

(Artikel Penelitian/Ulasan)

# Optimalisasi PLTS Atap On-Grid di Indonesia: Standarisasi Inverter, Kinerja Ekonomi, dan Monitoring Berbasis IoT

Christoffel Napitupulu<sup>1</sup>, Muhammad Arya Rangga<sup>2</sup>, Muhammad Rizky<sup>3</sup>, Novri Trias Putra<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universitas Negeri Medan, Indonesia, email : [cristo.na700@gmail.com](mailto:cristo.na700@gmail.com)

<sup>2</sup>Universitas Negeri Medan, Indonesia, email : [muhhammadaryarangga@gmail.com](mailto:muhhammadaryarangga@gmail.com)

<sup>3</sup>Universitas Negeri Medan, Indonesia, email : [rzkyymuh91@gmail.com](mailto:rzkyymuh91@gmail.com)

<sup>4</sup>Universitas Negeri Medan, Indonesia, email : [novritrias@gmail.com](mailto:novritrias@gmail.com)

\* Christoffel Napitupulu

**Abstract:** This study explores the implementation of rooftop on-grid Solar Power Plants (PLTS) in Indonesia, with a focus on inverter standardization, economic feasibility, and IoT-based monitoring systems. Using a qualitative literature review of five scientific journals, the analysis covers technical compliance, financial viability, and the effectiveness of real-time monitoring. Findings indicate that on-grid PLTS reduces grid dependency by 20 kWh per month in residential areas and achieves a cost saving of 22.1% in financial institutions, with a payback period of approximately 8 years. The use of inverters that comply with national (SNI) and international standards—demonstrating over 95% efficiency and a Total Harmonic Distortion (THD) below 3%—ensures system reliability and performance. Additionally, the integration of IoT-based monitoring linked to Telegram offers high accuracy, with an error margin of less than 0.15%. This system also supports CO<sub>2</sub> emission reduction, aligning with Sustainable Development Goal (SDG) 7. Recommendations include revising energy export regulations and enhancing IoT data storage systems. This review provides valuable insights for policymakers and stakeholders in advancing the adoption of sustainable energy solutions in Indonesia.

**Keywords:** Grid Tie Power Plant Solar Panel; Internet Of Things; Inverter

**Abstrak:** Penelitian ini mengkaji penerapan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap jenis on-grid di Indonesia, dengan titik perhatian pada aspek standarisasi inverter, kelayakan ekonomi, serta sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT). Melalui pendekatan studi literatur kualitatif terhadap lima jurnal ilmiah, analisis dilakukan terhadap kesesuaian teknis, prospek finansial, dan efisiensi pemantauan secara real-time. Temuan menunjukkan bahwa implementasi PLTS on-grid mampu menurunkan ketergantungan pada jaringan listrik sebesar 20 kWh per bulan pada sektor perumahan, serta memberikan efisiensi biaya hingga 22,1% pada sektor lembaga keuangan, dengan estimasi waktu pengembalian investasi selama 8 tahun. Penggunaan inverter yang sesuai dengan standar nasional (SNI) dan internasional—dengan efisiensi lebih dari 95% dan total harmonic distortion (THD) di bawah 3%—menjamin stabilitas dan keandalan sistem. Selain itu, integrasi sistem monitoring IoT yang terhubung dengan Telegram menunjukkan akurasi tinggi dengan tingkat kesalahan kurang dari 0,15%. Sistem ini juga berkontribusi pada pengurangan emisi karbon dioksida, mendukung pencapaian Sustainable Development Goal (SDG) ke-7. Adapun rekomendasi yang diajukan meliputi penyempurnaan kebijakan ekspor energi listrik serta penguatan sistem penyimpanan data IoT. Kajian ini memberikan kontribusi penting bagi policy makers dan pemangku kepentingan dalam mendorong transisi menuju energi yang lebih berkelanjutan di Indonesia.

**Kata kunci:** PLTS Grid Tie; Internet Of Things; Inverter.

Diterima: Mei 07, 2025

Direvisi: Mei 27, 2025

Diterima: Juni 09, 2025

Diterbitkan: Juni 11, 2025

Versi sekarang: Juni 16, 2025



Hak cipta: © 2025 oleh penulis.  
Diserahkan untuk kemungkinan publikasi akses terbuka berdasarkan syarat dan ketentuan lisensi Creative Commons Attribution (CC BY SA) (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

## 1. Pendahuluan

Penggunaan energi terbarukan, khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), menjadi solusi penting dalam mendukung transisi energi di Indonesia. Pembangunan sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) grid-tie semakin mendominasi upaya transisi menuju sumber energi terbarukan yang berkelanjutan. PLTS grid-tie, yang terintegrasi dengan jaringan utilitas listrik, memungkinkan dalam pemanfaatan energi surya secara optimal untuk menghasilkan listrik sekaligus memfasilitasi pengurangan emisi gas rumah kaca. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) menekankan pentingnya pengurangan ketergantungan pada bahan bakar fosil guna mencapai target global terkait perubahan iklim. PLTS atap dengan sistem on-grid (grid-tie) kini semakin banyak diterapkan, baik pada skala perumahan, perkantoran, maupun industri. Sistem ini memungkinkan integrasi langsung dengan jaringan listrik PLN, sehingga dapat menekan konsumsi energi konvensional dan mendukung penghematan biaya listrik.

Beberapa studi menunjukkan bahwa keberhasilan implementasi sistem PLTS atap on-grid sangat dipengaruhi oleh berbagai aspek, seperti kepatuhan terhadap standar nasional dan internasional, pemilihan inverter yang sesuai dengan regulasi pasar domestik, serta perancangan sistem yang tepat sesuai kebutuhan beban. Di sisi lain, pemanfaatan teknologi modern seperti Internet of Things (IoT) untuk monitoring kinerja sistem telah menjadi nilai tambah dalam mengoptimalkan pengawasan dan pemeliharaan PLTS secara real time.

