

**PERENCANAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA
SURYA *ON-GRID* PADA ATAP GEDUNG PABRIK PT
KARUNIA BERCA INDONESIA**

Karya Tulis

Disusun untuk Memenuhi Tugas Akhir
Tahun Pelajaran 2024 – 2025



Oleh:

Nama : Axeleon Justin Algianto
Kelas : XII MIPA 6
No. Induk : 224710

YAYASAN PEMBINA UNIVERSITAS NEGERI JAKARTA
SEKOLAH MENENGAH ATAS LABSCHOOL KEBAYORAN
JAKARTA SELATAN

2025

LEMBAR PENGESAHAN

Nama : Axeleon Justin Algianto
Kelas : XII MIPA 6
No. Induk : 224710
Judul : **Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya On-Grid pada
Atap Gedung Pabrik PT Karunia Berca Indonesia**

Karya tulis ini telah dibaca dan disetujui oleh:

Pembimbing Teknis

Pembimbing Materi

Epidayatny, S. Pd.

Cahya Darmanto, S.Pd.

Mengetahui,

Kepala SMA Labschool Kebayoran

Dr. Suparno, S.Pd., M.M.

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan karya tulis dengan judul “Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya On-Grid pada Atap Gedung Pabrik PT. Karunia Berca Indonesia”. Karya tulis ini dibuat dalam rangka menyelesaikan tugas praktik Bahasa Indonesia di SMA Labschool Kebayoran serta menambah ilmu pengetahuan terkait hal yang diteliti lebih dalam oleh penulis. Dalam penulisan karya tulis ini penulis menyadari telah dibantu dan didukung oleh berbagai pihak.

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua dan keluarga yang telah memberikan dukungan dalam menyelesaikan karya tulis ini.
2. Kepala SMA Labschool Kebayoran yang telah memberi motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan karya tulis ini.
3. Ibu Epidayatny, selaku pembimbing teknis dan Bapak Cahya Darmanto, yang sudah membantu dalam menyempurnakan dan memperbaiki karya tulis ini.
4. Pimpinan PT Karunia Berca Indonesia yang diwakilkan oleh Bapak Billy Nuryanto sebagai *General Manager* yang telah membantu dalam pengambilan data untuk karya tulis ini.

5. Teman-teman Angkatan Vadastara yang memberikan dukungan mental dalam pengerjaan karya tulis ini.

Penulis menyadari bahwa dalam karya tulis ini masih terdapat banyak kekurangan dan jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat dibutuhkan untuk karya tulis ini. Penulis berharap semoga laporan ini dapat memberi kebermanfaatan bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Jakarta, Juli 2024

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
KATA PENGANTAR.....	ii
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Kegunaan Penelitian.....	3
BAB II LANDASAN TEORI	4
2.1 Energi	4
2.1.1 Energi Surya.....	4
2.1.2 Energi Listrik	6
2.1.3 Pemanfaatan Energi Surya	7
2.1.4 Efek Fotolistrik.....	8
2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya.....	11

2.2.1	Komponen PLTS.....	11
2.2.2	Cara Kerja	23
2.2.3	Jenis PLTS	24
2.2.4	Variasi dalam Produksi Energi PLTS	28
2.3	Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap	32
2.3.1	Mekanisme PLTS Atap	32
2.3.2	Regulasi Pengoperasian PLTS Atap	33
2.4	Analisis Teknis.....	35
2.4.1	Analisis Aliran Daya.....	36
2.4.2	Analisis Hubung Singkat.....	36
2.4.3	Analisis Kestabilan.....	37
2.5	Analisis Ekonomi	39
2.5.1	Levelized Cost of Energy (LCOE).....	39
2.5.2	Break Even Point (BEP).....	40
BAB III	METODOLOGI PENELITIAN	41
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	41
3.2	Metode Penelitian.....	41
3.3	Objek Penelitian	42
3.4	Teknik Pengambilan Sampel.....	42

3.5 Teknik Analisis Data.....	42
BAB IV PEMBAHASAN PENELITIAN.....	43
4.1 Data Hasil Penelitian.....	43
4.1.1 Luas Area Instalasi PLTS Atap Pabrik PT. KBI.....	43
4.1.2 Data Beban Listrik	46
4.1.3 Sistem Listrik	47
4.1.4 Data Konsumsi Listrik	47
4.1.5 Data Iradiasi	51
4.2 Analisis Perancangan PLTS Atap Pabrik PT. KBI	53
4.2.1 Langkah Pengerjaan	53
4.2.2 Pemilihan Komponen.....	58
4.2.3 Hasil Perancangan.....	63
4.3 Analisis Kelayakan Teknis.....	69
4.3.1 Kontribusi.....	69
4.3.2 Aliran Daya	70
4.3.3 Hubung Singkat.....	71
4.3.4 Kestabilan.....	72
4.4 Analisis Ekonomi	72
4.4.1 Potensi	72

4.4.2 Modal	75
4.4.3 Kelayakan Ekonomi	76
BAB V PENUTUP	79
5.1 Kesimpulan	79
5.2 Saran.....	80
DAFTAR PUSTAKA.....	81
LAMPIRAN.....	83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1: Percobaan efek fotolistrik	9
Gambar 2: Prinsip kerja sel surya	12
Gambar 3: Susunan modul surya	13
Gambar 4: Topografi <i>Inverter</i>	15
Gambar 5: Ilustrasi Solar Charge Controller	18
Gambar 6: Baterai VRLA	19
Gambar 7: Ilustrasi sistem fotovoltaiik	24
Gambar 8: Skema PLTS <i>On-Grid</i>	26
Gambar 9: Skema PLTS <i>Off-Grid</i>	27
Gambar 10: Skema PLTS <i>Hybrid</i>	28
Gambar 12: Diagram rentang hidup panel surya	29
Gambar 13: Pengaruh iradiasi terhadap panel surya.....	30
Gambar 14: Mekanisme PLTS Atap	33
Gambar 15: Denah <i>Plant</i> 1 Pabrik PT. KBI.....	43
Gambar 16: Sketsa <i>Workshop Plant</i> 1 Pabrik PT. KBI	44
Gambar 17: Grafik rata-rata konsumsi listrik dalam satu hari.....	50
Gambar 18: Rata-rata konsumsi listrik harian Pabrik PT. KBI	51

Gambar 19: Rata-rata keluaran daya.....	53
Gambar 20: Tampilan layar pembuatan proyek.....	54
Gambar 21: Tampilan layar penentuan kebutuhan energi	55
Gambar 22: Tampilan layar pembuatan desain baru.....	55
Gambar 23: Tampilan layar penentuan area	56
Gambar 24: Tampilan layar penentuan komponen modul	56
Gambar 25: Tampilan layar penentuan kabel dan <i>inverter</i>	57
Gambar 26: Tampilan layar simulasi	58
Gambar 27: Konstruksi 3D Perancangan PLTS Atap Parik PT. KBI.....	64
Gambar 28: <i>Single Line Diagram</i> PLTS Atap Pabrik PT. KBI	65
Gambar 29: Produksi Energi Listrik Bulanan	67
Gambar 30: Produksi Energi Listrik dalam Satu Hari	69
Gambar 31: Kontribusi Energi Listrik	70
Gambar 32: Perbandingan tagihan listrik.....	74

DAFTAR TABEL

Tabel 1: Data panjang dan lebar atap	45
Tabel 2: Data luas atap	45
Tabel 3: Rincian beban listrik	46
Tabel 4: Spesifikasi GENSET	47
Tabel 5: Konsumsi listrik bulanan Pabrik PT. KBI	48
Tabel 6: Konsumsi listrik dalam Satu Hari Pabrik PT. KBI	50
Tabel 7: Data Iradiasi	52
Tabel 8: Spesifikasi CSP17-72H-450Wp	58
Tabel 9: Jumlah Modul Surya	59
Tabel 10: Spesifikasi GoodWe GWK25K-MT	60
Tabel 11: Rekapitulasi Konstruksi	64
Tabel 12: Rekapitulasi Kelistrikan	66
Tabel 13: Produksi Energi Listrik Bulanan	67
Tabel 14: Produksi Energi Listrik dalam Satu Hari	68
Tabel 15: Tagihan sebelum pemasangan PLTS	73
Tabel 16: Tagihan setelah pemasangan PLTS	73
Tabel 17: Penghematan tagihan per lima tahun	74

Tabel 18: Modal awal investasi.....	75
Tabel 19: <i>Break Even Point</i> Perancangan PLTS <i>on-grid</i> Atap Pabrik PT. KBI.....	77

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada era modern ini, energi listrik telah menjadi kebutuhan utama untuk kehidupan sebagian besar masyarakat Indonesia. Dari kebutuhan rumah tangga hingga kebutuhan industri, listrik menjadi roda utama untuk menjalani sebagian besar kegiatan sehari-hari. Energi listrik perlu dihasilkan menggunakan bahan-bahan yang saat ini masih didominasi dengan sumber daya alam tidak terbarukan seperti batu bara, fosil, gas alam, dan lainnya. Dengan pertumbuhan permintaan energi listrik yang terus meningkat, ketersediaan sumber daya alam yang tidak terbarukan mengalami penurunan dan diperkirakan akan habis seiring berjalannya waktu. Oleh sebab itu, diperlukan langkah-langkah untuk memanfaatkan energi terbarukan sebagai investasi masa depan.

Sebagai negara yang kaya akan sumber daya alam, pemanfaatan energi terbarukan di Indonesia berpotensi untuk menghasilkan 3.686 gigawatt (GW) dengan energi surya sebagai penghasil terbesar pada angka 3.295 gigawatt (GW) berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral pada tahun 2023. Selain energi surya, terdapat energi terbarukan lain yang berpotensi untuk dimanfaatkan seperti energi hidro, bioenergi, bayu, panas bumi, dan laut. Akan tetapi, potensi energi terbarukan Indonesia yang begitu besar masih belum tergarap

secara optimal. Pada tahun 2023, baru 0,3% dari total potensi energi terbarukan yang dimanfaatkan.

Intensitas cahaya yang tinggi di negara tropis seperti Indonesia menjadikan pemanfaatan energi surya pilihan yang ideal sebagai sumber listrik. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dapat dipasang di berbagai tempat, salah satunya di atap gedung. PLTS atap merupakan solusi yang ideal untuk gedung-gedung dengan beban daya besar yang memiliki lahan yang luas. Hal ini dikarenakan PLTS atap dapat memanfaatkan lahan yang tidak terpakai di atap gedung, sehingga tidak membutuhkan lahan tambahan. Selain itu, PLTS atap juga lebih mudah dirawat daripada PLTS yang dipasang di lahan terbuka. Hal tersebut mendorong penulis untuk membahas rancangan instalasi PLTS pada atap gedung Pabrik PT. Karunia Berca Indonesia di Cilegon, Banten.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Apakah peralatan yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan energi dalam memasang PLTS di gedung Pabrik PT. Karunia Berca Indonesia?
2. Bagaimanakah profil penghematan energi yang dihasilkan PLTS untuk memenuhi kebutuhan daya di gedung Pabrik PT. Karunia Berca Indonesia?
3. Apakah investasi dalam rancangan PLTS dapat dianggap layak secara teknis?

4. Apakah investasi dalam rancangan PLTS dapat dianggap layak secara ekonomis?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui:

1. Peralatan yang dibutuhkan untuk memasang PLTS *on-grid* di gedung Pabrik PT. Karunia Berca Indonesia;
2. Kontribusi energi yang dihasilkan PLTS *on-grid* pada gedung Pabrik PT. Karunia Berca Indonesia;
3. Kelayakan investasi perancangan PLTS *on-grid* pada gedung Pabrik PT. Karunia Berca Indonesia.

1.4 Kegunaan Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat berguna sebagai berikut.

1. Menambah wawasan penulis tentang kontribusi daya serta kelayakan PLTS *on-grid* secara teknis dan ekonomis di Pabrik PT. Karunia Berca Indonesia.
2. Memberikan informasi kepada pembaca, khususnya civitas akademika SMA Labschool Kebayoran mengenai pemanfaatan PLTS atap pada gedung dengan memaparkan kontribusi penghematan daya oleh pemanfaatan tersebut.
3. Hasil penelitian dapat dijadikan bahan rujukan bagi pihak yang berminat melakukan penelitian lebih lanjut.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Energi

Berdasarkan Kamus Besar Bahasa Indonesia, energi merupakan daya (kekuatan) yang dapat digunakan untuk melakukan berbagai proses kegiatan, misalnya dapat merupakan bagian suatu bahan atau tidak terikat pada bahan (seperti sinar matahari). Sedangkan menurut Campbell, Reece, dan Mitchell (2002), energi adalah kemampuan untuk mengatur ulang suatu kumpulan materi atau dengan kata lain, energi adalah kapasitas atau kemampuan untuk melaksanakan kerja. Untuk mengukur besarnya energi, dirumuskanlah parameter yaitu Joule sebagai satuan SI (Sistem Internasional). Energi memiliki dimensi $[M] [L]^2 [T]^{-2}$ sehingga Joule dapat direpresentasikan sebagai $\text{kg.m}^2.\text{s}^{-2}$.

2.1.1 Energi Surya

Walter (2010) mendefinisikan energi surya sebagai sumber daya alam terdesentralisasi dan tidak terbatas yang memiliki potensi untuk memenuhi kebutuhan akan energi bersih dengan dampak lingkungan yang minimal di Indonesia. Energi surya merupakan salah satu jenis energi terbarukan yang memanfaatkan sinar matahari untuk dikonversi menjadi energi termal atau listrik. Sebagai sumber energi terbarukan yang bersih, energi surya memiliki ketersediaan yang sangat melimpah karena jumlah energi yang diterima dari matahari di Bumi

sangat besar. Meskipun jarak antara matahari dan bumi hanya 148.91 juta kilometer, energi yang dipancarkan oleh matahari mencapai 3 kali 10^{24} joule per tahun, atau 10.000 kali lebih banyak energi yang dikonsumsi di seluruh dunia. Energi ini dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, termasuk pembangkit listrik, penerangan, serta keperluan komersial atau industri.

Pada dasarnya, radiasi elektromagnetik yang dipancarkan oleh matahari melalui atmosfer Bumi dikenal sebagai energi matahari, dan dapat ditangkap dan diubah menjadi bentuk energi seperti panas dan listrik. Dua jenis radiasi adalah intensitas radiasi global dan langsung. Intensitas radiasi global dapat diukur dengan *pyranometer*, sedangkan intensitas radiasi langsung dapat diukur dengan *pyroheliometer*. Radiasi matahari dilambangkan dengan satuan W/m^2 dan memiliki persamaan matematis sebagai berikut:

$$R = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

Keterangan:

R = pancaran radiasi (daya/luas = J/m^2s)

ϵ = emisivitas benda ($0 < \epsilon < 1$)

σ = konstanta Stefan-Boltzmann ($5,67032 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$)

T = suhu (K)

Energi surya merupakan energi yang fleksibel untuk dimanfaatkan, namun sayangnya memiliki sifat intermiten, yang berarti sifat berubah-ubah setiap saat. Energi surya hanya dapat dimanfaatkan oleh manusia dari pagi hingga sore hari. Pada malam hari, energi surya tidak dapat digunakan. Dengan pergantian musim atau cuaca, peristiwa ini juga sama.

2.1.2 Energi Listrik

Menurut Agung (2005), energi listrik adalah energi yang berasal dari muatan listrik yang menciptakan medan listrik statis atau pergerakan elektron-elektron pada konduktor dan ion-ion pada zat cair atau gas. Energi listrik adalah jenis energi kinetik yang dihasilkan oleh muatan listrik yang bergerak. Kecepatan muatan menentukan jumlah energi listrik yang dibawa. Contoh dari pengimplementasian energi listrik adalah baterai.

Dalam memahami energi listrik, terdapat beberapa persamaan yang harus diketahui sebagai berikut.

a. Tegangan

$$V = I \cdot R$$

Keterangan:

V = tegangan (volt)

I = kuat arus (Ampere)

R = hambatan (Ω)

b. Daya

$$P = V \cdot I$$

$$P = I^2 R$$

$$P = \frac{V^2}{R}$$

Keterangan:

P = daya (watt)

V = tegangan (volt)

I = kuat arus (Ampere)

R = hambatan (Ω)

Energi listrik telah menjadi kebutuhan primer di kehidupan modern ini untuk menjalankan peralatan-peralatan elektronik sesuai fungsinya. Agar peralatan listrik dan elektronik dapat berfungsi dengan baik, diperlukan pasokan energi listrik yang sesuai dengan kebutuhan mereka. Jika tidak sesuai, bisa menyebabkan masalah seperti kinerja yang tidak optimal atau kerusakan. Hal ini termasuk jenis tegangan atau arus (AC atau DC) yang dibutuhkan, besarnya tegangan, dan arus minimal yang dibutuhkan. Menurut Yusgiantoro (2004), sumber daya alam yang dapat menghasilkan energi dapat dibagi menjadi dua kategori, yaitu sumber daya alam tidak terbarukan dan terbarukan. Contoh dari sumber daya alam tidak terbarukan adalah fosil, batu bara, dan minyak bumi. Sedangkan contoh dari sumber daya alam terbarukan adalah air, angin, dan surya (matahari).

2.1.3 Pemanfaatan Energi Surya

Energi matahari dapat dimanfaatkan dengan berbagai cara. Fotosintesis adalah proses di mana sinar matahari diubah menjadi energi kimia oleh tumbuhan. Kami memakan dan membakar kayu untuk memanfaatkan energi ini. Namun demikian, istilah "tenaga surya" mengacu pada proses transformasi sinar matahari secara langsung menjadi panas atau energi listrik untuk keperluan kita. *Photovoltaic* (*photo* = cahaya, *voltaic* = tegangan) dan "sinar matahari" adalah dua jenis dasar tenaga matahari. Kedua jenis ini menggunakan cahaya untuk menghasilkan listrik. Penggunaan bahan semi konduktor yang dapat diubah untuk

melepas elektron, yang merupakan partikel bermuatan negative yang membentuk dasar listrik, adalah rahasia proses ini.

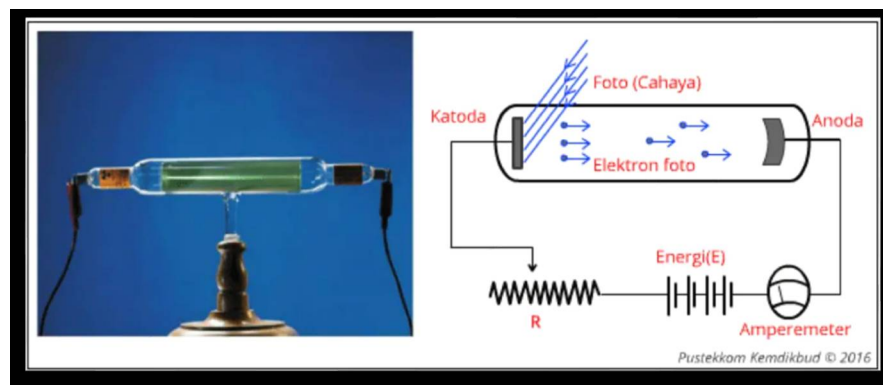
Pemanfaatan energi surya terdiri dari dua jenis utama: termal dan fotovoltaik sebagai berikut:

- a. Termal: Proses ini melibatkan alat konversi energi, seperti kolektor, yang menyerap energi matahari sebagai panas. Berbagai jenis fluida, seperti udara, air, refrigeran, dan lainnya, mengalir di dalam kolektor tersebut. Fluida tersebut kemudian menggunakan pemanas untuk mengubah energi matahari menjadi energi termal yang dapat digunakan untuk pemanasan atau pendinginan.
- b. Fotovoltaik: Ini adalah konversi langsung energi gelombang elektromagnetik matahari menjadi energi listrik melalui sel surya. Sel surya ini digunakan untuk berbagai keperluan seperti rumah tangga, penerangan jalan, alat pendingin, dan sebagainya.

