# Pengembangan dan Evaluasi Eksperimental *Automatic Transfer Switch* PLN dan *Inverter* Berbasis IoT dengan Proteksi Multi-Parameter pada Sistem PLTS Off-Grid

**Saifan Ghali Felik Horizon[1], Isac Ilham Akbar Habibi [2]**

[1,2]Program Studi Teknik Elektronika Kampus Kediri, Politeknik Negeri Malang, Indonesia
Email: [1]isachabibi93@gmail.com, [2]2241190042@polinema.ac.id
Nomor Handphone : (+62) 878601100606

**Abstrak**

PLTS Kopi Gus memerlukan sistem yang mampu menjaga kontinuitas suplai listrik, melakukan monitoring secara *real-time*, serta memberikan proteksi ketika terjadi gangguan. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan *Automatic Transfer Switch* (ATS) sinkron berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk *monitoring*, kendali, dan proteksi terhadap *overload*, *undervoltage*, dan penurunan tegangan baterai pada instalasi PLTS *Off-Grid* Kopi Gus. Sistem menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor PZEM-004T untuk pengukuran parameter kelistrikan dan rangkaian pembagi tegangan untuk *sensing* tegangan baterai, serta platform *ThingsBoard* sebagai media monitoring dan kendali jarak jauh. Hasil pengujian menunjukkan akurasi sensor PZEM-004T sebesar 95,76% dan pembagi tegangan sebesar 99,24%. pengujian monitoring pengiriman data melalui MQTT sistem mampu menampilkan parameter kelistrikan secara real-time menghasilkan rata-rata *delay* sebesar 2.156 ms yang dipengaruhi oleh proses akuisisi data sensor, pemrosesan pada server *ThingsBoard*, dan pembaruan *dashboard*. Sementara itu, pengujian sistem dalam proteksi terhadap *overload*, *undervoltage*, dan penurunan tegangan baterai menunjukkan rata-rata waktu respons sistem sebesar 7,85 detik yang dipengaruhi proses verifikasi gangguan selama 5 detik, sinkronisasi ATS, dan komunikasi internet. melakukan perpindahan sumber listrik melalui tombol fisik maupun virtual, serta mengirim notifikasi Telegram saat terjadi perubahan kondisi sistem.

**Kata kunci:** *Automatic Transfer Switch*, *Internet of Things*, PLTS *Off-Grid*, ESP32, PZEM-004T, *ThingsBoard*..

***Abstract***

*The Kopi Gus solar power plant (PLTS) requires a system capable of maintaining a continuous electricity supply, performing real-time monitoring, and providing protection in the event of disruptions. This research aims to design and implement an Internet of Things (IoT)-based synchronous Automatic Transfer Switch (ATS) for monitoring, control, and protection against overload, undervoltage, and battery voltage drop at the Kopi Gus off-grid solar power plant. The system uses an ESP32 microcontroller, a PZEM-004T sensor for measuring electrical parameters and a voltage divider circuit for sensing battery voltage, and the ThingsBoard platform for remote monitoring and control. Test results show an accuracy of 95.76% for the PZEM-004T sensor and 99.24% for the voltage divider. Data transmission monitoring via MQTT allows the system to display electrical parameters in real time, resulting in an average delay of 2,156 ms, influenced by the sensor data acquisition process, processing on the ThingsBoard server, and dashboard updates. Meanwhile, system testing for overload, undervoltage, and battery voltage drop protection showed an average system response time of 7.85 seconds, influenced by a 5-second fault verification process, ATS synchronization, and internet communication. Switching power sources via physical or virtual buttons, and sending Telegram notifications when system conditions change.*

***Keywords:*** *Automatic Transfer Switch, Internet of Things, Off-Grid PLTS, ESP32, PZEM-004T, ThingsBoard.*

***This work is an open access article and licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)***

## 1. PENDAHULUAN

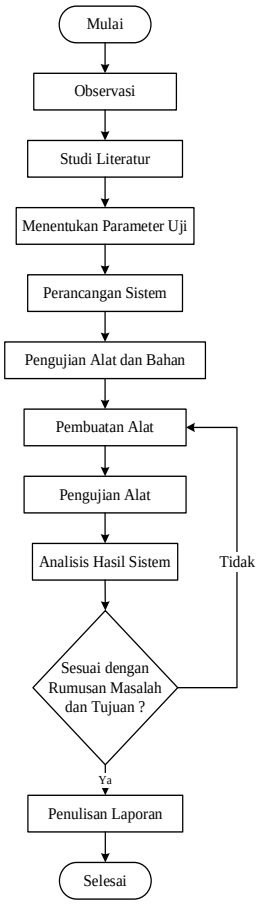
Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berkembang, termasuk pada sistem PLTS *off-grid* yang menuntut kemandirian dan kontinuitas listrik. Dalam sistem ini, inverter dan baterai berperan penting, tetapi kemampuan suplai dapat berubah akibat kondisi baterai, sumber energi, dan beban. Karena itu, diperlukan *Automatic Transfer Switch* (ATS) yang mampu memindahkan sumber otomatis saat sumber abnormal [1]. Berbagai penelitian mengembangkan ATS untuk integrasi PLN dan PLTS menggunakan ESP32, Arduino, dan sensor PZEM-004T [2]–[5].

Integrasi *Internet of Things* (IoT) memungkinkan monitoring dan kendali jauh melalui Blynk, MQTT, Node-RED, ThingsBoard, dan platform *cloud* [6]–[13]. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan ESP32, IoT, dan monitoring *real-time* bukan lagi aspek kebaruan utama. Permasalahan yang masih perlu dikaji adalah strategi pengambilan keputusan ketika sumber mengalami gangguan sebagian, seperti *overload*, *undervoltage*, atau penurunan tegangan baterai. Penggabungan beberapa parameter, verifikasi gangguan berbasis waktu, dan pemulihan sumber setelah kondisi normal masih terbatas [9], [14], [15]. Penelitian ini mengembangkan ATS dua sumber berbasis IoT dengan proteksi multi-parameter pada PLTS *off-grid*. Sistem menggunakan ESP32, dua sensor PZEM-004T untuk memantau PLN dan inverter, *voltage divider* untuk tegangan baterai, serta MQTT dan ThingsBoard untuk monitoring. Parameter yang dipantau meliputi tegangan, arus, daya, faktor daya, frekuensi, dan energi. Strategi proteksi menggunakan verifikasi gangguan berbasis waktu dan *Zero Crossing Detector* untuk switching.

