

Analisis Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Gedung Laboratorium Terpadu Institut Teknologi Kalimantan

Arya Golong Sutejo¹, Mifta Nur Farid^{1*}, Happy Aprillia¹

¹Program Studi Teknik Elektro, Jurusan Teknologi Industri dan Proses, Institut Teknologi Kalimantan
Jl. Soekarno Hatta No. KM 15, Karang Joang, Kota Balikpapan, Kalimantan Timur
E-mail: miftanurfarid@lecturer.itk.ac.id

Naskah Masuk: 15 Juli 2022; Diterima: 28 Agustus 2023; Terbit: 31 Maret 2024

ABSTRAK

Abstrak - Kebutuhan akan energi listrik di Indonesia masih bergantung pada energi fosil, namun untuk mengurangi ketergantungan tersebut, penerapan Energi Baru Terbarukan (EBT) menjadi penting dengan target pemerintah mencapai 23% pada tahun 2025. Wilayah Kalimantan Timur di Indonesia memiliki potensi besar untuk memanfaatkan energi surya, sehingga penelitian ini merancang PLTS on-grid sebagai alternatif pemenuhan kebutuhan listrik Gedung Laboratorium Terpadu ITK, terhubung langsung ke jaringan PLN tanpa menggunakan baterai penyimpanan energi. Penelitian ini menganalisis daya listrik keluaran PLTS *on-grid* pada cuaca mendung dan cerah di Gedung Laboratorium Terpadu ITK, serta aspek ekonomi terhadap biaya tagihan listrik dengan mengujikan simulasi iradiasi matahari, temperatur, dan daya keluaran PLTS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa PLTS *on-grid* yang optimal pada atap Gedung Laboratorium Terpadu ITK menggunakan 5 inverter 50 KW dan 492 panel surya 480Wp, dipasang dalam 6 seri dan 19 paralel, dengan tingkat suplai daya sebesar 50,06%. Pada cuaca mendung, PLTS menghasilkan daya keluaran sebesar 17,614 kW dengan iradiasi 98 W/m², dan pada cuaca cerah, daya keluaran meningkat menjadi 224,95 kW dengan iradiasi 965 W/m² dan temperatur 28,5°C. Dari segi ekonomi, dengan waktu pengembalian modal selama 5 tahun 6 bulan dan modal awal Rp.1.513.700.309 serta perhitungan *performance ratio* (PR), diperoleh persentase sebesar 86% dengan energi tahunan minimal 70%-90%, sehingga disimpulkan PLTS *on-grid* layak dibangun sebagai bagian dari penerapan Energi Baru Terbarukan di Gedung Laboratorium Terpadu ITK.

Kata kunci: Energi Baru Terbarukan, Energi Listrik, PLTS On-Grid

ABSTRACT

Abstract - The need for electricity in Indonesia still relies on fossil energy, but to reduce this dependence, the implementation of Renewable Energy becomes crucial with the government's target to achieve 23% by 2025. The region of East Kalimantan in Indonesia has great potential for utilizing solar energy, thus this study designs an on-grid Solar Power Plant as an alternative for meeting the electricity demand of the Integrated Laboratory Building at ITK, connected directly to the PLN grid without using energy storage batteries. The research analyzes the electricity output of the on-grid PLTS during both cloudy and sunny weather at the Integrated Laboratory Building at ITK, as well as the economic aspect related to the electricity bill costs, by conducting simulations of solar irradiation, temperature, and PLTS output power. The research findings indicate that the optimal on-grid PLTS on the rooftop of the Integrated Laboratory Building at ITK utilizes 5 inverters of 50 KW and 492 solar panels of 480Wp, installed in 6 series and 19 parallel connections, achieving a power supply rate of 50.06%. During cloudy weather, the PLTS generates an output of 17.614 kW with an irradiation of 98 W/m², while on sunny days, the power output increases to 224.95 kW with an irradiation of 965 W/m² and a temperature of 28.5°C. From an economic perspective, based on a payback period of 5 years and 6 months, initial capital of Rp. 1,513,700,309, and the performance ratio (PR) calculation, the PLTS on-grid is concluded to be viable for implementation as part of the utilization of Renewable Energy at the Integrated Laboratory Building at ITK.

Keywords: Renewable Energy, Electrical Energy, On-Grid Solar Power Plant

Copyright © 2024 Universitas Muhammadiyah Jember.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan akan energi listrik di Indonesia tetap menjadi prioritas utama bagi masyarakat saat ini. Namun, sebagian besar energi yang digunakan di Indonesia masih berasal dari sumber non-terbarukan seperti energi fosil, seperti minyak bumi dan batu bara [1]. Hal ini menyebabkan semakin berkurangnya ketersediaan sumber daya energi fosil di Indonesia seiring berjalannya waktu. Untuk mengantisipasi dampak dari menipisnya sumber energi fosil, pemerintah telah menggagas penerapan Energi Baru

Terbarukan (EBT) sejak dicanangkannya kebijakan melalui PP Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional. Kebijakan ini menetapkan beberapa target untuk peran EBT dalam kontribusi energi nasional, di antaranya pada tahun 2025 EBT diharapkan menyumbang paling sedikit 23% dan pada tahun 2050 paling sedikit 31% dari total energi, sambil menurunkan peran minyak bumi menjadi kurang dari 25% pada tahun 2025 dan kurang dari 20% pada tahun 2050 [2]. Penggunaan Energi Baru Terbarukan di Indonesia menjadi hal yang sangat penting bagi pemerintah karena bukan hanya mengurangi ketergantungan pada energi fosil, tetapi juga untuk mencapai tujuan menjadi negara yang ramah lingkungan. Peraturan pemerintah dalam PP Nomor 79 Tahun 2014 juga menekankan pentingnya memaksimalkan penggunaan energi terbarukan dengan mempertimbangkan aspek ekonomi serta meminimalkan penggunaan minyak bumi [2].

Energi surya adalah salah satu bentuk Energi Baru Terbarukan yang memiliki potensi besar di Indonesia. Radiasi matahari di Indonesia berperan penting dalam kehidupan sehari-hari dan menjadi pendukung utama dalam berbagai sektor ekonomi dan lingkungan. Potensi energi surya di Indonesia dapat dilihat dari data penyinaran matahari, dimana terdapat variasi radiasi matahari di 18 lokasi yang berbeda di seluruh Indonesia. Rata-rata radiasi matahari harian di wilayah barat mencapai sekitar 4,5 kWh/m²/hari, sedangkan di wilayah timur mencapai sekitar 5,1 kWh/m²/hari dengan variasi berkisar 9-10%. Sebagai contoh, Provinsi Kalimantan Timur memiliki radiasi matahari harian rata-rata sekitar 4,78 kWh/m². Dengan potensi radiasi matahari yang tinggi, Indonesia memiliki potensi besar dalam pengembangan energi surya sebagai sumber energi alternatif [3], [4].

