

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

Untuk menunjang penelitian ini maka diperlukan berbagai referensi jurnal ilmiah dan buku penunjang keberhasilan penelitian, jurnal dan buku yang digunakan sebagai referensi pada penelitian ini diantaranya :

Penelitian pertama dilakukan oleh Oladigbolu et al. (2020) dengan judul "*Optimal Design of a Hybrid Renewable Energy System for Rural Electrification*". Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang sistem pembangkit listrik *hybrid* yang optimal dengan mengombinasikan *photovoltaic* (PV), mikrohidro, diesel, dan baterai guna memenuhi kebutuhan listrik di daerah terpencil. Metode yang digunakan adalah simulasi dan optimasi menggunakan perangkat lunak HOMER dengan mempertimbangkan parameter teknis dan ekonomi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem *hybrid* mampu menghasilkan energi listrik yang lebih stabil dengan biaya energi yang lebih rendah dibandingkan sistem diesel tunggal, serta mampu menurunkan emisi karbon secara signifikan (Oladigbolu, 2020).

Penelitian kedua dilakukan oleh Renaldhy et al. (2020) dengan judul "*Dynamic Simulation of a Hybrid PV/Wind/Diesel System Using PowerFactory*". Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis kinerja dinamis sistem pembangkit *hybrid* yang menggabungkan *photovoltaic* (PV), wind, dan diesel dalam menjaga kestabilan sistem tenaga listrik di daerah terpencil. Metode yang digunakan adalah simulasi menggunakan *software PowerFactory* untuk mengamati respon frekuensi dan tegangan sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem *hybrid* mampu bekerja secara stabil dan andal karena adanya koordinasi antara generator diesel dan sumber energi

terbarukan, sehingga cocok diterapkan pada sistem kelistrikan terisolasi (Renaldhy, 2020).

Penelitian ketiga dilakukan oleh Elmia & Hassan (2025) dengan judul “*Evaluating the Technical and Economic Feasibility of PV/Wind/Diesel Hybrids*”. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kelayakan teknis dan ekonomi sistem *hybrid* dalam penyediaan listrik di daerah terpencil. Metode yang digunakan adalah algoritma metaheuristik untuk optimasi konfigurasi sistem berdasarkan parameter biaya dan keandalan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem *hybrid* PV/wind/diesel mampu memberikan solusi optimal dengan biaya energi yang lebih rendah serta keandalan yang lebih tinggi dibandingkan sistem konvensional berbasis diesel (Elmi and Hassan, 2025).

Penelitian kelima dilakukan oleh Pérez et al. (2026) dengan judul “*Techno-Economic and Environmental Assessment of a Hybrid Photovoltaic–Diesel System*”. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi performa sistem *hybrid* PV–diesel dari aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan. Metode yang digunakan adalah analisis berbasis data beban listrik, radiasi matahari, dan simulasi sistem energi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem *hybrid* mampu menurunkan biaya energi, meningkatkan efisiensi sistem, serta mengurangi emisi gas rumah kaca secara signifikan, sehingga menjadi solusi berkelanjutan untuk sistem energi masa depan (Alejandro et al., 2026).

## **1.2 Teori Dasar**

### **1.2.1 Energi dan Kebutuhan Energi Listrik**

#### **1. Pengertian energi**

Energi merupakan sesuatu yang bersifat abstrak yang sukar dibuktikan tetapi dapat dirasakan adanya. Energi adalah kemampuan untuk melakukan kerja

(*energy is the capability for doing work*) (Gunawan, 2018). Sedangkan energi alam adalah sesuatu yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai kepentingan dan kebutuhan hidup manusia agar hidup lebih sejahtera, energi alam bisa terdapat dimana saja seperti di dalam tanah, air, permukaan tanah, udara dan lain sebagainya. Definisi energi secara umum yaitu kata energi berasal dari bahasa Yunani, yang artinya kerja yaitu ergon (Azhar and Satriawan, 2020). Sedangkan menurut KBBI energi secara garis besarnya didefinisikan daya atau kekuatan yang akan diperlukan untuk dapat melakukan berbagai rangkaian proses kegiatan. Menurut Papilo (2022), energi adalah tenaga, atau gaya untuk berbuat sesuatu (Papilo, 2022). Definisi ini merupakan perumusan yang lebih luas daripada pengertian-pengertian mengenai energi yang pada umumnya dianut di dunia ilmu pengetahuan.

## **2. Jenis-jenis energi**

Dalam pengertian sehari-hari energi dapat didefinisikan sebagai kemampuan untuk melakukan suatu pekerjaan. Energi terbagi menjadi 2, yaitu energi konvensional dan energi non konvensional.

### **1. Energi konvensional**

Energi konvensional sering disebut sebagai sumber daya energi fosil. Energi fosil ini suatu saat akan habis karena kecepatan pemakaian lebih cepat dibanding dengan kecepatan pembentukannya. Energi konvensional atau energi fosil terdiri dari minyak bumi, gas bumi, dan batubara (Azizah Fauziah Misbahuddin, 2024).

### **2. Energi Non-konvensional**

Energi non-konvensional biasa disebut sebagai sumber daya energi non fosil. Energi non konvensional meliputi energi baru dan terbarukan. Energi non konvensional adalah energi air, angin, biomassa, matahari, nuklir, panas bumi, dan pasang surut air laut. Jenis-jenis energi berdasarkan sumbernya, yaitu energi tak terbarukan dan energi terbarukan (Safarudin, 2024).