Penelitian-penelitian sebelumnya yang dilakukan di berbagai lokasi di Indonesia termasuk perumahan, kantor pemerintahan, hingga lembaga keuangan menunjukkan hasil yang positif terhadap kinerja sistem PLTS on-grid, baik dari sisi efisiensi, keandalan, maupun keberlanjutan. Namun, tantangan seperti keterbatasan standar inverter, variasi desain sistem, serta kebutuhan akan integrasi teknologi digital masih menjadi perhatian utama.

Oleh karena itu, tulisan ini bertujuan untuk melakukan tinjauan komprehensif terhadap berbagai studi terkait implementasi PLTS atap on-grid di Indonesia, mencakup standar teknis, pemilihan inverter, desain sistem, serta pemanfaatan IoT untuk monitoring. Harapannya, tinjauan ini dapat menjadi referensi bagi perancang sistem, pembuat kebijakan, dan pengguna akhir dalam mengembangkan sistem energi surya yang andal dan efisien di masa depan.

## 2. Tinjauan Literatur

### 2.1 Tinjauan standar inverter dan kepatuhan di pasar domestik

GTI adalah inverter yang mengubah arus searah (DC) dari panel surya menjadi arus bolak-balik (AC) dan menghubungkan sistem panel surya ke jaringan listrik umum. Inverter ini memiliki kemampuan untuk menjaga keseimbangan antara pasokan energi dari panel solar dan kebutuhan listrik dari jaringan. **Standar dan Kepatuhan**

Di Indonesia, penting untuk memastikan bahwa inverter yang digunakan memenuhi standar tertentu untuk menjamin efisiensi dan keamanan sistem PLTS atap. Standar yang umum diterapkan termasuk SNI (Standar Nasional Indonesia) dan sertifikasi

internasional untuk produk energi terbarukan. Kepatuhan terhadap standar ini menjadi syarat bagi para pelaku industri untuk memasuki pasar domestik.

Kepatuhan terhadap standar ini menjadi syarat bagi para pelaku industri untuk memasuki pasar domestik.

## 2.2 Kriteria Inverter yang Memenuhi Standar

efisiensi konversi yang tinggi. Daya tahan terhadap kondisi lingkungan seperti hujan, panas, dan debu. Fitur proteksi dari gangguan listrik dan voltase. Kemudahan dalam hal pemeliharaan dan aksesori yang mendukung.

## 2.3 Perbedaan Inverter di Pasar Domestik

Inverter yang tidak memenuhi standar mungkin memiliki biaya rendah tetapi dapat menyebabkan kerugian dalam efisiensi dan berisiko terhadap sistem elektrikal. Penggunaan inverter yang tidak bersertifikat dapat menghadapi masalah hukum dan regulatif di pasar domestik

## 2.4 Implementasi sistem monitoring berbasis IoT

Dengan semakin berkembangnya Internet of Things (IoT), pengelolaan energi telah mengalami perubahan signifikan. Pemantauan arus dan tegangan pada sistem pembangkit listrik tenaga surya sangat penting untuk efisiensi dan pemeliharaan.

Telegram, sebagai aplikasi pesan, digunakan sebagai antarmuka bagi pengguna untuk menerima notifikasi dan pembaruan mengenai sistem pembangkit listrik tenaga surya mereka secara real-time.

## 2.5 Gambaran Umum Implementasi:

### 1. Arsitektur Sistem:

- Sistem biasanya melibatkan sensor untuk mengukur arus dan tegangan panel surya.
- Sensor-sensor ini mengirimkan data ke mikrokontroler (seperti Arduino atau Raspberry Pi), yang memproses informasi dan mengirimnya ke server atau langsung ke API Telegram.

### 2. Komunikasi Data:

- Sistem ini menggunakan protokol MQTT atau HTTP untuk mentransfer data dari mikrokontroler ke server cloud atau lokal tempat pemrosesan terjadi.
- Mikrokontroler dapat diprogram untuk mengirim pembaruan pada interval tertentu atau berdasarkan pemicu tertentu (misalnya, penurunan tegangan atau lonjakan arus).

### 3. Penggunaan Bot Telegram:

- Sebuah bot Telegram dibuat dan terhubung ke mikrokontroler. Ketika bot menerima data, ia memproses dan memformat pesan sebelum mengirimkannya kepada pengguna.
- Pengguna dapat menerima peringatan secara real-time, mengirim perintah, atau meminta status terkini dari sistem pembangkit listrik tenaga surya mereka melalui Telegram.

#### 4. Antarmuka Pengguna:

- Antarmuka Telegram memungkinkan pengguna untuk berinteraksi dengan monitoring dengan mudah menggunakan perintah sederhana.
- Perintah dapat mencakup permintaan bacaan arus, peringatan untuk kondisi abnormal, dan perintah kontrol jika pengendalian perangkat merupakan bagian dari sistem.

#### 2.6 Keuntungan Menggunakan IoT dan Telegram:

- **Pemantauan Real-Time:** Pengguna dapat memantau sistem energi surya mereka secara real-time dari mana saja menggunakan perangkat seluler mereka.
- **Biaya Efektif:** Memanfaatkan platform pesan yang sudah ada seperti Telegram mengurangi kebutuhan untuk mengembangkan aplikasi kustom yang mahal.
- **Mudah Digunakan:** Sebagian besar orang sudah familiar dengan aplikasi pesan, yang mengurangi kurva belajar.

### 3. Metode

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur kualitatif dengan pendekatan deskriptif-komparatif, yang bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan hasil dari lima jurnal ilmiah yang membahas implementasi PLTS atap on-grid di berbagai konteks di Indonesia.