Salah satu institusi di Indonesia yang bergerak dalam pengembangan Energi Baru Terbarukan, khususnya energi surya, adalah Institut Teknologi Kalimantan (ITK) yang berlokasi di Kota Balikpapan, Provinsi Kalimantan Timur. Gedung Laboratorium Terpadu di ITK memiliki potensi untuk menerapkan pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi alternatif. Potensi daya yang dapat dihasilkan dari panel surya di area ITK diperkirakan mencapai sekitar 1263,3 kWh/kWp per tahun dengan iradiasi matahari harian sekitar 1594,8 kWh/m² per tahun [3]. Oleh karena itu, ITK memiliki potensi yang layak untuk mengimplementasikan energi surya sebagai sumber energi alternatif.

Pemanfaatan energi surya dapat dilakukan dalam dua sistem, yaitu sistem off-grid dan on-grid. Sistem off-grid membutuhkan baterai sebagai penyimpanan energi dari panel surya karena beroperasi secara mandiri [5]. Sementara itu, sistem on-grid tidak memerlukan baterai karena terhubung langsung dengan jaringan listrik utama [5]. Kedua sistem ini memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Sistem off-grid dapat berfungsi sebagai pembangkit listrik yang handal karena dapat diaplikasikan pada siang dan malam hari, namun memiliki kekurangan pada stabilitas daya yang dihasilkan. Di sisi lain, sistem on-grid memiliki kelebihan dalam menghasilkan energi listrik yang maksimal karena terhubung langsung dengan jaringan PLN dan dianggap paling ramah lingkungan serta bebas emisi [6].

Berdasarkan hasil penelitian, penerapan PLTS atap (rooftop) menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan PLTS di atas tanah (ground mounting). Pengamatan selama 7 hari menunjukkan bahwa PLTS atap menghasilkan total daya sebesar 1.129,91 Wh untuk kondisi berbeban dan 3.961,991 Wh untuk kondisi tanpa beban. Sedangkan PLTS di atas tanah menghasilkan total daya sebesar 1.064,83 Wh untuk kondisi berbeban dan 3.880,13 Wh untuk kondisi tanpa beban [7].

Berdasarkan fakta tersebut, penelitian ini akan melakukan perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) On-Grid pada atap Gedung Laboratorium Terpadu di Institut Teknologi Kalimantan. Penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan energi surya sebagai sumber energi dalam PLTS On-Grid, yang merupakan bagian dari penerapan Energi Baru Terbarukan. Dengan adanya PLTS On-Grid ini, diharapkan akan menjadi salah satu inovasi dalam pengembangan Energi Baru Terbarukan di lingkungan Institut Teknologi Kalimantan.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan salah satu contoh sumber energi baru dan terbarukan yang menggunakan teknologi untuk mengkonversi energi foton dari sinar matahari menjadi energi listrik. Proses konversi ini terjadi di PV modul yang terdiri dari sel surya, yang terbuat dari lapisan-lapisan tipis bahan murni seperti silikon (Si) dan bahan semi konduktor lainnya. Ketika bahan-bahan ini menerima energi foton dari matahari, elektron dalam struktur atomnya akan terangkat, menciptakan aliran elektron bebas, yang pada akhirnya menghasilkan arus listrik searah. Secara umum, matahari membawa dua bentuk energi, yaitu energi panas dan energi cahaya. Dari dua bentuk energi ini, dapat dibedakan menjadi dua sistem tenaga surya, yaitu sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan sistem Tenaga Panas Matahari (*solar thermal*) [8].

2.2. Performance Ratio

Performance Ratio (PR) atau disebut juga Indikator Kinerja (IK) adalah suatu metrik yang mengukur kualitas kinerja suatu sistem berdasarkan jumlah energi yang dihasilkan dalam satu tahun. Apabila nilai IK berada pada kisaran 70%-90%, maka sistem tersebut dapat dianggap efisien. Persamaan yang digunakan untuk menghitung Indikator Kinerja dari sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) ditunjukkan oleh Persamaan (1) yang mana *Energy Yield* adalah Energi Tahunan sedangkan *Energy Ideal* adalah Energi yang diperoleh modul saat PSH(Wh) [9].

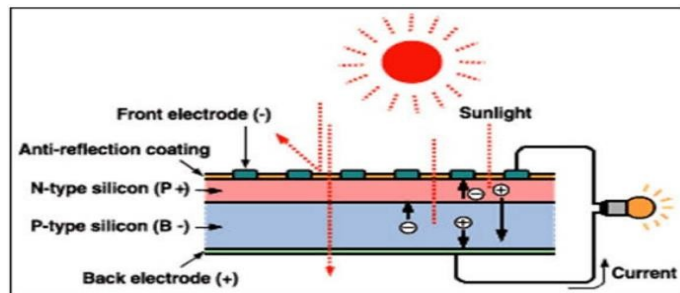
$$PR = \frac{E_{yield}}{E_{ideal}} \quad (1)$$

2.3. PLTS On-Grid

Sistem Photovoltaic (PV) Terkoneksi ke Jaringan atau PLTS Terkoneksi ke Grid adalah solusi energi hijau yang cocok untuk penduduk perkotaan, baik di lingkungan perumahan maupun perkantoran. Sistem ini menggunakan modul surya (photovoltaic module) untuk menghasilkan listrik yang ramah lingkungan dan tanpa emisi. Dengan adanya solusi ini, tagihan listrik rumah tangga dapat berkurang, dan pemiliknya akan mendapatkan nilai tambah. Sesuai dengan namanya, sistem PV terkoneksi ke jaringan PLN, yang berarti sistem ini tetap terhubung dengan jaringan listrik utama untuk mengoptimalkan pemanfaatan energi PV dan menghasilkan listrik seefisien mungkin [10].