Hasil pengujian menunjukkan akurasi PZEM-004T 95,76%, pembagi tegangan 99,24%, waktu respons proteksi rata-rata 7,85 detik, dan keterlambatan monitoring MQTT 2,156 detik. Kontribusi penelitian terletak pada integrasi monitoring, proteksi adaptif, switching otomatis, dan pemulihan sistem pada ATS.

## 2. METODE PENELITIAN

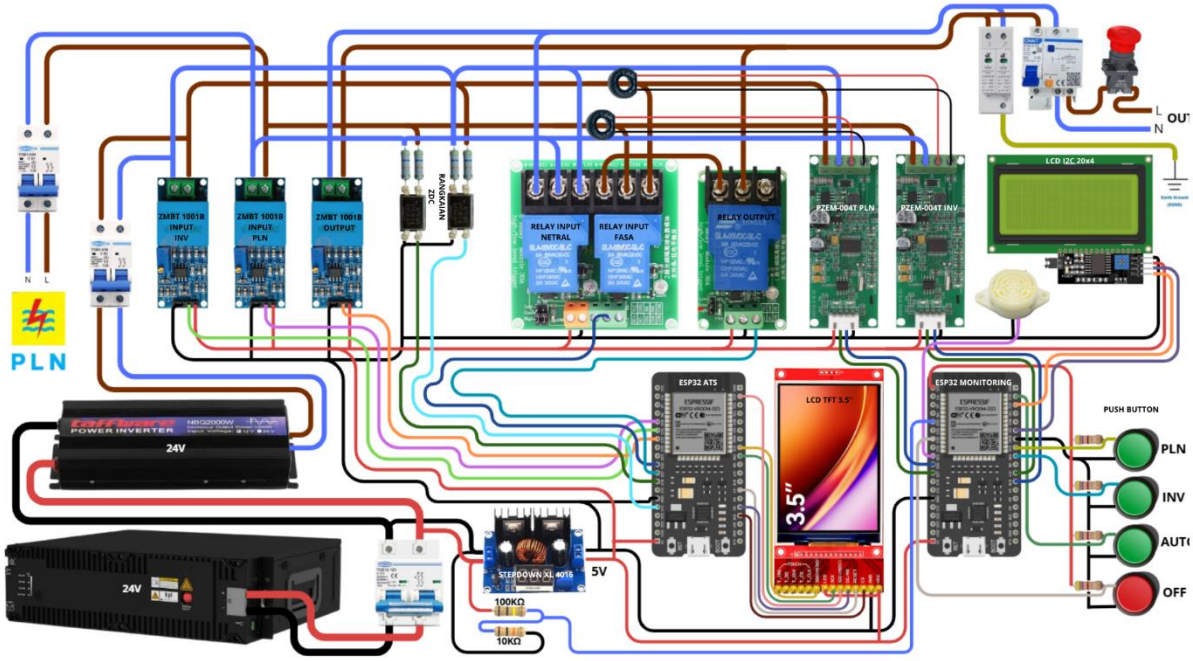
Metode penelitian diawali dengan studi literatur untuk memperoleh landasan teori dan referensi yang relevan. Tahap selanjutnya meliputi observasi, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, yang mencakup blok diagram sistem, sistem komunikasi MQTT berbasis IoT, serta *flowchart* pemantauan dan kendali. Setelah sistem selesai dirancang, dilakukan pengujian terhadap parameter daya listrik untuk mengetahui kinerja sistem. Hasil pengujian kemudian dianalisis dan dievaluasi sebagai dasar untuk menilai keberhasilan perancangan. Alur penelitian dasajikan dalam bentuk *flowchart* ditunjukkan pada Gambar 1.




Gambar 1. *Flowchart* Penelitian

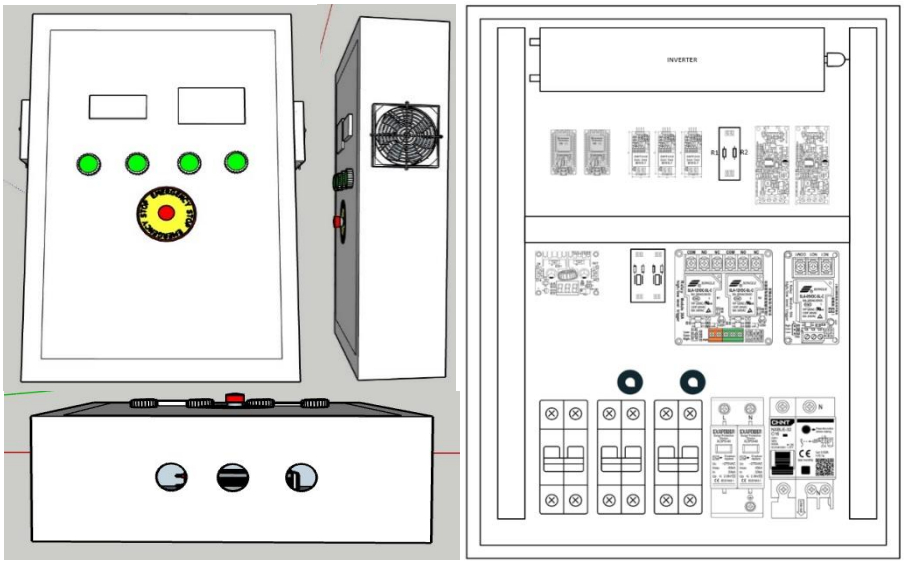
## 2.1 Perancangan Sistem

Perancangan perangkat keras dilakukan dengan mengintegrasikan sumber PLN, inverter, sensor PZEM-004T, sensor tegangan baterai, ESP32, rangkaian *Zero Crossing Detector*, relay, serta antarmuka tombol dan indikator. ESP32 berfungsi sebagai pusat pengolahan data dan pengendalian sistem, sedangkan sensor digunakan untuk memperoleh parameter kondisi masing-masing sumber. Diagram wiring rangkaian elektrikal sistem ditunjukkan pada Gambar 2.




Gambar 2. Wiring Diagram

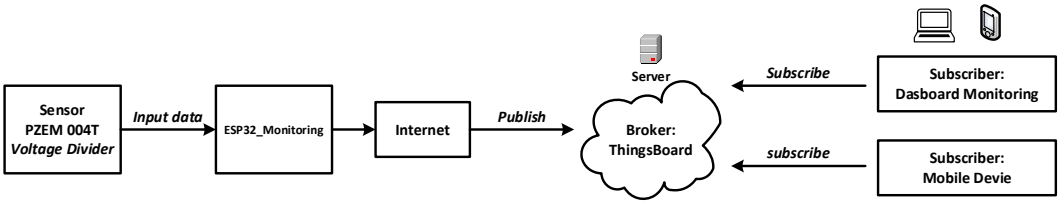
Untuk melidungi perangkat dari bahaya eksternal, panel ATS berfungsi sebagai pusat integrasi sistem kelistrikan dan kendali yang mengatur perpindahan sumber antara inverter dan PLN. Seluruh komponen proteksi, pengukuran, kendali, dan antarmuka disusun dalam panel secara terstruktur untuk mendukung keamanan dan keandalan operasi sistem. Desain Panel ATS ditunjukkan pada Gambar 3.




