid berperan penting dalam mengatur aliran energi antar sumber, mengelola proses pengisian dan pengosongan baterai, serta menjaga kualitas daya listrik yang disalurkan ke beban (Seane et al., 2022). Sistem kontrol cerdas memungkinkan pengoperasian sistem secara otomatis dan efisien sesuai dengan kondisi beban dan ketersediaan

energi.

Keunggulan utama PLTS hybrid terletak pada fleksibilitas dan keandalannya dalam menyediakan energi listrik secara berkelanjutan. Sistem ini mampu mengurangi ketergantungan pada jaringan listrik atau bahan bakar fosil, menekan biaya operasional, serta meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan. Namun, sistem hybrid juga memiliki tantangan, seperti kompleksitas desain, kebutuhan investasi awal yang relatif lebih tinggi, dan perlunya sistem kontrol yang lebih canggih dibandingkan dengan sistem PLTS konvensional.

Dalam implementasinya, PLTS hybrid memerlukan perencanaan yang matang agar mampu mencapai efisiensi energi optimal (HIDAYAT, 2025). Penentuan kapasitas modul fotovoltaik, baterai, dan sumber energi cadangan harus disesuaikan dengan profil beban dan kondisi operasional. Dengan desain dan manajemen energi yang tepat, sistem PLTS hybrid dapat menjadi solusi energi yang andal, efisien, dan berkelanjutan untuk mendukung transisi menuju energi bersih.

2.2.5 Efisiensi Energi

Dalam simulasi ini, efisiensi energi sistem *Smart Microgrid* dianalisis dengan skenario beban 5 kWp per hari, yang diasumsikan sebagai kebutuhan energi total harian sistem mikro skala laboratorium atau bangunan kecil (Kautsar & Rahayu, 2022). Nilai ini menjadi acuan utama dalam menentukan kapasitas PV dan baterai optimal agar efisiensi energi maksimal dengan kehilangan energi minimum dapat dicapai.

a. Pengertian Efisiensi Energi

Efisiensi energi adalah ukuran kemampuan suatu sistem dalam menggunakan energi secara optimal untuk menghasilkan output yang diinginkan dengan minim kehilangan energi (*losses*). Dengan konteks sistem kelistrikan, efisiensi energi menggambarkan perbandingan antara energi keluaran yang dimanfaatkan dengan energi masukan yang digunakan.

Secara umum, efisiensi energi dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\eta = \frac{E_{keluaran}}{E_{masuk}} \times 100\%$$

Keterangan :

- 1) η = Efisiensi energi (%)
- 2) $E_{keluaran}$ = Energi listrik bersih yang dimanfaatkan (kWh)
- 3) E_{masuk} = Energi total yang dihasilkan dari sumber (kWh)

Semakin tinggi nilai efisiensi energi, semakin baik kinerja sistem karena menunjukkan bahwa energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara maksimal dengan kehilangan yang minimal.

b. Konsep Efisiensi Energi dalam Sistem *Smart Microgrid*

Dalam sistem *Smart Microgrid* berbasis fotovoltaik (PV), efisiensi energi tidak hanya dilihat dari kemampuan modul PV mengubah sinar matahari menjadi listrik, tetapi juga mencakup efisiensi konversi daya, penyimpanan, dan distribusi energi dalam keseluruhan sistem.

Faktor-faktor yang menentukan efisiensi energi sistem *Smart Microgrid* antara lain :

- 1) Efisiensi konversi modul PV, kemampuan panel surya mengubah iradiasi matahari menjadi listrik
- 2) Efisiensi inverter, tingkat kehilangan energi saat konversi arus DC menjadi AC
- 3) Efisiensi penyimpanan baterai (*round-trip efficiency*), selisih energi yang disimpan dan dikeluarkan kembali oleh baterai
- 4) Manajemen beban dan distribusi daya, bagaimana energi disalurkan agar tidak terjadi kelebihan (*excess energy*) maupun kekurangan (*unmet load*)
- 5) Sistem kontrol cerdas, peran sistem kontrol dalam menjaga kestabilan operasi sistem serta mengoptimalkan penggunaan energi secara otomatis

Dengan demikian, efisiensi energi pada *Smart Microgrid* mencerminkan kinerja integratif seluruh komponen sistem, bukan hanya efisiensi satu komponen secara terpisah.

c. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Efisiensi

Beberapa faktor utama yang memengaruhi tingkat efisiensi energi pada sistem *Smart Microgrid* adalah :

1) Kondisi Lingkungan (Iradiasi dan Suhu)

Radiasi matahari yang tinggi meningkatkan produksi energi, namun suhu yang terlalu panas dapat menurunkan efisiensi panel surya.