Sumber energi tak terbarukan (*non-renewable*) didefinisikan sebagai sumber energi yang tidak dapat diisi atau dibuat kembali oleh alam. Sumber energi yang tak terbarukan diantaranya adalah:

a. Minyak Bumi

Minyak bumi adalah zat cair licin dan mudah terbakar yang terjadi sebagian besar karena hidrokarbon. Menurut teori, minyak bumi berasal dari sisa-sisa binatang kecil dan tumbuhan yang hidup di laut jutaan tahun yang lalu yang mengendap dan mendapat tekanan dari lempengan bumi sehingga secara alami larut dan berubah menjadi minyak bumi (Andi Resky, 2023).

b. Batubara

Batubara adalah batuan sedimen yang berasal dari material organik, yang memiliki kandungan utama berupa karbon, hidrogen dan oksigen. Batubara ini merupakan hasil akumulasi dan material organik pada suatu lingkungan pengendapan tertentu (Ie and Hamdani, 2026).

c. Nuklir

Sumber energi ini merupakan sumber energi hasil tambang yang lain, yang dapat dibudidayakan melalui proses fisi dan fusi. Energi nuklir, meskipun

bersih, mengandung risiko bahaya radiasi yang mematikan sehingga pengolahannya harus ekstra hati-hati. Sedangkan sumber energi terbarukan (*renewable*) didefinisikan sebagai sumber energi yang dapat dengan cepat diisi kembali oleh alam (RC Hartantrie, IGE Lesmana, AR TK, 2022).

Berikut ini adalah yang termasuk sumber energi terbarukan :

a. Biomassa

Biomassa adalah bahan organik yang dihasilkan melalui proses fotosintetik, baik berupa produk maupun buangan. Contoh biomassa antara lain adalah tanaman, rumput, ubi, limbah pertanian, limbah hutan dan kotoran ternak. Sumber energi biomassa mempunyai beberapa kelebihan, antara lain merupakan sumber energi yang dapat diperbaharui (*renewable*) sehingga dapat menyediakan sumber energi secara berkesinambungan (*sustainable*) (Sulasminingsih *et al.*, 2023).

b. Matahari

Energi matahari diperoleh dari cahaya panas yang merupakan dari panas matahari. Selain memanaskan air, energi ini juga bisa dikonversi menjadi listrik (Dwisari, Fisika and Jember, no date).

c. Air

Tenaga air adalah energi yang diperoleh dari air yang mengalir atau air terjun. Air yang mengalir ke puncak baling-baling atau baling-baling yang ditempatkan di sungai, akan menyebabkan baling-baling bergerak dan menghasilkan tenaga

mekanis, kemudian dikonversi oleh generator menjadi listrik (Kurniawan, 2026).

d. Angin

Pada saat angin bertiup, angin disertai dengan energi kinetik (gerakan) yang bisa melakukan suatu pekerjaan. Contoh, perahu layar memanfaatkan tenaga angin untuk mendorongnya bergerak di air. Tenaga angin juga bisa dimanfaatkan menggunakan baling-baling yang dipasang di puncak menara, yang disebut dengan turbin angin yang akan menghasilkan energi mekanik dan dikonversi menjadi energi listrik oleh generator (Windi *et al.*, 2025).

e. Panas Bumi

Energi panas bumi adalah energi panas yang berasal dari dalam bumi. Energi panas ini dihasilkan di dalam inti bumi yang ditimbulkan oleh peristiwa peluruhan partikel-partikel radioaktif di dalam batuan. Inti bumi terbentuk dari magma yang mengalir menembus berbagai lapisan batuan di bawah tanah. Saat mencapai reservoir air bawah tanah, terbentuklah air panas bertekanan tinggi yang keluar ke permukaan bumi melalui celah atau retakan di kulit bumi, maka timbul sumber air panas yang biasa disebut uap panas (Windi *et al.*, 2025).

f. Pasang surut air laut

Energi air pasang bisa dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik seperti halnya listrik tenaga air tetapi dalam skala yang lebih besar. Pada saat air pasang, air bisa ditahan di belakang bendungan. Ketika surut, maka tercipta

perbedaan ketinggian air antara air pasang yang ditahan di bendungan dan air laut, dan air laut dibelakang bendungan bisa mengalir melalui turbin yang berputar, untuk menghasilkan listrik (Wisnuwara, 2025).

### **3. Kebutuhan energi listrik masyarakat**

Kebutuhan energi listrik masyarakat merupakan jumlah energi listrik yang diperlukan oleh penduduk dalam suatu wilayah untuk mendukung berbagai aktivitas sehari-hari. Kebutuhan ini mencakup penggunaan listrik pada sektor rumah tangga, fasilitas umum, kegiatan ekonomi, hingga sektor industri kecil maupun besar. Secara umum, kebutuhan energi listrik masyarakat dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, yaitu (Jamilatun *et al.*, 2025):

#### **1. Jumlah Penduduk**

Semakin besar jumlah penduduk, maka semakin tinggi kebutuhan listrik. Hal ini karena setiap individu membutuhkan energi untuk penerangan, penggunaan alat elektronik, dan aktivitas lainnya.

#### **2. Tingkat Pertumbuhan Ekonomi**

Peningkatan ekonomi masyarakat akan mendorong penggunaan peralatan listrik yang lebih banyak, seperti AC, kulkas, mesin cuci, dan perangkat elektronik lainnya, sehingga konsumsi listrik meningkat.

