

Hak Cipta :

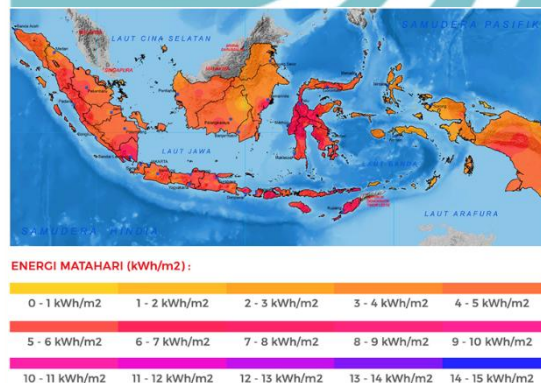
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Potensi Energi Matahari di Indonesia

Energi matahari merupakan energi yang dihasilkan dari matahari (Wijayanti, 2023). Energi ini diperoleh dengan cara mengonversi panas matahari melalui perangkat khusus menjadi energi alternatif lainnya yang dapat bermanfaat untuk memenuhi kebutuhan energi.

Sebagai negara kepulauan yang terletak di kawasan ekuator, Indonesia memiliki keuntungan geografis yang signifikan dalam pemanfaatan energi radiasi matahari. Merujuk pada data Deputi Bidang Klimatologi BMKG (2023), tingginya intensitas radiasi matahari di Indonesia yang berkisar antara 6,1 hingga 7,5 kWh/m² seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1 menjadikan energi surya sebagai sumber energi alternatif yang sangat potensial untuk dikembangkan.



Gambar 2. 1 Peta Potensi Energi Matahari di Indonesia
(Sumber: Deputi Bidang Klimatologi BMKG, 2023)

Lebih jauh, Kementerian ESDM mencatat bahwa total potensi kapasitas energi surya di Indonesia mencapai lebih dari 3.200 Gigawatt (GW). Angka tersebut mendominasi peta potensi EBT nasional, jauh mengungguli akumulasi potensi dari sumber energi air (hidro), panas bumi (geotermal), maupun angin (bayu).

Di sisi lain, kebutuhan energi listrik di Indonesia terus meningkat setiap tahunnya. Menurut Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN) dari Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral (KESDM) tahun 2019, rata-rata pertumbuhan konsumsi tenaga listrik nasional 5 tahun berturut-turut, dari tahun

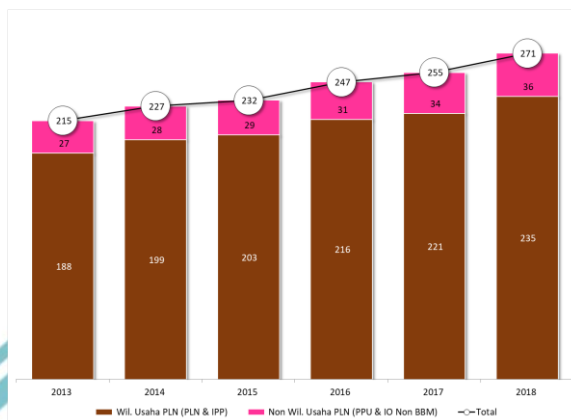


© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2014-2018, berada di angka 4,8% per tahun seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2 berikut.



Gambar 2. 2 Perkembangan Konsumsi Tenaga Listrik Nasional Berdasarkan Wilayah Usaha (dalam TWh)

(Sumber: Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN) KESDM, 2019)

Sayangnya sumber energi tersebut masih didominasi oleh sumber energi tak terbarukan yaitu bahan bakar fosil dan batu bara sebesar 59,6% dan kurang dari 0,5% berasal dari Energi Baru Terbarukan (EBT) (Aprilianti dkk, 2020). Padahal, energi fosil merupakan penghasil emisi terbesar di dunia saat ini.

Penggunaan energi terbarukan, seperti energi surya, yang melimpah di Indonesia bisa menjadi salah satu solusi dalam mengurangi penggunaan energi fosil sebagai sumber energi listrik yang mendominasi. Sehingga, pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi listrik dapat membantu memenuhi kebutuhan konsumsi energi listrik yang terus meningkat serta mengurangi emisi di Indonesia.

2.2 Deskripsi Umum Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan suatu teknologi pembangkit listrik yang mengkonversi energi foton dari matahari menjadi energi listrik melalui sel surya (fotovoltaik) (Samsurizal dkk, 2021). Sel fotovoltaik merupakan lapisan tipis dari silikon (Si) murni atau bahan semikonduktor lainnya. PLTS mengonversi cahaya matahari menjadi listrik arus searah (DC), yang selanjutnya dapat ditransformasikan menjadi listrik arus bolak-balik (AC) apabila diperlukan.

PLTS ini sangat disarankan sebagai alternatif utama penyediaan listrik daerah pedesaan terpencil. Solusi ini dianggap ideal karena wilayah-wilayah tersebut



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

umumnya memiliki potensi paparan sinar matahari yang tinggi, sementara akses terhadap bahan bakar konvensional sangat terbatas dan harganya terlampaui mahal.

Adapun alasan utama penggunaan teknologi fotovoltaik menurut Ramdhani dalam bukunya yang berjudul “Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya: *Dos & Don'ts*” adalah sebagai berikut:

- Sumber energi yang melimpah dan tanpa biaya
- Sumber energi tersedia di tempat dan tidak perlu diangkut
- Biaya pengoperasian dan pemeliharaan sistem PLTS yang relatif kecil
- Tidak perlu pemeliharaan yang sering dan dapat dilakukan oleh operator setempat yang terlatih
- Ramah lingkungan, tidak ada emisi gas dan limbah cair atau padat yang berbahaya

2.3 Jenis-Jenis PLTS

Konfigurasi utama dalam sistem PLTS dapat dikelompokkan menjadi 3 jenis, yaitu PLTS *Off-Grid (stand-alone)*, PLTS *On-Grid (Grid-Connected PV Plant)*, dan PLTS *On-Grid*.

2.3.1 PLTS Off-Grid (Stand-Alone)

Sistem PLTS *Off-Grid* merupakan sistem PLTS yang memproduksi energi listriknya secara mandiri dan tidak terhubung dengan jaringan. Oleh karena itu, sistem ini sering disebut *stand-alone system*. Sistem ini biasanya dilengkapi dengan baterai sebagai media penyimpanan (*storage*) energi listrik. Pemasangan baterai berguna untuk memastikan kontinuitas suplai daya listrik saat intensitas cahaya matahari menurun, seperti pada cuaca mendung maupun di malam hari.

Umumnya, sistem ini diaplikasikan pada wilayah yang belum terjangkau jaringan listrik atau berlokasi jauh dari pusat pembangkit. Meskipun demikian, sistem ini tetap dapat diimplementasikan di kawasan dengan infrastruktur jaringan listrik yang sudah memadai. Hal ini umumnya didorong oleh keinginan masyarakat untuk memproduksi energi listriknya sendiri secara mandiri melalui pemanfaatan sumber energi terbarukan.

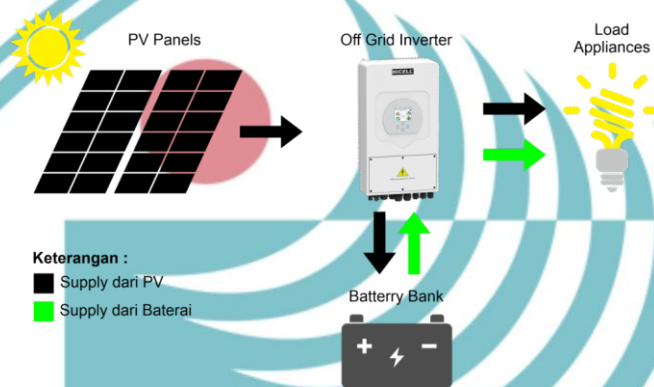


Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Sistem PLTS *Off-Grid* merupakan salah satu solusi strategis untuk menyediakan akses listrik, terutama di kawasan 3T (Terdepan, Terluar, dan Tertinggal). Wilayah ini umumnya berlokasi sangat jauh dari pusat pemerintahan provinsi, sehingga menghadapi berbagai keterbatasan yang signifikan. Di luar peruntukannya bagi daerah terpencil, sistem PLTS ini juga sangat relevan untuk menyuplai kebutuhan energi di sektor pariwisata.

Contoh Konfigurasi sistem PLTS Off-Grid ditunjukkan pada gambar 2.3 berikut.



Gambar 2. 3 Konfigurasi PLTS Off-Grid

(Sumber: <https://hicell.co.id/mengenal-apa-itu-pembangkit-listrik-tenaga-surya/>)

2.3.2 PLTS On Grid

Sistem PLTS *On-Grid* merupakan sistem PLTS yang terkoneksi ke jaringan PLN (Samsurizal dkk, 2021). Umumnya, PLTS *On-Grid* ini dirancang tanpa menggunakan komponen baterai sebagai penyimpan energi cadangan. Pada sistem ini, aspek teknis dalam proses sinkronisasi PLTS dengan jaringan eksisting merupakan faktor yang sangat krusial. Hal ini dikarenakan suplai daya PLTS sangat bergantung pada intensitas radiasi matahari yang mudah berubah akibat faktor cuaca, musim, dan tutupan awan. Fluktuasi radiasi yang diterima oleh modul fotovoltaik tersebut secara langsung akan memengaruhi daya keluaran PLTS, yang pada akhirnya dapat berdampak pada kestabilan parameter jaringan, khususnya tegangan dan frekuensi.