2) Kapasitas PV dan Baterai

Kombinasi kapasitas PV dan baterai yang seimbang akan meminimalkan kehilangan energi. Kapasitas yang tidak proporsional menyebabkan *excess energy* atau *unmet load*.

3) Efisiensi Konversi Daya

Inverter dan pengendali sistem memiliki batas efisiensi tertentu, semakin tinggi efisiensi konversinya, semakin kecil system losses.

4) Profil Beban Listrik (*Load Profile*)

Ketidaksesuaian waktu antara puncak produksi PV dan kebutuhan beban dapat menurunkan efisiensi sistem jika manajemen energi tidak optimal.

5) Strategi Manajemen Energi (*Energy Management Strategy*)

Pengaturan pengisian baterai, prioritas penggunaan energi, dan pembagian beban secara cerdas dapat meningkatkan efisiensi secara signifikan.

Semua faktor ini saling memengaruhi, sehingga dalam penelitian berbasis simulasi, diperlukan pendekatan terintegrasi untuk menemukan konfigurasi yang memberikan efisiensi energi maksimum.

d. Pengukuran Efisiensi Energi pada Simulasi *HOMER Pro*

Dalam perangkat lunak *HOMER Pro*, efisiensi energi sistem dapat diukur melalui beberapa parameter kinerja utama, yaitu :

1) *Total Energy Production (E_t)* – total energi yang dihasilkan oleh sistem PV

2) *Renewable Fraction (RF)* – persentase energi yang berasal dari sumber terbarukan

3) *Unmet Load (UL)* – energi kebutuhan beban yang tidak terpenuhi

4) *System Losses (L_s)* – energi yang hilang akibat proses konversi dan penyimpanan

5) *Performance Ratio (PR)* – indikator keseluruhan efisiensi sistem berdasarkan perbandingan energi aktual dan energi teoritis

Efisiensi sistem *Smart Microgrid* dihitung dari kombinasi kelima parameter tersebut, dengan menekankan pada seberapa besar energi terbarukan

yang dimanfaatkan dibandingkan energi total yang dihasilkan. Melalui simulasi, *HOMER Pro* akan menampilkan hasil setiap parameter pada berbagai skenario konfigurasi, sehingga dapat dievaluasi skenario mana yang paling efisien.

2.2.6 Perangkat Lunak *HOMER Pro*



Gambar 2. 13 Perangkat Lunak *HOMER Pro*

HOMER Pro merupakan perangkat lunak yang banyak digunakan untuk simulasi, optimasi, dan analisis kelayakan sistem energi hybrid (Mehta & Basak, 2020). Perangkat lunak *HOMER Pro* (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*) merupakan sebuah *software* simulasi dan optimasi sistem energi terbarukan yang dikembangkan oleh *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* di Amerika Serikat. Perangkat lunak ini dirancang untuk membantu para peneliti, perencana, dan pengembang energi dalam merancang, mensimulasikan, dan menganalisis sistem hibrida yang terdiri dari berbagai sumber energi seperti fotovoltaik (PV), turbin angin, generator diesel, sistem penyimpanan energi, serta jaringan listrik konvensional (*utility grid*). Beberapa penelitian membandingkan HOMER dengan perangkat lunak lain seperti PVsyst dan Helioscope dalam perencanaan PLTS (Kautsar & Rahayu, 2022). *HOMER Pro* mampu mensimulasikan interaksi antar komponen sistem energi dalam berbagai kondisi lingkungan dan skenario operasional, kemudian memberikan hasil analisis berupa performa teknis, efisiensi energi, serta kelayakan ekonomi dari sistem yang dimodelkan.

Salah satu keunggulan utama *HOMER Pro* adalah kemampuannya dalam melakukan optimasi sistem energi hibrida dengan mempertimbangkan berbagai

variabel teknis dan ekonomi secara bersamaan (Khashemi Hamzah & Arifin, 2024). *HOMER Pro* menggunakan pendekatan iteratif di mana perangkat lunak akan menjalankan ribuan kombinasi simulasi untuk mencari konfigurasi sistem yang paling optimal berdasarkan kriteria tertentu, seperti efisiensi energi tertinggi atau biaya siklus hidup terendah (*Net Present Cost – NPC*). Hasil dari proses optimasi ini kemudian disajikan dalam bentuk grafik, tabel, dan kurva performa yang mudah dianalisis, sehingga peneliti dapat membandingkan performa setiap konfigurasi sistem dengan jelas. Analisis tekno-ekonomi menggunakan *HOMER Pro* memungkinkan evaluasi *Net Present Cost (NPC)* dan *Cost of Energy (COE)* secara komprehensif (Khashemi Hamzah & Arifin, 2024). Dalam penelitian ini, optimasi dilakukan dengan fokus pada peningkatan efisiensi energi melalui analisis perubahan kapasitas PV dan baterai terhadap nilai *renewable fraction* dan *system losses*.