#### **3. Pola Konsumsi Energi**

Gaya hidup masyarakat juga memengaruhi kebutuhan listrik. Masyarakat dengan pola hidup modern cenderung memiliki konsumsi listrik yang lebih tinggi dibandingkan masyarakat dengan pola hidup sederhana.

#### 4. Ketersediaan dan Akses Listrik

Wilayah yang sudah terjangkau jaringan listrik secara merata akan memiliki tingkat konsumsi listrik yang lebih tinggi dibandingkan daerah yang masih terbatas aksesnya.

#### 5. Perkembangan Teknologi

Semakin berkembangnya teknologi, semakin banyak perangkat berbasis listrik yang digunakan masyarakat, sehingga kebutuhan energi listrik meningkat.

Dalam konteks penelitian, seperti pada daerah terpencil atau pulau (misalnya sistem pembangkit *hybrid* diesel-fotovoltaik), analisis kebutuhan energi listrik masyarakat sangat penting untuk:

- a. Menentukan kapasitas pembangkit yang dibutuhkan
- b. Menyesuaikan sistem pembangkitan dengan beban harian (*load profile*)
- c. Menghindari kekurangan (*defisit*) atau kelebihan (*over supply*) energi
- d. Meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem listrik

Biasanya, kebutuhan energi listrik dihitung berdasarkan total daya yang digunakan (Watt) dan lama pemakaian (jam), sehingga diperoleh konsumsi energi dalam satuan Watt-hour (Wh) atau kilowatt-hour (kWh). Dengan memahami kebutuhan energi listrik masyarakat secara tepat, perencanaan sistem kelistrikan dapat dilakukan secara optimal, efisien, dan berkelanjutan.

#### 4. Pola konsumsi energi listrik

Pola konsumsi energi listrik adalah gambaran atau karakteristik penggunaan listrik oleh masyarakat dalam periode waktu tertentu. Pola ini menunjukkan kapan, di mana, dan seberapa besar listrik digunakan, sehingga

dapat diketahui perilaku pemakaian energi dalam suatu wilayah. Pola konsumsi listrik sangat penting dalam perencanaan sistem kelistrikan karena membantu dalam memahami profil beban (*load profile*), yaitu fluktuasi penggunaan listrik dari waktu ke waktu. Secara umum, pola konsumsi energi listrik masyarakat memiliki karakteristik sebagai berikut (Mirza Hamdhan, 2021):

#### 1. Berdasarkan Waktu (Harian)

Penggunaan listrik biasanya berfluktuasi dalam satu hari:

- Pagi hari: konsumsi mulai meningkat (aktivitas rumah tangga dimulai)
- Siang hari: relatif stabil atau menurun (banyak aktivitas di luar rumah)
- Malam hari: puncak konsumsi (*peak load*), karena hampir semua aktivitas dilakukan di rumah seperti menyalakan lampu, TV, dan peralatan elektronik

#### 2. Berdasarkan Hari (Mingguan)

- Hari kerja: konsumsi cenderung stabil
- Akhir pekan/libur: konsumsi bisa meningkat karena lebih banyak aktivitas di rumah

#### 3. Berdasarkan Jenis Pengguna

- Rumah tangga: dominan pada malam hari
- Komersial (toko, kantor): dominan pada siang hari
- Industri: relatif stabil tergantung jam operasional

#### 4. Berdasarkan Musim atau Kondisi Tertentu

- Pada musim panas atau cuaca panas, konsumsi listrik meningkat karena penggunaan pendingin (AC/kipas)
- Pada hari besar atau acara tertentu, konsumsi juga bisa meningkat

#### 5. Faktor yang Mempengaruhi Pola Konsumsi

- Jumlah dan jenis peralatan listrik
- Kebiasaan dan gaya hidup masyarakat

- Tarif listrik
- Kondisi ekonomi
- Ketersediaan energi listrik

#### 6. Pentingnya Pola Konsumsi Energi Listrik

Mengetahui pola konsumsi listrik memiliki beberapa manfaat, antara lain:

- Menentukan kapasitas pembangkit listrik yang sesuai
- Mengatur distribusi energi secara efisien
- Menghindari beban puncak yang berlebihan (*overload*)
- Mendukung perencanaan sistem energi terbarukan (seperti PLTS)
- Meningkatkan efisiensi penggunaan energi

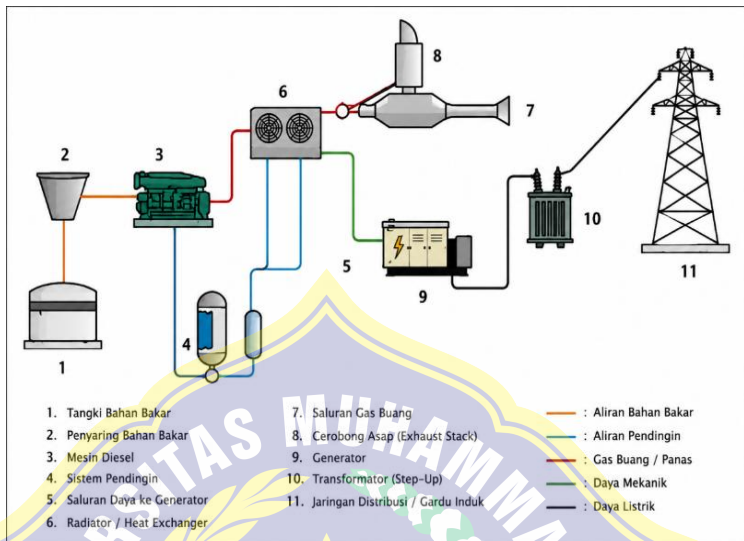
Dalam penelitian, pola konsumsi biasanya disajikan dalam bentuk grafik beban harian (*load curve*), yang menunjukkan perubahan penggunaan listrik setiap jam dalam sehari. Dengan memahami pola konsumsi energi listrik, perencanaan sistem kelistrikan dapat dilakukan secara lebih tepat, sehingga mampu memenuhi kebutuhan masyarakat secara optimal dan berkelanjutan.