#### 4. Hasil dan Pembahasan

##### 4.1. Hasil dan Pembahasan dari Penelitian tentang Grid-Tie Inverter untuk PLTS Atap di Indonesia:

Data Hasil Temuan dari Penelitian tentang Grid-Tie Inverter untuk PLTS Atap di Indonesia:

###### 1. Ketersediaan Inverter di Pasar Domestik

- Total Model Inverter: 513 model inverter dari berbagai merek dan kapasitas.
- Rentang Kapasitas: 0,5 kW hingga 10 kW.
- Ketersediaan Berdasarkan Kapasitas:

Inverter dengan kapasitas 3 kW paling banyak tersedia, diikuti oleh 1 kW.

Inverter dengan kapasitas di bawah 1 kW (0,5 kW dan 0,6 kW) juga cukup banyak

###### 2. Status Manufaktur

- Impor vs Lokal: Sebagian besar inverter masih diimpor dari luar negeri (contoh: Cina, Jerman, Swiss). Beberapa pabrikan lokal seperti Pascal, Kenika, dan Luminous juga tersedia, tetapi tidak semua produknya memenuhi standar/sertifikasi.

- Merek yang Memenuhi Standar: ABB, Growatt, SMA, Schneider, Solis, Sofarsolar, dan Pascal.

- Merek Tanpa Standar/Sertifikasi: Usat, Kewo, Mitsuyama, Sunpro, Victron Energy, dll.

###### 3. Parameter Teknis Inverter

- THD (Total Harmonic Distortion):

Banyak inverter memiliki THD <3% (memenuhi standar PLN).

Namun, masih banyak inverter yang tidak mencantumkan data THD.

• Efisiensi:

Sebagian besar inverter memiliki efisiensi >95% pada beban penuh.

Beberapa inverter non-standar memiliki efisiensi rendah (contoh: 52,3%).

• Bentuk Gelombang Keluaran:

Mayoritas inverter menghasilkan gelombang sinus murni (pure sine wave).

• Jumlah Fasa:

Inverter satu fasa lebih banyak tersedia dibanding tiga fasa, sesuai kebutuhan rumah tangga.

4. Harga Inverter

• Harga Rata-Rata: Rp3.435.380 per kW.

• Perbandingan Harga: Inverter berstandar cenderung lebih mahal dibanding yang belum berstandar untuk kapasitas yang sama.

5. Standar dan Sertifikasi

• Standar Nasional (SNI dan SPLN): Inverter harus memenuhi kriteria seperti THD maksimal 3%, efisiensi >90%, fitur proteksi (over/under voltage, anti-islanding, dll.).

• Sertifikasi Internasional: Beberapa inverter memiliki sertifikasi IEC, CE, UL, dan lainnya.

6. Kesimpulan Utama

• Ketersediaan inverter di Indonesia cukup beragam dan memadai untuk mendukung PLTS atap.

• Kualitas inverter secara umum baik, terutama dari segi efisiensi dan THD.

• Perlunya peningkatan kesadaran akan pentingnya memilih inverter yang memenuhi standar/sertifikasi untuk keandalan sistem.

7. Daftar Inverter yang Memenuhi Standar

• Contoh merek dan model:

SMA: Sunny Boy 1.5, Sunny Tripower 10.0.

Growatt: MIN 2500TL-XH, SPH 6000.

Solis: Solis-1P3K-4G, Solis-3P10K-4G.

ABB: UNO-DM-5.0-TL-Plus, TRIO-8.5-TL-OUTD.

Pascal: MG3KTL, MG1K5TL.

Pembahasan

a. Pentingnya Standarisasi:

Standar dari BSN (SNI) dan PLN (SPLN) seperti SPLN D3.022-2:2012 menetapkan syarat inverter yang layak digunakan, termasuk:

o THD < 3%

o Efisiensi > 90%

o Proteksi overvoltage, overheat, arus lebih, GFDI, dsb.

o Fitur seperti anti-islanding, restart otomatis.

b. Kebutuhan Pasar dan Tantangan:

Inverter skala kecil ( $\leq 3$  kW) sangat diminati, cocok untuk rumah tangga. Namun, banyak inverter di pasar tidak jelas spesifikasinya, sehingga pemilihan harus hati-hati.

c. Efek Positif Ketersediaan Inverter Standar:

Mendukung program Gerakan Sejuta Surya Atap.

• Menjamin keandalan dan keamanan sistem PLTS atap.

• Meningkatkan kepercayaan masyarakat terhadap teknologi energi surya.

d. Catatan Negatif:

• Beberapa inverter masih belum efisien dan tidak sesuai standar (THD tinggi, efisiensi rendah).

• Produk tidak berstandar bisa berdampak buruk pada performa PLTS dan membahayakan sistem listrik.

## 4.2. Hasil dan Pembahasan Temuan Penerapan Sistem Tenaga Surya Grid-Tie pada Skala Perumahan

4.2.1. Feasibilitas Sistem Grid-Tie Skala Perumahan

Studi ini membuktikan bahwa penerapan sistem grid-tie fotovoltaik (PV) skala perumahan di Fiji dan negara-negara kepulauan Pasifik (PICs) sangat layak. Sistem ini berhasil

mengurangi ketergantungan pada listrik dari grid sebesar 20 kWh per bulan, yang menunjukkan potensi signifikan dalam menurunkan biaya energi rumah tangga. Keberhasilan ini didukung oleh kondisi geografis PICs yang memiliki intensitas radiasi matahari tinggi sepanjang tahun (Gambar 3), sehingga efisiensi konversi energi surya menjadi listrik optimal.

#### 2. Analisis Ekonomi dan Keunggulan Biaya

- **Biaya Awal dan ROI:** Sistem grid-tie memerlukan investasi awal 1000 FJD, lebih rendah daripada sistem stand-alone (2200 FJD). Meskipun periode pengembalian modal (13 tahun) terlihat panjang, sistem ini lebih hemat dalam jangka panjang karena minimnya biaya pemeliharaan (Tabel 3).

- **Pengurangan Biaya Operasional:** Eliminasi baterai penyimpanan tidak hanya menekan biaya awal tetapi juga menghilangkan biaya penggantian baterai yang biasanya diperlukan setiap 5–10 tahun pada sistem stand-alone.