2.4. Panel Surya

Panel surya terdiri dari beberapa sel fotovoltaik yang diatur sedemikian rupa untuk menghasilkan output yang diinginkan. Kumpulan sel fotovoltaik ini dapat mengubah cahaya matahari menjadi listrik arus searah. Dengan tambahan baterai yang terhubung ke panel surya, daya hasil konversi cahaya matahari menjadi listrik dapat disimpan sebagai cadangan energi listrik. Secara sederhana, sel fotovoltaik terdiri dari persambungan bahan semikonduktor dengan tipe P dan N, yaitu P-N junction semiconductor. Ketika cahaya matahari mengenai sel fotovoltaik ini, akan terjadi aliran elektron, yang disebut sebagai aliran arus listrik.



Gambar 1. Proses perubahan energi matahari menjadi energi listrik

Gambar 1 menjelaskan proses konversi energi matahari menjadi energi listrik. Ketika cahaya matahari menyinari sel fotovoltaik, hole (ruang muatan positif) akan bergerak meninggalkan tipe P dan menyebabkan ion negatif akseptor tertinggal di dekat sambungan. Sementara itu, elektron akan bergerak meninggalkan tipe N dan menyebabkan beberapa ion positif donor tertinggal di dekat sambungan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Akibatnya, terbentuklah ruang muatan negatif di daerah tipe P dan ruang muatan positif di daerah tipe N di sekitar sambungan. Pada titik sambungan P-N, terdapat daerah tanpa muatan bebas yang disebut daerah pengosongan (*depletion region*) [11].

Panel surya merupakan sel fotovoltaik yang mengubah energi cahaya matahari langsung menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Temperatur panel surya adalah suhu yang diukur pada permukaan panel. Pada malam hari, suhu panel sama dengan suhu lingkungan sekitarnya, namun saat terik matahari siang hari, suhu panel dapat mencapai 30°C atau lebih di atas suhu lingkungan sekitarnya [12].

2.5. Luas Atap

Saat menginstal panel surya di atap gedung, penting untuk melakukan perhitungan yang tepat untuk menentukan luas atap yang akan dipasang panel surya. Jika sebagian area atap telah digunakan untuk keperluan bangunan atau memiliki bayangan, perhitungan luas atap dapat dilakukan dengan dua pendekatan. Persamaannya yang digunakan adalah Persamaan (2) yang mana *P* adalah panjang atap dan *L* adalah lebar atap [13].

$$\text{Luas Atap Potensial} = P \times L \quad (2)$$

2.6. Inverter

Inverter adalah perangkat listrik yang berfungsi untuk mengubah arus listrik searah (DC) menjadi arus listrik bolak-balik (AC). Karena energi radiasi matahari menghasilkan arus DC, sementara banyak perangkat membutuhkan arus AC, maka diperlukan alat untuk mengkonversi arus tersebut. Perangkat yang mampu melakukan konversi ini disebut inverter. Terdapat dua jenis inverter berdasarkan penggunaannya:

- Inverter untuk sistem PLTS *stand-alone* harus mampu menyediakan tegangan AC yang konstan sehingga dapat mendukung beban yang terhubung.
- Inverter untuk sistem PLTS *grid-connected* bertujuan menghasilkan tegangan AC yang sesuai dengan tegangan yang ada di jaringan kapan pun diperlukan. Tegangan yang dihasilkan ini berperan penting dalam mengoptimalkan dan meningkatkan kinerja energi yang dihasilkan oleh modul surya.

Dengan demikian, inverter menjadi perangkat krusial dalam sistem pembangkit listrik tenaga surya, baik dalam konfigurasi *stand-alone* maupun *grid-connected* [14].

2.7. KWh Meter EXIM (Ekspor-Impor)

KWh meter ekspor-impor, juga dikenal sebagai KWh meter EXIM, sebenarnya mirip dengan KWh meter standar yang digunakan oleh PLN. Namun, KWh meter EXIM memiliki fitur tambahan yang disebut net metering. Fitur ini berfungsi untuk menghitung konsumsi KWh impor dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) ke jaringan PLN, sehingga memungkinkan pengurangan tagihan listrik bagi pelanggan yang menggunakan PLTS. Mengingat sumber energi surya bersifat intermiten, artinya tidak selalu tersedia, seperti saat malam hari ketika tidak ada sinar matahari, penyambungan PLTS dengan sistem net metering dapat menjaga stabilitas pasokan energi listrik agar dapat dimanfaatkan oleh pelanggan PLN [15].

Dari segi ekonomis, pemasangan PLTS dengan sistem net metering juga menjadi lebih ekonomis karena tidak perlu menyertakan baterai, yang notabene memiliki harga yang sangat mahal [15]. Atas dasar ini, Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (PERMEN ESDM) No. 49/2018 mewajibkan PLN untuk menyediakan dan memasang meter kWh ekspor-impor energi listrik bagi konsumen PLN yang telah memiliki Sertifikat Laik Operasi (SLO) dalam waktu paling lambat 15 hari kerja sejak SLO diterima oleh PLN. Meskipun demikian, biaya meter tersebut akan ditanggung oleh konsumen [14].

2.8. Analisis Ekonomi

Dalam melakukan studi kelayakan diperlukan beberapa metode untuk mendapatkan nilai perbandingan dalam melakukan analisis ekonomi kelayakan PLTS.

2.8.1. Benefit-Cost Ratio

Dalam melakukan perhitungan *Benefit Cost Ratio (B-CR)* digunakan Persamaan (3). Jika nilai *Benefit Cost Ratio* lebih besar dari 1 maka manfaat yang dihasilkan selama umur ekonomis proyek lebih dari biaya (*cost*) dan investasi, sehingga proyek tersebut baik (*favourable*). Dan jika nilai *Benefit Cost Ratio* kurang dari 1 maka *benefit* yang dihasilkan selama umur ekonomis proyek tidak cukup untuk menutupi *cost* dan *investment* maka proyek tersebut tidak baik (*unfavourable*) [16].

$$\text{Benefit Cost Ratio} = \frac{\text{Benefit}}{\text{Cost}} \quad (3)$$

2.8.2. Biaya Pemeliharaan dan Operasional

Biaya pemeliharaan dan operasional tahunan untuk Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) diperkirakan mencapai 1%-2% dari biaya investasi awal. Persentase ini mencakup biaya pembersihan panel surya, pemeliharaan, dan perbaikan komponen PLTS. Dalam penelitian ini, ditetapkan persentase sebesar 1% karena di Indonesia hanya terdapat dua musim, yaitu musim hujan dan musim kemarau, berbeda dengan negara-negara yang memiliki empat musim sehingga biaya pemeliharaannya lebih tinggi. Sehingga persamaan Biaya Pemeliharaan dan Operasional yang digunakan adalah Persamaan (4).