2.1.4 Efek Fotolistrik

Efek fotolistrik adalah fenomena di mana elektron terlempar keluar dari permukaan suatu material (biasanya logam) ketika material tersebut terkena radiasi elektromagnetik (seperti cahaya tampak dan ultraviolet) dengan frekuensi di atas frekuensi ambang batas yang spesifik untuk material tersebut. Pada tahun 1899, J.J. Thomson menemukan bahwa elektron dapat terpancar dari permukaan logam ketika terkena radiasi elektron. Temuan ini sebelumnya juga diamati oleh H. Hertz pada tahun 1887, yang menemukan bahwa partikel bermuatan dapat terlepas dari permukaan logam saat terkena cahaya. Seorang ilmuwan lain, Lenard, pada tahun

1898, menemukan bahwa muatan dan massa partikel yang terpancar dari logam tersebut serupa dengan muatan dan massa elektron. Temuan ini kemudian dikenal sebagai efek fotolistrik (Beiser, 1991). Lenard menemukan bahwa elektron akan terlepas dari logam jika foton yang menimpanya memiliki frekuensi di atas ambang batas frekuensi elektron seperti gambar berikut ini.



Gambar 1: Percobaan efek fotolistrik

Energi kinetik elektron yang terlepas ditentukan oleh frekuensi foton. Intensitas radiasi foton hanya memengaruhi jumlah elektron yang terlepas jika frekuensinya mencukupi. Semakin tinggi intensitas radiasi, semakin banyak elektron yang terlepas, dan sebaliknya, semakin rendah intensitas radiasi, semakin sedikit elektron yang terlepas. Kemudian pada 1905, Einstein menemukan bahwa radiasi gelombang elektromagnetik membawa energi dalam bentuk foton, di mana energi foton sebanding dengan frekuensinya. Intensitas radiasi tidak memengaruhi energi foton. Energi kinetik yang dihasilkan oleh elektron terlepas dari logam sebanding dengan selisih energi foton dan fungsi kerja logam.

Priyambodo (2010) menjelaskan bahwa menurut teori modern, cahaya dianggap sebagai bagian dari spektrum gelombang elektromagnetik serta sebagai partikel yang disebut foton. Konsep ini mengikuti dualitas gelombang-partikel, yang menyatakan bahwa cahaya dapat memiliki sifat gelombang dan juga sifat partikel. Fenomena efek fotolistrik membantu mengklarifikasi dualisme ini. Cahaya di alam dianggap sebagai paket energi, dengan energinya memiliki nilai yang terkuantisasi dan merupakan kelipatan dari bilangan bulat. Energi foton didefinisikan menggunakan persamaan Planck sebagai berikut.

$$E = h \cdot \nu$$

Keterangan:

E = energi foton

h = konstanta Planck ($6,625 \times 10^{-34}$ J.s)

ν = frekuensi foton (Hertz)

Bahwa satu elektron menyerap satu kuantum energi dan kemudian dilepaskan dari logam dan ditransfer ke pelat logam lain adalah konsep penting yang dikemukakan oleh Einstein sebagai latar belakang terjadinya efek fotolistrik. Rumus matematis untuk energi kinetik elektron adalah sebagai berikut.

$$Ek_{maks} = h \cdot \nu - h \cdot \nu_0$$

Keterangan:

Ek_{maks} = energi kinetik elektron (J)

h = konstanta Planck ($6,625 \times 10^{-34}$ J.s)

ν = frekuensi foton (Hertz)

ν_0 = frekuensi ambang batas logam (Hertz)

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit listrik tenaga surya adalah pembangkit energi yang menggunakan fotovoltaik (sel surya) untuk mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik, menjadikannya sebagai sumber listrik yang stabil dan ramah lingkungan (H. Ummah, 2021). Sedangkan menurut standar SNI 8395:2017, PLTS adalah suatu sistem pembangkit energi listrik yang menggunakan radiasi matahari sebagai sumber energi utamanya, yang kemudian diubah menjadi listrik melalui proses konversi oleh sel fotovoltaik. Fotovoltaik, juga dikenal sebagai sel surya. Gunawan (2015) menjelaskan bahwa arus dan tegangan yang dihasilkan oleh sel surya dipengaruhi oleh radiasi matahari.

Semakin banyak radiasi matahari, lebih banyak arus dan tegangan yang dihasilkan. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) mengonversi energi cahaya matahari menjadi listrik arus searah (DC), yang bisa diubah menjadi listrik arus bolak-balik (AC) sesuai kebutuhan.

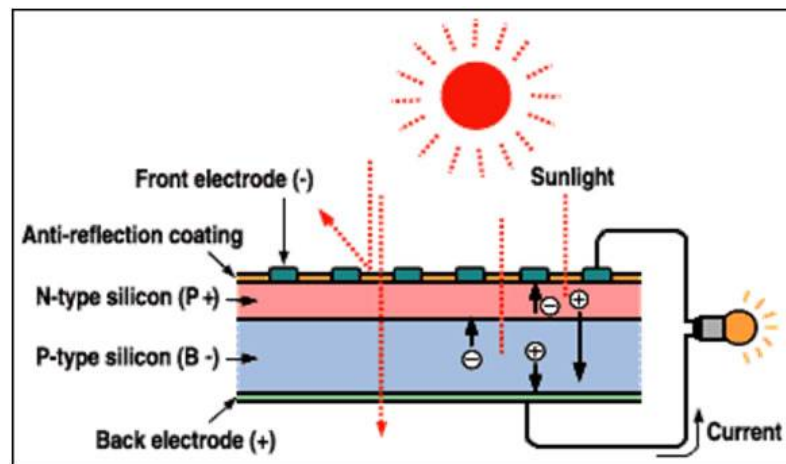
2.2.1 Komponen PLTS

PLTS adalah sistem yang terdiri dari banyak komponen penting dan pendukung, yaitu:

1. Modul Surya

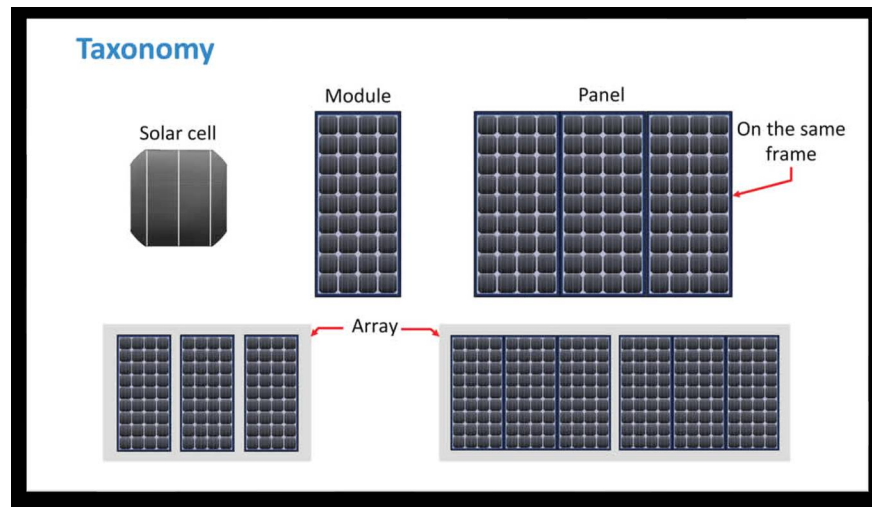
Modul surya menggunakan pertemuan semikonduktor jenis P dan jenis N untuk menghasilkan energi surya menjadi listrik. Panel ini terdiri dari modul surya

yang dirangkai secara seri atau paralel untuk memenuhi kebutuhan daya listrik tertentu yang menyerap sel surya. Sebagian besar sel surya terdiri dari komponen *photovoltaic*, yang juga dikenal sebagai komponen yang memiliki kemampuan untuk mengubah cahaya (*photo*) menjadi listrik (*voltaic*). Ilustrasi prinsip kerja sel surya terdapat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2: Prinsip kerja sel surya

Kapasitas daya, yang diukur dalam satuan *Watt-peak* (Wp), menunjukkan jumlah daya yang dapat dihasilkan oleh modul surya dalam kondisi intensitas radiasi yang diterima sebesar 1000 W/m^2 dan suhu lingkungan 25°C . Kapasitas daya didefinisikan sebagai jumlah daya dan arus listrik yang dapat dihasilkan oleh modul surya tergantung pada intensitas radiasi yang diterima (Hasan, 2012). Susunan modul surya terdapat di gambar berikut ini.



Gambar 3: Susunan modul surya

Modul surya adalah modul yang terdiri dari beberapa string sel surya yang terhubung dalam bingkai aluminium dengan seri seri yang berputar dari positif ke negatif. Setiap sel surya dapat menghasilkan 0,5 volt, dan modul 36-sel dapat menghasilkan 18 volt. Satu bingkai modul akan mengandung 60 atau 72 sel surya. Jumlah amperage yang dimiliki sel dipengaruhi oleh ukurannya atau luasnya. Ukuran sel yang lebih besar memiliki amperage yang lebih besar. Voltage Power (Wp) adalah satuan yang digunakan untuk menunjukkan kapasitas setiap modul surya, yang biasanya berkisar antara 80 dan 300 Wp per modul. Kapasitas modul surya dipengaruhi oleh energi listrik (kWh) yang dibutuhkan beban dan tingkat radiasi matahari. Modul dapat disusun secara seri untuk meningkatkan nilai tegangan dan paralel untuk meningkatkan nilai arus. Meskipun ada banyak jenis sel surya yang telah digunakan, sel surya berbasis silikon adalah yang paling umum digunakan dalam penggunaan masal.

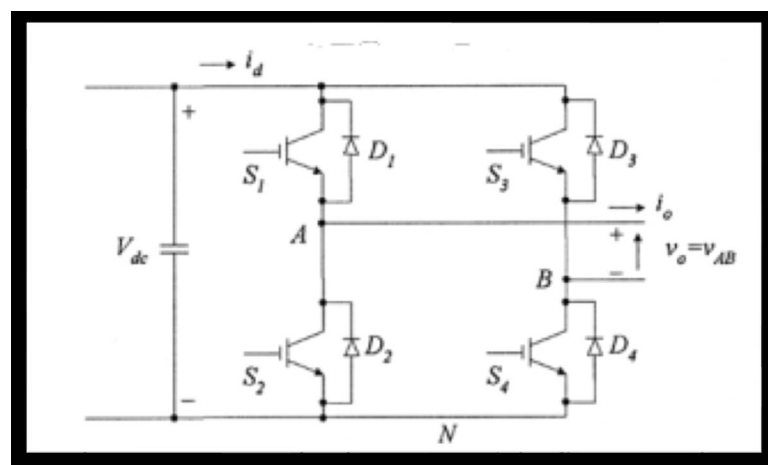
Beberapa jenis yang tersedia di pasaran adalah *monocrystalline*, *polycrystalline*, *amorphous silicon*, *thin-film*, *hybrid silicon*. *Monocrystalline* adalah jenis panel surya paling efisien yang menggunakan proses Czochralski untuk pembuatannya, menghasilkan daya listrik tertinggi per satuan luas. Meskipun mahal karena dipotong menjadi bentuk bundar, panel ini memiliki karakteristik fisik berupa bentuk segi delapan, bulat, dan agak gelap. Meskipun *monocrystalline* dapat memiliki ketebalan 200 mikron dengan efisiensi 15-20%, kelemahannya terletak pada kinerja yang kurang baik di daerah teduh atau cuaca berawan. *Polycrystalline*, yang dibuat dengan melelehkan silikon dalam tungku keramik, meskipun lebih murah, memiliki efisiensi sekitar 18% lebih rendah dari *monocrystalline*. Namun, jenis ini dapat menghasilkan listrik bahkan saat mendung. *Amorphous silicon*, yang terbuat dari silikon dengan struktur tidak teratur, memiliki kinerja baik dalam kondisi cahaya rendah, sehingga sering digunakan dalam sel surya amorf. *Thin-film*, dengan efisiensi rendah sekitar 6,5-8%, menawarkan harga yang lebih terjangkau dengan kemampuan fleksibelnya, ideal untuk aplikasi seperti dinding atau atap. Panel surya *hybrid silicon* menggabungkan teknologi fotovoltaiik dan termal, menghasilkan listrik dan panas secara bersamaan.

2. *Inverter*

Panel surya menghasilkan listrik arus searah, atau *Direct Current* (DC), tetapi perasalatan listrik membutuhkan listrik arus bolak-balik, atau *Alternating Current* (AC). Dengan demikian, *inverter* digunakan sebagai komponen elektronika yang dapat mengubah listrik DC menjadi listrik AC. Efisiensi pengoperasian *inverter* rata-rata 90% dan tertinggi 95-97% pada jenis *inverter* yang

terhubung ke jaringan. Hal ini disebabkan oleh kehilangan daya *inverter* yang disebabkan oleh disipasi panas.

Pada zaman ini, penggunaan *inverter* dalam PLTS memiliki dua kategori, yakni *inverter* yang beroperasi secara independen (*Off-Grid*) dan *inverter* yang terhubung dengan jaringan listrik PLN (*On-Grid*). Dalam PLTS *Off-Grid*, *inverter* biasa digunakan, sedangkan dalam PLTS *On-Grid*, jenis *inverter* yang dipakai adalah *Grid Tied Inverter* (GTI). GTI merupakan *inverter* yang secara otomatis menyelaraskan tegangan DC dari panel surya dengan tegangan jaringan PLN (*Grid*) pada waktu yang sama dan mengoptimalkan produksi energi yang dihasilkan oleh panel surya (Safri Nahela, 2019). Topografi *inverter* terdapat pada gambar di bawah ini.



Gambar 4: Topografi *Inverter*

3. Media Penghantar

Selama proses instalasi PLTS, manajemen kabel diperlukan. Sangat penting untuk merencanakan dan menghitung panjang dan rute kabel. Elastisitas kabel

harus dapat mengakomodasi gerakan platform terapung dan perubahan ketinggian permukaan air yang mungkin terjadi. Gaya tegang dapat menyebabkan kabel patah.

Kapasitas Hantar Arus (KHA) harus diperhitungkan untuk menentukan ukuran kabel yang tepat, sesuai dengan perhitungan berikut.

$$KHA (A) = Arus Nominal (A) \times 125\%$$

Dalam proses memilih penghantar, nilai drop tegangan juga dipertimbangkan selain nilai KHA. Drop tegangan pada rangkaian DC dan AC dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

Drop Tegangan DC (V) =

$$2 \times Panjang Kabel (m) \times Arus Nominal (A) \times Resistensi Kabel \left(\frac{\Omega}{m} \right)$$

Drop Tegangan AC (V) =

$$\sqrt{3} \times Panjang Kabel (m) \times Arus Nominal (A) \times Resistensi Kabel \left(\frac{\Omega}{m} \right)$$

Jika kabel tertentu terus menghasilkan tegangan jatuh yang melebihi toleransi, drop tegangan harus diperkecil. Ada beberapa cara untuk melakukan ini, yaitu dengan pemilihan konduktor dengan luas penampang lebih besar, pengurangan arus beban, pengurangan panjang konduktor, dan penyesuaian suhu konduktor.

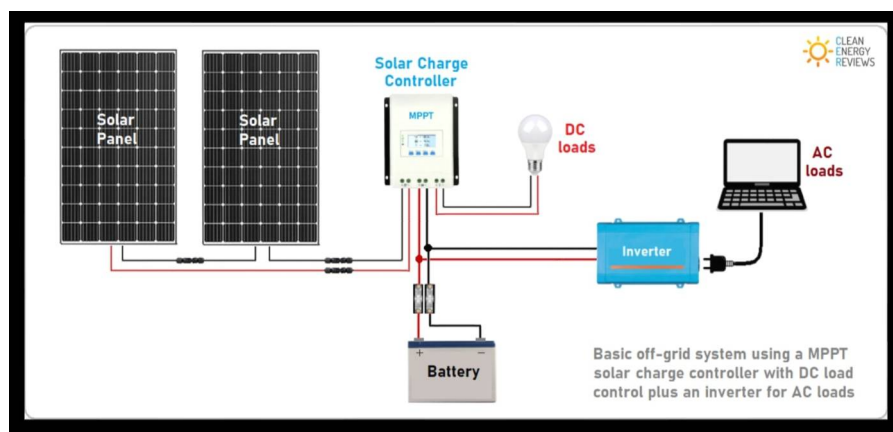
Selain itu, kabel harus dilindungi dan diarahkan sehingga ada rongga sisa untuk mencegah kabel terkena air, dan kabel harus diikat dengan benar dengan

pengikat kabel yang terbuat dari baja tahan karat atau tahan sinar ultraviolet. Rute kabel (atau *routing* kabel) dan desain platform harus dipertimbangkan pada tahap perencanaan. Bentuk huruf S dapat membantu rute kabel (ESDM, 2021).

4. *Charge Controller*

Solar Charge Controller (SCC) atau yang dikenal juga sebagai *Battery Charge Regulator* (BCR) adalah sebuah perangkat yang bertugas mengatur aliran daya dan tegangan yang dialirkan dari panel surya ke baterai. *Charge controller* berfungsi untuk mengontrol pengisian arus searah dari panel surya ke baterai dan penyaluran arus searah dari baterai ke peralatan listrik (beban). Jika baterai penuh, *charge controller* akan menghentikan pengisian dari panel surya. Pengguna PLTS dapat mengetahui jumlah listrik yang ada di dalam baterai dengan menggunakan data pengontrol perubahan.

Pada sistem panel surya, dua SCC biasanya digunakan: PWM (*Pulse Width Modulation*) dan MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). Karena memiliki tingkat efisiensi yang lebih tinggi daripada PWM, tipe MPPT dianggap sebagai pengendali yang paling efisien saat ini. Tingkat efisiensi PWM adalah 75–80%, sedangkan MPPT adalah 92–95%. Ilustrasi SCC terdapat pada gambar berikut.



Gambar 5: Ilustrasi Solar Charge Controller

5. Baterai

Baterai listrik adalah alat yang terdiri dari dua atau lebih sel elektrokimia yang dapat mengubah energi kimia yang tersimpan menjadi energi listrik. Komponen baterai kadang-kadang disebut sebagai akumulator atau *accumulator*. Baterai adalah jenis baterai yang paling umum dan dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan. Akumulator adalah sel listrik yang sangat efisien yang melakukan proses elektrokimia secara bolak-balik (*reversible*), menurut Rudolf Michael (1995). Tiap sel memiliki kutub positif dan negatif, masing-masing menunjukkan energi potensial yang lebih tinggi daripada kutub negatifnya. Kutub bertanda negatif adalah sumber elektron, yang mengalir ketika terhubung ke rangkaian eksternal dan memberikan energi kepada peralatan eksternal. Ketika baterai terhubung ke rangkaian eksternal, elektrolit dapat bergerak sebagai ion di dalamnya, menyebabkan reak. Ketika ion baterai berpindah, arus listrik keluar dari baterai, yang menghasilkan kerja. Secara teknis, baterai adalah alat dengan banyak sel, tetapi sel tunggal juga disebut baterai.

Baterai jenis sekunder biasanya digunakan pada sistem PLTS untuk kapasitas yang besar seperti baterai VRLA (*Valve Regulated Lead Acid*). Baterai PLTS memiliki fungsi untuk menyimpan kelebihan daya yang dihasilkan oleh PLTS untuk digunakan oleh sistem ketika panel surya tidak dapat memberikan daya. Sebagai berikut adalah baterai yang sering digunakan dalam sistem PLTS. Baterai VRLA terdapat pada gambar di bawah ini.



Gambar 6: Baterai VRLA

Untuk mengetahui kapasitas baterai sistem PLTS fotovoltaik, rumus berikut dapat digunakan.

$$\text{Baterai (kWh)} = \frac{\text{Otonomi Sistem} \times \text{Total Daya per Hari (kWh)}}{\text{Efisiensi}}$$

Keterangan:

Otonomi Sistem = Cadangan baterai 2 hari tanpa cahaya matahari

Efisiensi = Efisiensi baterai x Efisiensi Penghantar

Ef. Baterai = 0,85 (Bagus Ramadhani, 2018)

Ef. Penghantar = 0,98 (Bagus Ramadhani, 2018)

$$\text{Baterai (Ah)} = \text{Baterai (kWh)} \times \frac{1000 \text{ V}}{\text{Nominal tegangan}}$$

$$\text{Kapasitas Baterai} = \frac{\text{Baterai (Ah)}}{\text{Depth of Discharge (80%)}}$$

6. Alat Proteksi

Komponen proteksi tersebut bertujuan untuk menjaga komponen dalam sistem agar terhindar dari arus atau tegangan yang berlebihan. Pemasangan sistem proteksi ini memiliki dampak ekonomis yang positif, karena pengguna tidak perlu mengganti komponen utama PLTS jika terjadi masalah, melainkan hanya perlu mengganti komponen proteksi. Pemilihan komponen proteksi harus memperhatikan *rating* tegangan yang sesuai dengan komponen utama dalam sistem PLTS.