- **Kesesuaian dengan Kebijakan Energi Fiji:** Hasil ini sejalan dengan target pemerintah Fiji untuk mencapai 100% energi terbarukan pada 2030, sekaligus mendukung SDG 7.

#### 3. Dampak Lingkungan dan Sosial

- **Pengurangan Emisi Karbon:** Dengan menggantikan sebagian energi fosil, sistem grid-tie berkontribusi langsung pada penurunan emisi CO<sub>2</sub>, sesuai dengan komitmen global PICs terhadap mitigasi perubahan iklim.

- **Akses Energi Berkelanjutan:** Sistem ini dapat menjadi solusi bagi 4% wilayah urban dan 20% rural Fiji yang masih kekurangan listrik, terutama di daerah terpencil dengan akses grid terbatas.

#### 4. Keunggulan Dibanding Sistem Stand-Alone

- **Efisiensi Energi:** Sistem grid-tie menghilangkan losses yang terjadi pada proses penyimpanan baterai dan konversi tambahan, sehingga efisiensi daya lebih tinggi (Gambar 2 vs. Gambar 1).

- **Skalabilitas:** Desain modular memungkinkan penambahan kapasitas PV sesuai kebutuhan tanpa investasi besar pada baterai.

#### 5. Tantangan dan Solusi

- **Ketergantungan pada Grid:** Sistem tidak beroperasi saat grid mati (karena alasan keamanan). Solusi potensial adalah hybrid system dengan baterai terbatas untuk cadangan darurat.

- **Variabilitas Radiasi Matahari:** Meski radiasi di PICs stabil, analisis bulanan (Gambar 3) menunjukkan fluktuasi. Pemilihan sudut tilt panel yang dinamis (Equation 1) atau penggunaan MPPT (Gambar 4) dapat memaksimalkan harvest energi.

#### 6. Implikasi Kebijakan dan Rekomendasi

Hasil penelitian ini menyoroti potensi sistem grid-tie untuk mendukung transisi energi terbarukan di PICs. Pemerintah Fiji dapat mempertimbangkan insentif seperti subsidi untuk biaya instalasirekomkebi atau kebijakan net metering untuk memungkinkan penjualan kelebihan energi ke jaringan, yang dapat memperpendek periode ROI [20]. Selain itu, edukasi masyarakat tentang manfaat sistem grid-tie dan kemudahan instalasinya dapat meningkatkan adopsi di kalangan rumah tangga.

### 4.3. Hasil dan Pembahasan Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dengan Sistem On Grid di BPR BKK Mandiraja Cabang Wanayasa Kabupaten Banjarnegara

#### 4.3.1 Kinerja Output PLTS dan Iradiasi Matahari

Berdasarkan data hasil pengamatan dari bulan Juni hingga November 2021, diperoleh informasi bahwa nilai daya output dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berkorelasi dengan besar iradiasi matahari yang diterima di lokasi penelitian, yaitu di BPR BKK Mandiraja Cabang Wanayasa, Banjarnegara. Meskipun demikian, hubungan antara iradiasi matahari dan daya output tidak sepenuhnya linear.

Sebagai contoh, iradiasi tertinggi tercatat pada bulan Oktober sebesar 6,57 kWh/m<sup>2</sup>/hari, namun daya output rata-rata tertinggi justru terjadi pada bulan Juli sebesar 437,46 W dengan iradiasi sebesar 5,94 kWh/m<sup>2</sup>/hari. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat faktor lain yang mempengaruhi kinerja panel surya, seperti suhu lingkungan, sudut pemasangan panel terhadap posisi matahari, adanya bayangan, serta kebersihan permukaan panel.

#### 4.3.2 Efisiensi Inverter

Efisiensi inverter dihitung sebagai rasio antara daya output AC yang dihasilkan inverter dengan daya input DC dari panel surya. Selama periode pengamatan, efisiensi inverter (Solis Mini 1500 4G) rata-rata berada di atas 97%, yang merupakan indikator bahwa inverter bekerja dalam performa yang sangat baik. Efisiensi tertinggi tercatat mencapai 99,96%, sedangkan penurunan efisiensi terjadi pada tanggal 21 Juli, 9 November, dan 22 November 2021, yang disebabkan oleh gangguan teknis pada perangkat inverter.

#### 4.3.3 Energi Ekspor dan Impor

Sistem PLTS yang digunakan dalam penelitian ini merupakan sistem on grid yang terkoneksi langsung dengan jaringan listrik PLN. Energi listrik yang dihasilkan oleh PLTS dapat digunakan untuk memenuhi beban internal dan kelebihanannya dapat diekspor ke jaringan PLN. Hasil observasi menunjukkan bahwa energi yang diimpor dari PLN jauh lebih besar dibandingkan energi yang diekspor, dengan rasio sekitar 7 hingga 10 kali lipat.

Energi ekspor tertinggi tercatat pada tanggal 21 November 2021 (hari Minggu) sebesar 4.006 Wh, yang disebabkan oleh rendahnya konsumsi beban pada hari tersebut. Rata-rata persentase energi yang diekspor ke PLN berada pada kisaran 30% – 40% dari total energi yang dihasilkan oleh PLTS. Sementara itu, kebutuhan energi dari PLN masih mendominasi, yaitu sekitar 80% – 85% dari total kebutuhan energi harian di lokasi penelitian.

#### 4.3.4 Analisis Ekonomi

Analisis ekonomi dilakukan untuk mengetahui manfaat finansial dari pemasangan PLTS sistem on grid. Penghematan dihitung dari dua komponen, yaitu: (1) penghematan biaya akibat energi PLTS yang menggantikan konsumsi PLN, dan (2) pendapatan dari ekspor energi ke PLN.