$$B = 0,01 \times \text{Total Biaya Investasi} \quad (4)$$

2.8.3. Life Cycle Cost (LCC)

Biaya siklus hidup atau *Life Cycle Cost (LCC)* diperoleh dari nilai total biaya pemasangan suatu sistem PLTS yang terdiri biaya pemeliharaan, biaya investasi awal dan operasional untuk biaya penggantian komponen. Persamaan yang digunakan untuk menghitung LCC ditunjukkan oleh Persamaan (5) dan Persamaan (6) yang mana C adalah biaya investasi awal, Mpw adalah total nilai biaya pemeliharaan operasinonal selama umur proyek [17].

$$Mpw = M \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \tag{5}$$

$$LCC = MC + Mpw \tag{6}$$

2.8.4. Faktor Pemulihan Modal

Pemulihan modal faktor digunakan untuk mengkonversi arus kas biaya siklus hidup (LCC) menjadi serangkaian biaya tahunan dengan jumlah yang setara. Sesuai dengan sumber [18], persamaan untuk pemulihan modal adalah ditunjukkan oleh Persamaan (7) dan Persamaan (8) yang mana COE adalah biaya energi (Rp/kWh), CRF adalah faktor pemulihan modal, LCC adalah biaya siklus hidup, dan E_{yield} adalah produksi energi tahunan [18].

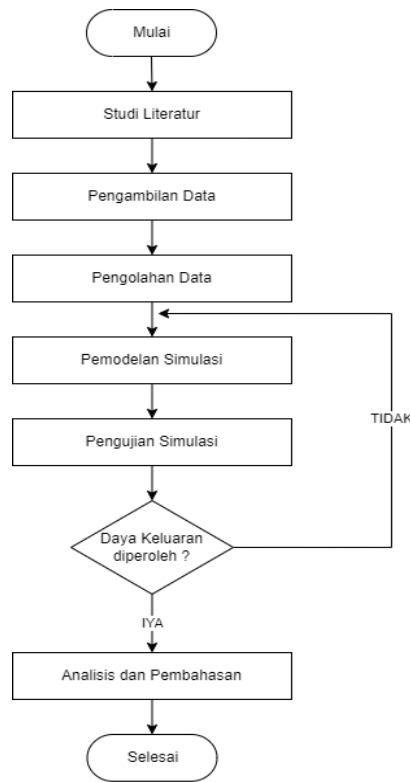
$$COE = \frac{LCC \times CRF}{E_{yield}} \tag{7}$$

$$PP = \frac{LCC}{E_{yield} \times COE} \tag{8}$$

3. METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Penelitian

Pada penelitian ini memiliki beberapa tahapan dalam pelaksanaannya. Tahapan yang dilakukan diantaranya adalah studi literatur, pengambilan data, pengolahan data, pemodelan simulasi, pengujian simulasi dan analisis dan pembahasan seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram penelitian

Berdasarkan Gambar 2 dilakukan diagram alir penelitian untuk menyelesaikan tahapan-tahapan yang akan dilakukannya penelitian. Berdasarkan diagram penelitian hal yang dilakukan pertama yaitu mencari studi literatur mengenai studi kelayakan PLTS untuk menunjang jalannya penelitian ini, selanjutnya pengambilan data seperti iradiasi, temperatur, panjang dan lebar atap dan daya puncak pada gedung. setelah pengambilan data dilakukan langkah selanjutnya melakukan pengolahan data untuk mengetahui jumlah data yang telah kita ambil, selanjutnya melakukan pemodelan simulasi untuk merancang sistem PLTS *on-grid* yang akan digunakan pada Gedung Laboratorium Terpadu ITK, langkah selanjutnya melakukan pengujian simulasi untuk mengetahui apakah terdapat kesalahan dalam melakukan pemodelan jika terdapat kesalahan maka dilakukan pemodelan simulasi ulang, dan

jika tidak adanya kesalahan dalam melakukan pengujian maka dapat dilihat daya yang dihasilkan oleh sistem PLTS *on-grid* tersebut, kemudian langkah terakhir setelah semua selesai dilakukan maka langkah terakhir yaitu melakukan analisis dan pembahasan mengenai apa yang sudah dikerjakan.

3.2 Pengambilan Data

Dalam pengambilan data tahapan pertama yang perlu dilakukan yaitu menentukan area perancangan yang di tetapkan di Gedung Laboratorium Terpadu Institut Teknologi Kalimantan, setelah menentukan area perancangan langkah selanjutnya melakukan perhitungan untuk menentukan panjang dan lebar atap langkah selanjutnya area *shading* digunakan untuk menentukan area atau kawasan yang menjadititik peletakan panel surya untuk pembangkit listrik tenaga surya *on-grid* agar meminimalisir terkena shading atau bayangan dari bangunan, langkah selanjutnya pengambilan data iradiasi dan temperatur sebagai input data harian data iradiasi dan temperatur dari pancaran sinar matahari yang diukur menggunakan Solar Power Meter dan *Thermometer*. Setelah pengambilan data dilakukan kemudian data dimasukan ke excel sebagai input data harian selama pengambilan data berlangsung yaitu 30 hari, langkah terkhir menentukan jumlah penggunaan daya Laboratorium Terpadu Institut Teknologi Kalimantan untuk mengetahui daya yang dapat dibangkitkan oleh PLTS *On-Grid*.

3.3 Pengolahan Data

Setelah data di dapatkan maka tahap selanjutnya yaitu pengolahan data. Dalam pengolahan data dilakukan perhitungan terkait luas atap yang akan dilakukan pemasangan panel surya, perhitungan jumlah panel surya dan *inverter* yang akan digunakan dan perhitungan biaya yang akan di gunakan dalam melakukan pembuatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya atap pada gedung Lab Terpadu Institut Teknologi Kalimantan.

3.4 Perancangan Sistem

Tahap perancangan sistem yang pertama dilakukan yaitu pemodelan sistem simulasi kelistrikan menggunakan software MATLAB SIMULINK. Perancangan sisitem dilakukan untuk mendapatkan nilai keluaran daya yang dihasil oleh PV dari pengukuran nilai iradiasi dan temperature. Berdasarkan sistem kerja alat menggunakan *software* MATLAB SIMULINK. Pada diagram alir diatas dimana alur yang pertama kali dilakukan yaitu menentukan nilai iradiasi dan temperatur yang digunakan, selanjutnya melakukan pemodelan simulasi menggunakan SIMULINK setelah pemodelan selesai dilakukan langkah selanjutnya yaitu memasukan input data iradiasi dan temperatur dan dilakukan pengujian menggunakan SIMULINK, setelah dilakukan pengujian maka didapatkan daya *output* pada pemodelan simulasi menggunakan SIMULINK.