#### 1.2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)

PLTD adalah instalasi pembangkit listrik yang menggunakan mesin diesel sebagai penggerak utama (Kartikasari, Insinyur and Mada, 2026). Mesin diesel bekerja berdasarkan prinsip siklus diesel dengan komponen utama berupa engine, generator, sistem bahan bakar, sistem pendingin, dan sistem pelumasan. Mesin diesel merupakan mesin pembakaran dalam (*internal combustion engine*) yang menggunakan prinsip penyalan kompresi (*compression ignition*) (Ahmad Yani, 2022). Berbeda dengan mesin bensin

yang menggunakan busi sebagai pemicu pembakaran, mesin diesel memanfaatkan tekanan dan suhu tinggi hasil kompresi udara untuk menyalakan bahan bakar. Pada siklus kerja mesin diesel, udara dimasukkan ke dalam silinder dan dikompresi hingga mencapai tekanan dan temperatur tinggi (sekitar 30–40 bar dan 600–700 °C). Ketika bahan bakar solar diinjeksikan ke ruang bakar pada akhir langkah kompresi, bahan bakar langsung terbakar akibat suhu tinggi tersebut. Pembakaran ini menghasilkan energi panas yang dikonversi menjadi energi mekanik melalui gerak piston, yang selanjutnya diubah menjadi energi listrik melalui generator.

Parameter utama yang memengaruhi kinerja mesin diesel meliputi tekanan kompresi, efisiensi pembakaran, waktu penyemprotan bahan bakar, temperatur gas buang, serta konsumsi bahan bakar. Keseimbangan antar parameter tersebut akan menentukan besarnya daya keluaran dan efisiensi bahan bakar mesin secara keseluruhan (Kristanto, 2020). Untuk mempermudah dalam melakukan pemeliharaan mesin diesel para teknisi harus mempunyai dasar-dasar pengetahuan mengenai mesin diesel yang baik, agar setiap melakukan pemeliharaan para teknisi dapat memperlakukan setiap komponen yang berada dalam mesin, sesuai dengan konstruksinya.



Gambar 2.1 Pembangkit listrik tenaga diesel.

Sumber: Teknik Maintenance Workshop, Prinsip kerja pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD), 2019.

Dari gambar di tersebut dapat kita lihat bagian-bagian dari Pembangkit Listrik Tenaga Diesel, yaitu :

1. Tangki penyimpanan bahan bakar.
2. Penyaring bahan bakar.
3. Tangki penyimpanan bahan bakar sementara (bahan bakar yang disaring).
4. Pengabut.
5. Mesin diesel.
6. Turbo charger.
7. Penyaring gas pembuangan.
8. Tempat pembuangan gas (bahan bakar yang disaring).
9. Generator.
10. Trafo.
11. Saluran Transmisi.

### 2.2.2.1 Prinsip kerja PLTD

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) bekerja dengan prinsip mengubah energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar diesel menjadi energi listrik melalui beberapa tahapan proses (Marhaini and Mardwita Arief Suranda, 2022). Proses ini melibatkan mesin diesel sebagai penggerak utama (*prime mover*) dan generator sebagai penghasil energi listrik. Secara umum, prinsip kerja PLTD dimulai dari proses pembakaran bahan bakar di dalam mesin diesel. Bahan bakar solar diinjeksikan ke dalam ruang bakar yang telah berisi udara bertekanan tinggi akibat proses kompresi. Udara yang dikompresi akan mengalami peningkatan suhu sehingga ketika bahan bakar disemprotkan, terjadi pembakaran secara spontan tanpa memerlukan percikan api (*self ignition*). Proses pembakaran ini menghasilkan energi panas yang sangat tinggi.

Energi panas tersebut kemudian diubah menjadi energi mekanik melalui gerakan piston di dalam silinder. Piston akan bergerak naik turun (gerak translasi) akibat tekanan hasil pembakaran (Sikki, 2014). Gerakan piston ini selanjutnya diteruskan ke poros engkol (*crankshaft*) sehingga menghasilkan gerak putar. Gerak putar dari poros engkol ini digunakan untuk memutar rotor generator yang terhubung secara langsung dengan mesin diesel. Ketika rotor berputar di dalam medan magnet stator, maka terjadi proses induksi elektromagnetik sesuai dengan prinsip hukum Faraday. Akibatnya, energi mekanik diubah menjadi energi listrik dalam bentuk arus listrik.

Listrik yang dihasilkan oleh generator kemudian disalurkan melalui sistem distribusi untuk digunakan oleh konsumen. Dalam proses ini, terdapat juga sistem pendukung seperti sistem pendingin (*cooling system*), sistem pelumasan (*lubrication system*), dan sistem bahan bakar (*fuel system*) yang berfungsi menjaga kinerja mesin tetap optimal dan stabil.