Pemanfaatan *HOMER Pro* dalam penelitian ini berfungsi sebagai alat utama untuk mensimulasikan dan mengevaluasi performa sistem *Smart Microgrid* berbasis fotovoltaik. Dengan perangkat ini, berbagai skenario konfigurasi sistem diuji untuk menentukan kombinasi kapasitas PV dan baterai yang paling efisien serta strategi manajemen energi yang menghasilkan nilai efisiensi tertinggi dan kehilangan daya terendah. Hasil simulasi yang diperoleh akan menjadi dasar dalam menyusun rekomendasi desain sistem *Smart Microgrid* yang optimal, andal, dan berkelanjutan (Rifki Kafil & Pawenary, 2024). Melalui pendekatan berbasis *HOMER Pro*, penelitian ini tidak hanya mampu menganalisis kinerja sistem secara teknis, tetapi juga memberikan gambaran komprehensif mengenai potensi penerapan teknologi energi terbarukan yang efisien dalam mendukung strategi efisiensi energi di masa depan.

Dalam konteks penelitian ini, *HOMER Pro* dapat digunakan untuk sebagai berikut :

a. Pemodelan sistem *smart microgrid* berbasis PV

Pemodelan sistem *smart microgrid* berbasis PV merupakan tahapan fundamental dalam perancangan dan analisis sistem energi terbarukan yang

terintegrasi, di mana berbagai komponen seperti panel surya, baterai, inverter, dan beban listrik dihubungkan dalam satu sistem kendali terpadu untuk mencapai efisiensi dan keandalan optimal.

Pemodelan *Smart Microgrid* berbasis PV bertujuan untuk menggambarkan hubungan teknis dan dinamis antar komponen sistem dalam berbagai kondisi operasi. Proses ini mencakup representasi matematis dan logika kerja sistem mulai dari konversi energi matahari menjadi listrik, penyimpanan energi, hingga distribusi daya ke beban. Dalam konteks penelitian ini, pemodelan dilakukan dengan mengidentifikasi komponen utama sistem yang terdiri dari modul PV, baterai, inverter, beban listrik, serta sistem kontrol cerdas yang mengatur aliran energi antar komponen. Modul PV berfungsi sebagai penghasil utama energi listrik berdasarkan besaran radiasi matahari dan efisiensi konversinya. Energi yang dihasilkan dalam bentuk arus searah (DC) kemudian disalurkan ke inverter untuk diubah menjadi arus bolak-balik (AC) yang dapat digunakan oleh beban listrik. Sementara itu, sistem baterai berfungsi untuk menyimpan energi berlebih dari PV agar dapat digunakan kembali saat produksi energi menurun.

b. Simulasi skenario efisiensi energi

Simulasi skenario efisiensi energi merupakan pendekatan analitis yang digunakan untuk menilai dan membandingkan kinerja sistem *Smart Microgrid* berbasis fotovoltaik (PV) dalam berbagai konfigurasi dan kondisi operasi guna menemukan strategi paling optimal untuk meningkatkan efisiensi energi (Zulfadli & Indarto, 2023). Pendekatan ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak simulasi seperti HOMER Pro, yang memungkinkan pemodelan sistem energi secara detail dan realistis berdasarkan data teknis, kondisi lingkungan, serta profil konsumsi beban listrik. Melalui simulasi, berbagai parameter sistem seperti kapasitas PV, ukuran baterai, efisiensi inverter, serta strategi pengaturan beban dapat diuji secara sistematis, sehingga diperoleh gambaran menyeluruh mengenai bagaimana perubahan setiap variabel memengaruhi efisiensi total sistem dan besaran kehilangan energi (*system losses*) (Bekkouche et al., 2025a).