3.5 Pungujian Sistem

Setelah melakukan pengambilan data dan pengolahan data hingga mendapatkan hasil penentuan kelayakan PLTS atap yang di lakukan secara manual dengan perhitungan dan menggunakan matlab simulink. Pada sistem yang dirancang kemudian diuji menggunakan *software* Matlab untuk mengetahui daya yang di hasilkan oleh iradiasi matahari dan temperatur yang berada di Laboratorium Terpadu Institut Teknologi Kalimantan. Pengujian dilakukan dengan dua kondisi ketika cuaca cerah dan ketika cuaca mendung untuk melihat hasil yang didapatkan oleh *software* matlab. Jika hasil pengujian telah didapatkan lanjutkan ke langkah selanjutnya, analisis sistem. Jika hasil pengujian menggunakan *software* matlab simulink yang dilakukan terdapat kesalahan atau hasil yang error, maka tinjau lokasi kesalahan pada sistem dan dilakukan perbaikan ulang.

3.6 Analisis dan Pembahasan

Setelah dilakukan pengambilan data, maka dilakukan analisis data. Analisis data dilakukan dengan membandingkan pemakain listrik gedung lab terpadu yang sudah di pasang pembangkit listrik tenaga surya *on-grid* dengan gedung lab terpadu yang belum terpasang pembangkit listrik tenaga surya *on-grid*. Kemudian data yang didapatkan akan dihitung untuk mengetahui konsumsi daya listrik yang dipakai.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Panel Surya

Berdasarkan hasil penelitian jumlah panel surya yang digunakan sebanyak 492 panel surya, daya yang dapat di bangkitkan sebesar 236,16kWp dan daya puncak pada Gedung Laboratorium ITK sebesar 471,75kW. Berdasarkan jumlah daya yang dapat di hasilkan oleh panel surya dan daya puncak gedung maka dapat dihitung persentase energi yang disuplai untuk membangkitkan Gedung sebesar 50.06%. Spesifikasi panel surya yang digunakan ditunjukkan oleh Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi panel surya

Electrical Data	
Model Name	SunPower X-Series: X22-480-COM
Maximum Power (Pmax)	480 W
Open Circuit Voltage (Voc)	97,2 V
Short Circuit Current (Isc)	6,48 A
Voltage at Maximum Power (Vmp)	78,8
Current at Maximum Power (Imp)	6,09 A
Module Efficiency (%)	22,2%
Mechanical Parameters	
Dimensions (P x L) (m ²)	2,067 x 1,046

4.2. Inverter

Berdasarkan penentuan inverter pada Tabel 2 menggunakan jenis Canadian Solar 50kW dengan tegangan maximum 1100 Volt jumlah yang digunakan sebanyak 5 inverter.

Tabel 2. Spesifikasi inverter Canadian Solar 50kW

Technical Data	
Model Name	CSI-50KTL-GI
Maximum DC input Voltage	1100 V _{DC}
Open DC Input Voltage Range	200-1000 V _{DC}
Operating DC Input Voltage (Isc/A)	200 V
Operating Current (Imp)	114 A
Maximum Input Current (Isc/A)	178 A
Rated AC Output Power	50 kW
Maximum AC Output Power	55 kW
Rated Output Voltage	380/400 V _{AC}
Nominal AC Output Current	76/72,2 A
Efficiency	98,8%

4.3. Losses

Jenis-jenis losses yang dihitung dan nilai yang didapatkan dari dari masing-masing jenis losses ditunjukkan oleh Tabel 3.

Tabel 3. Jenis dan nilai losses

Jenis Losses	Besarnya Nilai Losses
Losses Manufacture	3%
Losses (debu, kotoran, dll)	5%
Losses Temperature Panel	5,7%
Losses Kabel	0,152%
Total Losses	13,852%

Berikut merupakan perhitungan losses untuk mendapatkan nilai daya output PLTS

$$\text{losses} = P_{\text{out PLTS}} \times 13,852\% = 236,16 \text{ kW} \times 13,852\%$$

$$\text{losses} = 32,70 \text{ kW}$$

$$P_i = \text{besar daya yang digunakan} - (100\% - 19,5\%)$$

$$= 236,16 \text{ kW} - 32,70 \text{ kW}$$

$$= 203,46 \text{ kW}$$

Maka didapatkan daya listrik yang telah dikurang losses sebesar 203,46 kW

Energi yang dihasilkan dalam satu hari penuh menggunakan data iradiasi GLOBAL SOLAR ATLAS sebesar 4,351 kWh

$$P_{\text{out}} = P_i \times \text{Radiasi Matahari} = 203,46 \times 4,352$$

$$= 885,254 \text{ kWh}$$

Energi yang dihasilkan dalam periode satu tahun penuh sebesar

$$E_{\text{yield}} = P_{\text{out}} \times 365 \text{ hari} = 885,254 \times 365$$

$$= 323.117,87 \text{ kWh/tahun}$$

4.4. Performance Ratio

Indeks Kinerja (IK) atau *Performance Ratio* (PR) adalah sebuah parameter yang menggambarkan kualitas sistem berdasarkan total energi yang dihasilkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dalam satu tahun. Apabila nilai PR berada pada kisaran 70-90%, maka sistem tersebut dapat dianggap memenuhi standar yang layak. Berikut ini adalah perhitungan terhadap nilai PR.

$$H_{\text{tilt}} = \text{PSH} \times 365 \text{ hari} = \left(4,351 \times 1000 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2} \times 365 \text{ hari} \right)$$

$$= 1.588,115 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \text{ per tahun}$$

$$E_{\text{ideal}} = \text{daya spesifikasi modul surya} \times \text{jumlah modul} \times H_{\text{tilt}}$$

$$= 0.48 \text{ kWp} \times 492 \text{ modul} \times 1.588,115 \text{ kWh/tahun}$$

$$= 375.049,238 \text{ kWh/tahun}$$

Setelah melakukan perhitungan E_{ideal} maka dapat menghitung *Performance Ratio* (PR) menggunakan perhitungan berikut:

$$\text{PR} = \frac{E_{\text{yield}}}{E_{\text{ideal}}} = \frac{323.117,87 \text{ kWh/tahun}}{375.049,238 \text{ kWh/tahun}} = 0.86 = 86\%$$

Berdasarkan nilai PR sebesar 70% - 90% apabila perhitungan yang didapat lebih dari 70% maka sistem tersebut dapat dikatakan layak untuk direalisasikan. Berdasarkan energi tahunan yang ada di ITK didapatkan nilai *performance ratio* sebesar 86%, sehingga dari perhitungan tersebut dikatakan layak untuk direalisasikan.