Secara ringkas, prinsip kerja PLTD dapat dijelaskan melalui tahapan berikut:

1. Bahan bakar diesel dibakar di dalam mesin → menghasilkan energi panas
2. Energi panas menggerakkan piston → menghasilkan energi mekanik
3. Energi mekanik memutar generator → menghasilkan energi listrik
4. Energi listrik disalurkan ke beban

Dengan demikian, kinerja PLTD sangat bergantung pada efisiensi proses pembakaran, kondisi mesin diesel, serta kestabilan sistem pendukungnya. Oleh karena itu, pemeliharaan dan pengendalian kondisi lingkungan, seperti suhu dan kelembapan, menjadi faktor penting untuk menjaga keandalan operasi PLTD.

#### **2.2.2.2 Komponen utama PLTD**

Sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) terdiri dari dua komponen utama, yaitu mesin diesel sebagai penggerak utama (*prime mover*) dan generator sebagai pembangkit listrik. Adapun bagian-bagian penting mesin diesel pembangkit meliputi (Sihombing, Erivianto and Dalimunthe, 2025):

1. Blok silinder (*Cylinder Block*) Sebagai rumah bagi komponen utama seperti piston, connecting rod, dan crankshaft. Berfungsi menahan tekanan dan panas tinggi selama proses pembakaran.
2. Piston dan Ring Piston Piston mengubah tekanan gas hasil pembakaran menjadi gaya mekanik linier, sedangkan ring piston menjaga kerapatan gas dan mengurangi kebocoran oli.

3. Connecting Rod (Batang Penghubung) Meneruskan gaya dari piston ke poros engkol (*crankshaft*).
4. Crankshaft (Poros Engkol) Mengubah gerak linier piston menjadi gerak rotasi untuk memutar generator.
5. Sistem Bahan Bakar Meliputi fuel pump, injector, fuel filter, dan fuel line, berfungsi menyalurkan dan mengatur jumlah bahan bakar yang diinjeksikan ke ruang bakar sesuai kebutuhan daya.
6. Sistem Pelumasan Mengalirkan oli ke seluruh bagian mesin untuk mengurangi gesekan, pendinginan komponen, dan membersihkan kotoran logam halus.
7. Sistem Pendingin Menjaga suhu kerja mesin agar tetap optimal (biasanya  $80-90^{\circ}\text{C}$ ) dengan mengalirkan air pendingin atau cairan radiator melalui jaket air di sekitar silinder.
8. Sistem Injeksi Bertugas menginjeksikan bahan bakar dengan tekanan tinggi dan waktu yang tepat agar pembakaran sempurna.
9. Generator (*Alternator*) Mengubah energi mekanik dari poros engkol menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik.
10. Panel Kontrol dan Proteksi Mengatur distribusi daya, sistem proteksi (*overload*, *overvoltage*, dan *overcurrent*), serta pengendalian otomatis start–stop.

### **1.2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (*Photovoltaic*)**

#### **1. Pengertian Sistem *Photovoltaic* (PV)**

Sistem *Photovoltaic* (PV) adalah sistem pembangkit listrik yang mengubah energi cahaya matahari secara langsung menjadi energi listrik menggunakan efek fotovoltaiik (Maulana, 2023). Efek ini terjadi ketika sinar matahari mengenai material semikonduktor (biasanya silikon),

sehingga menghasilkan arus listrik. Secara sederhana, sistem PV sering dikenal sebagai pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) karena memanfaatkan sumber energi matahari yang bersifat terbarukan dan ramah lingkungan. Komponen Utama Sistem *Photovoltaic* (PV) Sistem PV terdiri dari beberapa komponen penting, yaitu:

1. Panel Surya (*Solar Cell*/Modul PV)  
Befungsi menangkap energi matahari dan mengubahnya menjadi listrik arus searah (DC).
2. Inverter  
Mengubah arus listrik DC menjadi arus bolak-balik (AC) agar dapat digunakan oleh peralatan listrik rumah tangga.
3. Baterai (Opsional)  
Digunakan untuk menyimpan energi listrik agar dapat digunakan saat malam hari atau saat tidak ada sinar matahari.
4. *Charge Controller*  
Mengatur pengisian dan pengosongan baterai agar tidak terjadi *overcharge* atau kerusakan.
5. Sistem Distribusi  
Menyalurkan listrik ke beban atau peralatan listrik.

## 2. Cara Kerja Sistem PV

- a. Sinar matahari mengenai panel surya
- b. Panel menghasilkan listrik DC
- c. Listrik dialirkan ke inverter untuk diubah menjadi AC
- d. Energi digunakan langsung atau disimpan dalam baterai

## 3. Keunggulan Sistem *Photovoltaic*

- a. Sumber energi terbarukan dan tidak habis
- b. Ramah lingkungan (tidak menghasilkan polusi)

- c. Cocok untuk daerah terpencil atau belum terjangkau listrik
- d. Biaya operasional relatif rendah

#### 4. Kelemahan Sistem *Photovoltaic*

- a. Bergantung pada intensitas sinar matahari
- b. Investasi awal cukup tinggi
- c. Membutuhkan area pemasangan yang cukup luas
- d. Efisiensi masih terbatas

#### 1.2.4 Prinsip kerja panel surya

Prinsip kerja panel surya didasarkan pada efek fotovoltaiik, yaitu proses perubahan energi cahaya matahari menjadi energi listrik menggunakan material semikonduktor, seperti silicon (Ilra, Faisal and Juliangga, 2026).