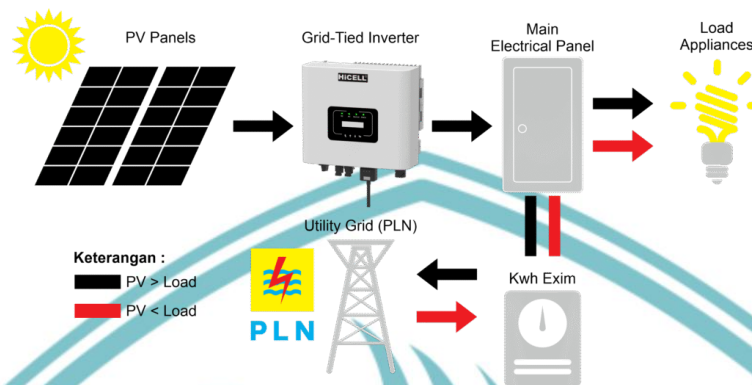
Bagi konsumen di tingkat rumah tangga maupun perkantoran, sistem ini memberikan nilai tambah berupa efisiensi pengeluaran karena dapat menekan biaya tagihan listrik bulanan.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Contoh konfigurasi sistem PLTS Off Grid dapat dilihat pada gambar 2.4 berikut.



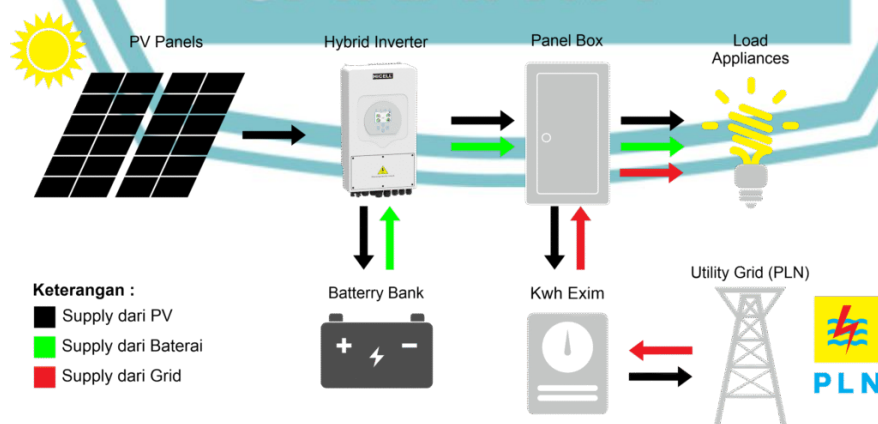
Gambar 2. 4 Konfigurasi PLTS Off-Grid

(Sumber: <https://hicell.co.id/mengenal-apa-itu-pembangkit-listrik-tenaga-surya/>)

2.3.3 PLTS Hybrid

Sistem PLTS *Hybrid* merupakan sistem PLTS yang terintegrasi dengan jaringan eksisting dan beroperasi secara berdampingan dengan pembangkit lainnya seperti PLTD, PLTMH, PLTB, dan berbagai jenis pembangkit lainnya (Bernando, 2021). Pengoperasian sistem gabungan ini menuntut manajemen serta pembagian waktu operasi yang optimal di antara masing-masing unit pembangkit. Untuk mendukung kelancaran pengaturan tata operasi tersebut, sistem PLTS berkonfigurasi hibrida pada umumnya selalu dilengkapi dengan komponen baterai.

Contoh konfigurasi sistem PLTS Off Grid dapat dilihat pada gambar 2.5 berikut.



Gambar 2. 5 Konfigurasi PLTS Hybrid

(Sumber: <https://hicell.co.id/mengenal-apa-itu-pembangkit-listrik-tenaga-surya/>)



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2.4 Komponen Utama PLTS

2.4.1 Modul Fotovoltaik

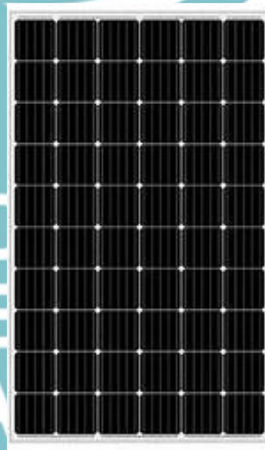
Modul fotovoltaik merupakan komponen utama sistem PLTS yang berfungsi mengubah energi surya menjadi listrik searah atau *Direct Current* (DC) (Bernando, 2021), sehingga outputnya hanya memiliki dua kutub, yakni positif (+) dan negatif (-). Pada dasarnya, panel surya dibentuk dari gabungan sejumlah sel fotovoltaik yang dihubungkan untuk menghasilkan arus DC tertentu. Konfigurasi sel-sel tersebut bisa diatur secara seri untuk meningkatkan tegangan, secara paralel untuk meningkatkan arus, maupun menggunakan gabungan keduanya (seri-paralel). Kapasitas maksimal sebuah panel surya diukur dalam satuan Watt Peak (Wp), yang merepresentasikan daya puncak nominalnya berdasarkan kondisi uji standar (STC).

Modul fotovoltaik dapat dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan sel penyusunnya, antara lain:



Gambar 2. 6 Modul Fotovoltaik Jenis Polikristalin

(Sumber: Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS))



Gambar 2. 7 Modul Fotovoltaik Jenis Monokristalin

(Sumber: Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS))



Gambar 2. 8 Modul Fotovoltaik Jenis Amorphous

(Sumber: Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS))

- Polikristal (*Polycrystalline*): Sel surya yang memiliki susunan kristal yang tidak seragam. Secara dimensi, jenis Polikristal membutuhkan permukaan panel yang lebih besar dibandingkan jenis Monokristal untuk menghasilkan daya listrik yang sama, tetapi masih bisa menghasilkan listrik pada saat cahaya lemah (cuaca mendung). Panel



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

ini memiliki Tingkat efisiensi antara 10-12%. Contoh modul PV tipe Polikristal dapat dilihat pada gambar 2.6 di atas.

- Monokristal (*Monocrystalline*): Sel surya yang paling efisien karena menghasilkan daya listrik terbesar per satuan luas permukaan. Efisiensinya bisa mencapai 12% - 14%. Namun, efisiensinya turun drastis dalam cuaca berawan. Contoh modul PV tipe Monokristal dapat dilihat pada gambar 2.7 di atas.
- Amorphous atau Film Tipis: Sel surya yang bahan bakunya berupa silikon amorphous (a-Si). Sel surya jenis ini sering digunakan sebagai *supply* untuk perangkat dengan daya kecil. Efisiensinya hanya $\pm 9\%$, tetapi biaya pembuatannya murah karena hanya menggunakan $\pm 1\%$ jumlah silikon pada sel *crystalline*. Contoh modul PV tipe Amorphous dapat dilihat pada gambar 2.8 di atas.

2.4.2 Baterai

Dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), baterai berperan penting sebagai media penyimpanan cadangan energi. Komponen ini bertugas menampung daya listrik berarus searah (DC) yang diproduksi oleh panel surya. Nantinya, energi yang tersimpan akan dimanfaatkan sebagai sumber listrik cadangan saat panel surya tidak beroperasi, seperti ketika cuaca mendung atau pada malam hari. Selain itu, penggunaan baterai juga membuat tegangan listrik yang disalurkan ke sistem menjadi lebih stabil. Kapasitas penyimpanan daya pada baterai ini dinyatakan dalam satuan Ampere Hour (Ah), yang merujuk pada besaran arus maksimal yang mampu disuplai oleh baterai dalam kurun waktu satu jam. Contoh aki yang biasa digunakan pada sistem PLTS dapat dilihat pada gambar 2.9 berikut.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 2. 9 Aki PLTS

(Sumber: <https://www.blibli.com/p/aki-plts-vrla-gel-12v-45ah-zeus-battery-aki-deep-cycle/ps--GHS-70072-03341>)

2.4.3 Inverter

Inverter atau yang sering disebut *power inverter* adalah suatu rangkaian peralatan elektronika daya yang berfungsi untuk mengkonversi sumber tegangan searah (DC) menjadi sumber tegangan keluaran arus bolak-balik (AC) (Bernando, 2021), dimana nilai tegangan dan frekuensi dapat diatur sesuai dengan kebutuhan sistem. Konversi sistem tegangan DC ke sistem tegangan AC dapat dilakukan pada tegangan 6 VDC, 12 VDC, 24 VDC atau 48 VDC ke 110 VAC, 120 VAC, 220 VAC, 230VAC, atau 240 VACs dengan frekuensi suplai 50 Hz atau 60 Hz.

Inverter pada sistem PLTS dapat dibagi menjadi dua berdasarkan jenis dan konfigurasinya diantaranya adalah:



Gambar 2. 10 Grid Tie Inverter

(Sumber: <https://www.inverter.com/600w-solar-grid-tie-inverter>)



Gambar 2. 11 Bidirectional Inverter

(Sumber: <https://weelinkpower.en.made-in-china.com/product/OnrYgwoMLFcl/China-All-in-One-Portable-Bidirectional-Power-Inverter-2000W.html>)

- *Grid Tied Inverter* (GTI): Inverter yang berfungsi untuk mengonversi tegangan searah (DC) dari modul fotovoltaik menjadi tegangan bolak-



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

balik (AC) yang dapat langsung disalurkan ke jaringan distribusi (*feeder*). Dalam pengoperasiannya, GTI bekerja dengan menjadikan tegangan pada jaringan yang tersambung sebagai tegangan referensinya. Contoh inverter ini tertera pada gambar 2.10 di atas.

- *Bidirectional Inverter* (BDI): Inverter yang memiliki kemampuan konversi dua arah untuk mengubah tegangan DC menjadi AC serta tegangan AC kembali menjadi DC. Inverter ini dirancang agar sisi DC dapat disambungkan ke modul surya atau baterai, sementara sisi AC dapat diintegrasikan dengan berbagai pembangkit listrik eksternal (misalnya genset, PLTD, dan PLTMH). Contoh inverter ini tertera pada gambar 2.11 di atas.

2.5 Efisiensi Modul Fotovoltaik

Ukuran seberapa baik performa suatu modul fotovoltaik dalam menyerap sinar matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik disebut dengan efisiensi (Bernando, 2012). Efisiensi suatu sel surya dipengaruhi oleh spektrum, intensitas sinar matahari dan suhu sel surya itu sendiri.