Komponen alat proteksi PLTS adalah:

a. *Miniature Circuit Breaker* (MCB)

MCB memiliki peran penting sebagai pelindung dan pemutus arus ketika terjadi kelebihan beban atau hubung singkat. Kegagalan fungsi MCB dapat menyebabkan risiko kebakaran, sehingga komponen ini sangat krusial dalam instalasi listrik. MCB memiliki kapasitas arus yang terbatas, biasanya hingga 63 A. Selain itu, MCB juga memiliki Trip Level yang menentukan batas arus yang dapat membuat MCB beralih ke posisi mati. Kelebihan arus yang melampaui batas ini sering kali menjadi penyebab utama kebakaran, sehingga penting bagi MCB untuk berfungsi dengan baik. *Trip Level* pada MCB tidak dapat diatur secara manual. *Interrupting Capacity* merupakan batas arus maksimum yang dapat dilewati sebelum MCB mengalami kerusakan permanen. Jika arus melebihi batas ini, MCB tidak akan berfungsi. MCB umumnya memiliki nilai *Interrupting Capacity* yang lebih rendah dibanding MCCB. MCB biasanya digunakan untuk keperluan rumah tangga atau komersial.

b. *Molded Case Circuit Breaker (MCCB)*

MCCB memiliki fungsi yang serupa dengan MCB, namun memiliki perbedaan dalam spesifikasi yang membuatnya lebih sesuai untuk penggunaan industri. Kapasitas rating arus MCCB dapat mencapai 1000 Amps, yang jauh lebih tinggi dibanding MCB, sehingga cocok digunakan di lingkungan industri. Trip level pada MCCB dapat diatur sesuai dengan kebutuhan, sementara MCB tidak memiliki fitur ini. *Interrupting capacity* MCCB juga lebih tinggi daripada MCB, menunjukkan kemampuan MCCB dalam menangani arus yang lebih besar. Selain itu, MCCB memiliki kemampuan untuk berfungsi dalam kondisi *under voltage trip*, di mana tegangan lebih rendah dari batas yang ditentukan, serta *shunt trip*, yang memungkinkannya memutus arus dari sumber eksternal, bukan hanya ketika arus melebihi batas yang ditentukan.

c. *Surge Protection Device (SPD)*

Surge Protection Device berfungsi sebagai perangkat pelindung yang dipasang pada jaringan listrik untuk melindungi dari lonjakan arus dan tegangan yang berlebih. Alat ini bertugas untuk membelokkan tegangan yang melebihi batas ke *grounding*, khususnya saat terjadi lonjakan tegangan listrik, seperti akibat sambaran petir atau masalah pada pembangkit listrik, korsleting, atau *switching* yang tidak terduga. SPD akan aktif bekerja saat terjadi lonjakan tegangan listrik yang tiba-tiba. Ketika tegangan listrik normal mengalir, SPD tidak beroperasi, tetapi saat terjadi lonjakan, sisi anode *arrester* akan melepaskan tegangan listrik berlebih ke arah katode yang terhubung dengan *grounding*.

7. Meter Ekspor Impor

Meter Ekspor Impor (exim) adalah salah satu komponen penting dalam sistem PLTS *on-grid* yang berfungsi untuk mengukur listrik yang diterima dari PLN oleh pengguna dan listrik yang dihasilkan oleh PLTS untuk disalurkan kembali ke jaringan PLN. Alat ini menggunakan kWh-meter tiga fasa untuk mengukur energi dalam satuan kWh.

Menurut Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 26 tahun 2021, energi listrik yang diekspor oleh pelanggan PLTS atap dihitung berdasarkan nilai kWh ekspor yang tercatat pada Meter kWh Ekspor-Impor, dengan tarif yang dibayarkan oleh perusahaan penyedia energi listrik. Kelebihan energi yang dihasilkan oleh PLTS akan secara otomatis disalurkan ke jaringan distribusi dengan tarif yang sesuai, yang akan diperhitungkan pada tagihan berikutnya atau melalui skema *net billing*. Jika kelebihan energi terjadi secara rutin, maka energi yang disalurkan ke jaringan distribusi akan diakumulasikan sebagai tabungan energi untuk mengurangi tagihan di bulan-bulan berikutnya. Akumulasi saldo dilakukan setiap 6 bulan dengan periode Januari hingga Juni, dan direset pada bulan Juli, serta periode Juli hingga Desember, direset pada bulan Januari tahun berikutnya. Pelanggan industri yang menggunakan sistem PLTS akan dikenakan *capacity charge* setiap bulannya, yang merupakan biaya operasi PLTS berdasarkan kapasitas total *inverter* dalam satuan kW, dikalikan dengan waktu 5 jam, dan tarif tenaga listrik yang berlaku.

Jika rumus perhitungan dibuat, tarif listrik untuk meter exim adalah sebagai berikut:

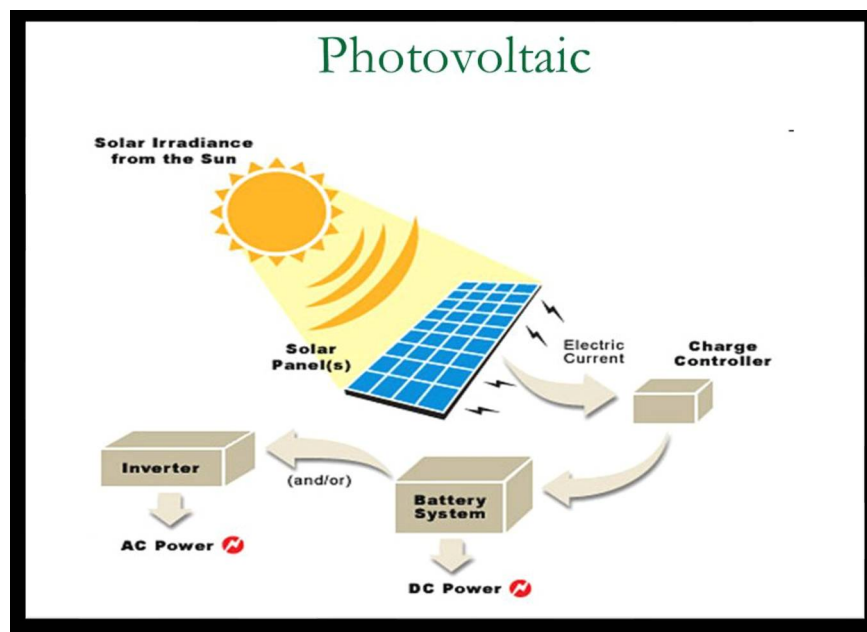
$$\text{Tagihan (kWh)} = \text{kWh Impor} - (100\% - \text{kWh Ekspor})$$

2.2.2 Cara Kerja

Konsep pembangkit listrik tenaga surya sangat sederhana, yaitu mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Matahari merupakan sumber energi alami yang telah banyak dimanfaatkan untuk memasok daya listrik, terutama di satelit komunikasi melalui penggunaan sel surya. Sel surya ini mampu menghasilkan listrik secara langsung dari sinar matahari tanpa perlu bagian yang berputar atau bahan bakar tambahan. Sebagai hasilnya, sistem sel surya dianggap bersih dan ramah lingkungan. Berbeda dengan generator listrik, yang memerlukan bagian yang berputar dan bahan bakar untuk menghasilkan listrik, yang juga dapat menimbulkan suara bising dan gas rumah kaca yang merugikan ekosistem bumi.

Sistem sel surya yang dapat digunakan di bumi terdiri dari panel sel surya, *charge controller*, dan baterai 12 volt yang memerlukan biaya pemeliharaan. Panel sel surya terdiri dari beberapa sel surya yang dihubungkan secara seri dan paralel sesuai dengan kapasitas yang dibutuhkan. *Charge controller* mengatur proses pengisian baterai dengan sumber energi dari panel surya. Proses pengisian hanya terjadi saat ada cahaya matahari, dan kontroler akan memutuskan pasokan energi saat malam hari. Ketika tegangan baterai mencapai 12 volt, pengisian akan dihentikan. Meskipun rangkaian kontroler pengisian dapat dirakit sendiri, biasanya tersedia secara komersial. Panel surya biasanya dipasang menghadap matahari agar dapat menyerap sinar matahari dengan maksimal.

Komponen sel surya terdiri dari kaca pelindung, bahan transparan untuk melindungi sel surya, material anti-refleksi untuk menyerap lebih banyak cahaya, serta semikonduktor *P-type* dan *N-type* untuk menghasilkan medan listrik. Sel surya bekerja seperti dioda semikonduktor, di mana cahaya yang diserap oleh bahan semikonduktor menyebabkan pelepasan elektron, yang kemudian mengalir dan digunakan sebagai energi listrik. Ilustrasi sistem fotovoltaiik terdapat pada gambar berikut ini.



Gambar 7: Ilustrasi sistem fotovoltaiik

2.2.3 Jenis PLTS

Sianipar R. (2014) menyatakan bahwa ada tiga kategori desain sistem PLTS yang umumnya digunakan, yaitu:

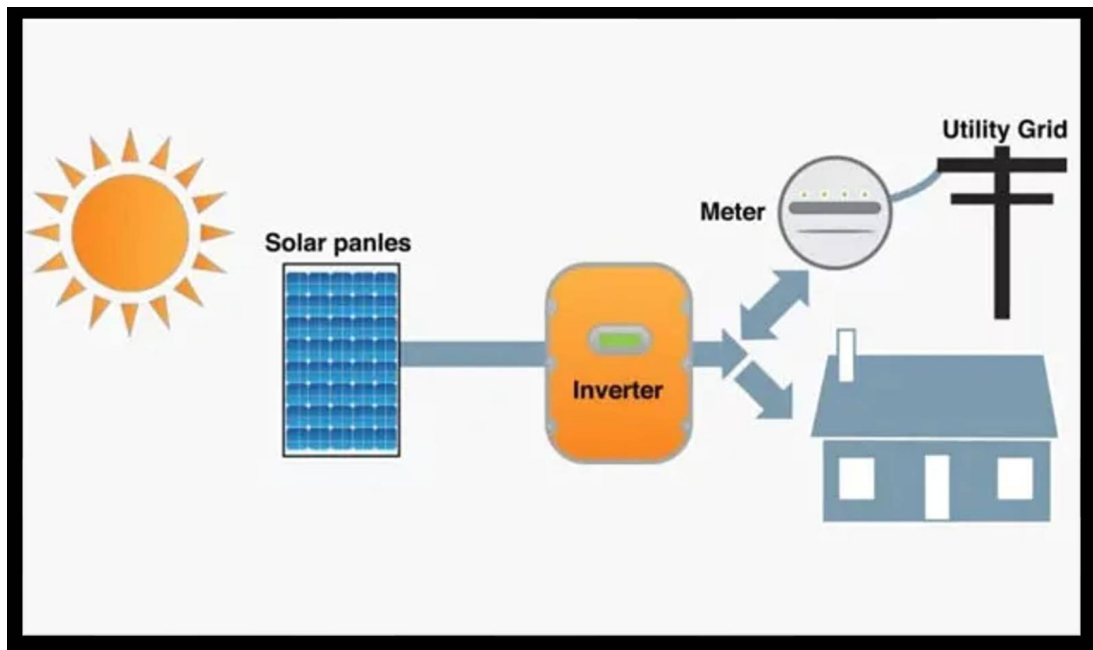
a. PLTS *On-Grid*

Model instalasi PLTS *On-Grid* atau yang disebut juga sebagai *Grid Connection System* menggunakan jaringan PLN dan panel surya yang dijadikan satu untuk menghasilkan listrik untuk rumah tangga atau bisnis. Panel surya adalah sumber energi untuk sistem yang ramah lingkungan dan tidak menghasilkan gas emisi buang. Selain itu, *Grid Connection System* tetap terhubung ke jaringan PLN dengan tujuan mengoptimalkan penggunaan energi panel surya, yang menghasilkan lebih banyak energi dan juga mengurangi biaya listrik (Anggara, 2018).

Sistem PLTS *On-Grid* umumnya tidak dilengkapi dengan baterai (*grid-connected PV without a battery back up*) dan bertujuan untuk mengurangi penggunaan BBM. Untuk menjaga stabilitas sistem induknya pada siang hari, kapasitas sistem dibatasi sebesar 20% dari beban. Dalam sistem ini, *inverter* yang disebut sebagai *inverter* di grid memiliki kemampuan untuk melepaskan hubungan saat grid kehilangan tegangan. Namun, terdapat juga beberapa PLTS *on-grid* yang menggunakan baterai sebagai sistem penyimpanan, yang dikenal sebagai *grid-connected PV with a battery back up*. Baterai ini pada dasarnya berfungsi sebagai cadangan saat terjadi kegagalan jaringan untuk jangka waktu tertentu dan juga dapat digunakan untuk mengeksport kelebihan daya listrik ke jaringan listrik PLN.

PLTS *on-grid* dapat dioperasikan baik dalam pola *distributed* maupun *centralized*. Pada pola *distributed*, PLTS *on-grid* biasanya terhubung dengan beban tertentu seperti rumah dan sering digunakan untuk jaringan tegangan rendah. Sedangkan pola *centralized* lebih cocok untuk jaringan tegangan menengah atau tinggi. PLTS *on-grid centralized* memiliki keunggulan karena memungkinkan

kerugian daya pada sisi pembangkitan lebih kecil, meskipun kerugian pada penyaluran tetap ada. Selain itu, dari segi *monitoring*, sistem *centralized* juga lebih mudah karena terpusat dalam satu area. Skema PLTS *On-Grid* terdapat pada gambar berikut ini.

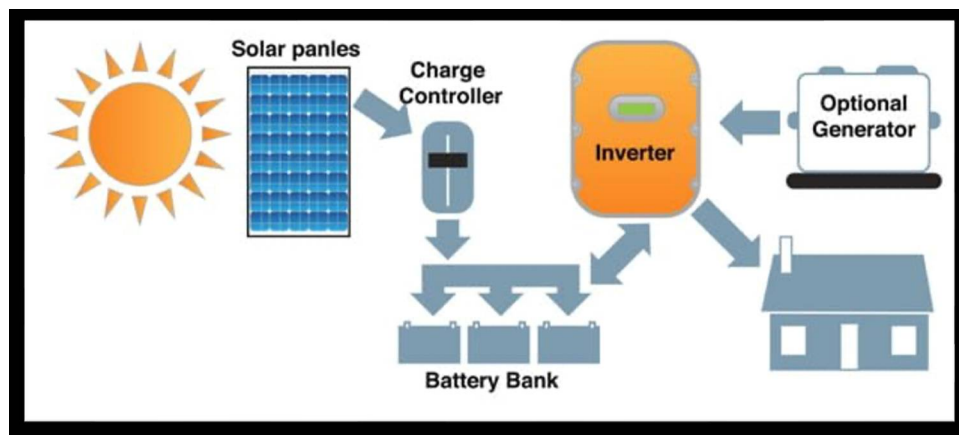


Gambar 8: Skema PLTS *On-Grid*

b. PLTS *Off-Grid*

Sistem *off-grid*, juga dikenal sebagai *stand-alone*, adalah sistem yang hanya bergantung pada energi matahari sebagai sumber daya utamanya dan menggunakan rangkaian modul surya untuk menghasilkan listrik untuk kebutuhan beban tanpa terhubung ke jaringan listrik PLN. Karena tergantung sepenuhnya pada sinar matahari, sistem ini membutuhkan baterai sebagai media penyimpanan energi.

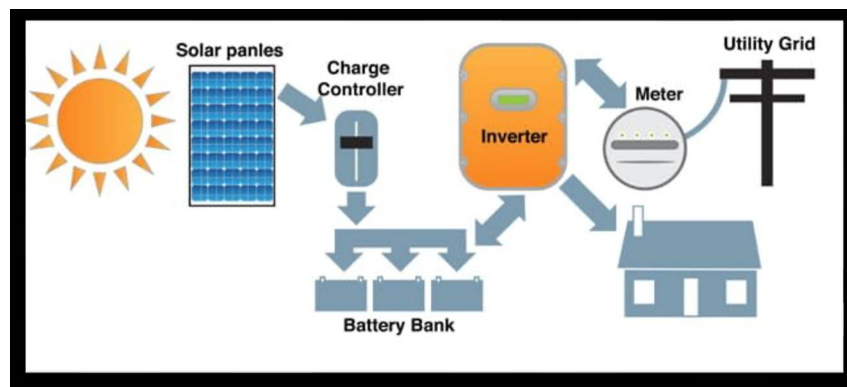
Sistem PLTS *Off-Grid* biasanya digunakan di daerah atau wilayah yang jauh dari jaringan listrik PLN dan tidak dapat dijangkau (Asy & Purnama, 2011). Kapasitas panel surya dan baterai harus ditentukan secara akurat, dengan menambah kapasitas baterai untuk mengatasi hari-hari tanpa sinar matahari. Kapasitas PV harus mencukupi beban minimal dengan tingkat radiasi matahari rata-rata sebesar 1 kW/m^2 , dan mampu mengisi baterai sesuai kebutuhan selama periode discharge. Proses pengisian baterai tergantung pada lamanya sinar matahari efektif atau *peak sun hour* (PSD), biasanya sekitar 3-4 jam per hari. Sistem PLTS *Off-Grid* dibagi menjadi PLTS *Off-Grid Domestic* dan PLTS *Off-Grid Non-Domestic*. PLTS *Off-Grid Domestic* menyediakan listrik untuk beban rumah tangga, sementara PLTS *Off-Grid Non-Domestic* digunakan untuk aplikasi seperti telekomunikasi, pompa air, pelabuhan, atau bandara. Skema PLTS *Off-Grid* terdapat pada gambar berikut ini.



Gambar 9: Skema PLTS *Off-Grid*

c. PLTS *Hybrid*

Jenis PLTS *hybrid* menggabungkan dua atau lebih pembangkit dengan PLTS saat beroperasi. Penggabungan PLTS dengan tenaga diesel adalah contoh PLTS *hybrid* yang dapat digunakan untuk menghasilkan sistem yang lebih handal, berkelanjutan, dan kontinyu. Skema PLTS *Hybrid* seperti gambar berikut ini.



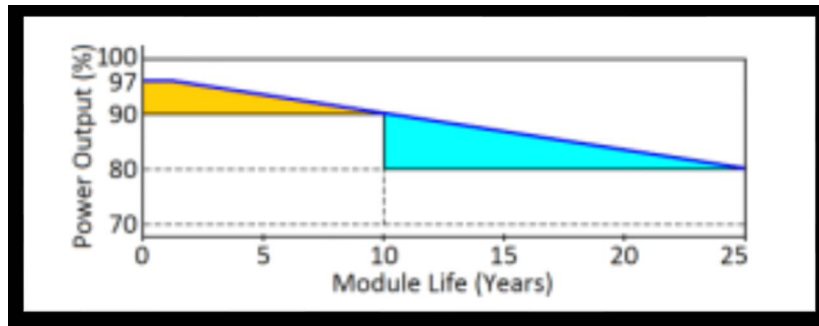
Gambar 10: Skema PLTS *Hybrid*

2.2.4 Variasi dalam Produksi Energi PLTS

Keluaran daya yang dihasilkan oleh panel surya (PLTS) dipengaruhi oleh sejumlah faktor selama pengoperasiannya. Faktor-faktor ini adalah sebagai berikut.

1. Degradasi Panel Surya

Selama penggunaan, kualitas peralatan tentu akan menurun. Panel surya juga terlibat dalam peristiwa ini, dan bagian ini juga mengalami kerusakan. Panel surya biasanya dijamin bertahan selama 25 tahun. Masa hidup panel surya terdapat pada gambar berikut ini.