##### Mekanisme Kerja Panel Surya

Secara sederhana, prosesnya berlangsung sebagai berikut:

1. Penyerapan Sinar Matahari  
Panel surya terdiri dari sel-sel surya (*solar cell*) yang akan menyerap energi cahaya (foton) dari matahari.
2. Terjadinya Efek Fotovoltaiik  
Ketika foton mengenai permukaan sel surya, energi tersebut akan membebaskan elektron dari atom-atom semikonduktor. Peristiwa ini dikenal sebagai efek fotovoltaiik.
3. Pergerakan Elektron  
Sel surya memiliki dua lapisan semikonduktor (positif dan negatif) yang menciptakan medan listrik. Medan ini menyebabkan elektron bergerak secara terarah.
4. Terbentuknya Arus Listrik (DC)  
Pergerakan elektron tersebut menghasilkan arus listrik searah (DC).

## 5. Pemanfaatan Energi Listrik

Arus listrik DC dapat:

- Digunakan langsung untuk beban DC
- Disimpan dalam baterai
- Diubah menjadi arus AC menggunakan inverter untuk kebutuhan rumah tangga

### 1.2.5 Komponen sistem PV (panel, inverter, baterai, *charge controller*)

Sistem *Photovoltaic* (PV) terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja secara terpadu untuk menghasilkan, mengatur, menyimpan, dan menyalurkan energi listrik dari matahari. Berikut penjelasannya:

#### 1. Panel Surya (*Solar Module* / PV Panel)

Panel surya merupakan komponen utama yang berfungsi mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik arus searah (DC). Terdiri dari banyak sel surya (*solar cell*) berbahan semikonduktor (umumnya silikon) Menghasilkan listrik ketika terkena sinar matahari.

#### 2. Inverter

Inverter berfungsi mengubah arus listrik searah (DC) dari panel surya menjadi arus bolak-balik (AC) yang digunakan oleh peralatan listrik.

- Wajib untuk sistem yang digunakan di rumah tangga
- Tersedia beberapa jenis: inverter *grid-tie*, *off-grid*, dan *hybrid*
- Menentukan kualitas listrik (tegangan dan frekuensi stabil)

#### 3. Baterai (*Energy Storage*)

Baterai digunakan untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan panel surya agar dapat digunakan saat malam hari atau ketika cuaca mendung.

- Umumnya menggunakan baterai tipe deep cycle (misalnya *lithium-ion* atau *lead-acid*)
- Sangat penting pada sistem *off-grid* (tidak terhubung PLN)

#### 4. Charge Controller

*Charge controller* berfungsi mengatur aliran listrik dari panel surya ke baterai agar proses pengisian berjalan aman dan efisien.

- Mencegah *overcharge* (pengisian berlebih) dan *overdischarge* (pengosongan berlebih)
- Menjaga umur baterai agar lebih panjang
- Terdapat dua jenis utama: PWM (*Pulse Width Modulation*) dan MPPT (*Maximum Power Point Tracking*)
- Kapasitas baterai menentukan lama waktu penyimpanan energy

### 1.2.6 Sistem Pembangkit Listrik Hybrid

#### 1. Pengertian sistem hybrid

Sistem *hybrid* adalah sistem pembangkit listrik yang menggabungkan dua atau lebih sumber energi yang berbeda dalam satu kesatuan sistem untuk menghasilkan listrik secara lebih efisien, andal, dan berkelanjutan. Dalam konteks kelistrikan, sistem *hybrid* biasanya mengkombinasikan energi terbarukan (seperti tenaga surya/PLTS atau angin) dengan energi konvensional (seperti diesel/genset). Contoh yang umum adalah sistem *hybrid* PLTS–diesel, di mana panel surya digunakan sebagai sumber utama, sementara genset

diesel berfungsi sebagai cadangan saat energi matahari tidak mencukupi.

## 2. Jenis-jenis sistem *hybrid* (diesel-PV, PV-baterai, dll)

Sistem *hybrid* dalam pembangkit listrik merupakan kombinasi dua atau lebih sumber energi untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, dan keberlanjutan. Berikut adalah beberapa jenis sistem *hybrid* yang umum digunakan:

### 1) Sistem *Hybrid* Diesel – Photovoltaic (PV)

Sistem ini menggabungkan genset diesel dengan panel surya (PV).

Cara kerja:

Panel surya menjadi sumber utama pada siang hari, sedangkan genset diesel digunakan saat malam hari atau ketika energi surya tidak mencukupi.

Kelebihan: Mengurangi konsumsi bahan bakar diesel

Aplikasi: Daerah terpencil atau pulau kecil

### 2) Sistem *Hybrid* PV – Baterai

Sistem ini menggabungkan panel surya dengan baterai sebagai penyimpan energi.

- Cara kerja

Energi dari panel surya disimpan dalam baterai dan digunakan saat malam hari atau saat kebutuhan meningkat.

- Kelebihan: Tidak memerlukan bahan bakar fosil
- Kekurangan: Bergantung pada kapasitas baterai
- Aplikasi: Rumah tangga atau sistem off-grid

### 3) Sistem *Hybrid* Diesel – PV – Baterai

Merupakan kombinasi tiga komponen utama: panel surya, baterai, dan genset diesel.

- **Carakerja**

Panel surya sebagai sumber utama, baterai sebagai penyimpanan, dan diesel sebagai cadangan terakhir.