Gambar 3. Desain 3D Panel

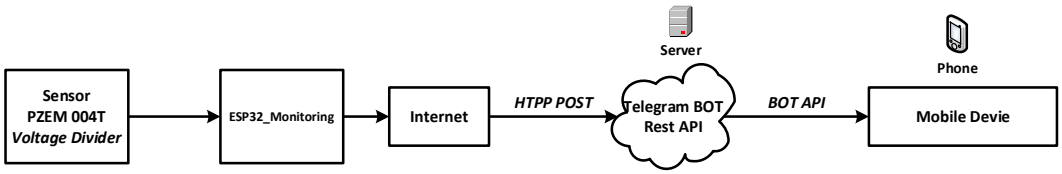
## 2.2 Perancangan Sistem *Monitoring*

Pengukuran parameter AC dilakukan menggunakan dua PZEM-004T. Sensor pertama digunakan untuk mengukur sumber inverter dan sensor kedua digunakan untuk mengukur sumber PLN. Kedua sensor memberikan informasi tegangan, arus, daya aktif, faktor daya, frekuensi, dan energi listrik. Tegangan baterai diukur menggunakan pembagi tegangan sebelum masuk ke ADC ESP32. Data hasil pengukuran ke platform *monitoring ThingsBoard* melalui jaringan internet melalui komunikasi *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT). Alur pengiriman data ditunjukkan pada Gambar 4.




Gambar 4. Alur pengiriman data untuk Monitoring IoT

Selain *monitoring* secara *real-time* melalui dashboard, pada sistem IoT yang dikembangkan juga dilengkapi dengan mekanisme notifikasi alarm untuk meningkatkan respons pengguna terhadap kondisi gangguan. Alur pengiriman dataditunjukkan pada Gambar 5.




Gambar 5. pengiriman data untuk Notifikasi Via telegram

## 2.4 Proteksi Multi-Parameter

Pada sistem ATS dua sumber, keputusan perpindahan tidak cukup hanya didasarkan pada kondisi sumber terputus. Gangguan dapat muncul dalam bentuk beban berlebih, penurunan atau kenaikan tegangan, maupun penurunan tegangan baterai sebelum sumber mengalami kegagalan total. Pada sistem PLTS *off-grid*, peningkatan beban juga dapat meningkatkan arus dari baterai dan menyebabkan penurunan tegangan pada sisi DC maupun keluaran inverter. Oleh karena itu, penelitian ini menerapkan proteksi multi-parameter dengan mengevaluasi beberapa parameter kelistrikan sebagai dasar pengambilan keputusan ATS. Proteksi Multi-Parameter ditunjukan pada tabel 1.

Tabel 1. Parameter dan tindakan proteksi

| Parameter | Kondisi gangguan | Ambang | Tindakan sistem |
|---|---|---|---|
| Daya inverter | Overload | >700 W | Pindah ke PLN |
| Daya semu PLN | Overload | >900 VA | *Trip*/isolasi beban |
| Tegangan inverter | Undervoltage | <187 V | Verifikasi 5 s → pindah ke PLN |
| Tegangan inverter | Overvoltage | >242 V | Verifikasi 5 s → pindah ke PLN |
| Tegangan baterai | Tegangan rendah | ≤23,8 V | Pindah ke PLN |

## 2.5 Algoritma Proteksi

Algoritma proteksi dirancang menggunakan pendekatan *rule-based decision*. ESP32 melakukan pembacaan parameter secara periodik, kemudian membandingkan setiap parameter dengan nilai ambang yang telah ditentukan. Jika parameter masih berada dalam rentang normal, sumber tetap dipertahankan. Sebaliknya, apabila parameter melewati ambang, sistem menjalankan pemeriksaan lanjutan sebelum menentukan tindakan proteksi. Implementasi pada ESP32 menggunakan kondisi parameter sebagai dasar keputusan switching dan pengiriman informasi status kepada pengguna.

Secara sederhana, algoritma proteksi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$S_i = \begin{cases} 1, & X_i > X_{i,max} \\ 1, & X_i < X_{i,min} \\ 0, & X_{i,min} \leq X_i \leq X_{i,max} \end{cases} \quad (1)$$

Dengan $X_i$ merupakan parameter yang dipantau dan $S_i$ merupakan status gangguan parameter $Ke-i$. Nilai $S_i = 1$ menunjukkan bahwa parameter berada pada kondisi abnormal. Namun, untuk gangguan tegangan, status abnormal tidak langsung menghasilkan switching. Sistem terlebih dahulu menerapkan verifikasi berbasis waktu. Apabila kondisi abnormal tetap berlangsung selama 5 detik, gangguan dikonfirmasi dan tindakan proteksi dijalankan. Mekanisme ini digunakan untuk menghindari *false switching* akibat fluktuasi tegangan sesaat.

Secara matematis, kondisi gangguan dikonfirmasi apabila:

$$T_{abnormal} \geq T_{verify} \quad (2)$$

Dengan $T_{abnormal}$ merupakan durasi parameter berada pada kondisi abnormal dan $T_{verify}$ merupakan waktu verifikasi yang ditetapkan sebesar 5 detik. Dengan demikian, apabila:

$$T_{abnormal} < 5\ s \quad (3)$$

Sistem tidak melakukan perpindahan sumber. Sebaliknya, apabila:

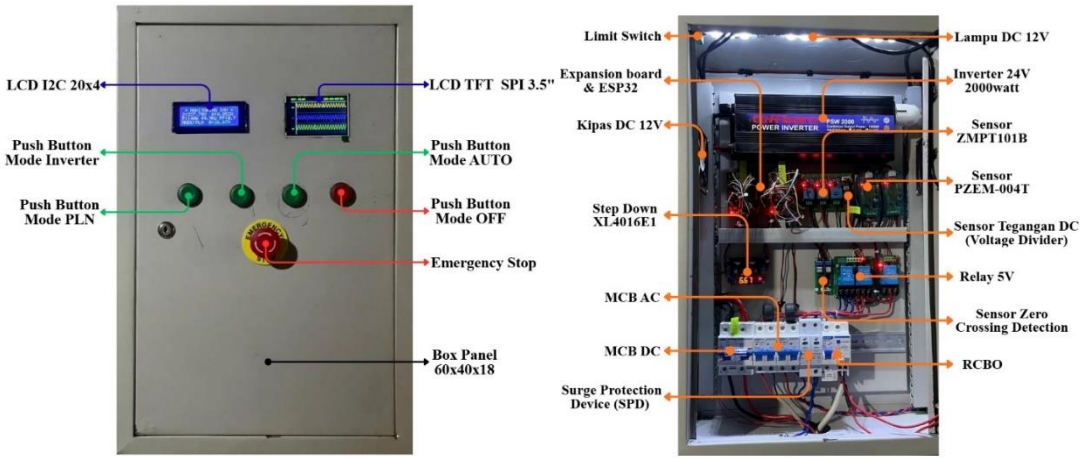
$$T_{abnormal} \geq 5\ s \quad (4)$$

Maka kondisi dianggap sebagai gangguan yang memenuhi kriteria proteksi.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Implementasi Sistem

Proses implementasi mencakup perakitan komponen elektronik, pengkabelan, pembuatan mekanik pada panel. Implemetasi dilakukan PLTS Kopi Gus yang. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 6.




Gambar 6. Implementasi Sistem Pada Panel

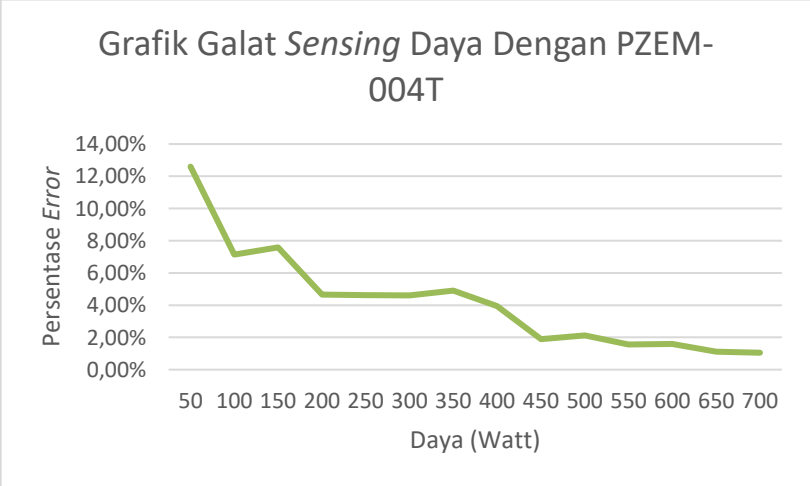
### 3.2. Pengujian Sensor Daya PZEM-004T

Pengujian sensor PZEM-004T pada dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam mengukur parameter kelistrikan daya Aktif dengan mengunakan beban resistif murni (Lampu Pijar) dengan interval 50W dimulai dari 50-700 Watt. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa data yang digunakan sebagai dasar *monitoring* dan proteksi sistem memiliki tingkat akurasi yang baik. Hasil pengujian disajikan dalam bentuk tabel 2 berikut.

Tabel 2. Pengujian Daya Pada PZEM-004T

| **Beban (W)** | **Daya Aktif Alat Ukur (W)** | **Daya Aktif PZEM (W)** | ***Error* (%)** |
|---|---|---|---|
| 50 | 52,4 | 59,1 | 12,60% |
| 100 | 98,6 | 105,4 | 7,14% |
| 150 | 145,7 | 156,6 | 7,59% |
| 200 | 193,7 | 202,5 | 4,66% |
| 250 | 238,3 | 249,5 | 4,62% |
| 300 | 282,5 | 295,8 | 4,61% |
| 350 | 326,6 | 342,2 | 4,91% |
| 400 | 381.2 | 396,4 | 3,94% |
| 450 | 429,5 | 437,6 | 1,89% |
| 500 | 472,2 | 482,9 | 2,12% |
| 550 | 514,7 | 522,3 | 1,56% |
| 600 | 565,8 | 574,5 | 1,59% |
| 650 | 625,8 | 618,3 | 1,12% |
| 700 | 669.1 | 676,7 | 1,05% |
| | Rata-Rata *Error* | | 4,24% |

Hasil pembacaan sensor berada pada rentang 59 W hingga 676 W, sedangkan hasil pengukuran alat ukur berada pada rentang 52,4 W hingga 669 W. Persentase galat pengukuran daya aktif berkisar antara 1,05% hingga 12,60%. Galat terbesar terjadi pada beban 50 W, sedangkan galat terkecil diperoleh pada beban 700 W. nilai galat *sensing* arus 4,24% menunjukkan bahwa sensor PZEM-004T memiliki tingkat akurasi yang sangat baik dalam melakukan pengukuran daya yaitu sebesar 95,76% . Hasil pembacaan sensor dapat diamati dalam bentuk grafik pada Gambar 7.




Gambar 7. Grafik Sensing Daya PZEM-004T

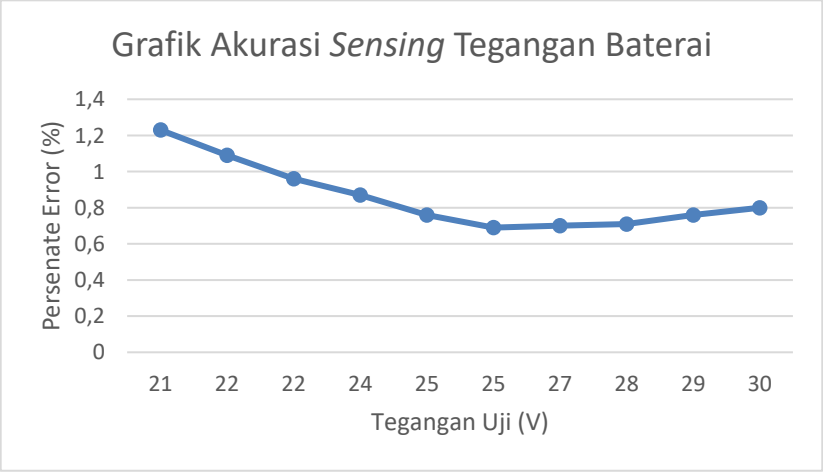
### 3.3. Pengujian Sensor Tegangan *Battery* (*Voltage Divider*)

Pengujian sensor tegangan *battery* dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi pembacaan tegangan *battery* oleh ESP32 melalui rangkaian pembagi tegangan (*voltage divider*). Parameter tegangan *battery* merupakan salah satu parameter penting dalam sistem ATS karena digunakan sebagai dasar *monitoring* kondisi *battery* serta aktivasi proteksi *battery* lemah pada sistem *Inverter*. Hasil pengujian disajikan dalam bentuk tabel 3 berikut.