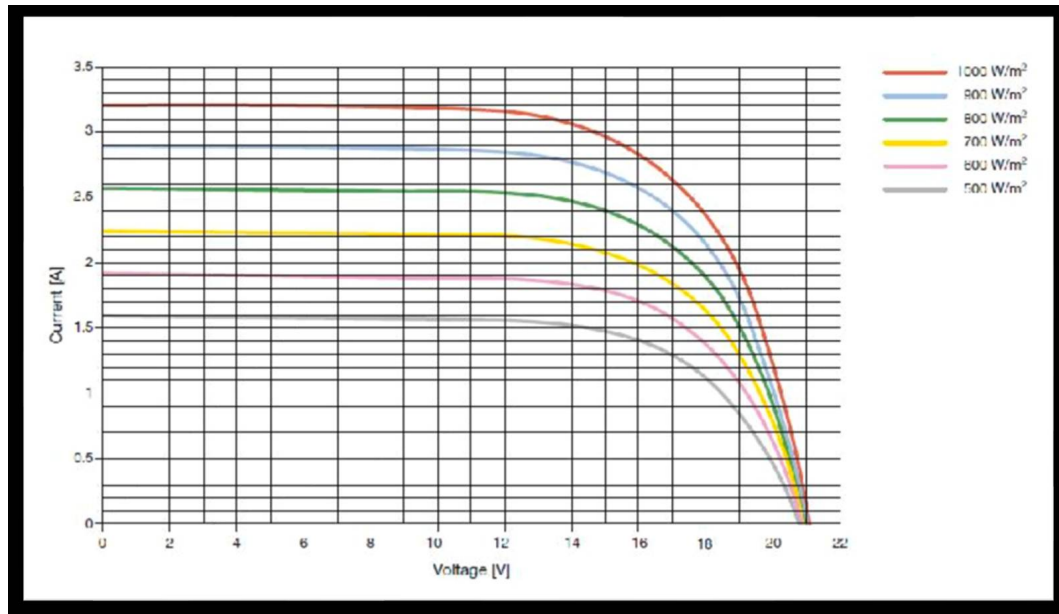


Gambar 12: Diagram rentang hidup panel surya

Berdasarkan diagram di atas, kualitas panel surya akan menurun menjadi 90% selama sepuluh tahun pertama dan menjadi 80% selama lima belas tahun berikutnya. Panel surya dapat rusak karena hal-hal kimia, listrik, panas, atau mekanik. Keluaran daya panel surya biasanya kehilangan 0.5% per tahun. Jika dibandingkan dengan jenis *Monocrystalline Silicon* dan *Polycrystalline Silicon*, panel surya jenis *Cadmium Telluride* (CdTe), *Amorphous Silicon* (a-Si), dan *Copper Indium Gallium Selenide* (CIGS) mengalami degradasi lebih cepat.

2. Irradiance

Radiasi matahari adalah sumber utama iradiasi di bumi. Arus keluaran, tegangan keluaran, daya, *fill-factor*, dan efisiensi adalah semua faktor yang memengaruhi radiasi matahari. Lokasi dan kondisi spektrum matahari ke bumi mempengaruhi variasi radiasi. Peristiwa iradiasi berdampak pada kurva karakteristik tegangan (V) dan arus (I) terdapat pada gambar berikut ini.



Gambar 13: Pengaruh iradiasi terhadap panel surya

Arus yang dihasilkan oleh modul surya akan menurun secara proporsional dengan penurunan iradiasi, tetapi variasi tegangan tanpa beban akan sangat kecil. Ketika modul surya berada di bawah batas operasi standarnya, efisiensi konversi tidak terpengaruh oleh variasi iradiasi. Ini berarti bahwa efisiensi konversi sama baik dalam kondisi cerah maupun mendung. Akibatnya, jumlah energi listrik yang sedikit yang dihasilkan modul surya saat langit mendung bukanlah penurunan efisiensi melainkan penurunan produksi.

3. Temperatur

Kebalikan dari masalah iradiasi, ketika temperatur modul surya meningkat, arus yang dihasilkannya tetap tidak berubah; sebaliknya, tegangan menurun, yang berarti bahwa kinerja modul surya menurun dalam produksi energi listrik. Setiap kenaikan 1°C di atas 25°C akan mengakibatkan penurunan sekitar 0,5% daya yang

dihasilkan oleh panel surya, yang berarti bahwa panel surya tidak akan berfungsi sepenuhnya jika temperatur yang diterimanya tetap normal.

4. *Shading*

Dalam suatu PLTS, sebagian besar area yang digunakan oleh modul surya mungkin terhalang atau dibayangi oleh pepohonan, daun yang jatuh, asap, kabut, awan, atau panel surya yang terpasang di dekatnya. Dalam situasi ini, sel surya yang tertutupi akan berubah menjadi beban pasif setelah berhenti menghasilkan energi listrik.

Dalam kondisi tertentu, sel ini akan berfungsi sebagai dioda dan membelokkan arus yang dihasilkan oleh sel lain dalam hubungan seri. Ini akan membahayakan produksi modul surya secara keseluruhan dan dapat merusak modul karena panas yang berlebihan. Diharapkan penggunaan dioda *by-pass* yang terpasang paralel pada masing-masing modul akan menghindari masalah yang lebih besar karena *shading string*.

5. *Soiling*

Seiring berjalannya waktu, kotoran akan menumpuk di permukaan modul fotovoltaik, mengurangi cahaya yang jatuh ke area tertentu. Selain merusak lapisan dan segel sel fotovoltaik, soiling pada sistem fotovoltaik dapat mengakibatkan kerugian daya sebesar 5-17%, terutama di daerah yang sering terkena hujan. Dibandingkan dengan sistem PLTS yang dipasang di tanah, sistem PLTS atap akan mengalami kerugian soiling yang lebih sedikit.

6. Sudut Kemiringan

Sudut kemiringan modul fotovoltaik menentukan intensitas paparan sinar matahari yang akan mengenai permukaan modul. Sudut kemiringan yang paling maksimal pada modul akan menghasilkan lebih banyak daya.

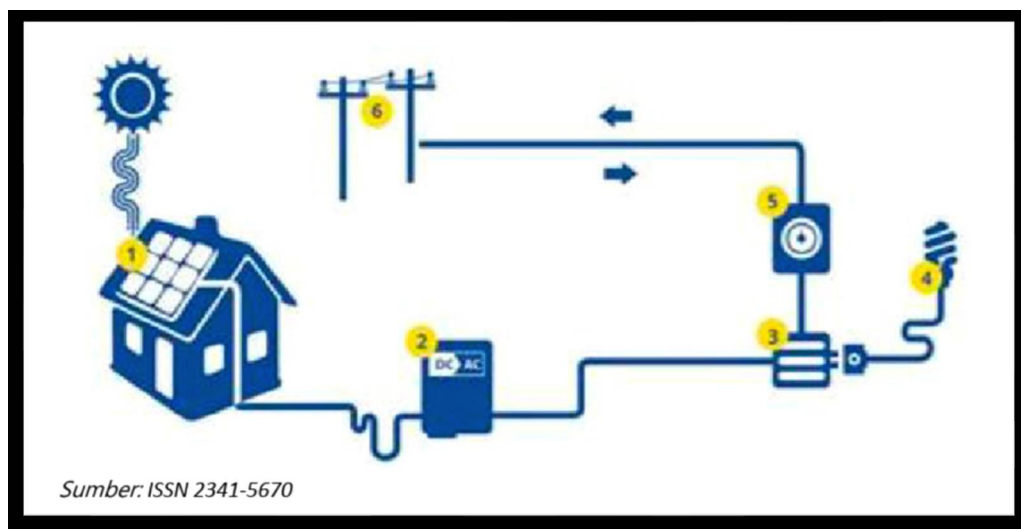
2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap

Berdasarkan standar dalam Peraturan Menteri ESDM No.49 tahun 2018, jo. Permen No.13 tahun 2019, jo. Permen No.16 tahun 2019, PLTS atap adalah proses pembangkitan tenaga listrik yang menggunakan modul fotovoltaik, yang diletakkan di atap, dinding, atau bagian lain dari bangunan milik pelanggan PLN. PLTS atap dapat dipasang secara *off-grid* maupun *on-grid*. PLTS atap *off-grid* biasanya dibangun di tempat-tempat di mana PLN tidak memberikan listrik, seperti daerah 3T (Terdepan, Terpencil, Tertinggal). PLTS atap *on-grid* ditujukan untuk menjaga kestabilan energi listrik pelanggan PLN dan lebih murah karena tidak menggunakan baterai yang mahal dan memiliki masa operasional yang terbatas. Pemasangan PLTS di atap memiliki banyak keuntungan, seperti menghemat tagihan listrik, membantu penggunaan energi modern, dan dapat membantu mengurangi dampak perubahan iklim.

2.3.1 Mekanisme PLTS Atap

Proses mekanisme PLTS atap dijelaskan sebagai berikut. Pertama, panel surya mengubah energi matahari menjadi energi listrik, menghasilkan arus listrik DC. Kemudian, arus DC tersebut diubah oleh *inverter* menjadi listrik AC. Listrik

AC yang dihasilkan masuk ke dalam jaringan listrik rumah melalui AC *breaker* panel. Selanjutnya, energi listrik digunakan untuk penerangan atau peralatan elektronik rumah tangga. Selama penggunaan energi, kWh meter ekspor impor (exim) digunakan dengan menggunakan sistem *net metering*. Meter exim membaca ekspor listrik dari pelanggan PLTS ke jaringan PLN, serta membaca impor listrik dari jaringan PLN ke pelanggan PLTS. Ilustrasi mekanisme PLTS Atap terdapat pada gambar berikut.



Gambar 14: Mekanisme PLTS Atap

2.3.2 Regulasi Pengoperasian PLTS Atap

Salah satu kemajuan dalam teknologi pembangkitan energi di Indonesia adalah sistem PLTS atap. Oleh karena itu, Indonesia sebagai negara hukum telah menetapkan beberapa peraturan yang berkaitan dengan PLTS atap. Peraturan ini harus dipatuhi dari mulai perencanaan dan pembangunan hingga saat PLTS atap beroperasi.

Permen Menteri ESDM Nomor 2 Tahun 2024 mengatur pembangkit listrik tenaga surya atap yang terhubung pada jaringan tenaga listrik pemegang izin usaha penyediaan tenaga listrik untuk kepentingan umum.

Dalam aturan ini, terdapat beberapa perubahan dibandingkan dengan aturan lama., yaitu:

- a. Permen ESDM No. 2 Tahun 2024 mengatur bahwa pemegang IUPTLU wajib menyusun kuota pengembangan sistem PLTS atap untuk jangka waktu lima tahun.
- b. Dalam aturan sebelumnya, PLTS atap yang akan dipasang calon pelanggan di wilayah usaha BUMN pemegang IUPTLU kapasitasnya dibatasi paling tinggi 100% dari daya tersambung. Namun, dalam Permen ESDM No. 2 Tahun 2024 tidak ada lagi ketentuan tersebut, tetapi ada kuota pengembangan sistem PLTS atap yang disusun pemegang IUPTLU untuk diusulkan kepada Dirjen Ketenagalistrikan Kementerian ESDM.
- c. Permen ESDM No. 2 Tahun 2024 menghapuskan skema *net-metering* dan menggantikan dengan Kwh meter ekspor-impor (EXIM) dengan Kwh *Advanced Meter*, di mana kelebihan energi listrik atau ekspor tenaga listrik dari pengguna ke PT PLN (Persero) tidak akan dihitung/dinolkan.
- d. Permen ESDM No. 2 Tahun 2024 juga mengatur mekanisme kuota sistem PLTS atap yang berlaku untuk lima tahun, dengan periode pendaftaran pada bulan Januari dan Juli, setahun hanya 2 kali.

- e. *Kwh Advanced Meter* adalah meter *kilowatt hour* (kWh) yang disediakan dan dipasang oleh pemegang IUPTLU pada instalasi milik Pelanggan PLTS Atap yang dapat melakukan komunikasi data dan pengukuran dua arah.
- f. Permen ESDM No. 2 Tahun 2024 juga mengatur bahwa pengguna PLTS atap dengan kapasitas lebih besar dari 3 MW (tiga megawatt) harus menyediakan pengaturan basis data prakiraan cuaca yang terintegrasi dengan sistem *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) atau *smart grid* distribusi milik IUPTLU.

2.4 Analisis Teknis

Dalam studi kelayakan usaha, aspek teknis mencakup proses pembuatan atau pembangunan bisnis serta pengoperasiannya setelah selesai. Saat hasil produksi yang diinginkan tercapai, usaha dapat dinilai layak dari aspek teknis. Analisa kelayakan dari aspek teknis sangat penting untuk memastikan bahwa gagasan yang disebutkan dapat diterapkan. Untuk memenuhi kelayakan teknis, beberapa parameter harus dipenuhi. Ini termasuk penentuan lokasi, proses produksi yang efisien, dan penggunaan teknologi dan komponen berkualitas tinggi untuk menghasilkan produk dengan kualitas terbaik. Berikut merupakan analisis teknis pada sistem kelistrikan.

2.4.1 Analisis Aliran Daya

Untuk menganalisis sistem tenaga listrik dalam keadaan tunak (*steady state*), seorang insinyur diharuskan untuk menggunakan analisis aliran daya pada perencanaan, penentuan operasi terbaik untuk sistem tenaga, penjadwalan ekonomis, dan pertukaran daya antara perusahaan utilitas. Analisis aliran daya adalah cara untuk menemukan sistem tenaga listrik dengan operasi terbaik. Metode yang digunakan bisa manual dengan perhitungan matematika atau menggunakan *software* seperti ETAP, PowerWorld, dan PSS/E. Analisis aliran daya biasanya hanya berfokus pada sistem transmisi yang melibatkan transmisi daya massal. Banyak analisis lain, seperti analisis kestabilan peralihan dan studi lanjutan, bergantung pada hasil perhitungan analisis aliran daya. Untuk melakukan analisis aliran daya, beberapa elemen diperlukan. Ini termasuk tegangan bus (magnitudo dan sudut), arus pada setiap saluran, daya (aktif dan reaktif) pada setiap saluran, dan pembebanan komponen sistem listrik.

2.4.2 Analisis Hubung Singkat

Short Circuit atau gangguan hubung singkat merupakan situasi kesalahan dasar dan parah dalam struktur rangkaian, seperti konverter sumber tegangan (John, 1999). Sambaran petir, kegagalan isolasi, gangguan binatang, dan ranting pohon dapat menyebabkan gangguan hubung singkat. Saat terjadi gangguan hubung singkat, arus yang mengalir menuju titik gangguan akan sangat besar, sehingga tegangan di sekitar titik gangguan akan sangat rendah. Arus yang lebih singkat berarti tegangan di sekitar titik gangguan lebih rendah. Hal ini akan mengganggu

stabilitas sistem. Gangguan ini juga dapat merusak peralatan karena arus yang sangat besar.

Analisis hubung singkat merupakan studi penting untuk memprediksi dan memahami efek hubung singkat pada sistem tenaga listrik. Tujuannya untuk menentukan besarnya arus hubung singkat, mengevaluasi kemampuan peralatan dan sistem, merencanakan dan memilih peralatan proteksi, serta meningkatkan keamanan dan keandalan sistem. Manfaatnya termasuk mencegah kerusakan peralatan, meningkatkan stabilitas dan keandalan sistem, meminimalisir risiko kebakaran dan ledakan, serta meningkatkan keselamatan personil.

Metode yang digunakan bisa manual dengan perhitungan matematika atau menggunakan *software* seperti ETAP, PowerWorld, dan PSS/E. Parameter yang dianalisis meliputi arus hubung singkat, tegangan hubung singkat, waktu hubung singkat, impedansi sistem, dan kapasitas interupsi. Analisis ini bisa dilakukan dalam berbagai kondisi, seperti operasi normal, gangguan, dan perencanaan. Jadi, analisis hubung singkat adalah alat penting untuk meningkatkan keamanan, keandalan, dan stabilitas sistem tenaga listrik. Dengan melakukan analisis ini, dapat mencegah kerusakan peralatan, meningkatkan keselamatan personil, dan meminimalisir risiko terjadinya gangguan.

2.4.3 Analisis Kestabilan

Sistem tenaga listrik memegang peranan penting dalam mengalirkan energi listrik dari pembangkit ke konsumen dengan efisiensi yang baik untuk memenuhi kebutuhan beban listrik. Oleh karena itu, keandalan sistem tenaga listrik menjadi krusial, di mana sistem harus dapat menyediakan energi listrik secara terus menerus

dan merespons gangguan dengan cepat. Kemampuan sistem tenaga listrik untuk kembali ke kondisi setimbang setelah gangguan dikenal sebagai stabilitas sistem tenaga listrik. Gangguan kestabilan ini dapat menyebabkan perubahan sudut rotor generator atau penurunan tegangan yang signifikan.

Gangguan pada sistem tenaga listrik dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis: gangguan kecil dan gangguan besar. Gangguan kecil terjadi akibat perubahan beban atau pembangkit secara acak, pelan, dan bertahap, dengan pengaruh yang tidak signifikan pada aliran daya. Sementara itu, gangguan besar terjadi karena kehilangan unit pembangkit, fluktuasi beban, atau kehilangan saluran transmisi, yang dapat mengakibatkan gangguan tegangan dan mengancam stabilitas sistem.

Ketidakstabilan sistem dapat menyebabkan keluarnya pembangkit dari sistem tenaga listrik, sehingga analisis stabilitas diperlukan. Analisis ini meliputi kestabilan sudut rotor, kestabilan frekuensi, dan kestabilan tegangan. Sudut rotor mengacu pada perbedaan sudut antara medan putar rotor dan stator pada generator sinkron, dan kestabilan sudut rotor merujuk pada kemampuan generator sinkron untuk tetap stabil. Frekuensi mencerminkan keseimbangan antara daya yang dihasilkan dan total beban pada sistem, dan kestabilan frekuensi menjamin nilai frekuensi tetap pada batas setelah gangguan.

Kestabilan tegangan menunjukkan kemampuan sistem untuk mempertahankan nilai tegangan pada setiap bus setelah terjadinya gangguan. Gangguan seperti peningkatan beban yang cepat atau hubung singkat dapat menyebabkan ketidakstabilan tegangan, bahkan bisa mengakibatkan kolaps tegangan total atau sebagian. Untuk mencegah kolaps tegangan, langkah-langkah

seperti pemasangan kompensator daya reaktif, *Automatic Voltage Regulator* (AVR) pada pembangkit, serta pengaturan transformator *tap changer* dapat dilakukan dengan baik.

2.5 Analisis Ekonomi

Dalam studi kelayakan usaha, aspek ekonomi berkaitan dengan manfaat yang dihasilkan dari pembangunan bisnis dan dampaknya terhadap ekonomi. Aspek yang paling menentukan dari studi kelayakan usaha adalah jumlah dana yang diinvestasikan. Aset atau barang yang diperoleh dengan tujuan menghasilkan pendapatan atau apresiasi disebut investasi. Berikut adalah metode-metode analisis ekonomi.

2.5.1 *Levelized Cost of Energy (LCOE)*

LCOE, juga dikenal sebagai Biaya Energi *Levelized* (LEC), adalah nilai sekarang bersih dari unit biaya listrik selama masa pakai aset pembangkit. Biasanya dianggap sebagai harga rata-rata yang harus diterima aset penghasil di pasar untuk mencapai titik impas selama masa pakai aset tersebut.

Diskon, anuitas, dan model keuangan adalah beberapa metode yang memiliki kelebihan dalam menghitung LCOE. Metode anuitas, metode LCOE yang paling umum digunakan, memungkinkan perhitungan ulang LCOE dengan cepat. Metode ini menghitung total biaya selama pemakaian dan membaginya dengan total listrik yang dihasilkan selama pemakaian. Dengan metode ini, total biaya yang

diperhitungkan akan dikonversi menjadi biaya tahunan yang setara, dan nilai pembangkit listrik yang digunakan adalah rata-rata pembangkit listrik tahunan.