- **Kelebihan:** Sangat andal dan fleksibel

- **Aplikasi:** Pulau terpencil, kawasan industri kecil

### **1.2.7 Sistem Penyimpanan Energi (Battery Storage)**

#### **1. Pengertian baterai dalam sistem PV**

Baterai dalam sistem *Photovoltaic* (PV) adalah komponen penyimpanan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya. Energi yang dihasilkan panel surya pada siang hari tidak selalu langsung digunakan, sehingga baterai berfungsi untuk menyimpan kelebihan energi tersebut agar dapat digunakan kembali saat dibutuhkan, terutama pada malam hari atau saat intensitas matahari rendah. Secara umum, baterai dalam sistem PV bekerja dengan cara menyimpan energi dalam bentuk energi kimia ketika terjadi proses pengisian (*charging*), dan mengubahnya kembali menjadi energi listrik saat digunakan (*discharging*).

#### **2. Fungsi utama baterai dalam sistem PV**

- 1) Menyimpan energi listrik dari panel surya
- 2) Menjaga kontinuitas suplai listrik, terutama saat tidak ada sinar matahari
- 3) Menstabilkan tegangan dan arus dalam sistem
- 4) Meningkatkan keandalan sistem, terutama pada sistem *off-grid* atau *hybrid*

### **1.3 Analisis Kelayakan Sistem Pembangkit**

Analisis kelayakan sistem pembangkit merupakan proses evaluasi yang dilakukan untuk menentukan apakah suatu

proyek pembangkit listrik layak untuk dibangun dan dioperasikan. Analisis ini mencakup berbagai aspek, seperti teknis, ekonomi, lingkungan, dan operasional, guna memastikan bahwa sistem yang direncanakan dapat berjalan secara optimal, efisien, serta memberikan manfaat yang maksimal. Dalam konteks sistem pembangkit *hybrid* (PLTS–Diesel), analisis kelayakan menjadi sangat penting karena melibatkan integrasi dua atau lebih sumber energi yang memiliki karakteristik berbeda.

### 1.3.1 Kelayakan Teknis

#### 1. Analisis kebutuhan beban Listrik

Analisis kebutuhan beban listrik merupakan tahap awal yang sangat penting dalam perencanaan sistem pembangkit, khususnya pada sistem *hybrid* (PLTS–Diesel). Analisis ini bertujuan untuk mengetahui besarnya energi listrik yang dibutuhkan oleh pengguna sehingga sistem yang dirancang dapat memenuhi kebutuhan tersebut secara optimal dan efisien.

#### 1. Pengertian Beban Listrik

Beban listrik adalah seluruh peralatan atau perangkat yang menggunakan energi listrik dalam suatu sistem, seperti:

1. Lampu penerangan
2. Peralatan rumah tangga (TV, kulkas, kipas)
3. Peralatan industri atau usaha
4. Sistem pompa air, dll

#### 2. Tujuan Analisis Beban

1. Menentukan total kebutuhan energi (kWh/hari)
2. Mengetahui daya puncak (*peak load*)

3. Menentukan kapasitas komponen sistem (panel surya, baterai, inverter, genset)
4. Menghindari kekurangan atau kelebihan kapasitas sistem

### 3. Metode Perhitungan Beban Listrik

Perhitungan kebutuhan energi dilakukan dengan rumus:

$$E = P \times t \dots \dots \dots (2.1)$$

Keterangan:

- **E** = Energi listrik (Wh atau kWh)
- **P** = Daya peralatan (Watt)
- **t** = Lama pemakaian (jam)

### 4. Langkah-Langkah Analisis Beban

#### a. Identifikasi Peralatan Listrik

Mencatat semua peralatan yang digunakan beserta daya masing-masing.

#### b. Menentukan Lama Pemakaian

Menghitung berapa lama setiap alat digunakan dalam sehari.

#### c. Menghitung Konsumsi Energi Harian

Mengalikan daya dengan waktu penggunaan.

#### d. Menentukan Total Beban

Menjumlahkan seluruh konsumsi energi untuk mendapatkan total kebutuhan harian.

## 2. Perhitungan kapasitas pembangkit

Perhitungan kapasitas pembangkit merupakan tahap penting dalam perancangan sistem pembangkit listrik, khususnya pada sistem *hybrid* (PLTS–Diesel). Tujuan utama dari perhitungan ini adalah untuk menentukan ukuran atau kapasitas komponen utama seperti panel surya, baterai, inverter, dan genset agar mampu memenuhi kebutuhan beban listrik secara optimal.

### 1. Tujuan Perhitungan Kapasitas

- Menentukan kapasitas PLTS (panel surya)
- Menentukan kapasitas baterai
- Menentukan kapasitas inverter
- Menentukan kapasitas genset (diesel)
- Menjamin sistem dapat memenuhi kebutuhan energi harian dan beban puncak

### 2. Perhitungan Kapasitas PLTS (Panel Surya)

Kapasitas panel surya dihitung berdasarkan kebutuhan energi harian dan potensi radiasi matahari (*Peak Sun Hour/PSH*):

$$PPV = \frac{E_{\text{harian}}}{PSH \times \eta} \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan:

- **P<sub>v</sub>** = Kapasitas panel surya (Wp)
- **E<sub>harian</sub>** = Kebutuhan energi (Wh/hari)
- **PSH** = *Peak Sun Hour* (jam/hari)
- **η (eta)** = Efisiensi sistem (biasanya 0,7–0,8)

### 3. Perhitungan Kapasitas Baterai

Kapasitas baterai ditentukan berdasarkan kebutuhan energi dan lama cadangan energi (autonomy days):

$$C_{\text{bat}} = \frac{E_{\text{harian}} \times D}{V \times DoD} \dots \dots \dots (2.3)$$

Keterangan:

- **C<sub>bat</sub>** = Kapasitas baterai (Ah)
- **D** = Lama hari cadangan (hari)
- **V** = Tegangan sistem (Volt)
- **DoD** = *Depth of Discharge* (misal 0,5 untuk lead-acid)

### 3. Kesesuaian teknologi dengan kondisi Lokasi

Kesesuaian teknologi dengan kondisi lokasi merupakan aspek penting dalam analisis kelayakan

sistem pembangkit, khususnya pada sistem *hybrid* (PLTS–Diesel). Tujuan dari analisis ini adalah untuk memastikan bahwa teknologi yang digunakan dapat beroperasi secara optimal sesuai dengan kondisi geografis, iklim, serta karakteristik wilayah setempat.