Efisiensi PLTS diukur dalam persentase dan dinyatakan sebagai perbandingan antara daya listrik output dengan daya matahari input yang diterima oleh panel surya. Rumus dasar untuk menghitung efisiensi PLTS adalah sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.1)$$

Ket:

- η : Efisiensi (%)
 P_{out} : Daya Output (W)
 P_{in} : Daya Input (W)

Daya input ini merupakan hasil dari konversi energi matahari menjadi energi listrik oleh panel surya. Daya input PLTS dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$P_{in} = E = G \times A \quad (2.2)$$

Ket:

- P_{in} : Energi surya yang dihasilkan (W)
 G : Intensitas radiasi matahari (W/m^2)



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

A : Luas area panel surya (m^2)

Produksi daya output PLTS mengacu pada jumlah daya listrik yang dihasilkan oleh sistem PLTS dari panel surya setelah melalui proses konversi energi matahari menjadi energi listrik. Dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut.

$$P_{out} = V_{panel} \times I_{panel} \quad (2.3)$$

Ket:

P_{panel} : Daya Panel (W)

V_{panel} : Tegangan Panel (V)

I_{panel} : Arus Panel (a)

2.6 Rasio Performa

Standar IEC 61724 digunakan sebagai acuan internasional untuk mengevaluasi kinerja sistem PLTS. Evaluasi dilakukan menggunakan beberapa parameter utama yang menggambarkan efisiensi dan keandalan sistem pembangkit listrik tenaga surya. Parameter tersebut antara lain *Performance Ratio* atau *PR*, *Reference Yield*, & *Final Yield*.

Performance Ratio atau *PR* merupakan parameter penilaian kualitas suatu sistem PLTS yang menunjukkan total kerugian selama proses konversi arus DC menjadi AC (La Emi *et al.*, 2025). *PR* biasanya dinyatakan dalam persentase di mana suatu sistem PLTS dianggap layak apabila nilai *PR* berkisar antara 70% hingga 90%.

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \times 100\% \quad (2.4)$$

Ket:

Y_f : *Final Yield*

Y_r : *Reference Yield*

Reference Yield adalah parameter yang menyatakan perbandingan antara total energi matahari yang diterima permukaan panel surya (kWh/m^2) dengan irradiansi yang sesuai dengan *Standart Test Condition* (STC) sebesar $1000 W/m^2$ (La Emi *et al.*, 2025). Parameter ini menunjukkan jumlah jam penyinaran matahari efektif (peak sun hours) dan digunakan untuk memudahkan evaluasi kinerja sistem tenaga surya.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

$$Y_r = \frac{HT}{G_{STC}} \quad (2.5)$$

Ket:

HT : irradiansi pada bidang array (kWh/m^2)

G_{STC} : irradiansi Referensi STC (1kW/m^2)

Final Yield merupakan parameter yang menyatakan perbandingan antara total produksi energi listrik sistem fotovoltaik dengan kapasitas daya terpasang (La Emi *et al.*, 2025). Parameter ini menunjukkan durasi efektif operasi modul surya pada kapasitas nominalnya.

$$Y_f = \frac{E_{ac}}{P_{pv}} \quad (2.6)$$

Ket:

E_{ac} : keluaran energi (kWh ac)

P_{pv} : Total daya yang ter-install /PLTS

2.7 kWh Meter EXIM

Alat pengukur kWh Export-Import (EXIM), sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2.12, merupakan komponen yang dipasang di area pelanggan PLN untuk memantau arus listrik secara dua arah, yaitu besaran daya yang diproduksi (ekspor) dan yang digunakan (impor). Sistem ekspor-impor ini kian populer seiring meningkatnya penerapan sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) atap. Melalui sistem tersebut, surplus energi yang dihasilkan dari panel surya milik pelanggan dapat diserap oleh PLN dan dikonversikan menjadi "tabungan listrik".



Gambar 2. 12 KWh meter EXIM

(Sumber: <https://biggo.id/s/kwh+meter+wifi/?view=card>).



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Alat pengukur kWh Exim ini bekerja dengan membandingkan energi input PLTS dengan daya yang dibutuhkan untuk menutupi beban di mana sistem PLTS bekerja dengan menyuplai energi langsung untuk memenuhi kebutuhan beban yang dipasang pada siang hari. Ketika produksi energi melebihi kebutuhan daya beban, kelebihan daya tersebut tidak terbuang, melainkan disalurkan ke jaringan PLN melalui meteran kWh Ekspor-Impor (EXIM). Energi yang dikirim ini dicatat sebagai ekspor atau kredit listrik yang nantinya berfungsi mengurangi tagihan bulanan pelanggan (Kita, 2019).

Sebaliknya, jika produksi PLTS menurun dan tidak mampu memenuhi kebutuhan daya beban akibat kendala lingkungan—seperti cuaca mendung, radiasi matahari yang rendah, atau *Peak Sun Hour* (PSH) yang kurang optimal—maka kekurangan daya akan dipenuhi dari jaringan PLN dan dicatat sebagai impor listrik (Janaloka, 2017). Secara keseluruhan, meteran EXIM memegang peran krusial dalam mencatat lalu lintas transaksi jual (ekspor) dan beli (impor) energi antara pengguna PLTS dan PLN.

2.8 ESP32

ESP32 dikenalkan oleh Espressif System yang merupakan penerus dari mikrokontroler ESP8266. Mikrokontroler ESP32 memiliki keunggulan yaitu sistem berbiaya rendah, dan juga berdaya rendah dengan modul WiFi yang terintegrasi dengan chip mikrokontroler serta memiliki bluetooth dengan mode ganda dan fitur hemat daya menjadikannya lebih fleksibel. Mikrokontroler ini dapat digunakan sebagai sistem mandiri yang lengkap atau dapat dioperasikan sebagai perangkat pendukung mikrokontroler host.

ESP32 adalah chip dengan WiFi 2.4GHz dan *bluetooth* dengan desain teknologi 40nm yang dirancang untuk daya dan kinerja radio terbaik yang menunjukkan ketahanan, keserbagunaan dan keandalan dalam berbagai aplikasi dan skenario daya. Modul ini mendukung beberapa SDK opensource, seperti ESP-IDF, MicroPython, dan Arduino Core.

2.9 HMI

HMI (*Human Machine Interface*) adalah antarmuka yang menjadi jembatan komunikasi antara manusia (operator) dengan mesin/sistem otomatisasi melalui perangkat keras dan perangkat lunak tampilan visual yang intuitif. Dalam konteks



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

kelistrikan dan otomasi industri, HMI biasanya berupa layar grafik yang menampilkan informasi status sistem dan menerima perintah dari pengguna untuk mengontrol sistem. Fungsi utama dari HMI, yaitu untuk memantau sistem dan mengontrol proses dari suatu sistem secara real-time.

Dalam proyek kali ini HMI yang digunakan ber-merk *DWIN* tipe *DMG80480C070* seperti pada gambar 2.13 berikut.



Gambar 2. 13 HMI DWIN DMG80480C070_15WTR 7 Inch

(Sumber https://electrobes.com/product/7-inch-hmi-lcd-display-touch-panel-with-shell-dmg80480c070_15wtr-commercial-grade/)

2.10 Monitoring

Menurut Rohayati (2014), monitoring merupakan bentuk observasi terstruktur yang dilakukan secara sadar dari waktu ke waktu untuk mengukur sejauh mana pergerakan menuju atau menjauhi suatu target. Di sisi lain, Mudjahidin (2010) mendefinisikannya sebagai evaluasi berkesinambungan atas jalannya sebuah proyek, guna memastikan kesesuaian antara pelaksanaan dengan jadwal, serta mengevaluasi pemanfaatan sumber daya oleh pihak sasaran berdasarkan perencanaan awal.

Merujuk pada kedua pandangan tersebut, dapat ditarik kesimpulan bahwa monitoring pada intinya adalah proses pengawasan berkelanjutan pada sebuah aktivitas guna mengumpulkan informasi yang relevan. Informasi yang diperoleh ini nantinya menjadi landasan penting dalam menentukan langkah atau kebijakan strategis untuk kegiatan di masa mendatang.

Menurut Simbar (2016), pada dasarnya kegiatan monitoring dilakukan untuk mengumpulkan informasi serta perspektif, yang nantinya akan dijadikan sebagai



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

umpan balik guna memenuhi kebutuhan spesifik. Monitoring mendapatkan informasi dari beberapa bagian komponen pendukung lainnya seperti sensor, saluran transmisi, variabel yang diukur, receiver dan display. Media komunikasi yang dipakai pada sistem ini yang biasanya menggunakan RS232 atau RS485 dengan menggunakan kabel dan TCP/IP apabila *wireless*/tanpa kabel.

2.11 Komponen Parameter

2.9.1 DC Meter

PZEM-017 merupakan modul sensor untuk pemantauan listrik DC yang berfungsi mengukur besaran kelistrikan arus searah seperti tegangan, arus, daya, dan energi. Data hasil pengukuran dikirim melalui komunikasi RS-485 menggunakan protokol komunikasi Modbus RTU, sehingga dapat diintegrasikan dengan mikrokontroler seperti Arduino atau ESP32, komputer, maupun sistem monitoring berbasis IoT.

2.9.2 AC Meter

PZEM 016 merupakan modul sensor untuk listrik AC yang berfungsi untuk mengukur besaran kelistrikan arus bolak balik seperti tegangan, arus, daya, dan energi. Data hasil pengukuran dikirim melalui komunikasi RS-485 menggunakan protokol komunikasi Modbus RTU, sehingga dapat diintegrasikan dengan mikrokontroler seperti Arduino atau ESP32, komputer, maupun sistem monitoring berbasis IoT.