Total penghematan biaya listrik selama 6 bulan operasional PLTS tercatat sebesar Rp 538.880. Penghematan ini terdiri dari Rp 394.347 akibat substitusi energi dari PLN ke PLTS, dan Rp 144.533 dari penjualan energi ke PLN. Tanpa penggunaan PLTS, total biaya listrik selama periode tersebut seharusnya sebesar Rp 2.438.897. Dengan demikian, pemasangan PLTS menghasilkan efisiensi biaya listrik sebesar 22,1%.

Temuan ini menunjukkan bahwa penggunaan PLTS sistem on grid tidak hanya mendukung efisiensi energi, tetapi juga mampu menekan biaya operasional listrik secara signifikan. Namun demikian, potensi penghematan maksimal masih belum tercapai karena dominasi konsumsi dari jaringan PLN, sehingga peningkatan kapasitas PLTS atau optimalisasi pemanfaatannya masih memungkinkan dilakukan untuk efisiensi yang lebih tinggi di masa depan.

### 4.4. Hasil & Pembahasan perancangan sistem PLTS Atap on-grid pada Kantor BAPPEDA LITBANG Kota Probolinggo

#### 4.4.1 Hasil

##### 1. Data Lokasi

Nama Lokasi: Kantor BAPPEDA LITBANG Kota Probolinggo

Koordinat: Lintang Selatan -7.7533132", Bujur Timur 133.2071383"

Daya PLN Terpasang: 33.000 VA (33 kVA)

Luas Atap Tersedia:

- Atap besar: 183,7 m<sup>2</sup>
- Atap kecil: 50,1 m<sup>2</sup>
- Total luas sisi utara atap: 233,8 m<sup>2</sup>

##### 2. Sudut kemiringan atap: 32"

Data Beban Listrik

Konsumsi listrik bulanan: Bervariasi antara ~6.500 - 9.600 kWh/bulan

Rata-rata konsumsi per tahun (2019): 90.749,67 kWh

Pemakaian daya puncak harian: 21 kWh

Tagihan total listrik PLN (2019): Rp122.693.552

##### 3. Data Radiasi Matahari

Sumber data: NASA Data Access Viewer

Data iklim yang digunakan:

- Radiasi Global Horizontal (GHI)
- Suhu
- Kecepatan angin
- Kelembapan

Data ini digunakan untuk simulasi di software PVsyst

#### 4. Data Komponen PLTS

A Skenario 1 (21,6 kWp)

Jumlah panel: 48 buah

Jenis panel: Longi Solar 450 Wp

Total kapasitas: 21,6 kWp

Inverter: Growatt 20000TL3X (20 kW)

Tujuan: Disesuaikan dengan kebutuhan puncak kantor, minim ekspor energi.

B Skenario 2 (32,4 kWp)

Jumlah panel: 72 buah

Jenis panel: Longi Solar 450 Wp

Total kapasitas: 32,4 kW/p

Inverter: Growatt 30000TL3S (30 kW)

Tujuan: Kapasitas lebih besar, memungkinkan ekspor energi ke PLN.

#### 5. Perhitungan Teknis (Hasil Simulasi PVsyst)

- Produksi Energi Tahunan

Skenario 1: 34.772 kWh

Skenario 2: 52.782 kWh

- Energi PLTS Terpakai vs Diekspor

Skenario 1:

Terpakai: 30.560 kWh

Diekspor: 4.212 kWh

Skenario 2:

Terpakai: 40.948 kWh

Diekspor: 11.834 kWh

- Investasi

Skenario 1: Rp267.000.000

Skenario 2: Rp395.850.000

- Keuntungan Selama 30 Tahun

Skenario 1: Rp406.863.069 (152% dari investasi)

Skenario 2: Rp595.619.904 (150% dari investasi)

- Payback Period (DPP):

Keduanya: ~8 tahun.

### 4.5.2 PEMBAHASAN

#### 1 Analisis Lokasi dan Kebutuhan Energi

Kantor BAPPEDA LITBANG Kota Probolinggo terletak pada koordinat  $-7.7533132^{\circ}$  LS dan  $113.2071383^{\circ}$  BT, dengan daya listrik terpasang sebesar 33 kVA. Berdasarkan data konsumsi listrik tahun 2019, tercatat total pemakaian sebesar 90.749,67 kWh atau rata-rata sekitar 7.562 kWh per bulan. Sementara itu, pemakaian daya puncak harian mencapai 21 kWh. Atap bangunan yang tersedia untuk instalasi PLTS memiliki total luas 233,8 m<sup>2</sup>, dengan sudut kemiringan 32°, arah utara, sehingga sangat ideal untuk pemasangan sistem panel surya di wilayah tropis seperti Indonesia. Pemilihan lokasi dan kondisi atap yang sesuai menjadi salah satu penentu keberhasilan perancangan sistem PLTS on-grid secara teknis.

#### 2 Desain Sistem PLTS: Dua Skenario Perbandingan

Untuk mengoptimalkan manfaat sistem PLTS on-grid, dilakukan perancangan dua skenario konfigurasi sistem dengan kapasitas berbeda:

- Skenario 1 (21,6 kWp) dirancang agar sesuai dengan kebutuhan daya puncak kantor dan bertujuan untuk meminimalkan ekspor energi ke jaringan PLN. Sistem ini terdiri dari 48 panel surya Longi Solar 450 Wp dan inverter Growatt 20000TL3X berkapasitas 20 kW.

- Skenario 2 (32,4 kWp) memiliki kapasitas lebih besar dari kebutuhan puncak kantor, yang memungkinkan ekspor energi listrik ke jaringan PLN dalam jumlah signifikan. Sistem ini menggunakan 72 panel surya Longi Solar 450 Wp dan inverter Growatt 30000TL3S berkapasitas 30 kW.

Kedua skenario dirancang dengan mempertimbangkan regulasi dalam PERMEN ESDM No. 49 Tahun 2018, yang membatasi nilai ekspor energi listrik ke PLN sebesar 65% dari total energi yang dikirimkan ke jaringan.