Tabel 3. Pengujian Sensor Tegangan Battery (*Voltage Divider*)

| Multimeter (V) | Sensor (V) | selisish | *Error* (%) |
|---|---|---|---|
| 21,08 | 20,82 | 0,26 | 1,23 |
| 22,01 | 21,77 | 0,24 | 1,09 |
| 22,95 | 22,73 | 0,22 | 0,96 |
| 24,03 | 23,82 | 0,21 | 0,87 |
| 25,02 | 24,83 | 0,19 | 0,76 |
| 25,97 | 25,79 | 0,18 | 0,69 |
| 27,03 | 26,84 | 0,19 | 0,70 |
| 28,00 | 27,80 | 0,20 | 0,71 |
| 28,99 | 28,77 | 0,22 | 0,76 |
| 30,06 | 29,82 | 0,24 | 0,80 |
| | Rata-Rata | | 0,857 |

Hasil pengujian pada Tabel 3 menunjukkan bahwa pembacaan sensor memiliki tingkat akurasi yang baik dengan rata-rata *error* sebesar 0,857 %. Grafik hasil pembacaan sensor ditunjukkan pada Gambar 8.




Gambar 8. Grafik Pengujian Sensor Tegangan Battery (*Voltage Divider*)

Hasil pengukuran tegangan *battery* menggunakan rangkaian pembagi tegangan (voltage divider) yang terhubung ke ESP32 memiliki tingkat akurasi yang cukup baik setelah dilakukan proses kalibrasi. Hal ini ditunjukkan oleh persentase galat yang relatif kecil dan berada pada kisaran 0,69% hingga 1,23% pada rentang pengujian 21 V hingga 30 V. Grafik menunjukkan bahwa persentase galat mengalami tren menurun pada saat tegangan *battery* meningkat dari sekitar 21 V hingga 26 V. Pada rentang tersebut, *error* berkurang dari sekitar 1,23% menjadi 0,69%, yang menunjukkan bahwa hasil pembacaan sensor semakin mendekati nilai yang diukur menggunakan multimeter sebagai alat ukur acuan.

### 3.4. Pengujian Sistem *Monitoring*

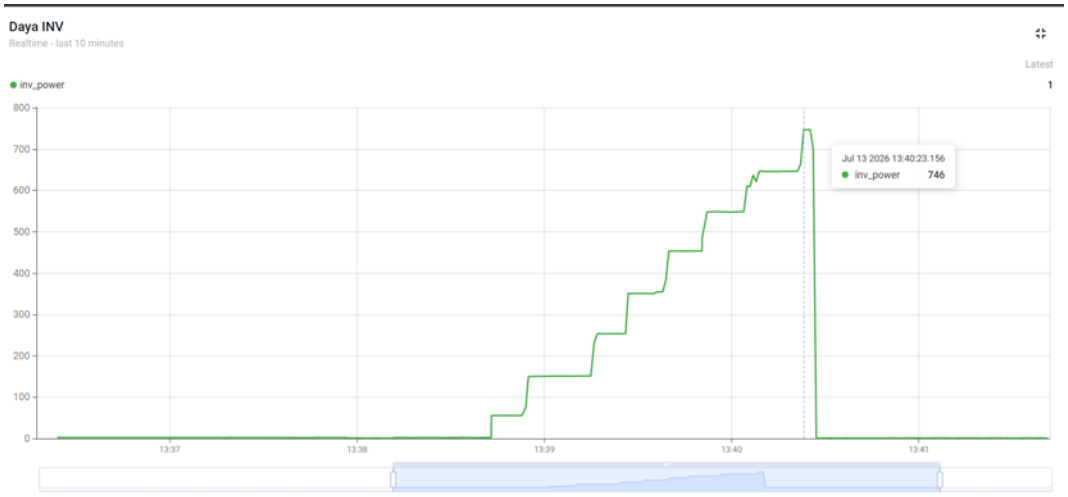
Pengujian sistem *monitoring* dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam membaca, mengirimkan, dan menampilkan data parameter listrik pada media *monitoring* lokal (LCD) maupun *monitoring* berbasis *Internet of Things* (*ThingsBoard*). Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui

kesesuaian data yang ditampilkan serta waktu respons sistem terhadap perubahan kondisi beban. Hasil pengujian disajikan dalam bentuk Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Pengujian Sistem *Monitoring*

| Daya (W) | Waktu Beban ON | Timestamp LCD | Timestamp *ThingsBoard* | Delay (ms) |
|---|---|---|---|---|
| 50 | 13:12:18.435 | 13:12:18.681 | 13:12:20.173 | 1.492 |
| 100 | 13:13:42.168 | 13:13:42.414 | 13:13:44.066 | 1.652 |
| 150 | 13:15:27.593 | 13:15:27.842 | 13:15:29.658 | 1.816 |
| 200 | 13:17:09.341 | 13:17:09.586 | 13:17:11.585 | 1.999 |
| 250 | 13:18:56.774 | 13:18:57.018 | 13:18:59.160 | 2.142 |
| 300 | 13:20:38.286 | 13:20:38.531 | 13:20:40.815 | 2.284 |
| 350 | 13:22:11.925 | 13:22:12.170 | 13:22:14.576 | 2.406 |
| 400 | 13:23:54.483 | 13:23:54.728 | 13:23:57.271 | 2.543 |
| 450 | 13:25:31.712 | 13:25:31.957 | 13:25:34.646 | 2.689 |
| 500 | 13:27:18.256 | 13:27:18.502 | 13:27:21.358 | 2.856 |
| 550 | 13:29:06.971 | 13:29:07.216 | 13:29:10.128 | 2.912 |
| 600 | 13:30:49.517 | 13:30:49.762 | 13:30:52.770 | 3.008 |
| 650 | 13:32:37.139 | 13:32:37.384 | 13:32:40.540 | 3.156 |
| 700 | 13:34:18.664 | 13:34:18.909 | 13:34:20.139 | 1.230 |
| 750 | 13:34:18.664 | 13:34:18.909 | 13:34:20.139 | 1.350 |
| | | **Rata-rata** | | 2.156 |

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4, sistem monitoring lokal menggunakan LCD mampu menampilkan perubahan nilai daya secara langsung ketika beban dihubungkan. Selama pengujian tidak terlihat adanya keterlambatan pada tampilan LCD, sehingga waktu respons tercatat sebesar 0 detik. Hal ini terjadi karena data dari sensor PZEM-004T diproses langsung oleh ESP32 dan ditampilkan pada LCD tanpa melalui komunikasi jaringan atau media eksternal.