2.12 MCB

MCB (*Miniature Circuit Breaker*) adalah sebuah perangkat elektromekanikal yang berfungsi sebagai pelindung rangkaian listrik dan arus yang berlebihan. MCB dapat memutus arus listrik secara otomatis ketika arus listrik yang melewati MCB tersebut melebihi nilai yang ditentukan. Namun saat arus dalam kondisi normal, MCB dapat berfungsi sebagai saklar yang bisa menghubungkan atau memutuskan arus listrik secara manual saat diperlukan, seperti saat melakukan perbaikan atau pemeliharaan. (Schnneider Electric, 2019)

MCB (*Miniature Circuit Breaker*) memiliki berbagai kegunaan penting dalam instalasi listrik, di antaranya:



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- 1) Proteksi dari Arus Lebih (Overload)
- 2) MCB memutus aliran listrik secara otomatis ketika arus melebihi kapasitas yang ditentukan, mencegah kerusakan pada kabel dan perangkat listrik akibat panas berlebih.
- 3) Melindungi dari Hubungan Pendek (*Short Circuit*) Jika terjadi korsleting yang bisa menyebabkan kebakaran atau kerusakan, MCB langsung memutus aliran listrik untuk mencegah bahaya.
- 4) Memastikan Keamanan Instalasi Listrik Dengan MCB, risiko bahaya listrik seperti kebakaran atau kerusakan alat listrik dapat diminimalkan.
- 5) Mengurangi Gangguan Listrik di Sistem MCB memungkinkan pemutusan selektif pada area yang bermasalah tanpa memengaruhi seluruh sistem instalasi listrik

2.13 Terminal

Terminal kabel merupakan komponen penting dalam sistem kelistrikan yang menghubungkan ujung kabel secara aman dan andal, memastikan aliran arus listrik stabil tanpa risiko korsleting atau putusnya sambungan. Terminal kabel meningkatkan efisiensi transmisi sistem dengan mempermudah pemeliharaan, meminimalkan risiko korsleting, dan memungkinkan distribusi daya yang cepat. Dalam sistem tenaga listrik, peran ini sangat vital untuk instalasi proteksi, seperti pada relay atau MCCB. (Lubis, et al., 2023).

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB III PERENCANAAN DAN REALISASI

3.1 Rancangan Alat

Pada perancangan Tugas Akhir, yaitu merancang sebuah sistem monitoring berbasis lokal dengan menggunakan HMI dan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang mampu memberikan sumber daya listrik tambahan untuk meningkatkan efisiensi dari penggunaan daya listrik serta melakukan pengukuran dan pemantauan parameter kelistrikan dan ekspor dan impor energi secara *real-time*. Sistem ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan daya listrik dan memberikan solusi pemantauan parameter sistem kelistrikan dan ekspor impor energi secara efisien untuk skala kecil. Terdapat beberapa parameter yang diukur dan dipantau dalam sistem ini, yaitu tegangan (volt), arus (ampere), daya aktif (watt), energi (Wh), dan ekspor impor energi (Wh).

Pada sistem pemantauan ini digunakan sensor PZEM-017 untuk mengukur parameter DC, PZEM-014 untuk mengukur parameter AC, dan kWh meter EXIM untuk mengukur ekspor dan impor energi. Begitupun pada sistem PLTS ini menggunakan panel surya dengan kapasitas 2 x 200 Wp dengan kapasitas inverter sebesar 600 W.

Semua perangkat parameter yang digunakan memiliki kemampuan untuk melakukan beberapa parameter yang diperlukan pada sistem ini secara akurat. Beberapa sensor yang digunakan memiliki *slave id* yang berbeda dan akan dihubungkan dengan mikrokontroler ESP32 sebagai otak yang berfungsi untuk menerima dan mengelola data dari sensor – sensor lalu mengirimkan data tersebut ke HMI untuk ditampilkan secara *real-time* melalui kabel dengan menggunakan protokol komunikasi Modbus RTU via RS485.

Sistem ini dirangkai pada sebuah panel box dengan ukuran 70 cm x 50 cm x 35 cm dengan peletakan HMI berupa di area tengah pintu panel guna mempermudah dalam melakukan pemantauan.

3.1.1 Deskripsi Alat

Alat yang direalisasikan adalah sistem PLTS dan sistem pemantauan kelistrikan dan daya berbasis lokal dengan menggunakan HMI yang dirancang untuk memantau parameter kelistrikan dan konsumsi daya pada



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

listrik 1 phase. Sistem ini dilengkapi dengan berbagai komponen utama yang terintegrasi dalam sistem untuk mendukung fungsi monitoring.

Pada sistem PLTS ini terdiri dari panel surya 2 x 400 Wp sebagai komponen yang mengkonveris sinar matahari menjadi energi listrik, inverter 600 W sebagai pengubah tegangan DC ke tegangan AC dari PLTS serta mensinkronkan tegangan dari PLN. Untuk sistem monitoring terdiri dari mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengelola data, PZEM-014 sebagai pembacaan parameter kelistrikan DC, PZEM-017 sebagai pembacaan parameter kelistrikan AC, dan kWh meter EXIM sebagai parameter untuk ekspor impor energi. Pada PZEM-017 terhubung terlebih dahulu ke *shunt* untuk mengubah arus besar menjadi tegangan sebesar millivolt. Hasil pembacaan dari setiap sensor akan ditampilkan decara lokal melalui HMI DWIN 7 inc 800 x 480 melalui protokol komunikasi Modbus RTU via RS485.

3.1.2 Cara Kerja Alat

Berikut rincian dari cara kerja alat:

- Panas dari sinar matahari diserap oleh panel surya yang kemudian akan dikonversikan menjadi listrik DC. Kemudian hasil konversi panas matahari dari panel surya akan diamankan dengan menggunakan MCB DC melewati sensor DC untuk mengukur tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan oleh panel surya.
- Setelah dari MCB DC, listrik hasil konversi panel surya akan masuk ke inverter on grid yang berfungsi untuk mengubah listrik DC menjadi AC dan mensinkronkan sesuai dengan listrik jala-jala. Listrik yang sudah diubah menjadi AC tersebut akan diamankan oleh MCB AC Inverter. Listrik dari jala-jala akan masuk dan disambungkan ke kWh Meter Exim lalu ke MCB AC jala-jala.
- Sambungan dari MCB AC inverter tadi akan dihubungkan secara paralel dengan sambungan dari MCB AC jala-jala pada terminal blok yang kemudian akan disambungkan ke kontak - kontak yang tersedia di pos satpam melewati sensor AC untuk mengukur daya pada masing - masing kontak - kontak yang kemudian data hasil pengukurannya akan dikirim ke ESP32 lalu diprogram untuk



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

memberikan tarif berdasarkan energi yang digunakan dari masing - masing kontak - kontak.

- Apabila sensor AC pada masing-masing kotak kontak mendeteksi adanya pemakaian energi, maka sensor akan mengirimkan data hasil pengukuran energi ke ESP32 lalu menampilkannya di HMI dan melakukan peresetan tarif setelah satu menit tidak adanya beban energi yang terhitung kembali.
- Apabila daya yang dihasilkan oleh panel surya tidak mencukupi atau lebih kecil dari beban, maka sumber listrik jala-jala akan menyuplai daya yang kurang dari panel surya.

3.1.3 Spesifikasi Alat

Berikut ini tabel 3.1 merupakan spesifikasi komponen yang dipakai pada “Monitoring Sistem Kelistrikan PLTS On-Grid Pada Pos Satpam Gedung I”. Setiap komponen yang digunakan memiliki spesifikasinya tersendiri untuk menunjang sistem tersebut.

Tabel 3. 1 Spesifikasi Komponen

No.	Komponen	Spesifikasi Teknis	Unit
1	Sensor DC	PZEM-017	1
		Tegangan DC 0-300 Volt, Arus 0-50 A, Daya, dan Energi.	
		Protokol Komunikasi Modbus RTU via RS485.	
2	Sensor AC	PZEM-014	4
		Tegangan AC 80-260 Volt, Arus 0-10 A, Daya, dan Energi.	
		Protokol Komunikasi Modbus RTU via RS485.	
3	Microkontroler	ESP32 30 Pin	1
4	Human Machine Interface (HMI)	HMI DWIN	1
		DMG80480C070_15WTR 7 Inc, resolusi 800 x 480, Komunikasi UART dan Modbus RTU via RS485, Touchscreen.	
5	Modul MAX485	Modul konversi UART TTL to RS485, Supply 5 V.	2



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

6	kWh Meter Ekspor Impor	kWh Meter Ekspor Imopor DDS238-4W	1
7	Adaptor	Adaptor AC to DC, Input 220 VAC, Output 5 VDC.	1
8	Power Supply Unit	PSU Input 220 VAC, Output 12 VDC. Maximum Power (Pmax): 200WP Maximum Power Current (Imp): 10,96A Maximum Power Voltage (Vmp): 18,24V Maximum Circuit Voltage (Voc): 21,8V	1
9	Panel Surya	Short Circuit Current (Isc): 11,62A Maximum System Voltage: 1000V Operating Temperature: -40°C to +85°C Berat: 12 KG Dimensi: 1290 x 760 x 30mm Micro Grid Tie 600 Watt	2
10	Inverter	VDC Input 11 – 32 V Protection: Islanding	1
11	MCB AC	MCB AC 4 A, 1P	3
12	MCB DC	MCB DC 25 A, 2P	1
13	Panel Box	Dimensi 70 x 50 x 35 cm	1
14	Kabel Duct	Dimensi 3 x 3 cm Panjang 1,7 m	2