### 3. Hasil Simulasi Energi (PVsyst)

Simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst memberikan hasil sebagai berikut:

- Produksi Energi Tahunan:
  - o Skenario 1: 34.772 kWh
  - o Skenario 2: 52.782 kWh
- Distribusi Energi:
  - o Skenario 1: Energi terpakai 30.560 kWh (87,9%), energi diekspor 4.212 kWh (12,1%)
  - o Skenario 2: Energi terpakai 40.948 kWh (77,6%), energi diekspor 11.834 kWh (22,4%)

Hasil ini menunjukkan bahwa Skenario 1 lebih efisien dalam memaksimalkan pemanfaatan energi untuk kebutuhan internal, sedangkan Skenario 2 lebih banyak mengekspor energi yang kurang optimal secara ekonomi karena hanya dihitung sebesar 65% dalam tagihan PLN.

### 4. Analisis Investasi dan Penghematan

Estimasi biaya investasi berdasarkan harga komponen dari vendor Warung Energi menunjukkan:

- Skenario 1: Rp267.000.000
- Skenario 2: Rp395.850.000

Dalam jangka waktu 30 tahun operasi, dengan mempertimbangkan penurunan efisiensi panel dan biaya operasional, diperoleh:

- Total keuntungan bersih (NPV):
  - o Skenario 1: Rp406.863.069 (152% dari investasi awal)
  - o Skenario 2: Rp595.619.904 (150% dari investasi awal)
- Profitability Index (PI):
  - o Keduanya > 1, menunjukkan kelayakan investasi secara finansial.
- Discounted Payback Period (DPP):
  - o Keduanya mencapai titik impas dalam waktu sekitar 8 tahun, yang tergolong cepat dalam proyek energi terbarukan.

### 5. Efisiensi Ekonomi dan Rekomendasi

Secara teknis, kedua skenario mampu menghasilkan energi yang signifikan dan membantu menurunkan tagihan listrik secara substansial. Namun, Skenario 1 lebih efisien secara ekonomi karena memiliki nilai NPV yang tinggi dengan investasi yang lebih rendah, serta proporsi energi terpakai yang lebih besar. Hal ini mengurangi potensi kerugian akibat pembatasan nilai ekspor energi oleh PLN.

Sementara itu, meskipun Skenario 2 menghasilkan energi lebih banyak, efisiensi ekonominya sedikit lebih rendah akibat tingginya porsi ekspor energi yang kurang menguntungkan secara tarif. Namun, skenario ini dapat dipertimbangkan untuk jangka panjang apabila regulasi nilai ekspor energi PLN direvisi di masa mendatang.

## 4.5 Hasil dan Pembahasan Rancang Bangun Monitoring Arus dan Tegangan Pada PLTS Sistem On Grid Berbasis IoT Menggunakan Aplikasi Telegram

### 4.5.1 Hasil

Penelitian ini menghasilkan sistem monitoring arus dan tegangan berbasis Internet of Things (IoT) pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sistem On Grid dengan aplikasi Telegram sebagai antarmuka pengguna. Pengumpulan data dilakukan dalam dua skenario pengujian, yaitu kondisi tanpa beban dan kondisi berbeban dengan beban berupa lem tembak elektrik 20W.

Tabel 1. Hasil pengukuran arus dan tegangan Panel Surya pada hari pertama.

Waktu	Panel Surya 20 WP		Error%
	Monitoring	Manual	

	V	A	V	A	V	A
10:30	14,8	0,96	14,5	0,95	0,02%	0,01%
11:30	15,0	0,94	14,9	0,93	0,01%	0,01%
12:30	14,8	0,92	14,7	0,91	0,01%	0,01%
01:30	14,7	0,91	14,5	0,89	0,01%	0,02%
02:30	15,0	0,91	14,8	0,88	0,01%	0,03%

menunjukkan hasil pengukuran arus dan tegangan panel surya pada hari pertama. Rata-rata tegangan yang diperoleh melalui pengukuran sensor adalah 14,86 V dan arus sebesar 0,928 A, sementara pengukuran manual menggunakan multimeter menunjukkan nilai rata-rata 14,68 V dan 0,912 A. Persentase kesalahan rata-rata (error) antara sensor dan multimeter adalah 0,014%.

Tabel 2. Hasil pengukuran arus dan tegangan Panel Surya pada hari kedua.

Waktu	Panel Surya 20 WP					
	Monitoring		Manual		Error <sup>0</sup> %	
	V	A	V	A	V	A
10:30	14,5	0,82	14,3	0,81	0,01%	0,01%
11:30	14,8	0,89	14,5	0,87	0,02%	0,02%
12:30	15,3	0,93	15,0	0,92	0,02%	0,01%
01:30	14,9	0,92	14,8	0,90	0,01%	0,02%
02:30	14,6	0,88	14,4	0,87	0,01%	0,01%

Menyajikan hasil pengukuran pada hari kedua dengan rata-rata tegangan dari sensor sebesar 14,82 V dan arus sebesar 0,888 A, sedangkan hasil pengukuran manual adalah 14,6 V dan 0,874 A, dengan tingkat kesalahan rata-rata yang sama yaitu 0,014%.

Selanjutnya, pengujian output inverter dilakukan dalam kondisi berbeban, sebagaimana ditunjukkan pada

Tabel 3. Hasil pengukuran arus dan tegangan Output Inverter dengan beban lem tembak elektrik 20W.

Waktu	Output Inverter					
	Monitoring		Manual		Error <sup>0</sup> %	
	V	A	V	A	V	A
1	219,8	0,09	218,7	0,08	0,01%	0,12%
2	219,7	0,09	218,5	0,07	0,01%	0,29%
3	219,5	0,08	218,2	0,07	0,01%	0,14%
4	219,4	0,07	218,1	0,06	0,01%	0,17%
5	219,0	0,07	218,8	0,06	0,01%	0,17%

Pengukuran dilakukan selama 5 menit dengan interval 1 menit. Sensor mencatat rata-rata tegangan sebesar 219,48 V dan arus sebesar 0,08 A, sedangkan pengukuran manual menunjukkan tegangan 218,26 V dan arus 0,068 A. Tingkat kesalahan rata-rata antara sensor dan pengukuran manual untuk output AC adalah 0,094%.