Gambar 9. Grafik Pengujian Sistem Monitoring IoT *ThingsBoard*

Pada Gambar 9, menunjukan hasil *monitoring* pada *ThingsBorad*, dashboard *ThingsBoard* menunjukkan adanya waktu tunda sebelum nilai daya terbaru ditampilkan.

### 3.5. Pengujian Peralihan Mode

Pengujian peralihan mode dilakukan untuk mengevaluasi waktu respons sistem dalam mengubah mode operasi ATS melalui dua metode pengendalian, yaitu menggunakan tombol fisik (*push button*) dan tombol virtual pada dashboard *ThingsBoard*. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan

sistem dalam menerima perintah, mengirimkan status mode, serta mengeksekusi perubahan mode oleh mikrokontroler ESP32. Hasil pengujian disajikan dalam bentuk Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Pengujian Peralihan Mode

| Tombol | Timestamp Data Terkirim | Timestamp ESP32_ATS Eksekusi | Delay (ms) |
|---|---|---|---|
| Fisik AUTO | 14:04:05.120 | 14:04:10.020 | 4900 |
| Fisik PLN | 14:04:18.450 | 14:04:24.250 | 5800 |
| Fisik INV | 14:04:32.115 | 14:04:37.015 | 4900 |
| Fisik STOP | 14:04:45.300 | 14:04:50.100 | 4800 |
| *Dashboard* AUTO | 14:04:58.750 | 14:05:02.350 | 3600 |
| *Dashboard* PLN | 14:05:10.220 | 14:05:13.320 | 3100 |
| *Dashboard* INV | 14:05:22.500 | 14:05:25.800 | 3300 |
| *Dashboard* STOP | 14:05:35.410 | 14:05:38.910 | 3500 |

### 3.6. Pengujian Sistem Proteksi Multi-Parameter

Pengujian proteksi dilakukan untuk mengetahui kemampuan algoritma dalam mendeteksi kondisi abnormal berdasarkan beberapa parameter kelistrikan, menentukan tindakan proteksi, memberikan notifikasi, serta melakukan *recovery* setelah kondisi kembali normal. Pengujian mencakup *overload inverter*, *overload* PLN, *undervoltage inverter*, dan *low voltage battery*. Setiap skenario dianalisis berdasarkan perubahan parameter pada grafik monitoring, respons notifikasi Telegram, serta riwayat perpindahan sumber pada *Switching History*. Hasil keseluruhan pengujian ditunjukkan pada Tabel 6.

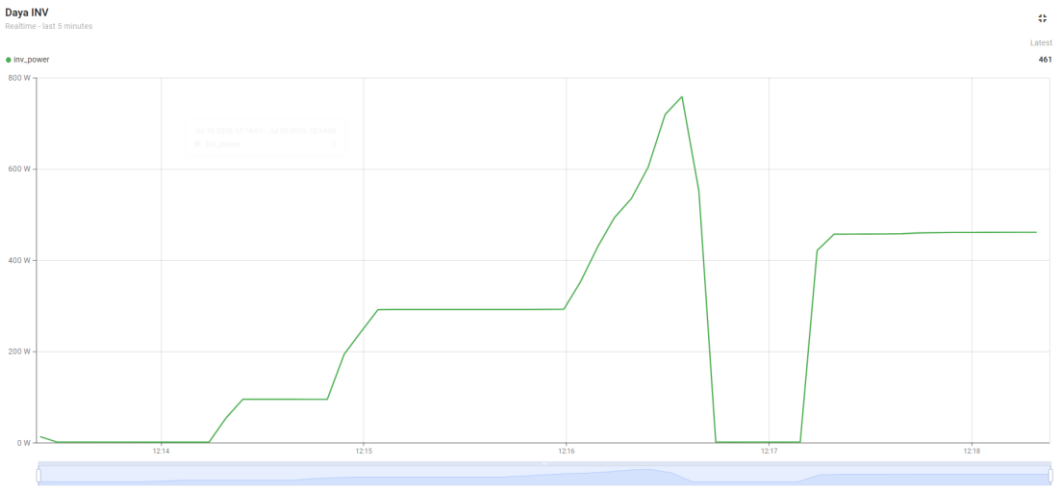
Tabel 6. Pengujian Sistem Proteksi

| Kondisi | Nilai gangguan | Tindakan | Waktu respons | Recovery | Status |
|---|---|---|---|---|---|
| Overload inverter | 756,3 W | INV → PLN | 7,9 s | 456,2 W | Berhasil |
| Overload PLN | 907,4 VA | PLN → OFF | 7,4 s | 214,9 VA | Berhasil |
| Undervoltage inverter | 196,8 V | INV → PLN | 6,7 s | 224,5 V | Berhasil |
| Low voltage battery | 20,45 V | INV → PLN | 6,6 s | 26,04 V | Berhasil |

Seluruh skenario menghasilkan respons proteksi, notifikasi, dan perubahan status sumber sesuai dengan kondisi pengujian. Data pada tabel tersebut kemudian diperkuat dengan hasil monitoring dan *Switching History*.

#### 3.6.1 Pengujian Proteksi *Overload Inverter*

PengujianPengujian *overload inverter* dilakukan dengan menghubungkan kombinasi beban berupa solder 60 W, empat lampu pijar 60 W, dan *rice cooker* 450 W. Hasil monitoring menunjukkan daya inverter meningkat hingga 756,3 W, melebihi batas proteksi sebesar 700 W. Grafik *monitoring* memperlihatkan peningkatan daya hingga melewati ambang tersebut sebelum sistem melakukan perpindahan sumber ke PLN.




Gambar 10. Grafik monitoring daya inverter saat overload

Setelah kondisi overload terkonfirmasi, status sumber berubah dari SW_INV = TRUE menjadi SW_PLN = TRUE. Berdasarkan *Switching History*, perubahan tersebut terjadi dengan waktu respons 7,9 detik. Setelah beban dikurangi hingga 456,2 W, sistem mendeteksi kondisi *inverter* kembali aman dan melakukan *recovery* menuju *inverter* dengan waktu 7,3 detik.