4.5. Analisa Ekonomi

Analisis ekonomi dilakukan pada studi kelayakan PLTS *On-grid* di gedung Laboratorium Terpadu Institut Teknologi Kalimantan guna mengetahui biaya perawatan, biaya yang akan dikeluarkan selama sistem PLTS berjalan, mengetahui harga jual listrik PLTS ke PLN, serta dapat mengetahui pengembalian modal selama masa operasional sistem PLTS yaitu 25 tahun. Harga barang yang digunakan analisis ekonomi pada penelitian ini didapatkan berdasarkan toko online. Tabel 4 menunjukkan bahan baku panel surya. Berdasarkan penelitian ini biaya pemasangan panel surya sebesar Rp. 150.000/kWh pada penelitian ini daya yang digunakan sebesar 236,16kWp maka biaya yang dikeluarkan dalam pemasangan panel surya sebesar Rp. 35.424.000.

Tabel 4. Bahan baku panel surya

Kebutuhan	Jenis	Unit	Harga	Harga Total
Panel Surya	SunPower X-Series: X22-480-COM	492	1.780.314	875.914.488
Inverter	Inverter Canadian Solar 50 KW	5	45.000.000	225.000.000
Kabel	NYY 1 × 35 mm	500m	73.500	36.750.000
Breaker AC	MCB/ Moulded Case Circuit SUNINT Breaker 3 Phase	5	538.000	2.690.000
Mounting Panel	Rail dan Inter Ckamp Kit	528	228.000	120.384.000
Biaya Pengiriman	Panel, Inverter, Kabel, Breaker AC dan Mounting Panel	-	-	79.503.505
Biaya Pemasangan Panel Surya	-	-	-	35.424.000
			Total Harga	1.375.665.993

4.5.1. Perhitungan biaya operasi dan perawatan (M)

Perhitungan biaya operasi dan perawatan (M) yang dilakukan setiap tahun 1-2% dari biaya total modal awal PLTS.

$$M = 1\% \times \text{total biaya investasi awal} = 1\% \times 1.375.665.993 \\ = \text{Rp. } 13.756.659 / \text{tahun}$$

4.5.2. Life Cycle Cost (LCC)

Biaya Total Siklus Hidup (LCC) adalah total biaya yang akan dikeluarkan selama operasi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). LCC mencakup biaya investasi awal, biaya pemeliharaan selama masa proyek berjalan (Mpw), dan biaya penggantian komponen selama masa proyek berjalan. Untuk menghitung LCC, digunakan nilai diskonto atau suku bunga kredit yang telah ditetapkan oleh Bank Indonesia, yakni sebesar 8,74%.

$$Mpw = M \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right]$$

$$Mpw(8,74\%, 25) = \text{Rp. } 13.756.659 \left[\frac{0,0874(1+0,0874)^{25}}{(1+0,0874)^{25} - 1} \right]$$

$$Mpw(8,74\%, 25) = \text{Rp. } 13.756.659 \left[\frac{7,1233}{0,7099} \right]$$

$$Mpw(8,74\%, 25) = \text{Rp. } 13.756.659 \times 10,034$$

$$Mpw(8,74\%, 25) = \text{Rp. } 138.034.316$$

Dengan menggunakan *Life Cycle Cost* (LCC) maka dapat dilakukan perhitungan untuk mengetahui biaya yang dikeluarkan selama umur PLTS 25 tahun.

$$LCC = C + Mpw = \text{Rp. } 1.375.665.993 + \text{Rp. } 138.034.316$$

$$LCC = \text{Rp. } 1.513.700.309$$

4.5.3. Cost of Energy (COE)

Setelah mendapatkan hasil perhitungan LCC maka langkah selanjutnya yaitu melakukan perhitungan Biaya Energy (*Cost of Energy*) untuk mengetahui harga jual energi PLTS ke PLN serta mengetahui faktor pemulihan modal *Capital Recovery Factor* (CRF)

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} = \frac{0,0874(1+0,0874)^{25}}{(1+0,0874)^{25} - 1} = \frac{0,7099}{7,1233}$$

$$CRF = 0,09965$$

Setelah didapatkan factor pemulihan modal (CRF), selanjutnya dilakukan perhitungan Biaya Energy (COE) dengan menggunakan hasil perhitungan dari LCC dan CRF.

$$COE = \frac{LCC \times CRF}{E_{\text{yield}}} = \frac{1.513.700.309 \times 0,09965}{375.049.238 \text{ kWh/tahun}}$$

$$COE = 402,187 / \text{kWh}$$

4.5.4. Payback Periode (PP)

Payback Periode (PP) atau berapa tahun akan kembalinya modal dari masa operasional PLTS yaitu 25 tahun dapat menggunakan perhitungan dibawah ini

$$PP = \frac{LCC}{E_{\text{yield}} \times COE} = \frac{1.513.700.309}{375.049,238 \text{ kWh/tahun} \times 402,187 / \text{tahun}}$$

$$PP = 10 \text{ tahun}$$

Berdasarkan perhitungan diatas untuk menentukan nilai *payback periode* dengan memasukan nilai *Life Cycle Cost* (LCC) dan dibagikan dengan energi tahunan dan didapatkan nilai *payback periode* berdasarkan COE 402,187 kwh yang ditetapkan dengan energi tahunan maka pengembalian modal selama 10 tahun dengan jangka waktu 25 tahun.