#### 4.5.2 Pembahasan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem monitoring arus dan tegangan yang dikembangkan dapat bekerja dengan baik. Selisih nilai antara pembacaan sensor dan alat ukur manual (multimeter) sangat kecil, yang menunjukkan akurasi tinggi dari sensor INA219 untuk DC dan PZEM-004T untuk AC. Tingkat error di bawah 0,15% membuktikan bahwa sistem ini layak digunakan dalam pemantauan harian kondisi PLTS.

Implementasi IoT melalui mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan aplikasi Telegram memberikan kemudahan akses data secara real-time tanpa harus melakukan pengukuran langsung di lapangan. Hal ini sangat mendukung kebutuhan monitoring jarak jauh, terutama pada sistem PLTS yang tersebar dan tidak selalu diawasi secara fisik.

Selain itu, sistem ini dirancang dengan kemampuan otomatisasi switching sumber daya, di mana relay akan berpindah dari panel surya ke sumber listrik cadangan (PLN) saat tegangan

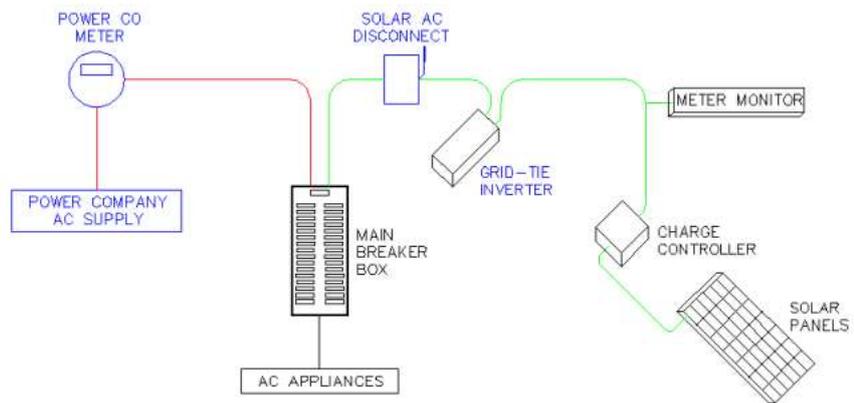
turun di bawah ambang batas 12V. Hal ini meningkatkan keandalan sistem PLTS hybrid dalam menjaga kontinuitas suplai listrik.

Temuan ini juga sejalan dengan penelitian sebelumnya oleh Zaini dan Bachrudin (2020), yang mengembangkan sistem monitoring berbasis IoT untuk pembangkit mikrohidro, dan mendukung kesimpulan bahwa integrasi IoT pada sistem energi terbarukan mampu meningkatkan efektivitas pengawasan dan pengambilan keputusan berbasis data.

Namun demikian, keterbatasan sistem terletak pada ketergantungannya terhadap koneksi internet. Ketika koneksi internet terputus, data dari sensor tidak dapat dikirim ke Telegram, sehingga monitoring tidak dapat dilakukan secara real-time.

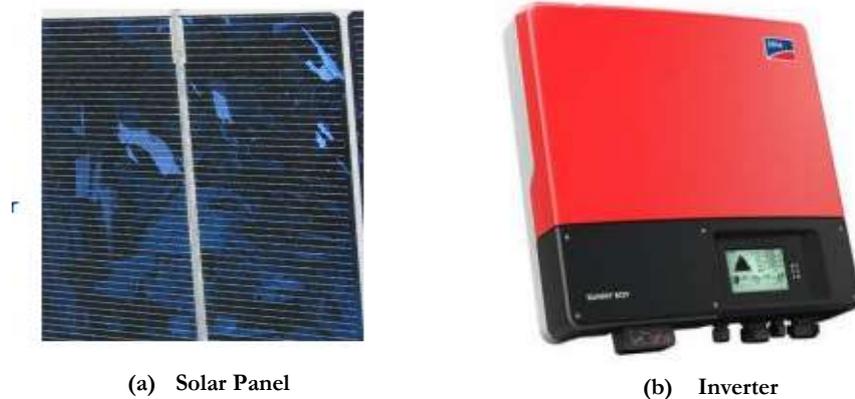
Untuk pengembangan ke depan, disarankan integrasi penyimpanan lokal (misalnya kartu SD) sebagai backup data saat koneksi internet terputus, serta pengembangan fitur notifikasi berbasis kondisi kritis (misalnya saat tegangan jatuh atau inverter tidak bekerja) agar pengguna dapat segera melakukan intervensi

4.1 . Gambar



Gambar 1. Skema untuk Sistem Grid-Tie .

Gambar ini menunjukkan skema sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) tipe grid-tie yang terintegrasi dengan jaringan utilitas. Komponen utama meliputi panel surya yang menghasilkan arus searah (DC), inverter grid-tie untuk mengkonversi DC menjadi arus bolak-balik (AC) yang sesuai dengan jaringan, serta meter monitor untuk pengukuran energi. Sistem juga mencakup perangkat disconnect untuk keamanan, main breaker box untuk distribusi daya ke peralatan AC, dan koneksi ke power company melalui power meter. Bagian bawah gambar menampilkan visual panel surya dan inverter fisik, menegaskan konfigurasi nyata sistem. Teks pendukung merujuk pada Gambar 2 dan Tabel 2 untuk detail tambahan.



**Gambar 2** ( a )Solar panel; ( b ) Inverter; merupakan komponen kunci dalam skema sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) grid-tie, yang secara langsung memengaruhi efisiensi, keandalan, dan kinerja keseluruhan sistem.