Dalam konteks sistem *Smart Microgrid*, simulasi skenario efisiensi energi bertujuan untuk menganalisis hubungan antara produksi energi terbarukan, penyimpanan energi, dan konsumsi beban listrik di bawah kondisi operasi yang bervariasi. Setiap skenario yang disimulasikan mewakili kombinasi tertentu dari kapasitas PV, kapasitas baterai, serta strategi manajemen energi. Hasil dari setiap skenario kemudian dibandingkan berdasarkan sejumlah indikator performa utama, seperti *renewable fraction (RF)*, *unmet load (UL)*, *system losses (SL)*, dan *performance ratio (PR)*. Nilai *renewable fraction* menunjukkan persentase energi yang berasal dari sumber terbarukan, sedangkan *unmet load* menggambarkan seberapa besar energi beban yang tidak terpenuhi akibat keterbatasan pasokan atau penyimpanan (Karima & Suyanto, 2024). Parameter *system losses* mengukur kehilangan daya selama proses konversi dan distribusi energi, sementara *performance ratio* menjadi indikator tingkat efisiensi keseluruhan sistem terhadap energi surya yang tersedia. Melalui analisis parameter-parameter tersebut, efisiensi energi dapat diukur secara objektif dan kuantitatif.

- c. Analisis hasil berupa energi yang dihasilkan, *renewable fraction*, *unmet load*, dan *performance ratio*

Analisis hasil berupa energi yang dihasilkan, *renewable fraction*, *unmet load*, dan *performance ratio* merupakan tahap evaluasi utama dalam penelitian sistem *Smart Microgrid* berbasis fotovoltaik (PV), di mana setiap parameter digunakan untuk mengukur tingkat kinerja, efisiensi, dan keandalan sistem dalam memenuhi kebutuhan energi secara berkelanjutan (Karjadi, 2025). Proses analisis ini dilakukan berdasarkan hasil simulasi yang dihasilkan oleh perangkat lunak *HOMER Pro*, yang menyediakan data kuantitatif mengenai produksi energi, konsumsi energi oleh beban, serta kehilangan daya dalam sistem. Setiap parameter memiliki peran penting dalam menggambarkan performa sistem secara menyeluruh, mulai dari seberapa besar energi yang dihasilkan oleh sumber terbarukan, seberapa efisien energi tersebut dimanfaatkan, hingga seberapa besar kebutuhan beban yang dapat dipenuhi tanpa gangguan.

Parameter berikutnya adalah *renewable fraction (RF)*, yaitu rasio antara jumlah energi yang berasal dari sumber energi terbarukan (seperti PV) terhadap total energi yang digunakan oleh sistem selama periode simulasi. Nilai RF menggambarkan sejauh mana sistem bergantung pada sumber energi bersih dibandingkan sumber energi konvensional. Nilai RF yang tinggi menunjukkan bahwa sistem *Smart Microgrid* semakin mandiri secara energi dan semakin sedikit bergantung pada pasokan eksternal seperti jaringan listrik PLN atau generator berbahan bakar fosil. Dalam penelitian ini, peningkatan nilai RF menjadi salah satu indikator keberhasilan strategi efisiensi energi, karena menunjukkan bahwa sebagian besar kebutuhan listrik telah terpenuhi oleh energi surya yang bersih, terbarukan, dan ramah lingkungan (Suka Alaqa et al., 2025). *HOMER Pro* secara otomatis menghitung RF berdasarkan proporsi energi PV terhadap total energi yang dikonsumsi oleh sistem selama simulasi.

Selain itu, *unmet load (UL)* atau beban tidak terpenuhi merupakan parameter yang menunjukkan seberapa besar kebutuhan energi listrik pengguna yang tidak dapat dipenuhi oleh sistem akibat keterbatasan produksi energi atau kapasitas penyimpanan. Nilai *unmet load* biasanya dinyatakan dalam persentase terhadap total kebutuhan beban tahunan. Nilai UL yang rendah menunjukkan bahwa sistem memiliki keandalan tinggi dalam menyediakan energi listrik secara kontinu, sedangkan nilai UL yang tinggi menandakan bahwa sistem tidak mampu mencukupi kebutuhan energi secara optimal, baik karena kapasitas PV terlalu kecil, kapasitas baterai tidak memadai, maupun karena strategi pengelolaan energi belum efisien. Dalam simulasi *Smart Microgrid*, penurunan nilai UL menjadi salah satu tujuan utama dari proses optimasi, karena secara langsung mencerminkan peningkatan stabilitas dan keandalan sistem dalam mendukung beban listrik selama 24 jam penuh.