Persamaan LCOE adalah:

$$LCOE = \frac{\text{Annual Costs}}{\text{Average Output}} = \frac{(\sum_{t=0}^n \frac{Ct}{(1+r)^t}) (\frac{r}{1-(1+r)^{-n}})}{(\sum_{t=1}^n Et)/n}$$

Keterangan:

LCOE = *Levelized Cost of Energi* (Rp/kWh)

Ct = Biaya Produksi Energi Tahunan (Rp)

Et = Produksi Energi Tahunan (kWh)

r = *Discount Rate*

n = Masa Pakai (Tahun)

2.5.2 Break Even Point (BEP)

Periode waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan modal investasi investor dikenal sebagai *break even point* (BEP). Untuk mengetahui risiko keuangan terhadap sistem yang akan dibangun, perhitungan BEP sangat penting; sistem yang lebih baik dibangun dengan nilai BEP yang lebih kecil. Perhitungan jangka waktu pengembalian didasarkan pada kas bersih setiap tahun.

Persamaan BEP adalah:

$$BEP = \frac{\text{Investasi}}{\text{Kas Bersih/Tahun}}$$

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu penelitian akan dilakukan pada bulan Maret dan April 2024. Lokasi pemasangan PLTS Atap ini direncanakan pada kawasan pabrik PT. Karunia Berca Indonesia yang terletak di Jalan Kawasan Industri Krakatau Steel, Rw. Arum, Kec. Purwakarta, Kota Cilegon, Banten dengan koordinat 6°00'27" LS (Lintang Selatan) dan 106°01'07" BT (Bujur Timur).

3.2 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah observasi, di mana penulis akan mengamati bangunan pabrik baja serta kelistrikannya melalui Helioscope untuk mensimulasikan apabila PLTS telah terpasang. Helioscope adalah sebuah aplikasi perangkat lunak yang digunakan untuk merencanakan dan mensimulasikan instalasi panel surya dengan memperhitungkan berbagai faktor seperti lokasi geografis, orientasi atap, kemiringan atap, potensi sinar matahari, dan bayangan yang mungkin terjadi dari bangunan atau pohon di sekitarnya. Selain itu, digunakan juga metode studi pustaka, di mana informasi diperoleh dari *e-book*, jurnal ilmiah, dan situs web di internet.

3.3 Objek Penelitian

Pada penelitian ini, objek yang akan diamati adalah rancangan PLTS Atap pada kawasan pabrik PT. Karunia Berca Indonesia melalui *software Helioscope* berupa kontribusi daya listrik dan biaya investasi.

3.4 Teknik Pengambilan Sampel

Metode pengambilan data yang akan digunakan adalah *unrandom sampling* karena penulis akan mengambil data secara tidak acak berdasarkan informasi yang telah diperoleh sebelumnya.

3.5 Teknik Analisis Data

Analisis data akan dilakukan secara kuantitatif, yaitu dengan menggunakan data numerik. Hal ini karena data yang akan diambil berupa persentase untuk memahami profil penghematan listrik, kontribusi daya listrik kepada PLN, dan lama waktu yang diperlukan untuk mencapai BEP.

BAB IV

PEMBAHASAN PENELITIAN

4.1 Data Hasil Penelitian

4.1.1 Luas Area Instalasi PLTS Atap Pabrik PT. KBI

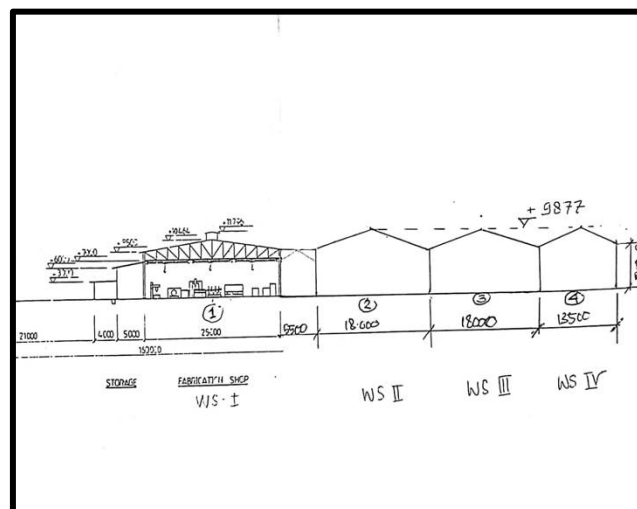
Plant 1 Pabrik PT. KBI merupakan area yang akan dipasang oleh PLTS, namun tidak semua bangunan akan dimanfaatkan. Pemasangan PLTS akan difokuskan pada area *Workshop* yang terdiri dari 4 bagian. Denah *Plant* 1 Pabrik PT. KBI terdapat pada gambar berikut.



Gambar 15: Denah *Plant* 1 Pabrik PT. KBI

Atap bangunan ini menghadap kepada dua sisi, yaitu barat daya dan timur laut. Lokasi Pabrik PT. KBI berada di bawah garis khatulistiwa sehingga atap yang menghadap utara akan menghasilkan *output* yang lebih baik. Oleh karena itu, penulis hanya memanfaatkan atap yang menghadap kepada timur laut yang arahnya cenderung ke utara. Sedangkan, atap yang menghadap barat daya tidak dimanfaatkan karena akan menghasilkan *output* yang kecil dan hanya akan memakan biaya.

Atap *Workshop Plant 1* Pabrik PT. KBI berbentuk prisma yang terdiri dari 4 *Workshop* berbeda. Sketsa dari *Workshop Plant 1* Pabrik PT. KBI terdapat pada gambar berikut.



Gambar 16: Sketsa *Workshop Plant 1* Pabrik PT. KBI

Dari gambar tersebut, dapat diketahui bahwa atap masing-masing bagian *workshop* memiliki kemiringan yang berbeda-beda dengan sisi yang berbeda juga sehingga menghasilkan lebar yang bervariasi. Selain itu, untuk pemasangan

komponen-komponen pendukung seperti kabel diperlukan pemberian jarak (*setback*) sebesar 1,2 m sehingga akan mengurangi panjang setiap sisi seperti pada tabel berikut.

Bagian	Panjang (m)	Lebar (m)	Kemiringan (°)	Panjang' (m)	Lebar' (m)
1	65	12,59	6,8	62,6	10,2
2	65	9,11	8,1	62,6	6,7
3	85	9,08	8,6	82,6	6,7
4	85	6,93	11,47	82,6	4,5

Tabel 1: Data panjang dan lebar atap

Perubahan panjang dan lebar tiap atap akan mengubah juga luas maksimal. Tabel berikut akan memperlihatkan perbedaan luas atap dengan luas panel yang dapat dipasang.

Bagian	Luas Atap (m)	Luas Panel (m)	Sudut Azimuth (°)
1	818,35	638,5	50
2	592,2	419,4	50
3	771,9	553,4	50
4	589,5	371,7	50

Tabel 2: Data luas atap

4.1.2 Data Beban Listrik

Bangunan Pabrik PT. KBI merupakan bangunan industri yang memiliki beban listrik yang sangat besar. Mesin-mesin pabrik membutuhkan daya sebesar 1,9 MVA atau 89% dari kapasitas listrik Pabrik PT. KBI yang sebesar 2,2 MVA. Bangunan Pabrik PT. KBI terbagi menjadi tiga, yaitu daerah fabrikasi, daerah galvanisasi, dan daerah perkantoran. Rincian dari beban listrik yang dibutuhkan pada Pabrik PT. KBI adalah sebagai berikut.

No	Beban	Fabrication	Galvanizing	Office	Total
1	Machine	1.879.796	91.800	-	1.971.596
2	Maintenance	98.050	13.025	-	111.075
3	AC	30.950	2.550	33.763	67.263
4	Personal Computer	7.028	-	8.579	15.607
5	CCTV	230	100	1.469	1.799
6	Lampu	20.490	9.670	50	30.210
7	Dispenser	2.500	-	-	2.500
Total					2.200.050

Tabel 3: Rincian beban listrik

Untuk memastikan suplai listrik terpenuhi, Pabrik PT. KBI menggunakan GENSET sebagai sumber listrik sekunder apabila terjadi pemadaman listrik dari pusat. Spesifikasi GENSET yang digunakan tertera sebagai berikut.

Daya	Tegangan	Faktor Daya	Kapasitas	Frekuensi
55 kW	415 V	0,8 Lagging	68 kVA	50 Hz

Tabel 4: Spesifikasi GENSET

4.1.3 Sistem Listrik

PT KBI, yang berlokasi di Kawasan Industri Krakatau, diwajibkan untuk menggunakan layanan listrik dari perusahaan pembangkit listrik swasta, yaitu Krakatau Daya Listrik (KDL). Pabrik PT KBI masuk dalam kategori pelanggan I3TM dengan kapasitas daya 630 kVA dan sistem AC tiga fasa 400 V. Kategori ini menggunakan tarif ganda, yang berarti tarif listrik berbeda antara Luar Waktu Beban Puncak (LWBP) dan Waktu Beban Puncak (WBP). Dengan tarif ganda, PT. KBI dapat mengelola penggunaan listrik mereka untuk meminimalkan biaya dengan mengatur operasi pabrik sesuai dengan struktur tarif. Kategori ini khusus untuk pelanggan dengan daya langganan lebih dari 197 kVA.

4.1.4 Data Konsumsi Listrik

Setelah melakukan pengambilan data selama satu bulan, penulis mendapatkan dua data konsumsi listrik. Yang pertama merupakan laporan bulanan periode Januari 2019 hingga Desember 2022 dan yang kedua merupakan laporan harian per 15 menit dari tanggal 14 Maret 2024 hingga 19 Maret 2024 yang didapatkan menggunakan kWh meter digital.

Dari data pertama, dapat diketahui bahwa aktivitas terbanyak terjadi pada tahun 2019. Pada tahun 2020 dan 2021, terjadi penurunan aktivitas dikarenakan

pandemi Covid-19. Kemudian pada tahun 2022, aktivitas mulai kembali semula. Data konsumsi selama 4 tahun ini digunakan untuk merepresentasikan konsumsi listrik pada Pabrik PT. KBI dan dapat diambil rata-ratanya sebagai berikut.

No.	Bulan	Konsumsi Listrik (kWh)
1	Januari	127.845
2	Februari	123.125
3	Maret	119.414
4	April	128.534
5	Mei	124.519
6	Juni	113.530
7	Juli	100.929
8	Agustus	120.441
9	September	151.839
10	Oktober	160.578
11	November	143.746
12	Desember	132.563
Rata-rata		128.922

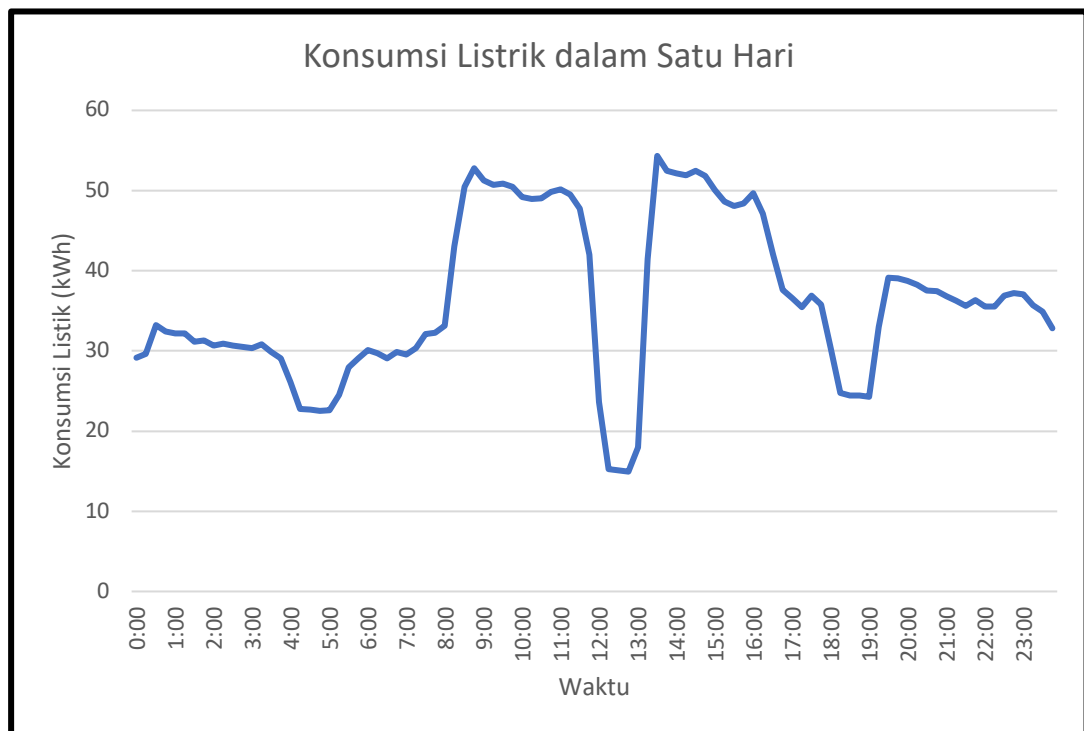
Tabel 5: Konsumsi listrik bulanan Pabrik PT. KBI

Kemudian, data kedua dibutuhkan untuk mengetahui kebutuhan listrik dalam satu hari. Data kedua dipaparkan dalam bentuk tabel dan grafik sebagai berikut.

No.	Waktu	Konsumsi Listrik (kWh)
1	01:00	124
2	02:00	127
3	03:00	123
4	04:00	120
5	05:00	94
6	06:00	104
7	07:00	119
8	08:00	124
9	09:00	179
10	10:00	203
11	11:00	197
12	12:00	189
13	13:00	69
14	14:00	166
15	15:00	208
16	16:00	195
17	17:00	176
18	18:00	145
19	19:00	104
20	20:00	135
21	21:00	152

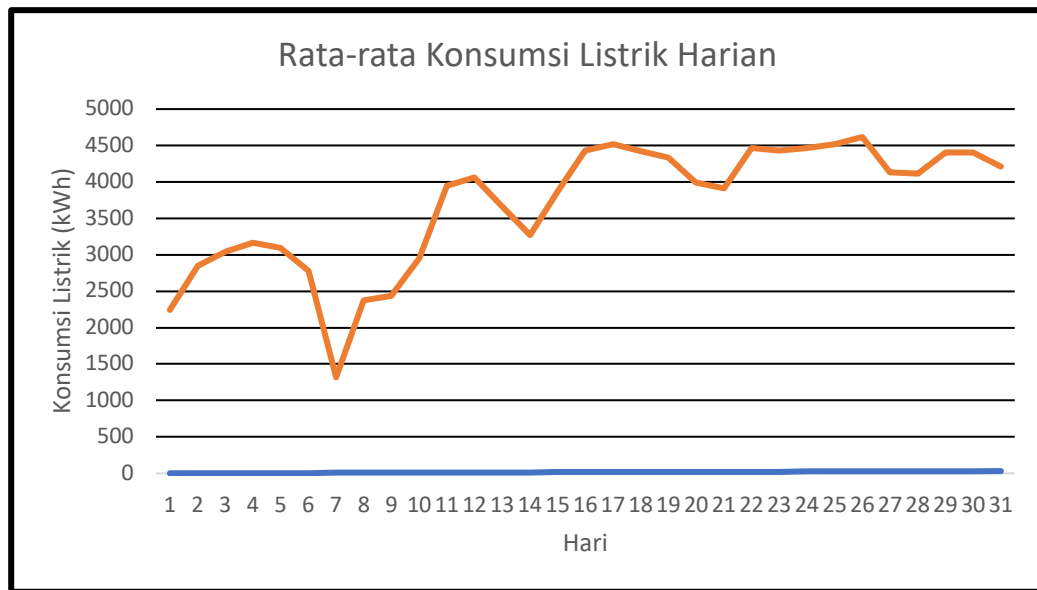
No.	Waktu	Konsumsi Listrik (kWh)
22	22:00	145
23	23:00	145
24	24:00	141
Total		3.486

Tabel 6: Konsumsi listrik dalam Satu Hari Pabrik PT. KBI



Gambar 17: Grafik rata-rata konsumsi listrik dalam satu hari

Selain itu, dari data kedua ini didapatkan juga rata-rata konsumsi listrik harian Pabrik PT. KBI sebagai berikut.



Gambar 18: Rata-rata konsumsi listrik harian Pabrik PT. KBI

4.1.5 Data Iradiasi

Untuk mengetahui potensi produksi energi listrik, perlu diketahui data iradiasi pada wilayah yang akan dipasang PLTS. Ada beberapa istilah yang menggambarkan nilai radiasi matahari, yaitu *Direct Normal Irradiation* (DNI), *Diffuse Horizontal Irradiation* (DHI), dan *Global Horizontal Irradiation* (GHI). DNI mengindikasikan jumlah cahaya yang diterima langsung dari matahari tanpa hambatan. DHI merupakan radiasi matahari yang mencapai permukaan tanah setelah tersebar oleh awan dan partikel di atmosfer. Sedangkan GHI adalah total radiasi matahari yang diterima pada permukaan horizontal tanah.

Dalam usaha mendapatkan data iradiasi, penulis memanfaatkan situs *Global Solar Atlas* yang memiliki akses data iradiasi paling akurat. Berdasarkan *Global*

Solar Atlas, data iradiasi pada wilayah Pabrik PT. KBI, tepatnya pada -06.006131° , 106.020088° , adalah sebagai berikut.

No.	Data	Singkatan	Nilai	Satuan
1	<i>Direct Normal Irradiation</i>	DNI	2,752	kWh/m ² per day
2	<i>Global Horizontal Irradiation</i>	GHI	4,774	kWh/m ² per day
3	<i>Diffuse Horizontal Irradiation</i>	DIF	2,677	kWh/m ² per day
4	<i>Global Tilted Irradiation at Optimum Angle</i>	GTI _{OPTA}	4,816	kWh/m ² per day
5	<i>Air Temperature</i>	TEMP	26,7	°C
6	<i>Optimum Tilt of PV Module</i>	OPTA	9	°

Tabel 7: Data Iradiasi

Selain data di atas, tersedia juga rata-rata keluaran daya per jam setiap bulan untuk PLTS dengan kapasitas 356,4 kWp. Dari data tersebut, dapat diketahui bahwa PLTS mulai bekerja pada 06:00 ketika matahari terbit sehingga energinya akan diubah menjadi energi listrik. Kemudian, PLTS mengalami *peak performance* ketika matahari berada di atas kepala tepatnya pada 09:00 hingga 13:00. Setelah itu, produksi energi listrik akan menurun dan berhenti pada 18:00. Data rata-rata keluaran daya pada Pabrik PT. KBI adalah sebagai berikut.

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0 - 1												
1 - 2												
2 - 3												
3 - 4												
4 - 5												
5 - 6										0.310	1.197	0.119
6 - 7	11.983	6.804	11.022	14.879	14.486	10.810	8.973	11.052	14.380	30.825	31.233	20.833
7 - 8	48.498	44.593	59.899	71.441	71.368	64.401	61.243	72.942	90.396	91.306	80.459	61.713
8 - 9	87.469	86.910	109.387	124.396	125.390	118.206	117.075	132.454	148.630	142.548	125.690	101.830
9 - 10	122.163	122.782	147.238	162.265	163.663	157.181	158.458	173.759	185.392	177.339	152.952	133.709
10 - 11	151.074	152.032	176.546	183.932	184.049	176.445	182.975	196.978	205.938	193.479	169.058	154.485
11 - 12	168.131	172.173	190.183	193.419	189.664	184.065	190.887	206.546	214.282	197.519	176.639	164.951
12 - 13	169.024	178.652	188.027	190.660	182.798	176.885	185.834	203.215	210.068	189.704	167.777	162.751
13 - 14	152.881	163.610	171.194	170.209	159.880	156.196	167.351	184.899	187.170	167.634	146.946	144.378
14 - 15	123.826	134.918	138.901	132.487	121.929	121.188	132.566	146.141	147.605	125.895	112.440	112.838
15 - 16	85.348	94.501	96.667	84.215	76.661	75.847	87.086	95.386	94.212	77.777	69.571	74.614
16 - 17	44.136	49.071	47.419	37.976	32.406	33.539	40.214	43.614	40.264	32.441	31.112	36.663
17 - 18	12.545	14.176	10.884	6.379	2.728	3.704	6.542	6.876	6.285	3.011	4.792	8.655
18 - 19												
19 - 20												
20 - 21												
21 - 22												
22 - 23												
23 - 24												
Sum	1,177	1,220	1,347	1,372	1,325	1,278	1,339	1,474	1,545	1,430	1,270	1,178

Gambar 19: Rata-rata keluaran daya

4.2 Analisis Perancangan PLTS Atap Pabrik PT. KBI

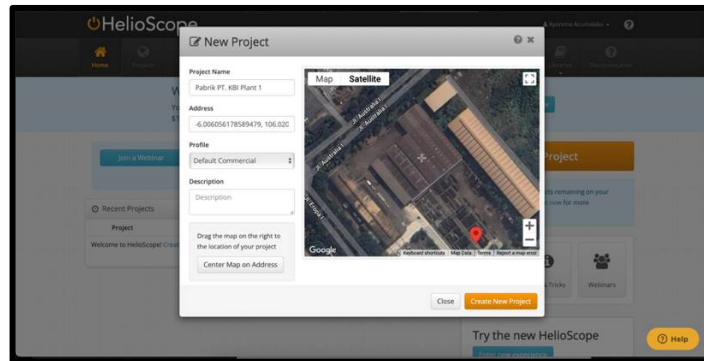
4.2.1 Langkah Pengerjaan

Dengan data yang telah diperoleh, penulis menggunakan perangkat lunak *Helioscope* untuk mensimulasikan dan merencanakan pemasangan PLTS Atap secara akurat. Fitur utama yang tersedia dalam *Helioscope* adalah desain peta dan tampilan satelit, penyusunan panel surya, perhitungan potensi energi, simulasi kinerja, dan integrasi dengan *database* komponen.