3.1.4 Diagram Blok

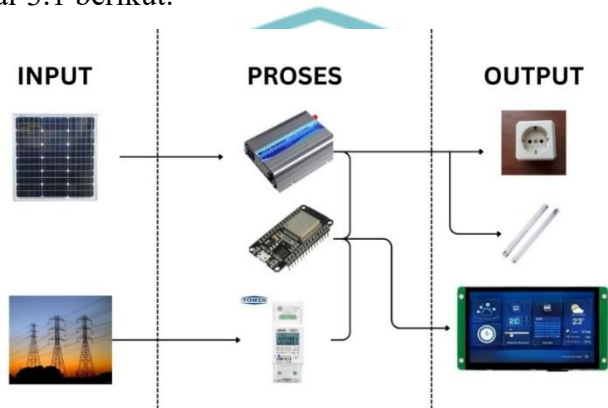
Diagram blok sistem PLTS On-Grid ini memiliki alur kerja yang terbagi ke dalam tiga tahapan utama, yakni input, proses, dan output. Pada tahap input, sistem menerima pasokan kelistrikan dari dua sumber: jaringan PLN dan PLTS. Selanjutnya pada tahap pemrosesan, energi yang masuk dari PLN akan dicatat oleh meteran kWh EXIM, sementara energi dari PLTS akan



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

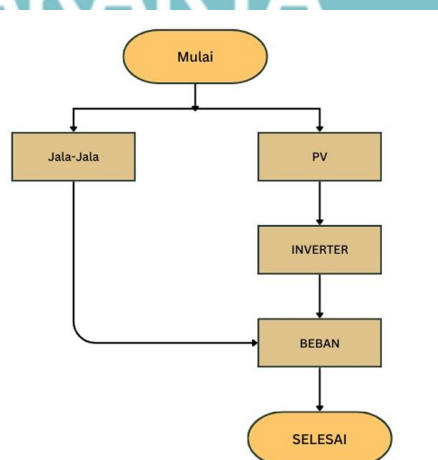
dikonversi dari arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC). Kedua sumber daya ini kemudian disinkronisasikan dan disalurkan bersama menuju tahap output guna menyuplai kebutuhan beban. Seluruh kinerja dari sistem ini dapat dipantau pengguna melalui antarmuka HMI. Diagram bloknya dapat dilihat pada gambar 3.1 berikut.



Gambar 3. 1 Diagram Blok Sistem Monitoring

3.1.5 Flowchart Alat

Panel surya bekerja dengan mengkonversi panas matahari menjadi energi listrik yang kemudian akan dikonversikan menjadi tegangan AC yang sesuai dengan standar PLN. Sumber PLN akan masuk dan dihubungkan secara paralel dengan sumber listrik dari panel surya yang telah di konversi menjadi tegangan AC 220 V. Kedua sumber yang telah dihubung paralel tersebut akan langsung dihubungkan ke beban. Diagram bloknya dapat dilihat pada gambar 3.1 berikut. Flowchart sistem PLTS dapat dilihat pada gambar 3.2 berikut.

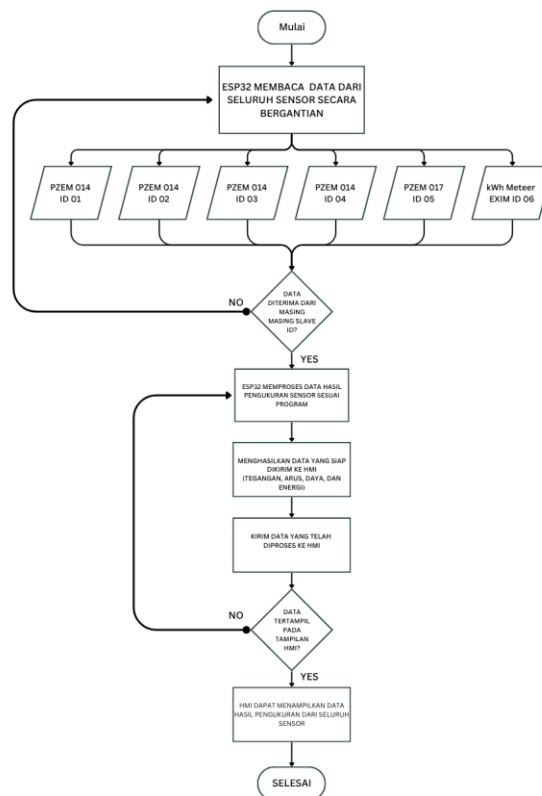


Gambar 3. 2 Flowchart Cara Kerja Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya On Grid



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 3. 3 Flowchart Cara Kerja Sistem Monitoring PLTS On Grid

Gambar 3.3 merupakan gambaran dari sistem monitoring sistem kelistrikan dan energi pada PLTS on grid. Mikrokontroler ESP32 akan menerima dan mengelola data hasil pengukuran dari PZEM-017, PZEM-04, dan kWh meter EXIM melalui MAX485 dengan menggunakan protokol Modbus RTU via RS485. Data yang telah diterima akan diolah dan dikirimkan dan ditampilkan ke perangkat antarmuka HMI melalui MAX485 dengan menggunakan protokol Modbus RTU via RS485.

3.1.6 Wiring Diagram

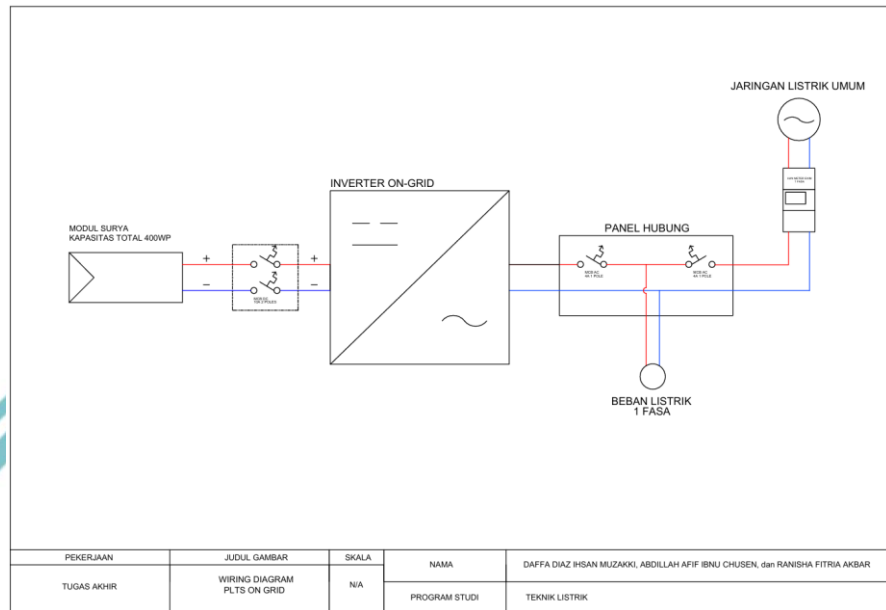
Wiring diagram sistem PLTS on grid, seperti yang terlihat pada gambar 3.4, berfungsi untuk menunjukkan sambungan antar komponen mulai dari panel surya, MCB DC, MCB AC, kWh meter EXIM, dan inverter. Sedangkan untuk wiring diagram sistem monitoring parameter kelistrikan sistem PLTS on grid dapat dilihat pada gambar 3.5. Komponen yang digunakan terdiri dari mikrokontroler ESP32, PZEM-014, PZEM-017, kWh



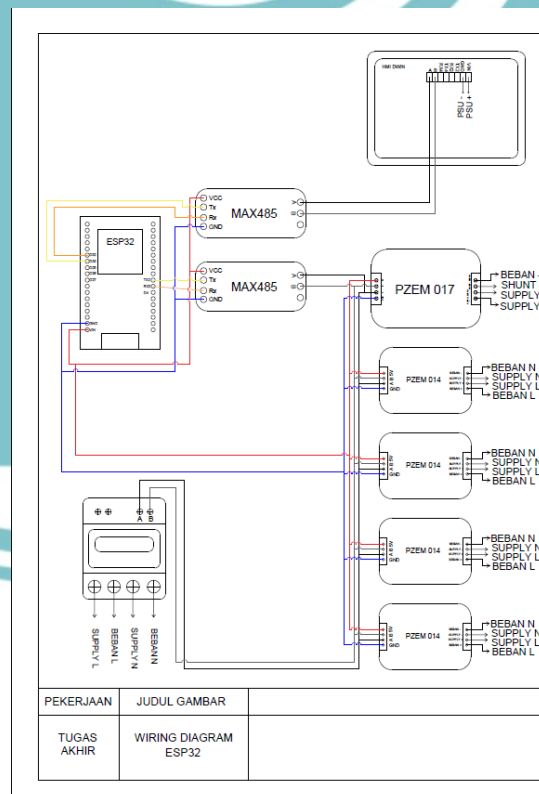
Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

meter EXIM, MAX485, dan HMI. Semua komponen saling terintegrasi untuk mengirim, mengelola, dan menampilkan data secara *real-time*.



Gambar 3. 4 Diagram Blok Sistem Monitoring



Gambar 3. 5 Wiring Diagram ESP32



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

3.2 Realisasi Alat

Realisasi sistem kelistrikan PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) On Grid dengan monitoring berbasis mikrokontroler menggunakan 2 buah PV dengan kapasitas 200 WP yang dipasang secara parallel di trotoar area parkir dekat gedung I seperti yang tertera pada gambar 3.6 dan 3.7 di bawah ini.



Gambar 3. 6 Lokasi Pemasangan Box Panel & Kotak Kontak



Gambar 3. 7 Lokasi Pemasangan Modul PV

Box panel dipasang pada tembok di dalam pos satpam menggunakan *dyna bolt* seperti yang tertera pada gambar 3.8 berikut.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 3. 8 Box Panel Pada Pos Satpam

Di dalam box panel terdapat komponen-komponen seperti MCB AC, MCB DC, kWh EXIM, kotak kontak din rail, *grid tie* inverter, PCB, terminal shunt, sensor DC (Pzem 017), sensor AC (Pzem 014), dan terminal blok serta *Human Machine Interface* (HMI) pada pintu box panel seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.9 berikut.



Gambar 3. 9 Layout Komponen di Dalam Box Panel

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB IV PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Efisiensi Modul Fotovoltaik

4.1.1 Deskripsi Pengujian

Pada tahap pengujian ini, akan dihitung persentase efisiensi modul fotovoltaik pada saat dihubungkan dengan beban melalui pengukuran daya *input* dan *output*-nya. Nilai efisiensi yang dihasilkan kemudian akan dijadikan bahan perbandingan terhadap standar efisiensi dari modul tipe *Monocrystalline*, yaitu sebesar 12% hingga 14%.