#### 1. Kondisi Geografis Lokasi

Faktor geografis sangat mempengaruhi pemilihan teknologi pembangkit, antara lain:

1. Letak wilayah (pesisir, pegunungan, atau pulau terpencil)
2. Aksesibilitas lokasi (kemudahan distribusi peralatan dan bahan bakar)
3. Ketersediaan lahan untuk pemasangan panel surya

Contoh:

Di daerah terpencil atau pulau kecil, sistem *hybrid* lebih cocok karena tidak bergantung sepenuhnya pada jaringan listrik.

### 1.3.2 Kelayakan Ekonomi

Kelayakan ekonomi merupakan salah satu aspek penting dalam analisis sistem pembangkit listrik, khususnya pada sistem *hybrid* (PLTS–Diesel). Analisis ini bertujuan untuk menilai apakah proyek yang direncanakan memberikan keuntungan secara finansial serta layak untuk diinvestasikan dalam jangka panjang.

1. Biaya investasi awal (*capital cost*) merupakan seluruh biaya yang dikeluarkan pada tahap awal pembangunan sistem pembangkit listrik, sebelum sistem mulai beroperasi. Dalam sistem *hybrid* (PLTS–Diesel), biaya ini mencakup pengadaan

peralatan utama serta biaya instalasi dan pendukung lainnya.

## 1. Komponen Biaya Investasi Awal

Berikut adalah komponen utama dalam *capital cost*:

### a. Biaya Peralatan Utama

- Panel surya (PV module)
- Baterai penyimpanan energi
- Inverter (DC ke AC)
- Genset diesel (sebagai sumber cadangan)

Komponen ini biasanya menyumbang porsi terbesar dari total investasi.

### b. Biaya *Balance of System* (BoS)

Meliputi komponen pendukung seperti:

- Kabel dan konektor
- Struktur *mounting panel*
- *Charge controller*
- Sistem proteksi (MCB, fuse, dll)

### c. Biaya Instalasi dan Konstruksi

- Biaya pemasangan panel surya
- Pembangunan pondasi atau struktur
- Instalasi sistem kelistrikan
- Pengujian dan *commissioning*

## 2. Biaya operasional dan pemeliharaan (O&M)

Biaya operasional dan pemeliharaan (O&M) adalah biaya yang dikeluarkan secara rutin selama sistem pembangkit listrik beroperasi. Pada sistem *hybrid* (PLTS–Diesel), biaya ini sangat penting karena berpengaruh langsung terhadap kinerja sistem serta kelayakan ekonomi dalam jangka Panjang.

Pengertian Biaya O&M Biaya O&M mencakup seluruh biaya untuk:

- Mengoperasikan sistem agar tetap berjalan

- Menjaga performa komponen tetap optimal
- Memperpanjang umur peralatan

## 2. Komponen Biaya O&M

### a. Biaya Operasional

- Konsumsi bahan bakar genset diesel
- Biaya tenaga kerja/operator
- Biaya monitoring dan pengawasan sistem

### b. Biaya Pemeliharaan Rutin

- Pembersihan panel surya dari debu dan kotoran
- Pengecekan kabel dan sistem kelistrikan
- Servis berkala genset (oli, filter, dll)
- Kalibrasi dan inspeksi sistem

### c. Biaya Penggantian Komponen

Beberapa komponen memiliki umur pakai terbatas:

- Baterai (tergantung jenis: *lead-acid* atau *lithium-ion*)
- Inverter
- Komponen genset yang aus

## 3. Biaya bahan bakar diesel

Biaya bahan bakar diesel merupakan salah satu komponen utama dalam analisis kelayakan ekonomi sistem *hybrid* (PLTS–Diesel). Biaya ini berkaitan langsung dengan penggunaan genset sebagai sumber energi cadangan, terutama saat produksi energi dari panel surya dan baterai tidak mencukupi.

1. Pengertian Biaya Bahan Bakar Diesel biaya bahan bakar diesel adalah pengeluaran yang digunakan untuk membeli bahan bakar (solar) guna mengoperasikan genset dalam menghasilkan energi listrik.

## 2. Peran Genset dalam Sistem *Hybrid*

Dalam sistem *hybrid*:

- Genset berfungsi sebagai *backup* saat energi dari PLTS tidak cukup
- Digunakan saat beban puncak tinggi
- Beroperasi saat kondisi cuaca buruk atau malam hari jika baterai habis

Semakin sering genset digunakan, maka biaya bahan bakar akan semakin besar.

## 3. Faktor yang Mempengaruhi Biaya Bahan Bakar

- Kapasitas dan efisiensi genset
- Durasi operasi genset
- Beban yang dilayani
- Harga solar di lokasi (bisa lebih mahal di daerah terpencil)
- Kontribusi energi dari PLTS dan baterai.