Untuk melakukan simulasi, terdapat langkah-langkah yang harus dijalani sebagai berikut.

1. Membuat proyek baru pada halaman *Helioscope*

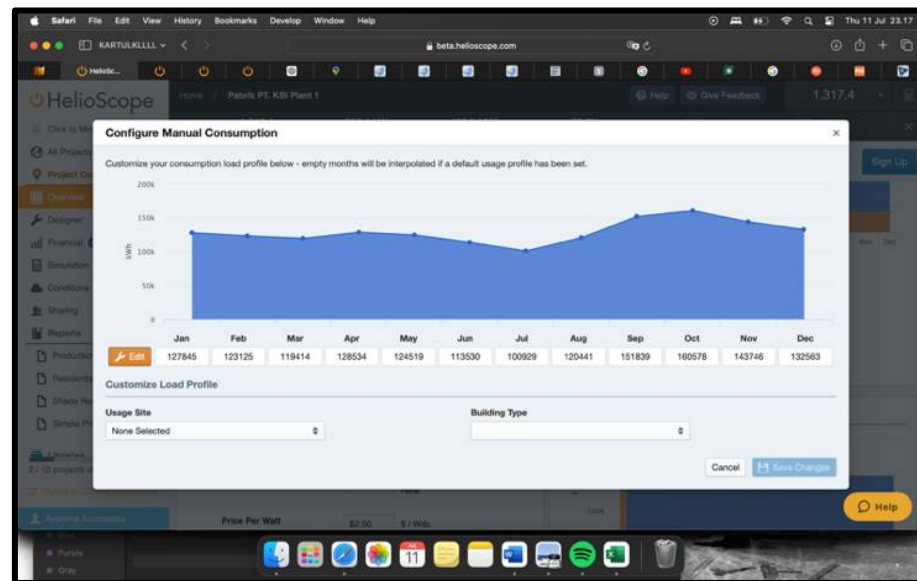
Helioscope dapat diakses melalui semua browser. Pembuatan proyek baru melibatkan pengisian nama dan titik lokasi simulasi PLTS akan dijalankan. Tampilan layar ketika membuat proyek baru adalah sebagai berikut.



Gambar 20: Tampilan layar pembuatan proyek

2. Menentukan kebutuhan energi

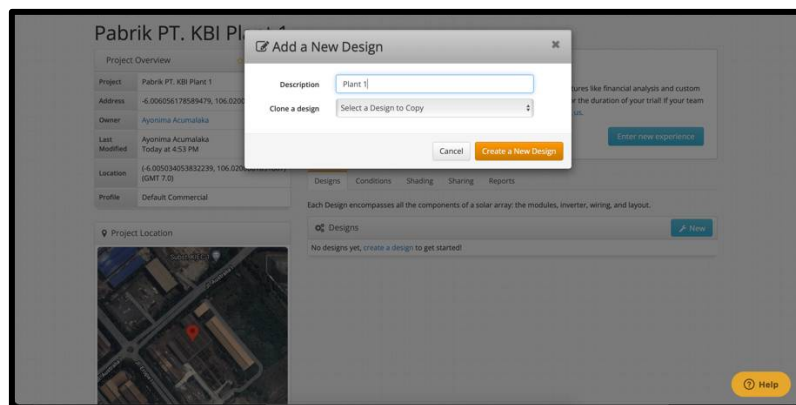
Setelah mendapatkan data konsumsi beban dari Pabrik PT. KBI, penulis memasukkannya ke dalam perangkat lunak *Helioscope*. Data ini akan bermanfaat untuk menentukan kontribusi dari energi listrik hasil PLTS tersebut. Tampilan ketika memasukkan nilai kebutuhan energi adalah sebagai berikut.



Gambar 21: Tampilan layar penentuan kebutuhan energi

3. Membuat desain baru

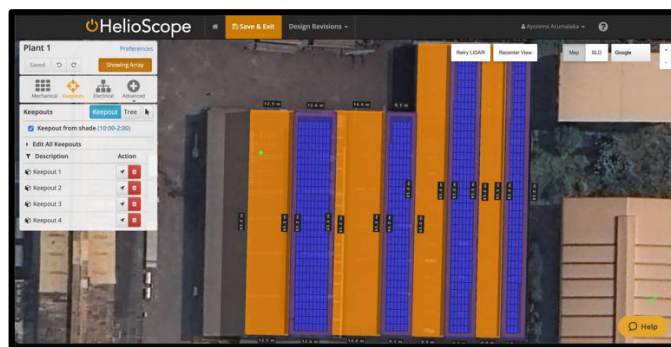
Untuk memulai rancangan, penulis membuat desain baru. Tampilan ketika membuat desain baru adalah sebagai berikut.



Gambar 22: Tampilan layar pembuatan desain baru

4. Menentukan area panel surya dan area yang harus dihindari

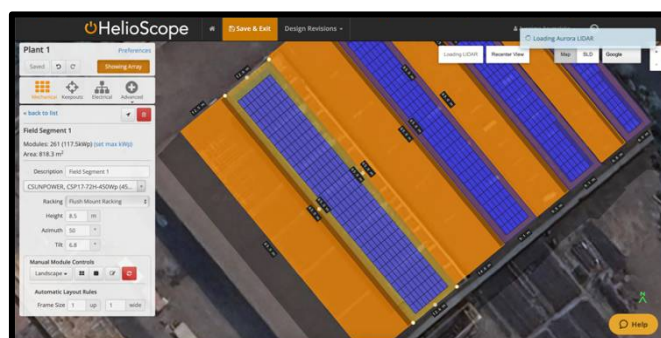
Untuk menentukan area, penulis perlu menetapkan tiap titik sudut yang secara otomatis akan terbentuk pada perangkat lunak *Helioscope*. Bentuk dapat bervariasi tergantung kebutuhan pengguna. Tampilan layar ketika menentukan area adalah sebagai berikut.



Gambar 23: Tampilan layar penentuan area

5. Menentukan komponen modul

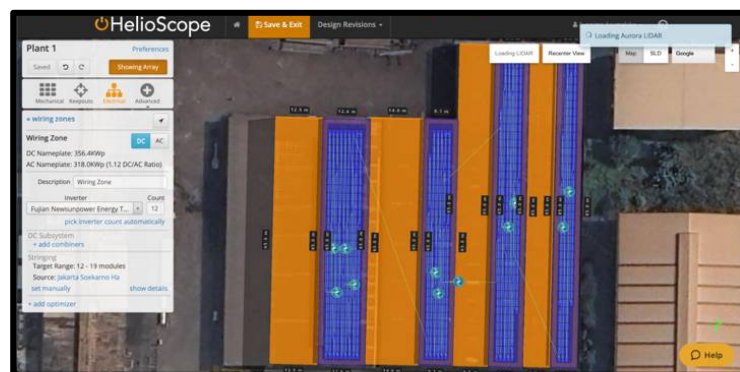
Penulis memasukkan tinggi, kemiringan atap, merek modul surya yang diinginkan, dan rincian lainnya seperti jarak *setback*, jarak antarmodul, dan lainnya. Tampilan ketika menentukan komponen modul adalah sebagai berikut.



Gambar 24: Tampilan layar penentuan komponen modul

6. Menentukan kabel dan *inverter*

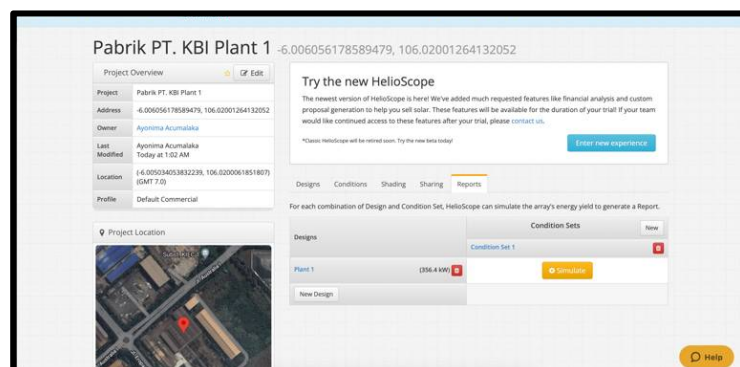
Selain modul yang bervariasi, perangkat lunak *Helioscope* juga menyediakan berbagai merek *inverter* yang umum digunakan dengan ukuran kabel yang bervariasi. Secara otomatis, perangkat lunak ini akan menentukan jumlah *inverter* yang dibutuhkan untuk mendapatkan rasio DC/AC di bawah 1,25. Tampilan ketika menentukan kabel dan *inverter* adalah sebagai berikut.



Gambar 25: Tampilan layar penentuan kabel dan *inverter*

7. Mensimulasikan hasil

Setelah memasukkan semuanya, penulis dapat mensimulasikan dan mendapatkan hasilnya. Tampilan ketika mensimulasikan adalah sebagai berikut.



Gambar 26: Tampilan layar simulasi

4.2.2 Pemilihan Komponen

Dalam upaya merancang PLTS yang layak, tentunya diperlukan pemilihan komponen dengan penuh perhitungan.

Komponen yang penulis pilih adalah sebagai berikut:

1. Modul Surya

Pabrik PT. KBI memiliki 4 atap dengan kemiringan yang berbeda-beda dengan jumlah luas panel yang dapat dipasang 1983 m². Panel yang akan digunakan adalah CSP17-72H-450Wp dengan spesifikasi sebagai berikut.

No.	Parameter	Data
1	Maximum Power [P_{MAX}/Wp]	450
2	Open Circuit Voltage [V_{OC}/V]	49,6
3	Short Circuit Current [I_{SC}/A]	11,5
4	Maximum Power Voltage [V_{MP}/V]	41,1
5	Maximum Power Current [I_{MP}/A]	10,95
6	Module Efficiency [%]	20,7
7	Module Dimension (W x H x D) [mm]	2094 x 1038 x 35
8	Operational Temperature [$^{\circ}C$]	-40 ~+85
9	Power Output Tolerance [W]	0~+5

Tabel 8: Spesifikasi CSP17-72H-450Wp

Panel surya dipasang pada keempat atap dengan luas atap yang berbeda yang diberi jarak *setback* 1,2 m. Untuk setiap satu *inverter*, disusun 2 *string* dengan 17 modul masing-masing dan 2 *string* dengan 16 modul masing-masing. Secara otomatis, perangkat lunak *Helioscope* menentukan jumlah modul yang terpasang sebagai berikut.

Atap	Kemiringan (°)	Modul	Luas Panel (m ²)	Daya (kWp)
<i>Workshop 1</i>	6,8	261	567,3	117,45
<i>Workshop 2</i>	8,1	171	167,36	76,95
<i>Workshop 3</i>	8,6	221	480,36	99,45
<i>Workshop 4</i>	11,47	139	302,13	62,55
Total		792	1517,15	356,4

Tabel 9: Jumlah Modul Surya

Dengan mengetahui jumlah modul dalam seri, penulis dapat menentukan nilai tegangan dan arus sebagai berikut.

$$\textbf{Tegangan } (V_{DC}) = 41,1 \times 17 = 698,7 \text{ V}$$

$$\textbf{Arus } (A_{DC}) = 10,95 \text{ A}$$

2. *Inverter*

Untuk perancangan ini, penulis menggunakan *inverter* GoodWe GWK25K-MT. Spesifikasi *inverter* berikut adalah sebagai berikut.

No.	Input	
1	Max. DC Input Power (W _{DC})	32500

No.	Input	
2	Max. Dc Input Voltage (V_{DC})	1100
3	MPPT Range (V_{DC})	200-950
4	Start-Up Voltage (V_{DC})	180
5	Max. Input Current (A_{DC})	30
6	Max. Short Current (A_{DC})	37,5
7	No. of MPPT Trackers	3
8	Number of Strings per MPPT	2
No.	Output	
1	Nominal Output Power (kW_{AC})	25
2	Max. Output Power (kW_{AC})	27,5 ^{*2}
3	Max. Output Apparent Power (kVA)	27,5 ^{*3}
No.	AC Output Data	
1	Nominal Output Voltage (V)	400 ^{*4} , 3L/N/PE or 3L/PE
2	Nominal Output Frequency (Hz)	50/60
3	Max. Output Current (A_{AC})	40
No.	General Data	
1	Model	GWK25K-MT
2	Max. Efficiency (%)	98,7
3	Operating Temperature Range [$^{\circ}C$]	-30~+60
4	Size (W x H x D) [mm]	480 x 590 x200
5	Weight (kg)	40
6	Cooling	Smart Fan Cooling

Tabel 10: Spesifikasi GoodWe GWK25K-MT

Untuk mengkonversi semua modul, dibutuhkan 12 *inverter* dengan total daya 300 kWp. Dari hasil ini, didapatkan rasio DC/AC sebagai berikut.

$$\text{Rasio} \frac{DC}{AC} = \frac{356,4}{300} = 1,19$$

Dari perhitungan di atas, nilai 1,19 yang lebih kecil dari 1,25 merupakan nilai yang cukup untuk menghindari kehilangan daya yang terlalu besar saat proses pengkonversian atau yang sering disebut dengan *clipping loss*.

3. Kabel

Dalam pemilihan kabel, diperlukan penyesuaian dengan arus maksimum yang mengalir untuk menghindari kerusakan. Pada pemasangan ini, diperlukan dua jenis kabel yaitu kabel DC dan kabel AC dengan perhitungan sebagai berikut.

a. Kabel DC

Arus listrik yang disusun seri pada penelitian ini adalah 10,95 A sehingga kapasitas hantar arusnya adalah sebagai berikut.

$$KHA [A] = 125\% \times 10,95 = 13,69 A$$

Berdasarkan nilai KHA di atas, penulis memilih 10 AWG dengan kapasitas arus 15 A dengan resistansi 3,27 Ω /Km dan luas penampang 5,26 mm². Untuk mengujinya, perlu dihitung apabila terjadi drop tegangan pada kabel terjauh yaitu 165 m. Kalkulasi apabila terjadi drop tegangan adalah sebagai berikut.

$$\text{Drop Tegangan DC } [V] = 2 \times 165 \times 10,95 \times \frac{3,27}{1000} = 11,81 V$$

$$\text{Drop Tegangan } [\%] = \frac{11,81}{698,7} \times 100\% = 1,69\%$$

Dari persentase di atas, kabel tersebut dianggap layak karena berada di bawah 2%.

b. Kabel AC

Arus keluaran maksimum *inverter* adalah 40 A sehingga kapasitas hantar arusnya adalah sebagai berikut.

$$KHA [A] = 125\% \times 40 = 50 A$$

Berdasarkan nilai KHA di atas, penulis memilih kabel listrik NYAF dengan kapasitas arus 135 A dengan resistensi 0,554 Ω /Km dan luas penampang 35 mm². Untuk mengujinya, perlu dihitung apabila terjadi drop tegangan pada kabel berjarak 60 m. Kalkulasi apabila terjadi drop tegangan adalah sebagai berikut.

$$Drop\ Tegangan\ AC [V] = \sqrt{3} \times 60 \times 40 \times \frac{0,554}{1000} = 2,3 V$$

$$Drop\ Tegangan [\%] = \frac{2,3}{400} \times 100\% = 0,57 \%$$

Dari persentase di atas, kabel tersebut dianggap layak karena berada di bawah 1%

4. MCB

MCB sebagai komponen proteksi berperan penting apabila arus melewati kapasitas hantar dari kabel. Pada perancangan ini, terdapat dua MCB yaitu untuk DC dan AC sebagai berikut.

a. MCB DC

Dari spesifikasi modul surya, didapatkan arus hubung singkat yang dihasilkan adalah 11,5 A sehingga kapasitas MCB adalah sebagai berikut.

$$Rating\ Arus\ MCB [A] = 125\% \times 11,5 = 14,375 A$$

Berdasarkan nilai arus MCB di atas, penulis menggunakan MCB dengan kapasitas 16 A.

b. MCB AC

Dari spesifikasi *inverter*, didapatkan arus maksimum yang dihasilkan adalah 40 A sehingga kapasitas MCB adalah sebagai berikut.

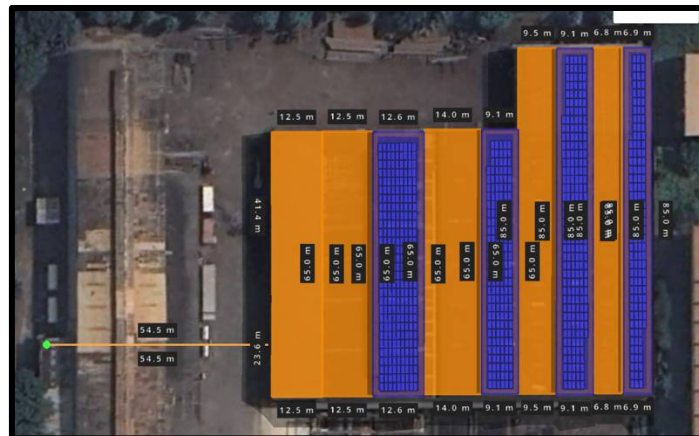
$$\text{Rating Arus MCB [A]} = 125\% \times 40 = 50 \text{ A}$$

Berdasarkan nilai arus MCB di atas, penulis menggunakan MCB dengan kapasitas 60 A.