Beban yang dihubungkan terbagi menjadi dua jenis, yakni beban resistif dan beban induktif. Beban resistif menggunakan 4 buah lampu pijar, yang terdiri dari 2 lampu berdaya 25 W, 1 lampu berdaya 100 W, dan yang lainnya berdaya 75 W. Sementara itu, untuk beban induktif digunakan 4 unit motor AC satu fasa dengan daya masing-masing sebesar 45 W.

4.1.2 Prosedur Pengujian

1. Mengukur intensitas radiasi matahari untuk menentukan daya input panel surya yang dilakukan menggunakan solar power meter seperti pada gambar 4.1 berikut.



Gambar 4. 1 Solar Power Meter

(Sumber: Dokumen Pribadi)

2. Menghubungkan beban resistif dan induktif menggunakan kabel *jumper* secara bergantian.
3. Mengukur parameter DC, seperti tegangan dan arus, untuk menentukan daya output panel surya menggunakan tang ampere seperti pada gambar 4.2 berikut.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 2 Tang Ampere Fluke

(Sumber: Dokumen Pribadi)

4. Menghitung daya input, daya output, dan efisiensi panel surya dari data-data yang telah terkumpul menggunakan rumus sesuai dengan dasar teorinya

4.1.3 Data Hasil Pengujian

1. Rekapitulasi Hasil Ukur

Pada tanggal 7 Juli 2026 dilakukan pengujian efisiensi inverter on-grid saat dihubungkan dengan beban resistif dan induktif yang diawali dengan pengumpulan variabel-variabel yang dibutuhkan seperti tegangan dan arus DC. Pengujian dilakukan mulai dari pukul 12:00 WIB hingga pukul 14:55 WIB untuk beban resistif, sedangkan untuk beban induktif pengujian dilakukan mulai dari pukul 11:58 WIB hingga pukul 15:16 WIB. Masing-masing pengujian dilakukan dengan selang waktu ± 15 menit. Hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 4.1 & 4.2 berikut.

Tabel 4. 1 Rekapitulasi Hasil Ukur Pengujian Efisiensi Panel Surya Berbeban Resistif

No.	Waktu	Radiasi (W/m ²)	P _{in} (W)	V _{DC} (V)	I _{DC} (A)	P _{Out} DC(W)	Efisiensi (%)
1	12:00	735,7	1442,56	17,9	4,65	83,23	5,77
2	12:23	228,9	448,83	16,7	3,89	64,96	14,47
3	12:40	243,6	477,651	17,9	8,43	150,9	31,59
4	13:07	651,9	1278,25	18,2	6,26	113,9	8,913
5	13:15	440,5	863,73	16,2	4,82	78,08	9,04
6	13:35	650,1	1274,72	18,3	6,65	121,7	9,547
7	13:50	162,1	317,846	16,5	2,73	45,045	14,172
8	14:05	443,9	870,4	16,4	4,64	76,1	8,743
9	14:25	435,5	853,93	17,9	5,4	96,66	11,32
10	14:40	255,5	500,98	16,7	2,93	48,93	9,77



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

11	14:55	96,2	188,623	15,5	1,61	24,95	13,23
Rata-Rata							12,415

Tabel 4. 2 Rekapitulasi Hasil Ukur Pengujian Efisiensi Panel Surya Berbeban Induktif

No.	Waktu	Radiasi (W/m ²)	P _{in} (W)	V _{DC} (V)	I _{DC} (A)	P _{Out} DC(W)	Efisiensi (%)
1	12:04	776,7	1522,9	17,6	3,56	62,65	4,114
2	12:30	283,7	556,28	18,3	7,4	135,42	24,34
3	13:00	786,2	1541,58	17,9	7,4	135,42	8,784
4	13:13	222,6	436,47	16	3,7	59,2	13,56
5	13:15	435,1	853,14	18,6	4,71	87,6	10,27
6	13:35	545,3	1069,2	18	6,35	114,3	10,7
7	13:50	170,5	334,32	17,8	2,95	52,51	15,71
8	14:05	350,1	686,48	18,2	3,92	71,34	10,39
9	14:25	421,3	826,085	17,8	4,5	80,1	9,7
10	14:40	268	525,49	17	3,41	57,97	11,03
11	14:55	93,4	183,14	16,6	1,57	26,06	14,231
Rata-Rata							12,074

2. Perhitungan Daya Input, Daya Output, dan Efisiensi Panel Surya

Dibutuhkan nilai daya input dan daya output panel surya dalam menghitung efisiensinya. Sebagai sampel, perhitungannya bisa dilakukan dengan mengambil data di saat panel surya bekerja pada efisiensi tertinggi.

Untuk menghitung daya input, dibutuhkan nilai radiasi matahari dan luas area panel surya. Berdasarkan data yang telah terkumpul sebelumnya, diketahui bahwa radiasi matahari yang terukur pada saat panel surya bekerja pada efisiensi tertinggi ketika dihubungkan dengan beban resistif dan induktif berturut-turut ada di nilai 243,6 W/m² dan 283,7 W/m². Dengan menggunakan persamaan (2.2) maka didapatkan daya input untuk masing-masing beban pengujian adalah sebagai berikut:

Beban Resistif

$$P_{in} = G \times A$$

$$P_{in} = 243,6 \text{ W/m}^2 \times 1,9608 \text{ m}^2$$

$$P_{in} \approx 477,651 \text{ W}$$

Beban Induktif

$$P_{in} = G \times A$$

$$P_{in} = 283,7 \text{ W/m}^2 \times 1,9608 \text{ m}^2$$

$$P_{in} \approx 556,28 \text{ W}$$



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Sedangkan untuk menghitung daya output, dibutuhkan nilai tegangan dan arus panel surya. Berdasarkan data yang telah terkumpul sebelumnya, diketahui bahwa tegangan dan arus panel surya yang terukur pada saat panel surya bekerja di efisiensi tertinggi ketika dihubungkan dengan beban resistif serta induktif berturut-turut ada di nilai 17,9 V & 8,43 A serta 18,3 V & 7,4 A. Dengan menggunakan persamaan (2.3) maka didapatkan daya output untuk masing-masing beban pengujian adalah sebagai berikut:

Beban Resistif

$$P_{out} = V_{panel} \times I_{panel}$$

$$P_{out} = 17,9 \text{ V} \times 8,43 \text{ A}$$

$$P_{out} \approx 150,9 \text{ W}$$

Beban Induktif

$$P_{out} = V_{panel} \times I_{panel}$$

$$P_{out} = 18,3 \text{ V} \times 7,4 \text{ A}$$

$$P_{out} \approx 135,42 \text{ W}$$

Setelah didapatkan nilai daya input dan outputnya, maka nilai efisiensi panel surya untuk masing-masing beban pengujianya dapat ditentukan menggunakan persamaan (2.1) sebagai berikut:

Beban Resistif

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{150,9}{477,651} \times 100\%$$

$$\eta \approx 31,59 \%$$

Beban Induktif

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{135,42}{556,28} \times 100\%$$

$$\eta \approx 24,34 \%$$

4.1.4 Analisis Data Pengujian

Berdasarkan hasil pengujian dan perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya, terlihat bahwa efisiensi panel surya tertinggi ketika dihubungkan dengan beban resistif tercatat sebesar 31,59% yang nilainya berfluktuasi antara 5,77 – 31,59% dari setiap selang ± 15 -20 menit waktu pengukuran dengan rata-rata sebesar 12,415%. Sementara pada pembebanan induktif, terlihat bahwa tingkat efisiensi tertingginya berada di nilai 24,34% yang berfluktuasi lebih besar dari pembebanan resistif antara 4,114 – 24,34% dari setiap selang ± 15 -20 menit waktu pengukuran dengan rata-rata sebesar 12,074%.

Secara keseluruhan, kinerja modul fotovoltaik pada saat berbeban ini dapat dikategorikan baik karena hasilnya sejalan dengan standar efisiensi untuk panel surya jenis *Monocrystalline* yang umumnya berada di kisaran 12-14%. Walaupun begitu, pengujian dengan variasi beban yang berbeda tidak

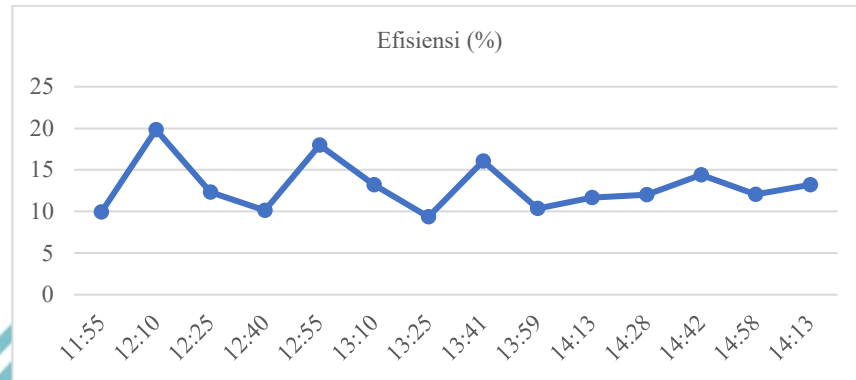


Hak Cipta :

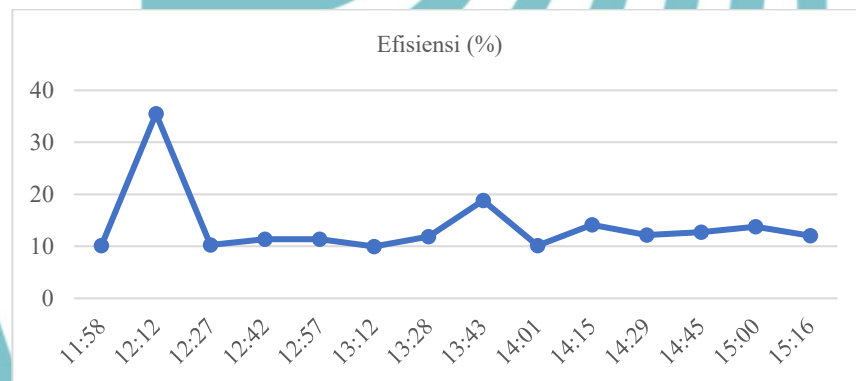
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

memengaruhi nilai efisiensinya karena efisiensi hanya tergantung pada spektrum, intensitas sinar matahari dan suhu sel surya.