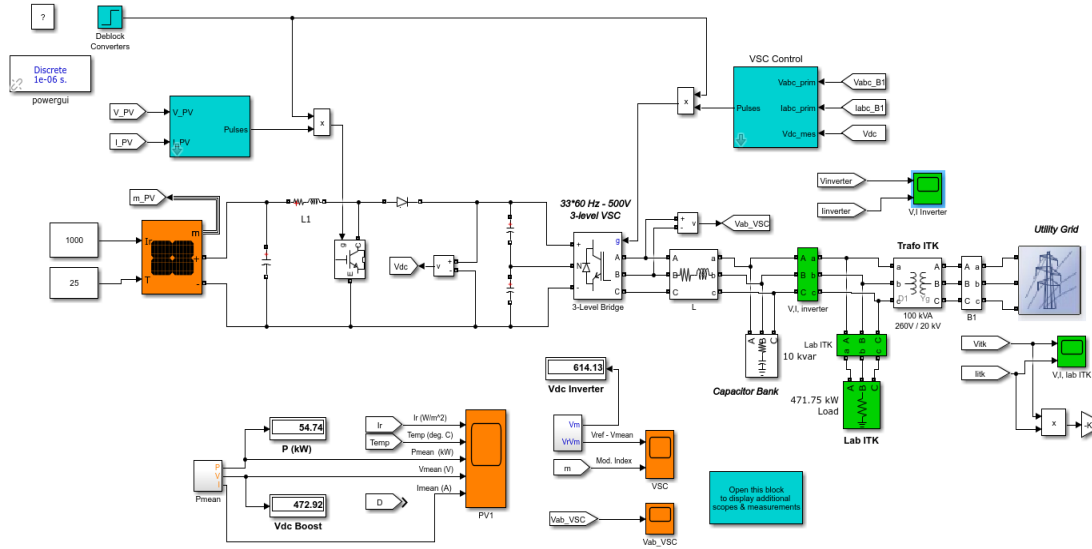
$$PP = \frac{LCC}{E_{\text{yield}} \times COE} = \frac{1.513.700.309}{375.049,238 \text{ kWh/tahun} \times 735 / \text{kwh}}$$

$$PP = 5,49 \text{ tahun} \approx 5 \text{ tahun } 6 \text{ bulan}$$

Berdasarkan perhitungan diatas untuk menentukan nilai *payback periode* dengan memasukan nilai *Life Cycle Cost* (LCC) dan dibagikan dengan energi tahunan dan COE maka didapatkan nilai *payback periode* berdasarkan COE 735/kwh yang ditetapkan oleh pihak PLN kepihak ITK, maka pengembalian modal membutuhkan waktu selama 5 tahun 6 bulan dengan jangka waktu selama 25 tahun.

4.6. Simulasi PLTS On-Grid Simulink Matlab

Pada Gambar 3 merupakan hasil simulasi perancangan yang menjadi sebuah *system PLTS On-Grid* pada Matlab Simulink 2021a.



Gambar 3. Simulasi PLTS on-grid simulink matlab

4.7. Iradiasi dan Temperatur

Input data dan iradiasi yang digunakan dalam pengujian simulasi selama 5 hari, data perhari di rata-ratakan untuk mendapatkan data minimum, maximum dan data average. Input data iradiasi berbeda ditunjukkan oleh Tabel 5 sedangkan input data temperatur berbeda ditunjukkan oleh Tabel 6.

Tabel 5. Input data iradiasi berbeda

Hari	Min Iradiasi (W/m ²)	Max Iradiasi (W/m ²)	Average Ir (W/m ²)	Average T (C)
1	97	514	252,50	26,04
2	98	965	439,40	28,50
3	138	965	578,22	30,47
4	267	893	550,44	29,68
5	197	756	515,33	31,78

Tabel 6. Input data temperatur berbeda

Hari	Min T (C)	Max T (C)	Average T (C)	Average ir (W/m ²)
1	25,0	27,3	26,04	252,50
2	25,5	32,5	28,50	439,44
3	27,2	40,1	30,47	578,22
4	27,5	31,8	29,68	550,44
5	27,1	35,9	31,78	515,33

4.8. Hasil pengujian simulasi daya Output panel surya

Berdasarkan hasil pengujian sistem PLTS pada Simulink matlab dapat dilihat pada gambar dibawah ini, sehingga dari perancangan tersebut akan dilakukan pengujian sistem dengan mamvariasikan nilai iradiasi dan temperatur. Dalam melakukan pengujian didapatkan hasil perbandingan daya yang disuplai *grid* dan PLTS. Hasil pengujian min,max dan average iradiasi ditunjukkan oleh Tabel 7.

Tabel 7. Hasil pengujian daya suplai grid dan PLTS ke beban

Hari	Daya Min (kW)	Daya Max (kW)	Daya Average (kW)
1	422,35	331,90	398,05
2	443,69	215,55	351,77

	Hari	Daya Min (kW)	Daya Max (kW)	Daya Average (kW)
Grid	3	435,07	217,14	317,56
	4	394,64	274,95	324,46
	5	412,78	274,06	335,09
PLTS	1	17,05	117,10	55,55
	2	17,61	224,95	98,63
	3	24,83	223,46	130,24
	4	58,66	178,35	124,04
	5	42,72	170,44	114,21

Berdasarkan Tabel 7 dapat dilihat daya yang di suplai *grid* ke beban dengan iradiasi berbeda dan temperatur berbeda. Pada table 4.22 dengan iradiasi max maka daya yang di suplai *grid* ke beban dapat menyuplai kurang lebih 50% daya, berbeda dengan ketika iradiasi min maka daya yang disuplai *grid* lebih besar dibandingkan daya yang disuplai oleh PLTS. Hal tersebut dikarenakan input iradiasi yang digunakan lebih kecil dibandingkan ketika input iradiasi max maka input iradiasi yang digunakan lebih besar.

Berdasarkan pada Tabel 8 dengan temperatur berbeda maka daya yang disuplai ke beban lebih dari 50%, hal tersebut disebabkan iradiasi sangat berpengaruh terhadap daya keluaran, semakin tinggi temperatur maka sangat berpengaruh pada daya keluaran panel surya.