4.2.3 Hasil Perancangan

Hasil perancangan PLTS Atap pada Pabrik PT. KBI adalah sebagai berikut:

1. Konstruksi



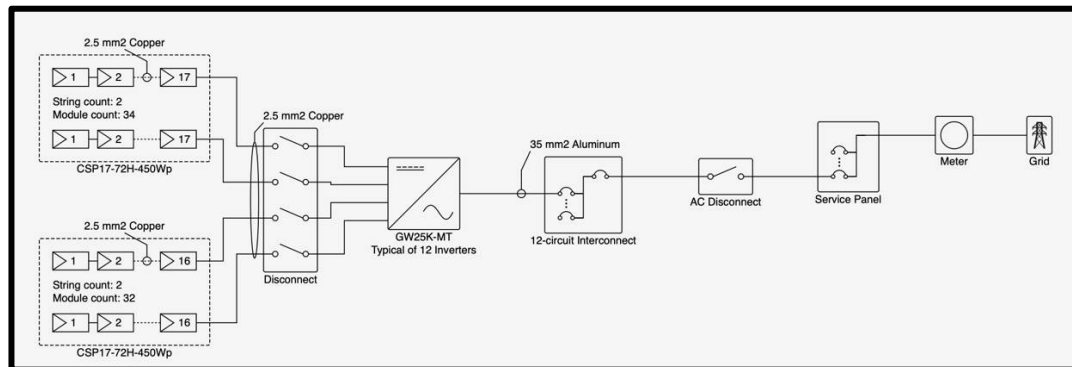


Gambar 27: Konstruksi 3D Perancangan PLTS Atap Parik PT. KBI

No.	Parameter	Ukuran	Satuan
1	Luas Atap Tersedia	2771,95	m ²
2	Tinggi Panel	8,5	m
3	Luas Panel	567,3; 167,36; 480,36; 302,13	m ²
4	Sudut Kemiringan	6,8; 8,1; 8,6; 11,47	°
5	Sudut Azimuth	50	°
7	Panjang Kabel DC Maksimum	165	m
8	Panjang Kabel AC Maksimum	60	m

Tabel 11: Rekapitulasi Konstruksi

2. Kelistrikan



Gambar 28: *Single Line Diagram* PLTS Atap Pabrik PT. KBI

No	Komponen	Parameter	Nilai	Satuan
1	Panel Surya	Luas Pemasangan	1517,15	m ²
		Kapasitas PLTS	356,4	kWp
		Kapasitas Panel	450	Wp
		Jumlah	792	Unit
		Tegangan String	698,7	V _{DC}
	Panel Surya	Arus String	10,95	A _{DC}
2	Inverter	Kapasitas	25	kW
		Jumlah	12	Unit

2	Inverter	Tegangan Output	400	V_{AC}
		Arus Output	40	A_{AC}
3	Kabel DC	Kapasitas	15	A
		Resistansi	3,27	Ω/km
	Kabel DC	Luas	5,26	mm^2
4	Kabel AC	Kapasitas	135	A
		Resistansi	0,554	Ω/km
		Luas	35	mm^2
5	MCB DC	Kapasitas	16	A
6	MCB AC	Kapasitas	60	A

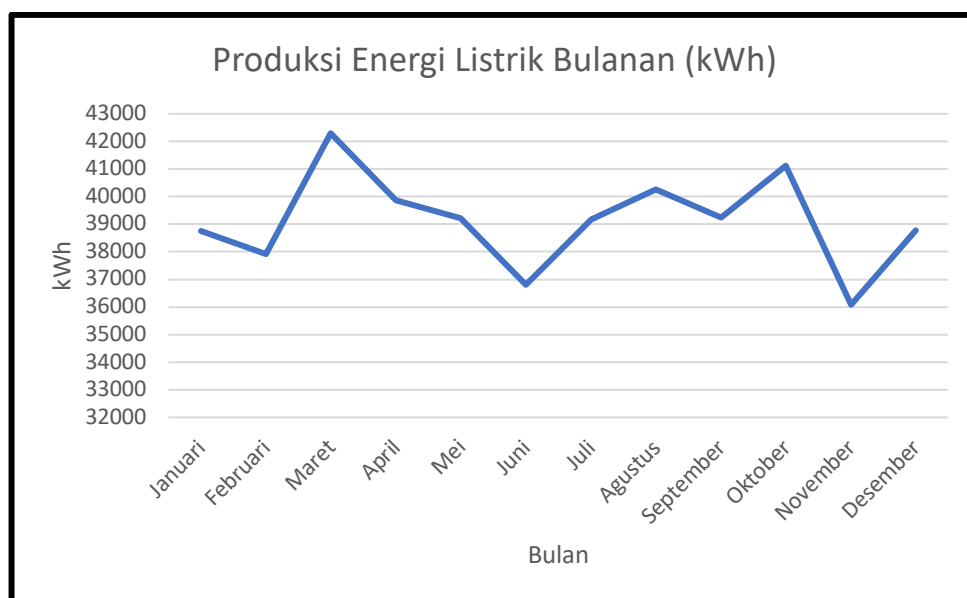
Tabel 12: Rekapitulasi Kelistrikan

3. Produksi

No.	Bulan	Produksi Energi Listrik (kWh)
1	Januari	38761,3
2	Februari	37921,8
3	Maret	42294,7
4	April	39872,7
5	Mei	39217,4
6	Juni	36805,4

No.	Bulan	Produksi Energi Listrik (kWh)
7	Juli	39179,7
8	Agustus	40258,2
9	September	39246,8
10	Oktober	41121,1
11	November	36082,7
12	Desember	38765,8
Total		469527,6
Rata-rata		39127,3

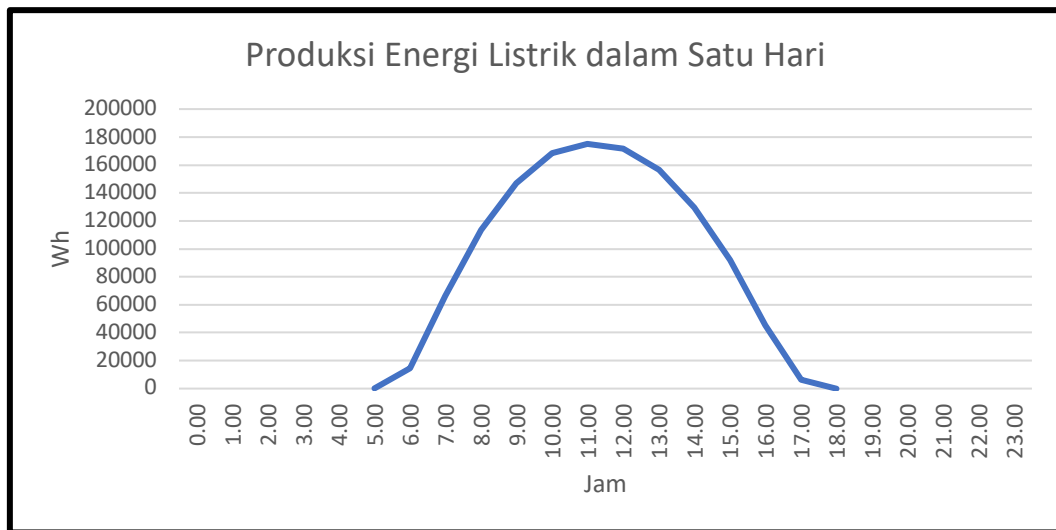
Tabel 13: Produksi Energi Listrik Bulanan



Gambar 29: Produksi Energi Listrik Bulanan

No.	Waktu	Energi Listrik (kWh)
1	05:00	0,13
2	06:00	14,44
3	07:00	66,40
4	08:00	113,74
5	09:00	146,97
6	10:00	168,54
7	11:00	175,09
8	12:00	171,60
9	13:00	156,42
10	14:00	129,48
11	15:00	91,48
12	16:00	45,34
13	17:00	6,43
14	18:00	0,13
Total		1286,61

Tabel 14: Produksi Energi Listrik dalam Satu Hari

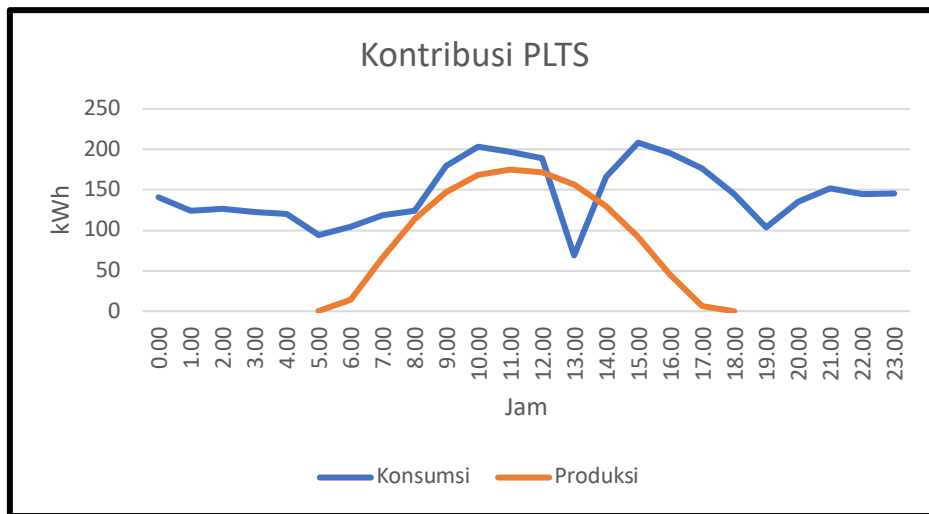


Gambar 30: Produksi Energi Listrik dalam Satu Hari

4.3 Analisis Kelayakan Teknis

4.3.1 Kontribusi

Pada penelitian ini, sistem PLTS dirancang pada atap Pabrik PT. KBI dengan kapasitas 356 kWp. Sistem PLTS ini dapat menghasilkan energi listrik sebesar 1287 kWh per harinya atau 37% dari konsumsi harian. Perbandingan energi yang dihasilkan dan diterima adalah sebagai berikut.



Gambar 31: Kontribusi Energi Listrik

Berdasarkan hasil perbandingan di atas, PLTS Atap berkapasitas 356 kWp yang mampu berkontribusi sebanyak 36,9% dianggap layak karena berhasil mengurangi konsumsi energi dan menghemat biaya tagihan listrik.

4.3.2 Aliran Daya

Berdasarkan rangkaian panel surya pada rancangan PLTS atap Pabrik PT. KBI, besar tegangan yang dialirkan dari satu string berisi 17 modul adalah 698,7 V dan pada string berisi 16 modul adalah 657,6 V. Dari total kapasitas daya yang sebesar 356 kWp, ketika mengalami konversi dari DC ke AC melalui *inverter* mengalami perubahan nilai menjadi 300 kWp. Nilai rasio DC/AC yang dihasilkan adalah 1,19 yang dinilai bagus untuk menghindari *clipping loss* pada nilai 1,25.

Kabel DC yang dipilih oleh penulis adalah kabel 10 AWG dengan kapasitas arus 15 A dengan resistansi $3,27 \Omega/\text{Km}$ dan luas penampang $5,26 \text{ mm}^2$. Nilai drop tegangan kabel ini adalah 1,69% yang dinilai bagus karena berada di bawah batas toleransi yaitu 2%. Kabel DC yang dipilih penulis adalah kabel listrik NYAF dengan kapasitas arus 135 A dengan resistensi $0,554 \Omega/\text{km}$ dan luas penampang 35 mm^2 . Nilai drop tegangan kabel ini adalah 0,57% yang dinilai bagus karena berada di bawah batas toleransi yaitu 3%. Total drop tegangan yang dihasilkan adalah sebesar 2,26% yang berada di bawah batas toleransi yaitu 3%.

Untuk memasang sistem PLTS secara on-grid tegangan keluaran PLTS harus sama dengan tegangan jaringan distribusi, frekuensi sistem PLTS harus sama dengan frekuensi jaringan distribusi, dan harus ada urutan fasa yang sesuai. Dalam penelitian ini, tegangan keluaran inverter adalah 400 V, yang sama dengan tegangan jaringan distribusi yang turun dari 20 kV menjadi 400 V. Setelah itu, frekuensi sistem PLTS juga telah disinkronisasi dengan frekuensi listrik di Indonesia, yaitu 50 Hz. Berdasarkan analisis aliran daya, sistem PLTS Atap Pabrik PT. KBI dinilai layak untuk dibangun.

4.3.3 Hubung Singkat

Dalam kelistrikan, terkadang terjadi gangguan pada arus yang melonjak yang menyebabkan penurunan kualitas penghantar. Maka dari itu, perlu disiapkan MCB sebagai komponen proteksi pada kedua sisi, yaitu DC dan AC. Arus hubung singkat pada panel surya adalah 11,5 A sehingga sisi DC dipasang MCB dengan kapasitas 16 A di antara *string* dan *inverter*. Panel surya bekerja pada arus maksimum 10,95 A yang lebih kecil dari arus hubung singkat sehingga akan jarang

terjadi gangguan. Arus maksimum dari *inverter* adalah 40 A sehingga sisi AC dipasang MCB dengan kapasitas 60 A. Dari perancangan di atas, sistem PLTS yang penulis rancang dianggap layak untuk mengatasi gangguan hubung singkat.

4.3.4 Kestabilan

Apabila terjadi gangguan, sistem kelistrikan akan melakukan penstabilan. Syarat agar penstabilan bisa dilakukan adalah dengan menyamakan tegangan dan frekuensi dari sistem PLTS dengan sistem pusat. Pada perancangan ini, penulis menggunakan *inverter* tiga fasa dengan keluaran tegangan 400 V dan frekuensi 50 Hz yang di mana sudah tersinkronisasi dengan sistem listrik KDL yaitu listrik tiga fasa dengan frekuensi 50 Hz dan tegangan 20 kV yang diturunkan ke 400 V. Dengan pembahasan di atas, sistem PLTS yang penulis rancang dianggap layak.

4.4 Analisis Ekonomi

4.4.1 Potensi

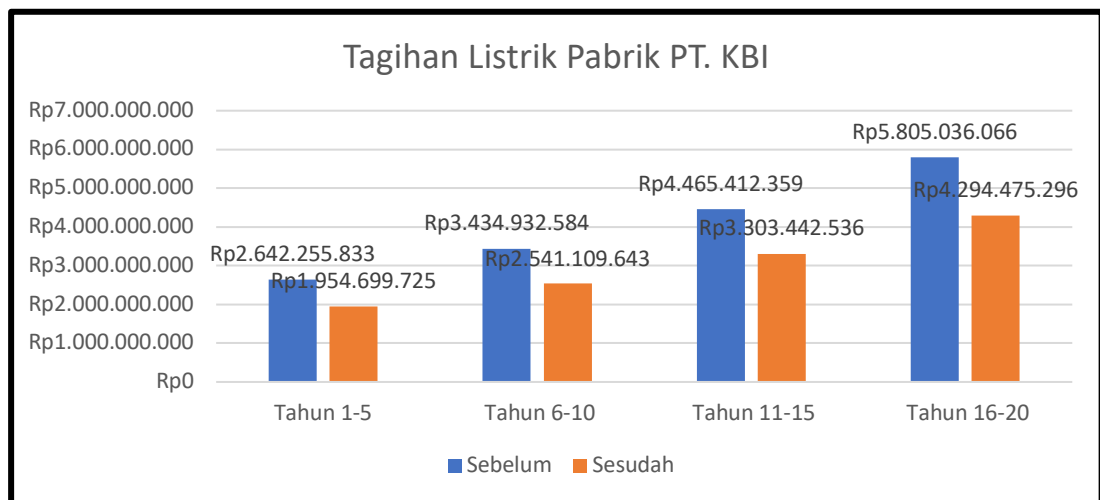
Pabrik PT. KBI menggunakan listrik distribusi KDL dengan paket I3TM dengan kapasitas 630 kVA dan *double* tarif. Tarif ganda berarti ada perbedaan harga ketika Waktu Beban Puncak (WBP) dari pukul 17.00-22.00 dan Luar Waktu Beban Puncak (LWBP). Tarif ketika WBP adalah Rp1.844,00 dan ketika LWBP adalah Rp1.317,00. Selain itu, normalnya tagihan listrik setiap lima tahun akan mengalami kenaikan sebesar 30%. Tagihan listrik sebelum dan setelah pemasangan PLTS adalah sebagai berikut.

No	Kategori	Daya (kWh)	Harga Satuan	Biaya
1	WBP	26581	Rp1844	Rp49.015.813
2	LWBP	81498	Rp1317	Rp107.333.080
3	kVArh	16.555,8	Rp1405	Rp23.260.933
Trafo				Rp16.726.500,0
PPN				Rp17.960.982
PPJ				Rp5.890.679
Total				Rp220.187.986

Tabel 15: Tagihan sebelum pemasangan PLTS

No	Kategori	Daya (kWh)	Harga Satuan	Biaya
1	WBP	26377	Rp1844	Rp48.639.534
2	LWBP	41817	Rp1317	Rp55.072.635
3	kVArh	16556	Rp1405	Rp23.260.899
Trafo+Materai				Rp16.736.500,0
PPN				Rp12.697.307
<i>Capacity Charge</i>				Rp2.173.050
PPJ				Rp4.311.718
Total				Rp162.891.644

Tabel 16: Tagihan setelah pemasangan PLTS



Gambar 32: Perbandingan tagihan listrik

Dari grafik di atas, dapat dilihat terdapat penghematan tagihan yaitu sebesar 26,02% lebih hemat dari tagihan sebelum memasang PLTS atap.

Tahun	Nilai
1-5	Rp687.556.108
6-10	Rp893.822.941
11-15	Rp1.161.969.823
16-20	Rp1.510.560.770
Total	Rp4.253.909.642

Tabel 17: Penghematan tagihan per lima tahun

4.4.2 Modal

Untuk merealisasikan perancangan PLTS *on-grid* pada atap Pabrik PT. KBI, diperlukan modal awal investasi yang diharapkan dapat menghemat tagihan pada jangka waktu 20 tahun. Pehitungan modal awal investasi PLTS ini adalah sebagai berikut.

Komponen	Tipe	Jumlah	Harga	Total
Modul Surya	CSP17-72H-450Wp	792	Rp 2.900.000,00	Rp 2.296.800.000,00
Inverter	GW25K-MT	12	Rp 37.500.000	Rp 450.000.000,00
Kabel DC	5,26 mm-15A	7963	Rp 25.000,00	Rp 199.075.000,00
Kabel AC	35 mm-135A	257	Rp 68.000,00	Rp 17.476.000,00
MCB DC	TOMZN 16A	48	Rp 108.000,00	Rp 5.184.000,00
MCB AC	Schneider 60A	12	Rp 350.427,00	Rp 4.205.124,00
Biaya Utama				Rp 2.972.740.124,00
Komponen Pelengkap				Rp 1.952.280.000,00
Operasional				Rp 900.000.000,00
Total Biaya				Rp 5.825.020.124,00

Tabel 18: Modal awal investasi

Selain komponen utama, terdapat komponen pelengkap yang diambil 85% dari modul surya dan biaya operasional untuk penggantian *inverter* setiap 10 tahun. Maka dari itu, modal awal investasi untuk jangka waktu 20 tahun adalah Rp5.825.020.124,00.

4.4.3 Kelayakan Ekonomi

Untuk menguji kelayakan ekonomi, penulis menggunakan metode *Levelized cost of Energi* atau LCOE dan metode *Break Even Point* (BEP).

Pembahasan dari kedua metode ini adalah sebagai berikut:

1. *Levelized Cost of Energy* (LCOE)

Nilai LCOE merupakan faktor penentu dalam menentukan biaya tarif yang harus dibayar untuk memperoleh energi listrik dari pembangkit listrik yang telah direncanakan. Perhitungan nilai LCOE dilakukan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$LCOE = \frac{5825020124}{\sum_{t=1}^{20} \frac{469528}{(1 + 0,05)^{t-1}}} = Rp948,09/kWh$$

Perhitungan di atas disesuaikan dengan modal yang dibutuhkan yaitu Rp5.825.020.124,00 dengan hasil energi sebesar 469.528 kWh dan degradasi kualitas panel surya 0,5%. Nilai LCOE yaitu Rp948,09/kWh dianggap layak karena berada di bawah tarif KDL yaitu Rp1317,00/kWh.

2. *Break Even Point* (BEP)

Break Even Point digunakan untuk menemukan durasi hingga perusahaan mendapatkan modalnya kembali. Perhitungan BEP untuk perancangan ini adalah sebagai berikut.