## 5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dikaji dalam jurnal ini, dapat disimpulkan bahwa sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap dengan konfigurasi on-grid memberikan kontribusi signifikan terhadap efisiensi energi dan penghematan biaya operasional, baik di sektor rumah tangga, kantor pemerintahan, maupun lembaga keuangan.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk meninjau implementasi teknis, pemilihan inverter, efisiensi sistem, serta pemanfaatan teknologi Internet of Things (IoT) dalam monitoring kinerja PLTS atap on-grid di Indonesia. Penelitian menunjukkan bahwa keberhasilan sistem PLTS sangat dipengaruhi oleh pemilihan inverter yang memenuhi standar nasional dan internasional, desain sistem yang sesuai kebutuhan, serta dukungan sistem monitoring real-time berbasis IoT seperti aplikasi Telegram. Meski begitu, masih ditemukan tantangan seperti dominasi penggunaan inverter non-standar, keterbatasan regulasi nilai ekspor energi, dan ketergantungan terhadap konektivitas internet dalam monitoring sistem.

Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji integrasi sistem penyimpanan data lokal pada sistem IoT, evaluasi skenario hybrid dengan baterai cadangan, serta pengaruh revisi kebijakan ekspor energi terhadap kelayakan ekonomi PLTS. Penelitian ini menunjukkan bahwa pengembangan sistem PLTS atap on-grid tidak hanya mendukung transisi energi berkelanjutan, tetapi juga memiliki potensi besar dalam mencapai target nasional dan global terkait energi bersih dan mitigasi perubahan iklim, sehingga penting untuk terus mendorong adopsi teknologi ini secara lebih luas di masa depan.

## Referensi

- [1] Deni Wijayanto Subuh Isnur Haryudo, Tri Wrahatnolo dan Nurhayati, Rancang Bangun Monitoring Arus dan Tegangan Pada PLTS Sistem On Grid Berbasis Internet of Things (IoT) Menggunakan Aplikasi Telegram, Volume 11 Nomor 03 Tahun 2022, 447-453
- [2] Gaura Putu, I Nyoman Satya Kumara dan Nyoman Setiawan, Grid Tie Inverter Untuk PLTS Atap Di Indonesia: Review Standar Dan Inverter Yang Compliance Di Pasar Domestik , Vol. 7, No. 2 Juni 2020
- [4] Aneesh A. Chand, Kushal A. Prasad, Kabir A. Mamun, Krishneel R. Sharma dan Kritish K. Chand, Adoption of Grid-Tie Solar System at Residential Scale, Clean Technol. 2019, 1, 15; doi:10.3390/cleantechnol1010015
- [5] Allan Ardiansyah, I Nyoman Setiawan dan I Wayan Sukerayasa, PERANCANGAN PLTS ATAP ON GRID SYSTEM PADA KANTOR BADAN PERENCANAAN PEMBANGUNAN DAERAH PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN KOTA PROBOLINGGO, Vol. 8, No. 4 Desember 2021.
- [6] International Electrotechnical Commission, "IEC 62109-1: Safety of power converters for use in photovoltaic power systems – Part 1: General requirements," Geneva, Switzerland, 2016.

- 
- [7] Badan Standardisasi Nasional, "SNI IEC 61727:2017 – Photovoltaic (PV) systems – Characteristics of the utility interface," Jakarta, Indonesia, 2017.
  - [8] PT PLN (Persero), "SPLN D3.022-2:2012 – Standar PLN untuk inverter grid-tie," Jakarta, Indonesia, 2012.
  - [9] A. P. Sari and Y. Pratama, "Analisis Kinerja Inverter Grid-Tie pada Sistem PLTS Atap di Indonesia," *Jurnal Teknologi Energi*, vol. 9, no. 2, pp. 123-130, 2018.
  - [10] R. Pratama and Y. Nugroho, "Implementasi Sistem Monitoring Berbasis IoT pada PLTS Atap Menggunakan Telegram," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 14, no. 1, pp. 45-52, 2020.
  - [11] K. Sopian and M. Y. Othman, "Future directions of solar photovoltaic technology and policy in Southeast Asia," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, pp. 1022-1031, 2017.
  - [12] International Energy Agency, "Solar PV Global Market Outlook 2021," Paris, France, 2021.
  - [13] D. P. Sari and S. Hidayat, "Studi Efisiensi dan Standarisasi Inverter pada PLTS Atap Rumah Tangga," *Jurnal Energi Terbarukan*, vol. 13, no. 3, pp. 110-119, 2019.
  - [14] M. Nurdin and R. Siregar, "Analisis Ekonomi Penerapan PLTS On-Grid pada Sektor Perumahan di Indonesia," *Jurnal Rekayasa Energi*, vol. 18, no. 1, pp. 67-75, 2022.
  - [15] S. Wahyudi and A. Ramadhan, "Pengaruh Standarisasi Inverter terhadap Keandalan PLTS Atap," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, vol. 8, no. 2, pp. 89-97, 2020.
  - [16] Kementerian ESDM RI, "Statistik Energi Surya Indonesia 2021," Jakarta, Indonesia, 2021.
  - [17] N. R. Kusuma and A. Putra, "Integrasi Sistem Monitoring IoT pada PLTS Atap Berbasis Telegram," *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer*, vol. 9, no. 4, pp. 381-388, 2021.
  - [18] A. Widodo and H. Susanto, "Studi Komparatif Inverter Grid-Tie Standar dan Non-Standar pada PLTS Atap," *Jurnal Energi dan Kelistrikan*, vol. 15, no. 2, pp. 56-64, 2019.
  - [19] United Nations, "SDG 7: Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all," New York, NY, USA, 2019.
  - [20] F. Siregar and R. Maulana, "Pengaruh Penggunaan Inverter Bersertifikat pada Efisiensi PLTS Atap," *Jurnal Energi Bersih*, vol. 11, no. 1, pp. 40-49, 2023.