Terlampir juga grafik nilai efisiensi untuk masing-masing beban pengujiannya pada gambar 4.3 dan 4.4 berikut.



Gambar 4. 3 Grafik Efisiensi Beban Resistif



Gambar 4. 4 Grafik Efisiensi Beban Induktif

4.2 Pengujian Rasio Performa Modul Fotovoltaik

4.2.1 Deskripsi Pengujian

Pada tahap pengujian ini, akan dihitung persentase rasio performa pada saat dihubungkan dengan beban melalui perhitungan *final yield* dan *reference yield*. Nilai rasio performa yang dihasilkan kemudian akan dijadikan bahan perbandingan terhadap rasio performa yang dianggap layak sesuai dengan standar yang ada yaitu 70-90%.

Beban yang dihubungkan terbagi menjadi dua jenis, yakni beban resistif dan beban induktif. Beban resistif menggunakan 4 buah lampu pijar, yang terdiri dari 2 lampu berdaya 25 W dan 2 lampu lainnya berdaya 95 W.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Sementara itu, untuk beban induktif digunakan 4 unit motor AC satu fasa dengan daya masing-masing sebesar 45 W.

4.2.2 Prosedur Pengujian

1. Mengukur intensitas radiasi matahari untuk menentukan daya input inverter On-Grid yang dilakukan menggunakan solar power meter seperti pada gambar 4.5 berikut.



Gambar 4. 5 Solar Power Meter

(Sumber: Dokumen Pribadi)

2. Menghubungkan beban resistif dan induktif menggunakan kabel *jumper* secara bergantian.
3. Mengukur parameter AC, seperti tegangan serta arus, untuk menentukan daya output panel surya menggunakan tang ampere seperti pada gambar 4.6 berikut.



Gambar 4. 6 Tang Ampere Fluke

(Sumber: Dokumen Pribadi)

4. Menghitung daya output PLTS sisi AC yang telah terkumpul menggunakan rumus sesuai dengan dasar teorinya.

4.2.3 Data Hasil Pengujian

1. Rekapitulasi Hasil Ukur



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Pada tanggal 7 Juli 2026 dilakukan pengujian persentase rasio performa saat dihubungkan dengan beban resistif dan induktif yang diawali dengan pengumpulan variabel-variabel yang dibutuhkan seperti energi ekspor, impor, dan total energinya. Pengujian dilakukan mulai dari pukul 12:00 WIB hingga pukul 14:55 WIB. Masing-masing pengujian dilakukan dengan selang waktu $\pm 15-20$ menit. Hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 4.3 & 4.4 sebagai berikut.

Tabel 4. 3 Rekapitulasi Hasil Ukur Sistem PLTS Berbeban Induktif

No.	Waktu	V _{AC} (V)	I _{AC} (A)	P _{Out} AC(W)	Radiasi (W/m ²)
1	12:04	229,9	0,78	179,322	776,7
2	12:30	228,6	0,77	176,022	283,7
3	13:00	226,8	0,78	176,904	786,2
4	13:13	228	0,68	155,04	222,6
5	13:15	227,6	0,78	177,528	435,1
6	13:35	230,2	0,79	181,858	545,3
7	13:50	230,3	0,78	179,634	170,5
8	14:05	230,2	0,79	181,858	350,1
9	14:25	230,3	0,77	177,331	421,3
10	14:40	230,5	0,78	179,79	268
11	14:55	230,5	0,78	179,79	93,4
RATA-RATA				176,8252	395,7182

Tabel 4. 4 Rekapitulasi Hasil Ukur PLTS Berbeban Resistif

No.	Waktu	V _{AC} (V)	I _{AC} (A)	P _{Out} AC(W)	Radiasi (W/m ²)
1	12:00	229,3	0,57	130,701	735,7
2	12:23	228,6	0,95	217,17	228,9
3	12:40	227,9	0,96	218,784	243,6
4	13:07	228,7	0,77	176,099	651,9
5	13:15	227,8	0,95	216,41	440,5
6	13:35	230,2	0,94	216,388	650,1
7	13:50	230,2	0,95	218,69	162,1
8	14:05	228,5	0,95	217,075	443,9
9	14:25	230,1	0,95	218,595	435,5
10	14:40	229,5	0,95	218,025	255,5
11	14:55	229,8	0,94	216,012	96,2
RATA-RATA				267,99	584,33



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

1. Perhitungan *Final Yield*, *Reference Yield* dan Rasio Performa

Dibutuhkan nilai *final yield* dan *reference yield* panel surya dalam menghitung rasio performanya. Untuk menghitung *final yield*, dibutuhkan nilai keluaran energi AC dan total daya yang ter-*install* pada panel surya. Berdasarkan data yang telah terkumpul sebelumnya, diketahui bahwa rata-rata energi per-jam yang terpantau ketika dihubungkan dengan beban induktif dan resistif berturut-turut ada di nilai 176,8252 W/jam dan 267,99 W/jam. Karena pengujian dilakukan selama 3 jam, maka total nilai keluaran energi AC ketika dihubungkan dengan beban induktif dan resistif berturut-turut ada di nilai 530,4755 W/jam dan 803,9937 W/jam. Dengan menggunakan persamaan 2.4 maka didapatkan *final yield* untuk masing-masing beban pengujian adalah sebagai berikut:

<u>Beban Induktif</u>	<u>Beban Resistif</u>
$Y_f = \frac{E_{ac}}{P_{pv}}$	$Y_f = \frac{E_{ac}}{P_{pv}}$
$Y_f = \frac{530,4755}{400}$	$Y_f = \frac{803,9937}{400}$
$Y_f \approx 1,326 \text{ kWh/kWp}$	$Y_f \approx 2,01 \text{ kWh/kWp}$

Sedangkan menghitung *reference yield*, dibutuhkan nilai radiasi matahari. Berdasarkan data yang telah terkumpul sebelumnya, diketahui bahwa rata-rata iradiasi yang terukur ketika dihubungkan dengan beban induktif serta resistif berturut-turut ada di nilai 395,72 W/m² & 584,3273 W/m². Karena pengujian dilakukan selama 3 jam, maka total nilai keluaran energi AC ketika dihubungkan dengan beban induktif dan resistif berturut-turut ada di nilai 1187,15 W/m² dan 1752,982 W/m².

Dengan menggunakan persamaan 2.5 maka didapatkan *reference yield* untuk masing-masing beban pengujian adalah sebagai berikut:

<u>Beban Induktif</u>	<u>Beban Resistif</u>
$Y_r = \frac{HT}{G_{STC}}$	$Y_r = \frac{HT}{G_{STC}}$
$Y_r = \frac{1187,15}{1000}$	$Y_r = \frac{1752,3273}{1000}$
$Y_r \approx 1,187 \text{ kWh/kW}$	$Y_r \approx 1,753 \text{ kWh/kW}$



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Setelah didapatkan nilai *final yield* dan *reference yield*-nya, maka rasio performa panel surya untuk masing-masing beban pengujiannya dapat ditentukan menggunakan persamaan 2.6 sebagai berikut:

<u>Beban Induktif</u>	<u>Beban Resistif</u>
$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \times 100\%$	$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \times 100\%$
$PR = \frac{1,3262}{1,187} \times 100\%$	$PR = \frac{2,01}{1,753} \times 100\%$
$PR \approx 111,71 \%$	$PR \approx 114,66 \%$

4.2.4 Analisis Data Pengujian

Berdasarkan hasil pemantauan dan perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya, terlihat bahwa rasio performa ketika dihubungkan dengan beban induktif tercatat sebesar 111,71 % sedangkan pada pembebanan resistif sebesar 114,66 % dari setiap selang $\pm 15-20$ menit waktu pengukuran. Kinerja panel surya ini dapat dikategorikan baik karena hasilnya sejalan, bahkan melebihi, daripada standar rasio performa yang umumnya berada di kisaran 70-90%.

Karakteristik beban induktif yang memiliki faktor daya tertinggal serta memerlukan daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) untuk menciptakan medan magnet menyebabkan arus total (I) yang mengalir melalui sistem AC lokal akan meningkat. Hal ini memperbesar rugi-rugi tembaga pada kabel distribusi AC antara inverter dan beban.

Saat motor listrik menyala, terjadi lonjakan arus (*inrush current*) yang dapat menyebabkan penurunan tegangan sesaat (*voltage sag*). Jika penurunan ini melewati batas toleransi inverter, inverter akan melakukan trip atau derating (penurunan daya mandiri), yang langsung memotong produksi energi AC dan menjatuhkan nilai PR.

4.3 Pengujian Kinerja kWh Exim

4.3.1 Deskripsi Pengujian

Pada tahap pengujian ini, akan dilakukan pengukuran daya output PLTS dan beban yang terpasang, serta pemantauan energi yang terekspor dan terimpor dari dan/atau ke PLN. Hasil pengukuran dan pemantauannya kemudian akan dijadikan bahan perbandingan terhadap cara kerja kWh Exim



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

yang sesuai dasar teorinya. Secara teori, ekspor daya dari PLTS ke PLN terjadi apabila produksi listrik PLTS melampaui kebutuhan beban. Sebaliknya, impor daya dari PLN akan berlangsung jika sistem PLTS tidak mampu menghasilkan energi yang cukup untuk menanggung beban terpasang tersebut.