Tahun	Investasi	Penghematan	Selisih
0	Rp 5.825.020.124	0	-Rp 5.825.020.124
1	-	Rp 687.556.108	-Rp 5.137.464.016

Tahun	Investasi	Penghematan	Selisih
2	-	Rp 687.556.108	-Rp 4.449.907.908
3	-	Rp 687.556.108	-Rp 3.762.351.799
4	-	Rp 687.556.108	-Rp 3.074.795.691
5	-	Rp 687.556.108	-Rp 2.387.239.583
6	-	Rp 893.822.941	-Rp 1.493.416.642
7	-	Rp 893.822.941	-Rp 599.593.702
8	-	Rp 893.822.941	Rp 294.229.239
9	-	Rp 893.822.941	Rp 1.188.052.180
10	-	Rp 893.822.941	Rp 2.081.875.120
11	-	Rp 1.161.969.823	Rp 3.243.844.943
12	-	Rp 1.161.969.823	Rp 4.405.814.766
13	-	Rp 1.161.969.823	Rp 5.567.784.589
14	-	Rp 1.161.969.823	Rp 6.729.754.412
15	-	Rp 1.161.969.823	Rp 7.891.724.235
16	-	Rp 1.510.560.770	Rp 9.402.285.005
17	-	Rp 1.510.560.770	Rp 10.912.845.774
18	-	Rp 1.510.560.770	Rp 12.423.406.544
19	-	Rp 1.510.560.770	Rp 13.933.967.314
20	-	Rp 1.510.560.770	Rp 15.444.528.084

Tabel 19: *Break Even Point* Perancangan PLTS *on-grid* Atap Pabrik PT. KBI

Setelah dilakukan perhitungan, PLTS *on-grid* Atap Pabrik PT. KBI berkapasitas 356 kWp akan mendapatkan modalnya kembali pada tahun ke-8 dalam investasi jangka waktu 20 tahun. Maka dari itu, perancangan ini dianggap layak.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya On-Grid pada Atap Gedung Pabrik PT. Karunia Berca Indonesia, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Perancangan sistem PLTS *on-grid* pada atap pabrik PT. KBI menggunakan modul surya jenis *monocrystalline* berkapasitas 450 Wp sebanyak 792 unit sehingga menghasilkan kapasitas 356 kWp dengan 12 *inverter grid-tie* berkapasitas 25 kW dengan total daya 300 kWp.
2. Perancangan sistem PLTS *on-grid* pada atap pabrik PT. KBI berkapasitas 356 kWp memproduksi 1.287 kWh per harinya atau 37% dari konsumsi harian dan dapat menghemat tagihan 26,02% per tahun dari tagihan sebelum pemasangan.
3. Secara teknis, perancangan sistem PLTS *on-grid* pada atap pabrik PT. KBI dianggap layak melalui uji aliran daya, hubung singkat, dan kestabilan.
4. Secara ekonomi, perancangan sistem PLTS *on-grid* pada atap pabrik PT. KBI dengan modal investasi Rp5.825.020.124,00 dianggap layak karena memiliki nilai LCOE Rp948,09/kWh dari biaya distribusi KDL

Rp1317/kWh dan BEP dalam 8 tahun dengan jangka waktu investasi 20 tahun.

5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya antara lain:

1. Dengan berkembang teknologi, diharapkan dapat menemukan spesifikasi yang lebih efisien.
2. Pengambilan data diharapkan lebih terbaharui sehingga dapat menghitung beban daya lebih akurat.

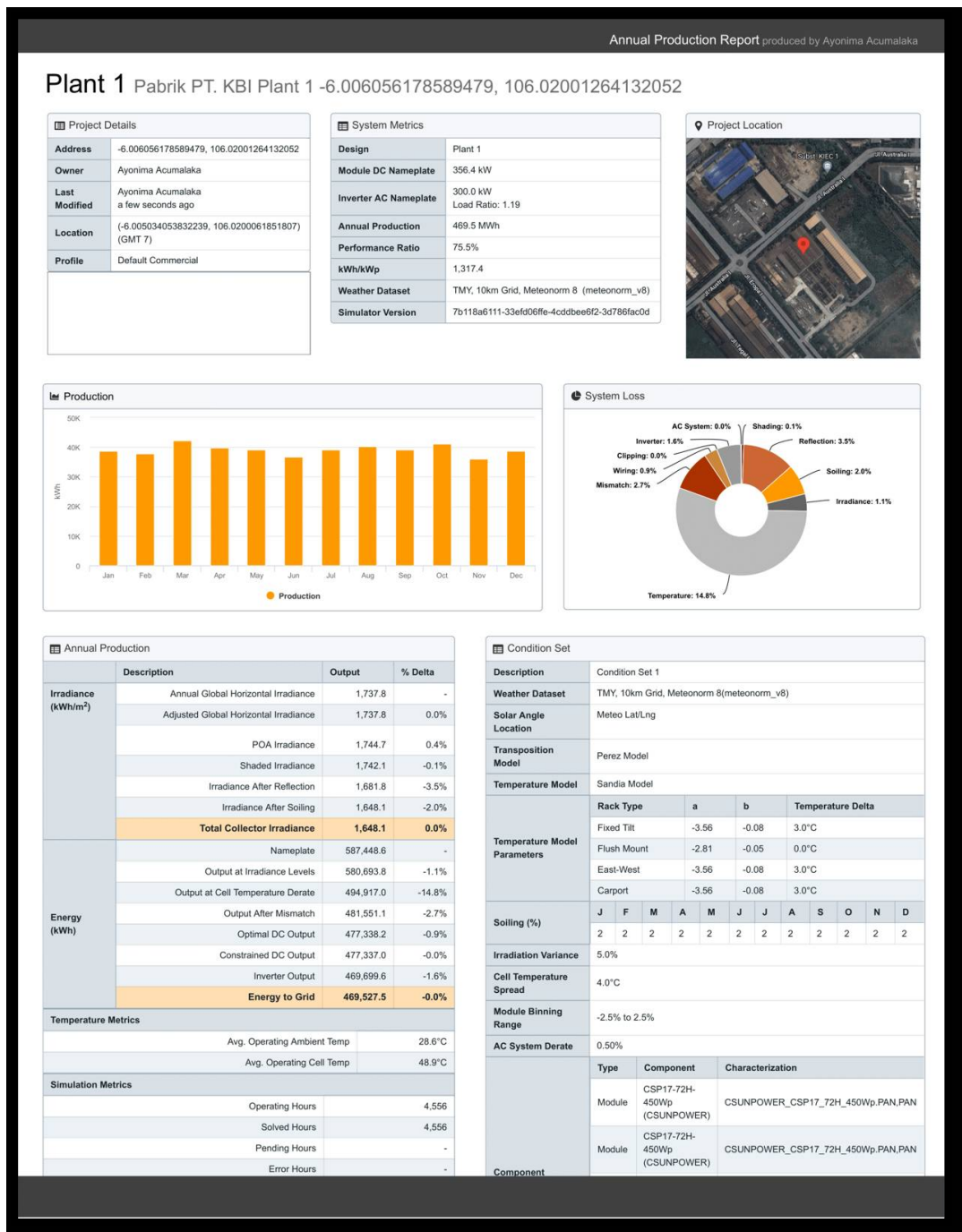
DAFTAR PUSTAKA

- Agriani, J. P. 2022. STUDI PERENCANAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA ATAP PADA GEDUNG PABRIK PT. KARUNIA BERCA INDONESIA (KBI).
- Giancoli. 1991. Physics. principles with applications. Prentice Hall.
- Indonesia Clean Energy Development II. 2020. Panduan Perencanaan dan Pemanfaatan PLTS Atap di Indonesia.
- Irwan, F. A. 2023. ANALISIS ONGRID PANEL SURYA PADA SEKTOR RUMAH TANGGA TERHADAP KONSUMSI LISTRIK PLN.
- Miliki potensi EBT 3.686 GW, Sekjen Rida: Modal Utama jalankan transisi energi Indonesia. ESDM. (n.d.). <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/miliki-potensi-ebt-3686-gw-sekjen-rida-modal-utama-jalankan-transisi-energi-indonesia>*
- Nahela, S. F. 2020. Analisa Unjuk Kerja Grid Tied Inverter Terhadap Pengaruh Radiasi Matahari dan Suhu PV pada PLTS On-Grid.
- Singh. 2013. Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review. Energy.
- SUDRANTO, D. A. 2021. PERANCANGAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA ATAP ON-GRID PADA APARTEMEN.
- SUDRANTO, D. A. 2021. PERANCANGAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA ATAP ON-GRID PADA APARTEMEN.

- Ummah, H., Setiati, R., Dadi, Y., Ariq, M., & Malinda, M. 2021. *Solar energy as natural resource utilization in urban areas: Solar energy efficiency literature review. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 780. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/780/1/012007>.
- Walter, M., Warren, E., McKone, J., Boettcher, S., Mi, Q., Santori, E., & Lewis, N. (2010). *Solar water splitting cells.. Chemical reviews*, 110 11, 6446-73 . <https://doi.org/10.1021/cr1002326>.
- Yusgiantoro. 2004. *Energi dan Keberlanjutan: Menuju Masa Depan Energi yang Berkelanjutan*.

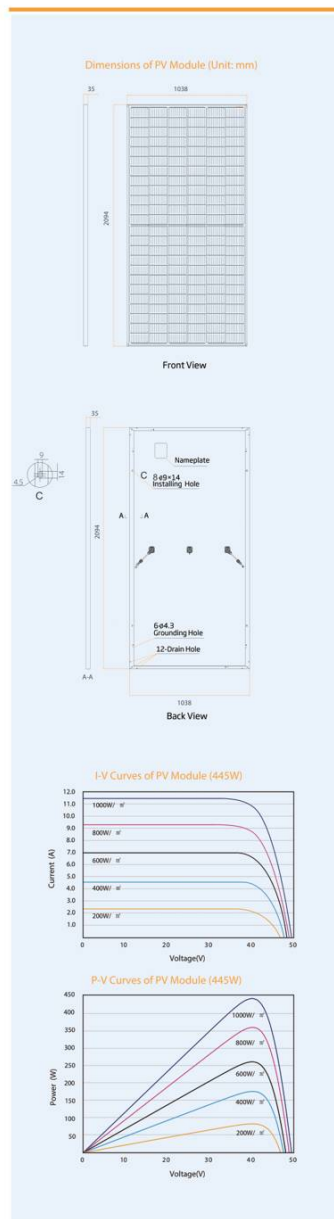
LAMPIRAN

Laporan Hasil Simulasi PLTS



Gambar 1: Laporan hasil simulasi PLTS

Spesifikasi Modul Surya



Electrical Performance (STC)

Maximum Power (Pmax)	435	440	445	450
Maximum Power Voltage (Vmp)	40.5	40.7	40.8	41.0
Maximum Power Current (Imp)	10.74	10.82	10.90	10.98
Open-circuit Voltage (Voc)	49.0	49.2	49.4	49.6
Short-circuit Current (Isc)	11.31	11.39	11.46	11.53
Module Efficiency(%)	20.01%	20.24%	20.47%	20.70%

STC: Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5.
*Measuring tolerance: 0~±5W

Electrical Data (NMOT)

Maximum Power (Pmax)	329	333	336	340
Maximum Power Voltage (Vmp)	38.2	38.4	38.5	38.7
Maximum Power Current (Imp)	8.61	8.68	8.73	8.80
Open-circuit Voltage (Voc)	46.3	46.4	46.6	46.8
Short-circuit Current (Isc)	9.11	9.17	9.23	9.28

NMOT: Irradiance at 800W/m², Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1m/s.

Mechanical Data

Solar Cells	Monocrystalline (166mm)
Cell Orientation	144 [2 x (12 x 6)]
Module Dimensions	2094*1038*35 mm
Weight	23.5kg
Glass	3.2mm (0.13 inches), High Transmission, AR Coated Heat Strengthened Glass
Encapsulant Material	EVA
Backsheet	White
Frame	35 mm (1.38 inches) Anodized Aluminium Alloy
J-Box	IP68
Output Cables (including Connector)	Photovoltaic Technology Cable 4.0mm² (0.006 inches²), Length: 300mm
Connector	MC4 Compatible

Temperature Ratings

NMOT (Nominal Module Operating Temperature)	45 °C (±2 °C)
Temperature Coefficient of Pmax	-0.33%/°C
Temperature Coefficient of Voc	-0.27%/°C
Temperature Coefficient of Isc	+0.050%/°C

(Do not connect Fuse in Combiner Box with two or more strings in parallel connection)

Maximum Ratings

Operational Temperature	-40 °C ~ +85 °C
Maximum System Voltage	1500V DC (IEC)
Maximum Overcurrent Protection	20A

Warranty

12 year Product Workmanship Warranty
25 year Power Warranty

Packaging

Modules per box: 31 pieces
40' Container: 682 pieces

Gambar 2: Spesifikasi modul surya

Spesifikasi Inverter

SMT Series

GOODWE

Technical Data	GW25K-MT	GW29.9K-MT	GW30K-MT	GW36K-MT
Input				
Max. Input Voltage (V)	1100	1100	1100	1100
MPPT Operating Voltage Range (V)	200 ~ 950	200 ~ 950	200 ~ 950	200 ~ 950
Start-up Voltage (V)	180	180	180	180
Nominal Input Voltage (V)	600	600	600	600
Max. Input Current per MPPT (A)	30	30	30	30
Max. Short Circuit Current per MPPT (A)	37.5	37.5	37.5	37.5
Number of MPP Trackers	3	3	3	3
Number of Strings per MPPT	2	2	2	2
Output				
Nominal Output Power (kW)	25.0	29.9	30.0	36.0 ¹
Nominal Output Apparent Power (kVA)	25.0	29.9	30.0	36.0 ¹
Max. AC Active Power (kW)	27.5 ²	29.9	33.0 ²	36.0 ²
Max. AC Apparent Power (kVA)	27.5 ³	29.9	33.0 ³	36.0 ³
Nominal Output Voltage (V)	400 ⁴ , 3L / N / PE or 3L / PE	400, 3L / N / PE or 3L / PE	400 ⁴ , 3L / N / PE or 3L / PE	400 ⁴ , 3L / N / PE or 3L / PE
Output Voltage Range (V)	320 ~ 460	320 ~ 460	320 ~ 460	320 ~ 460
Nominal AC Grid Frequency (Hz)	50 / 60	50 / 60	50 / 60	50 / 60
AC Grid Frequency Range (Hz)		47.5 ~ 51.5 / 57.0 ~ 61.8		
Max. Output Current (A)	40.0	43.3	48.0	53.3
Power Factor		~ 1 (Adjustable from 0.8 leading to 0.8 lagging)		
Max. Total Harmonic Distortion	<3%	<3%	<3%	<3%
Efficiency				
Max. Efficiency	98.7%	98.8%	98.8%	98.8%
European Efficiency	98.4%	98.5%	98.5%	98.5%
Protection				
PV String Current Monitoring	Integrated	Integrated	Integrated	Integrated
PV Insulation Resistance Detection	Integrated	Integrated	Integrated	Integrated
Residual Current Monitoring	Integrated	Integrated	Integrated	Integrated
PV Reverse Polarity Protection	Integrated	Integrated	Integrated	Integrated
Anti-islanding Protection	Integrated	Integrated	Integrated	Integrated
AC Overcurrent Protection	Integrated	Integrated	Integrated	Integrated
AC Short Circuit Protection	Integrated	Integrated	Integrated	Integrated
AC Overvoltage Protection	Integrated	Integrated	Integrated	Integrated
DC Switch	Integrated ⁵	Integrated ⁵	Integrated ⁵	Integrated ⁵
DC Surge Protection		Type III (Type II Optional)		
AC Surge Protection		Type III (Type II Optional)		
AFCI	Optional	Optional	Optional	Optional
Emergency Power Off	Optional ⁶	Optional ⁶	Optional ⁶	Optional ⁶
Remote Shutdown	Optional	Optional	Optional	Optional
PID Recovery	Optional	Optional	Optional	Optional
General Data				
Operating Temperature Range (°C)	-30 ~ +60	-30 ~ +60	-30 ~ +60	-30 ~ +60
Relative Humidity	0 ~ 100%	0 ~ 100%	0 ~ 100%	0 ~ 100%
Max. Operating Altitude (m)	3000	3000	3000	3000
Cooling Method	Smart Fan Cooling	Smart Fan Cooling	Smart Fan Cooling	Smart Fan Cooling
User Interface		LED, LCD (Optional), WLAN + APP		
Communication		RS485, WiFi or 4G or PLC(Optional) ⁷		
Communication Protocols		Modbus-RTU (SunSpec Compliant)		
Weight (kg)	40.0	40.0	40.0	40.0
Dimension (W x H x D mm)	480 x 590 x 200	480 x 590 x 200	480 x 590 x 200	480 x 590 x 200
Topology	Non-isolated	Non-isolated	Non-isolated	Non-isolated
Self-consumption at Night (W)	<1	<1	<1	<1
Ingress Protection Rating	IP65	IP65	IP65	IP65
DC Connector	MC4 (Max. 6mm ²)	MC4 (Max. 6mm ²)	MC4 (Max. 6mm ²)	MC4 (Max. 6mm ²)
AC Connector		OT / DT Terminal (Max. 25mm ²)		

*1: 33kW for Italy, 36kW for other country.

*2: For Brazil and Chile Max. AC Active Power (kW): GW25K-MT is 25; GW30K-MT is 30; GW36K-MT is 36.

*3: For Brazil and Chile Max. AC Apparent Power (kVA): GW25K-MT is 25; GW30K-MT is 30; GW36K-MT is 36.

*4: For Brazil Nominal Output Voltage is 380V, 3L / N / PE or 3L / PE.

*5: For Australia DC Switch is PV2 (Integrated).

*6: For Indian Emergency Power Off: Optional.

*7: For Brazil Communication is RS485, WiFi, USB, PLC (Optional).

*: Optional functions or devices are purchased separately.

*: Please visit GoodWe website for the latest certificates.

www.goodwe.com

Gambar 3: Spesifikasi inverter

Data Iradiasi

GLOBAL SOLAR ATLAS BY WORLD BANK GROUP

PV ELECTRICITY AND SOLAR RADIATION

PV system configuration



Pv system: Medium size comercial

Azimuth of PV panels: 50°

Tilt of PV panels: 9°

Installed capacity: 356.4 kWp

Annual averages

Total photovoltaic power output and Global tilted irradiation

485.488

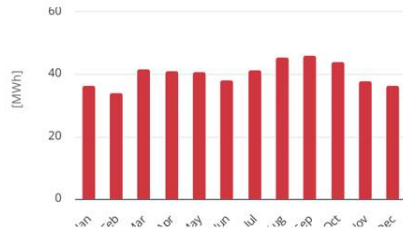
MWh per year

1751.9

kWh/m² per year

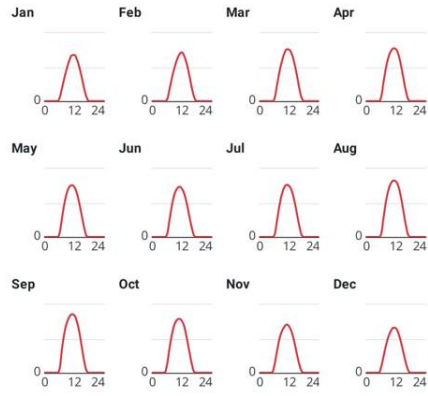
Monthly averages

Total photovoltaic power output



Average hourly profiles

Total photovoltaic power output [kWh]



UTC+07

Average hourly profiles

Total photovoltaic power output [kWh]

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0 - 1												
1 - 2												
2 - 3												
3 - 4												
4 - 5												
5 - 6										0.310	1.197	0.119
6 - 7	11.983	6.804	11.022	14.879	14.486	10.810	8.973	11.052	14.380	30.825	31.233	20.833
7 - 8	48.498	44.593	59.899	71.441	71.368	64.401	61.243	72.942	90.395	91.306	80.459	61.713
8 - 9	87.469	86.910	109.387	124.396	125.390	118.206	117.075	132.454	148.630	142.548	125.690	101.830
9 - 10	122.163	122.782	147.238	162.265	163.663	157.181	158.458	173.759	185.392	177.339	152.952	133.709
10 - 11	151.074	152.032	176.546	183.932	184.049	176.445	182.975	196.678	205.938	193.479	169.058	154.485
11 - 12	168.131	172.173	190.183	193.419	199.664	184.065	190.887	206.546	214.282	197.519	176.699	164.951
12 - 13	169.024	178.652	188.027	190.660	182.758	176.885	185.834	203.215	210.068	189.704	167.777	162.751
13 - 14	152.881	163.610	171.194	170.209	159.880	156.196	167.351	184.899	187.170	167.634	146.946	144.378
14 - 15	123.826	134.918	138.901	132.487	121.929	121.188	132.566	146.141	147.605	125.895	112.440	112.838
15 - 16	85.348	94.501	96.667	84.215	76.661	75.847	87.086	95.386	94.212	77.777	69.571	74.614
16 - 17	44.136	49.071	47.419	37.976	32.406	33.539	40.214	43.614	40.264	32.441	31.112	36.663
17 - 18	12.545	14.176	10.884	6.379	2.728	3.704	6.542	6.876	6.285	3.011	4.792	8.655
18 - 19												
19 - 20												
20 - 21												
21 - 22												
22 - 23												
23 - 24												
Sum	1,177	1,220	1,347	1,372	1,325	1,278	1,339	1,474	1,545	1,430	1,270	1,178

Gambar 4: Data iradiasi