Sementara itu, *performance ratio (PR)* merupakan parameter yang menggambarkan seberapa efisien sistem PV dalam mengubah energi surya yang diterima menjadi energi listrik yang benar-benar dapat digunakan oleh

beban. PR memperhitungkan seluruh kehilangan energi dalam sistem, termasuk kehilangan akibat suhu, efisiensi inverter, resistansi kabel, dan keterbatasan penyimpanan energi pada baterai. Nilai PR biasanya dinyatakan dalam persen, dan semakin tinggi nilainya, semakin baik kinerja sistem secara keseluruhan. *Performance ratio* menjadi indikator komprehensif karena menggabungkan semua aspek teknis dalam satu ukuran efisiensi total sistem. Dalam penelitian *Smart Microgrid*, PR menjadi salah satu acuan utama untuk mengevaluasi keberhasilan strategi efisiensi energi yang diuji melalui berbagai skenario simulasi di *HOMER Pro* (Husna & Santoso, 2025).

2.3 Kerangka Pemikiran

Penelitian ini diawali dengan identifikasi permasalahan berupa tingginya ketergantungan pada energi fosil dan rendahnya pemanfaatan energi surya. Selanjutnya dilakukan kajian teori terkait PLTS (Febriana Khairunnisa et al., 2025), *smart microgrid*, efisiensi energi, serta perangkat lunak *HOMER Pro*. Data yang diperoleh berupa potensi radiasi matahari, profil beban, serta parameter teknis PV dan baterai.

Tahap berikutnya adalah pemodelan sistem smart microgrid pada *HOMER Pro* dengan beberapa skenario efisiensi energi (Mariño et al., 2023). Hasil simulasi kemudian dianalisis berdasarkan parameter kinerja utama (energi terbarukan, *losses*, *unmet load*, *PR*). Akhirnya, penelitian menghasilkan rekomendasi konfigurasi sistem *smart microgrid* yang paling optimal dan efisien.

Kerangka pemikiran dalam penelitian ini disusun untuk menjelaskan alur berpikir logis yang menghubungkan teori dasar, penelitian terdahulu, serta pendekatan simulasi yang digunakan dalam mengevaluasi kinerja *Smart Microgrid* berbasis fotovoltaik (PV) menggunakan perangkat lunak *HOMER Pro* (Yenalem et al., 2020). Melalui kerangka ini, peneliti berupaya menunjukkan bagaimana konsep-konsep teoritis mengenai sistem energi terbarukan, efisiensi energi, dan teknologi *microgrid* dapat diimplementasikan secara praktis dalam lingkungan nyata, yaitu di Institut Teknologi PLN (IT PLN), yang memiliki infrastruktur laboratorium dan fasilitas energi surya sebagai studi kasus penerapan sistem *Smart Microgrid*.

Dalam konteks efisiensi energi, sistem *Smart Microgrid* berbasis PV di IT PLN menjadi model ideal untuk dikaji karena kampus ini memiliki profil beban yang kompleks terdiri atas beban akademik, laboratorium, dan fasilitas umum yang fluktuatif sepanjang hari. Hal ini memungkinkan dilakukan pengujian skenario efisiensi energi yang realistis dengan mempertimbangkan variasi intensitas radiasi matahari, kapasitas sistem PV, kapasitas baterai, serta strategi pengelolaan beban listrik. Melalui simulasi berbasis *HOMER Pro*, peneliti dapat memodelkan sistem *Smart Microgrid* yang menyerupai kondisi operasional di lingkungan IT PLN dan mengevaluasi performanya berdasarkan parameter seperti energi yang dihasilkan, *renewable fraction*, *unmet load*, dan *performance ratio*.

Kerangka pemikiran penelitian ini dimulai dengan pengumpulan dan analisis data potensi energi surya di lingkungan IT PLN yang digunakan sebagai dasar dalam menentukan potensi energi listrik yang dapat dihasilkan oleh sistem PV. Selanjutnya dilakukan pemodelan sistem *Smart Microgrid* berbasis PV yang melibatkan komponen utama seperti modul surya, baterai penyimpanan energi, inverter, dan beban listrik. Setiap komponen dimasukkan ke dalam perangkat lunak *HOMER Pro* sesuai dengan parameter teknisnya. Tahapan berikutnya adalah simulasi skenario efisiensi energi, di mana dilakukan variasi kapasitas PV, kapasitas baterai, dan strategi manajemen energi untuk mencari konfigurasi sistem dengan efisiensi tertinggi. Hasil simulasi dianalisis berdasarkan empat parameter utama yaitu energi yang dihasilkan, *renewable fraction*, *unmet load*, dan *performance ratio*, guna menentukan konfigurasi sistem yang paling optimal.