SWITCHING HISTORY

History - from 2026-07-30 12:15:00 to 2026-07-30 12:18:00

| Timestamp ↓ | SW_INV | SW_OFF | SW_PLN |
|---|---|---|---|
| 7/30/2026 12:16:49:692 | TRUE | FALSE | FALSE |
| 7/30/2026 12:16:57:567 | FALSE | FALSE | TRUE |
| 7/30/2026 12:17:05:166 | TRUE | FALSE | FALSE |

Gambar 11. Switching History pengujian overload inverter

Respons tersebut juga dikonfirmasi melalui Telegram. Saat daya mencapai 756,3 W, sistem mengirimkan Critical Report yang memuat kondisi overload, mode *Automatic*, dan perpindahan sumber menuju PLN. Setelah daya turun menjadi 456,2 W, sistem mengirimkan Safe Report dan menginformasikan bahwa inverter kembali menjadi sumber aktif.



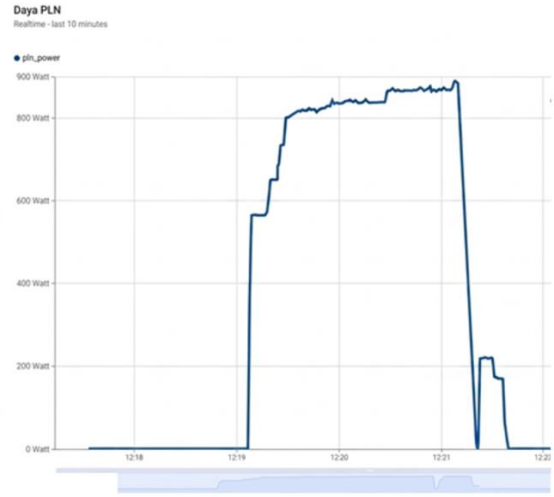

Gambar 12. Notifikasi Telegram Pengujian *Overload Inverter*

Hasil ini menunjukkan bahwa algoritma tidak hanya mendeteksi nilai daya yang melewati ambang, tetapi juga menjalankan urutan deteksi–verifikasi–*switching*–*recovery*. Penggunaan grafik, *Switching History*, dan notifikasi memberikan bukti yang saling melengkapi terhadap proses tersebut.

### 3.6.2 Pengujian Proteksi *Overload* PLN

Pengujian overload PLN dilakukan menggunakan beban resistif berupa setrika 450 W, empat lampu pijar 100 W, dan solder 60 W. Total daya nominal beban sebesar 910 W. Hasil monitoring

menunjukkan daya aktif PLN mencapai 897,4 W dengan faktor daya 0,99, sehingga daya semu mencapai 907,4 VA dan melewati batas proteksi 900 VA.

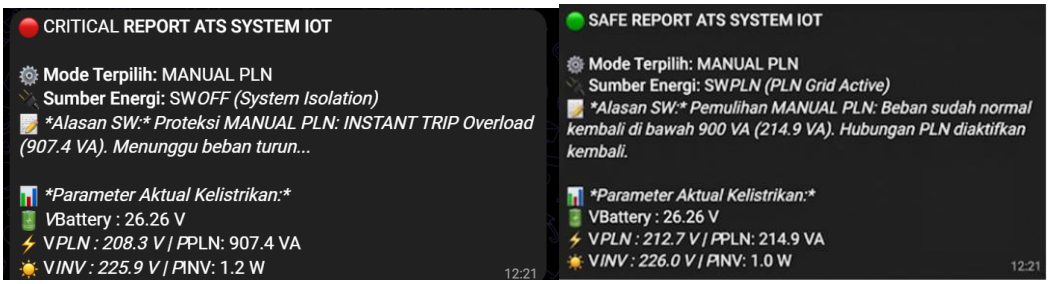



Gambar 13. Grafik *Monitoring* Daya PLN Saat *Overload*

Ketika kondisi overload terdeteksi, ATS mengaktifkan SW_OFF untuk mengisolasi beban. Proses tersebut membutuhkan waktu 7,4 detik dan dikonfirmasi melalui *Switching History*. Setelah beban diturunkan menjadi 214,9 VA, sistem kembali mengaktifkan suplai dan menghasilkan waktu recovery 7,6 detik.




Gambar 14. Switching History Pengujian Overload PLN

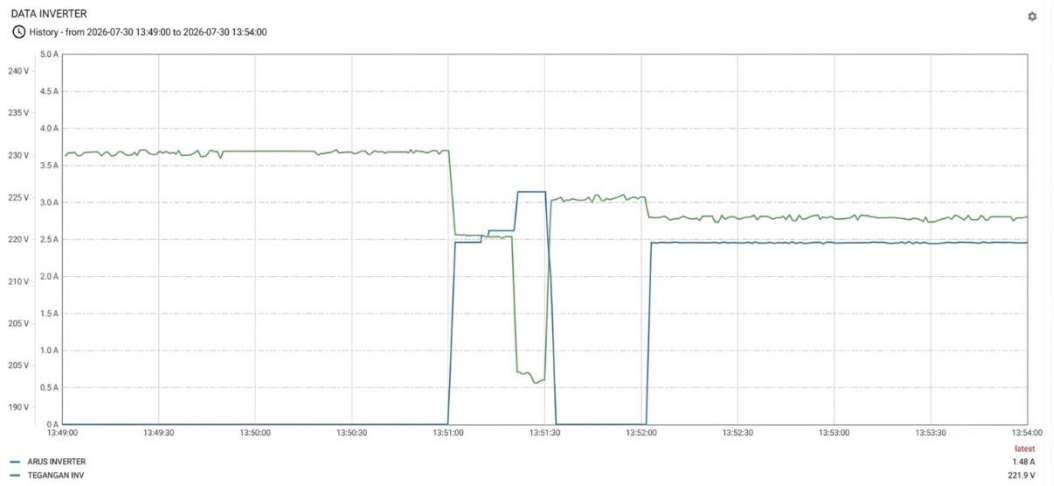



Gambar 15. Notifikasi *Overload* PLN

Notifikasi Telegram memberikan informasi tambahan mengenai kondisi gangguan dan status sistem. Dengan demikian, pada skenario ini terdapat hubungan yang jelas antara kenaikan daya semu → deteksi overload → isolasi beban → notifikasi → penurunan beban → recovery.

### 3.6.3 Pengujian Proteksi *Under Voltage Inverter*

Pengujian *undervoltage* dilakukan menggunakan beban induktif berupa gerinda 600 W. Tegangan keluaran *inverter* yang semula berada pada kisaran 225,7–226,9 V turun hingga 196,8 V ketika beban beroperasi. Kondisi tersebut disertai peningkatan arus inverter hingga sekitar 3,1 A.