Beban terpasang merupakan beban resistif yang terdiri dari 3 buah lampu LED berdaya 5 W serta 1 buah lampu pijar berdaya 25 W untuk pengujian hari pertama dan 40 W untuk pengujian hari kedua.

4.3.2 Prosedur Pengujian

1. Menghubungkan beban resistif menggunakan kabel steker.
2. Mengukur parameter AC dan DC, seperti tegangan serta arus, untuk menentukan daya input PLTS dan beban yang terpasang menggunakan tang ampere seperti pada gambar 4.9 berikut.



Gambar 4. 7 Tang Ampere Fluke
(Sumber: Dokumen Pribadi)

3. Menghitung daya input PLTS dan beban terpasang dari data-data yang telah terkumpul menggunakan rumus sesuai dengan dasar teorinya.
4. Melakukan pemantauan ekspor dan impor energi melalui kWh exim maupun HMI seperti pada gambar 4.10 & 4.11 berikut.



Gambar 4. 8 kWh Exim
(Sumber: Dokumen Pribadi)



Gambar 4. 9 HMI
(Sumber: Dokumen Pribadi)



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4.3.3 Data Hasil Pengujian

Pada tanggal 13 Juli 2026 dilakukan pengujian kinerja kWh Exim dengan beban terpasang berjenis resistif yang memiliki total daya sebesar ± 40 W. Pengujian dilakukan mulai dari pukul 10:00 WIB hingga pukul 15:30 WIB dengan selang waktu ± 15 menit. Hasil pengujiannya dapat dilihat pada tabel 4.5 berikut.

Tabel 4. 5 Data Hasil Pengujian kWh Exim Hari Pertama

No.	Waktu	V DC (V)	I DC (A)	P _{Out} DC(W)	V AC Beban (V)	I AC Beban (A)	P AC Beban (W)	Energi Ekspor (kWh)	Energi Impor (kWh)	Energi Total (kWh)	Ket.
1	10:00	21,1	0,49	10,34	231,2	0,17	39,3	0,51	0,11	0,62	Impor
2	10:15	18	6	108	230,3	0,18	41,45	0,51	0,11	0,62	Ekspor
3	10:30	18,1	8	144,8	230,3	0,18	41,45	0,53	0,11	0,64	Ekspor
4	10:45	17,9	7,62	136,4	230,2	0,17	39,13	0,53	0,11	0,64	Ekspor
5	11:00	17,7	8,26	146,2	230,2	0,17	39,13	0,53	0,11	0,64	Ekspor
6	11:15	17,9	6,52	116,7	230,4	0,17	39,17	0,54	0,11	0,65	Ekspor
7	11:30	17,7	7,08	125,3	229,3	0,17	39	0,55	0,11	0,66	Ekspor
8	11:45	17,8	8,46	150,6	231,2	0,17	39,3	0,56	0,11	0,67	Ekspor
9	12:00	17,6	8,91	156,8	232,2	0,17	39,5	0,57	0,11	0,68	Ekspor
10	12:15	17,5	9,93	173,8	232,3	0,17	39,5	0,59	0,11	0,7	Ekspor
11	12:30	18	8,5	153	230,4	0,16	37	0,6	0,11	0,71	Ekspor
12	12:45	17,8	8,53	151,84	230,6	0,23	53,04	0,61	0,11	0,72	Ekspor
13	13:00	17,6	8,4	147,84	230,4	0,16	37	0,62	0,11	0,73	Ekspor
14	13:15	17,3	8,5	147,05	231,4	0,17	39,34	0,63	0,11	0,74	Ekspor
15	13:30	17,4	6,44	112,06	231	0,17	39,27	0,64	0,11	0,75	Ekspor
16	13:45	17,2	6,88	118,34	230,9	0,17	39,253	0,65	0,11	0,76	Ekspor
17	14:00	17,2	8,59	147,75	230,9	0,17	39,253	0,66	0,11	0,77	Ekspor
18	14:15	17,6	7,84	138	230,7	0,17	39,2	0,67	0,11	0,78	Ekspor
19	14:30	17,9	7,63	136,6	230,5	0,16	37	0,67	0,11	0,78	Ekspor
20	14:45	17,3	7,74	133,9	230,4	0,19	44	0,68	0,11	0,79	Ekspor
21	15:00	17,5	6,69	117,1	230,9	0,17	39,25	0,69	0,11	0,8	Ekspor
22	15:15	17,5	3,87	67,7	230,9	0,18	41,56	0,69	0,11	0,8	Ekspor
23	15:30	20,4	0,71	14,5	231	0,16	37	0,69	0,12	0,81	Impor

Pada tanggal 14 Juli 2026 dilakukan pengujian kinerja kWh Exim dengan beban terpasang berjenis resistif yang memiliki total daya sebesar ± 55 W. Pengujian dilakukan mulai dari pukul 9:15 WIB hingga pukul 15:30 WIB dengan selang waktu ± 15 menit. Hasil pengujiannya dapat dilihat pada tabel 4.6 berikut.



Tabel 4. 6 Data Hasil Pengujian kWh Exim Hari Kedua

No.	Waktu	V DC (V)	I DC (A)	P DC (W)	V AC Beban (V)	I AC Beban (A)	P AC Beban (W)	Energi Ekspor (kWh)	Energi Impor (kWh)	Energi Total (kWh)	Ket.
1	09:15	16,8	2,2	37	231,8	0,21	48,7	0,7	0,21	0,91	Impor
2	09:30	16,6	2,55	42,3	231,5	0,22	50,93	0,7	0,23	0,93	Impor
3	09:45	16,5	2,7	44,22	230,8	0,22	50,776	0,7	0,24	0,94	Impor
4	10:00	16,5	3,01	49,7	231,1	0,24	55,46	0,7	0,25	0,95	Impor
5	10:15	17,9	5,5	98,09	230,8	0,24	55,39	0,7	0,25	0,95	Ekspor
6	10:30	18,2	7,6	137,96	229,9	0,26	59,77	0,7	0,25	0,95	Ekspor
7	10:45	17,9	7,62	136,4	230,4	0,24	55,3	0,7	0,25	0,95	Ekspor
8	11:00	17,7	8,26	146,2	229,7	0,24	55,13	0,71	0,25	0,96	Ekspor
9	11:15	18,2	7,33	133,41	229,6	0,23	52,81	0,71	0,25	0,96	Ekspor
10	11:30	16,5	2,9	47,85	230,1	0,24	55,22	0,71	0,26	0,97	Impor
11	11:45	18,2	7,79	141,8	230,5	0,24	55,32	0,71	0,26	0,97	Ekspor
12	12:00	18,1	8	144,8	232,2	0,24	55,73	0,72	0,26	0,98	Ekspor
13	12:15	18,2	8	145,6	232,5	0,26	60,45	0,72	0,26	0,98	Ekspor
14	12:30	18,2	6,35	115,6	231,9	0,24	55,66	0,72	0,26	0,98	Ekspor
15	12:45	18,4	6,9	127	230,9	0,24	55,42	0,73	0,27	1	Ekspor
16	13:00	17,6	3,01	53	229,9	0,24	55,2	0,73	0,28	1,01	Impor
17	13:15	20,1	0,5	10,05	229,4	0,24	55,06	0,73	0,29	1,02	Impor
18	13:30	17,5	7,95	139,125	229,5	0,26	59,67	0,73	0,29	1,02	Ekspor
19	13:45	17,6	6,53	114,93	229,6	0,24	55,104	0,74	0,29	1,03	Ekspor
20	14:00	17,7	5,54	98,06	229,8	0,23	52,85	0,74	0,29	1,03	Ekspor
21	14:15	17,9	5,39	96,5	229,8	0,23	52,85	0,75	0,29	1,04	Ekspor
22	14:30	17,8	7,7	137,06	230,1	0,26	59,83	0,75	0,29	1,04	Ekspor
23	14:45	17,7	7,2	127,44	229,8	0,26	59,75	0,75	0,29	1,04	Ekspor
24	15:00	17,8	2,89	51,44	229,4	0,23	52,76	0,75	0,3	1,05	Impor
25	15:15	17,4	3,13	54,46	230	0,24	55,2	0,75	0,31	1,06	Impor
26	15:30	17,2	1,03	17,72	229,8	0,24	55,15	0,75	0,32	1,07	Impor

4.3.4 Analisis Data Pengujian

Berdasarkan hasil pengukuran dan pemantauan yang telah dilakukan sebelumnya, terlihat bahwa saat beban yang digunakan sebesar 40W dayanya berkisar antara 37-53,04W, dan saat beban yang digunakan sebesar 55W dayanya berkisar 48,7-60,45W. Besar daya yang dihasilkan (daya aktif) ini yang akan mempengaruhi adanya daya ekspor dan daya impor. Saat beban lebih kecil dari daya aktif yang dihasilkan maka sisa penggunaan daya beban akan masuk ke jala-jala atau jaringan PLN seperti yang terjadi di pukul 15:30 WIB pada beban 40W dan pukul 09:15–10:00, 11:30, 12:45–13:15, serta 15:00–15:30 WIB pada beban 55W sehingga pengukuran impor daya pada



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

kWh EXIM akan berhenti yang ditandai dengan tidak adanya tanda panah pada layar monitoring kWh EXIM. Namun saat beban lebih besar dari daya aktif yang dihasilkan maka kekurangan daya pada beban akan diambil dari jala-jala atau jaringan PLN seperti yang terjadi di pukul 10:00–15:15 WIB pada beban 40W dan pukul 10:15–11:15, 11:45–12:45, serta 13:30–14:45 WIB pada beban 55W sehingga pengukuran ekspor daya pada kWh EXIM akan berhenti yang ditandai dengan adanya tanda panah pada layar monitoring kWh EXIM. Proses ini terjadi dikarenakan PLTS yang dibangun menggunakan sistem On Grid.