Tabel 8. Hasil pengujian dengan input temperatur berbeda

	Hari	Daya Min (kW)	Daya Max (kW)	Daya Average (kW)
Grid	1	399,40	398,12	399,55
	2	350,64	353,29	351,80
	3	316,17	322,59	317,64
	4	323,49	324,64	324,42
	5	332,07	336,00	334,11
PLTS	1	55,70	55,48	55,55
	2	99,76	97,11	98,60
	3	131,63	125,71	130,16
	4	125,01	123,86	124,08
	5	116,93	113,30	115,09

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan pada penelitian ini, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- Dengan desain sistem PLTS *on-grid* pada atap Gedung Laboratorium Terpadu Institut Teknologi Kalimantan menggunakan MATLAB SIMULINK 2021a dengan menggunakan 5 inverter 50 KW produksi Canadian Solar yang diintegrasikan pada 492 panel surya 480Wp produksi Sun Power berdimensi 2,067 x 1,046 m yang dipasangkan secara 6 seri dan 19 paralel mampu menyuplai daya sebesar 50,06 % dari beban puncak Gedung Laboratorium Terpadu ITK.
- Dengan menggunakan data iradiasi pada hari ke 2 daya listrik yang dihasilkan PLTS Ketika cuaca mendung menghasilkan daya keluaran sebesar 17,614 kW dengan iradiasi 98 W/m² sedangkan ketika cuaca cerah daya yang dihasilkan sebesar 224,95 kW dengan iradiasi 965 W/m² dengan temperatur 28,5 °C.
- Hasil perhitungan biaya pengeluaran menggunakan *Cost of Energy* (COE) dengan harga 402,187/kWh dapat mengembalikan dana menggunakan *payback period* selama 10 tahun, sedangkan menggunakan perhitungan *payback period* untuk pengembalian modal dengan menggunakan tarif yang ditetapkan kepada pihak ITK yaitu 735/kWh maka pengembalian modal membutuhkan waktu selama 5 tahun 6 bulan. Sehingga dari perhitungan *payback period* dengan menggunakan tarif yang di tetapkan kepada ITK maka PLTS *on-grid* layak dibangun hal tersebut dikarenakan dengan waktu 5 tahun 6 bulan dapat mengembalikan modal awal sebesar Rp. 1.513.700.309 dengan jangka waktu maksimal 25 tahun. Dengan menggunakan perhitungan *Performance Ratio* (PR) atau energi tahunan yang dihasilkan PLTS maka persentase yang didapatkan sebesar 86% maka dari perhitungan (PR) dapat dikatakan layak untuk dibangun dengan nilai energi tahunan minimal 70% - 90%.

REFERENSI

- [1] A. Jaelani, S. Firdaus, and J. Jumena, "Renewable Energy Policy in Indonesia: The Qur'anic Scientific Signals in Islamic Economics Perspective," *Int. J. Energy Econ. Policy*, vol. 7, no. 4, pp. 193-204, 2017.
- [2] F. Adjikri, "Strategi Pengembangan Energi Terbarukan Di Indonesia," *J. Online Mhs. JOM Bid. Tek. Elektro*, vol. 1, no. 1, 2017.
- [3] M. Firman, F. Herlina, and A. Sidiq, "Analisa Radiasi Panel Surya Terhadap Daya Yang Dihasilkan Untuk Penerangan Bagian Luar Masjid Miftahul Jannah Didesa Benua Tengah Kecamatan Takisung," *AL JAZARI J. Ilm. Tek. MESIN*, vol. 2, no. 1, pp. 98-102, 2017.
- [4] Hardianto, "Utilization of Solar Power Plant in Indonesia: A Review," *International Journal Of Environment, Engineering, & Education*, vol. 1, no. 1, 2019.
- [5] A. B. Abdul Kodir and A. T. Maulana, "Perencanaan dan Simulasi Sistem PLTS Off-Grid Untuk Penerangan Gedung Fakultas Teknik UNKRIS," *Elektrokrisna*, vol. 6, no. 3, pp. 97-107, 2018.
- [6] L. Halim, "Analisis Teknis dan Biaya Investasi Pemasangan PLTS On Grid dan Off Grid di Indonesia," *Resist. Elektron. Kendali Telekomun. Tenaga List. Komput.*, vol. 5, no. 2, pp. 131-136, 2022.
- [7] S. Baqaruzi, K. Kananda, and A. Muhtar, "Perbandingan Penempatan Panel Fotovoltaik Di Atas Tanah (Ground Mounting PV) Atau Di Atas Atap (Rooftop PV) Sebagai Implementasi Pemanfaatan PLTS Yang Efisien Di Itera," *J. Elektro*, vol. 13, no. 1, pp. 31-38, 2020.
- [8] D. Tan and A. K. Seng, *Handbook for solar photovoltaic systems*. Singapura: Energy Market Authority, 2011.
- [9] A. G. Hutajulu, M. RT Siregar, and M. P. Pambudi, "Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) On Grid Di Ecopark Ancol," *TESLA J. Tek. Elektro*, vol. 22, no. 1, pp. 23-33, 2020.
- [10] D. Fuaddin and A. Daud, "Rancangan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya On-Grid Kapasitas 20 kWp untuk Residensial," *J. Tek. Energi*, vol. 10, no. 1, pp. 53-57, 2021.
- [11] A. Julisman, I. D. Sara, and R. H. Siregar, "Prototipe Pemanfaatan Panel Surya Sebagai Sumber Energi Pada Sistem Otomasi Stadion Bola," *J. Komput. Inf. Teknol. Dan Elektro*, vol. 2, no. 1, pp. 35-42, 2017.
- [12] K. H. Khwee, "Pengaruh Temperatur Terhadap Kapasitas Daya Panel Surya (Studi Kasus: Pontianak)," *ELKHA J. Tek. Elektro*, vol. 5, no. 2, pp. 23-25, 2019.
- [13] K. Energi and S. D. Mineral, "Panduan Perencanaan dan Pemanfaatan PLTS atap di Indonesia," *Jkt. KESDM*, 2020.
- [14] I. G. B. W. Yogathama, I. W. A. Wijaya, and I. N. Budiastra, "Desain Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Mengikuti Pola Atap Wantilan Desa Antosari Untuk Memenuhi Daya 3600 Watt," *J. SPEKTRUM*, vol. 8, no. 2, pp. 83-90, 2021.
- [15] Y. Perdana and I. Wardiah, "Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Ongrid 5500 Watt Di Rumah Kost Akademi," *Semin. Nas. Ris. Terap.*, vol. 3, 2018.
- [16] F. Hidayat, B. Winardi, and A. Nugroho, "Analisis Ekonomi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Di Departemen Teknik Elektro Universitas Diponegoro," *Transient J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 7, no. 4, pp. 875-882, 2019.
- [17] Z. Syamsudin, S. Hidayat, and M. N. Effendi, "Perencanaan Penggunaan Plts Di Stasiun Kereta Api Cirebon Jawa Barat," *Energi Kelistrikan*, vol. 9, no. 1, pp. 70-83, 2018.
- [18] B. Maruli Pangaribuan, I. A. Dwi Giriantari, and I. W. Sukerayasa, "Desain PLTS Atap Kampus Universitas Udayana: Gedung Rektorat," *J. SPEKTRUM*, vol. 7, no. 2, p. 90-100, 2020.