Gambar 16. Grafik Monitoring Tegangan *Inverter* saat *Undervoltage*

Setelah kondisi gangguan terverifikasi, sistem mengalihkan sumber dari inverter menuju PLN dengan waktu 6,7 detik. Ketika tegangan inverter kembali menjadi 224,5 V, sistem melakukan *recovery* menuju inverter dengan waktu 7,8 detik.

SWITCHING HISTORY

History - from 2026-07-30 13:51:41 to 2026-07-30 13:52:06

| Timestamp ↓ | SW_INV | SW_OFF | SW_PLN |
|---|---|---|---|
| 7/30/2026 13:51:41:974 | TRUE | FALSE | FALSE |
| 7/30/2026 13:51:48:667 | FALSE | FALSE | TRUE |
| 7/30/2026 13:52:06:456 | TRUE | FALSE | FALSE |

Gambar 17. Grafik *Switching History* Pengujian *Undervoltage*

Respons tersebut juga dikonfirmasi melalui Telegram. Kondisi 196,8 V menghasilkan Critical Report, sedangkan setelah tegangan kembali 224,5 V sistem mengirimkan Safe Report yang menunjukkan inverter kembali menjadi sumber aktif.

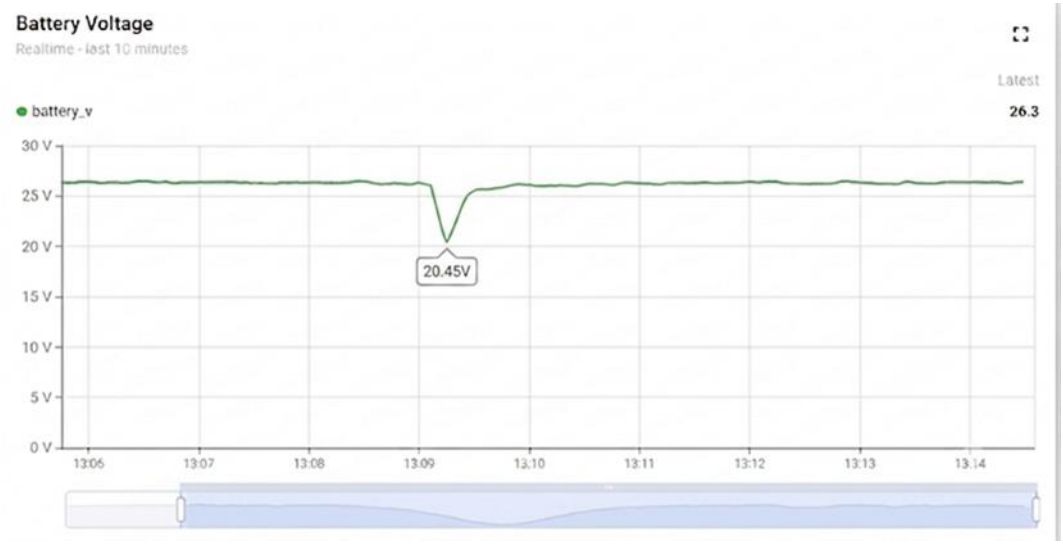



Gambar 18. Grafik Notifikasi *Telegram* Pengujian *Undervoltage*

Hasil tersebut memperlihatkan bahwa perubahan tegangan pada sumber inverter dapat digunakan sebagai parameter proteksi independen dari parameter daya. Dengan demikian, sistem dapat melakukan switching meskipun inverter belum mengalami overload.

### 3.6.4 Pengujian Proteksi *Low Voltage Battery*

Pengujian Pengujian *low voltage battery* dilakukan dengan menurunkan tegangan DC secara terkontrol. Tegangan baterai yang semula sekitar 26,3 V diturunkan hingga 20,45 V, melewati batas proteksi yang digunakan pada pengujian. Sistem kemudian melakukan verifikasi selama 5 detik sebelum mengalihkan suplai dari inverter ke PLN.



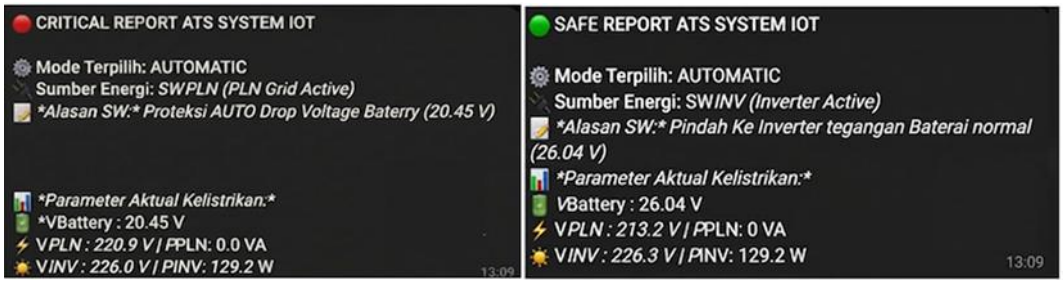

Gambar 19. Grafik Tegangan Baterai saat *Low Voltage*

Berdasarkan *Switching History*, perpindahan inverter menuju PLN terjadi dengan waktu 6,6 detik. Setelah tegangan baterai kembali meningkat menjadi 26,04 V, sistem melakukan *recovery* menuju inverter dengan waktu 7,4 detik.




Gambar 20. *Switching History* Pengujian *Low Voltage Battery*

Pada kondisi 20,45 V, sistem mengirimkan Critical Report yang menginformasikan bahwa proteksi *AUTO Drop Voltage Battery* aktif dan sumber berpindah ke PLN. Setelah tegangan kembali 26,04 V, sistem mengirimkan Safe Report dan menunjukkan inverter kembali menjadi sumber aktif.




Gambar 21. Notifikasi Telegram Pengujian *Low Voltage Battery*

Hasil tersebut menunjukkan bahwa tegangan baterai dapat digunakan sebagai parameter proteksi untuk mencegah operasi inverter ketika kondisi suplai DC tidak lagi memenuhi batas operasi yang ditentukan.

## 4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan dan menguji Automatic Transfer Switch (ATS) dua sumber berbasis IoT pada sistem PLTS *off-grid* dengan pendekatan proteksi multi-parameter. Sistem mampu memantau kondisi sumber PLN, inverter, dan baterai serta melakukan perpindahan sumber berdasarkan kondisi overload, undervoltage, dan tegangan baterai rendah. Hasil pengujian menunjukkan akurasi

pengukuran daya PZEM-004T sebesar 95,76%, sedangkan pengukuran tegangan baterai menggunakan *voltage divider* memiliki akurasi 99,24%. Monitoring berbasis MQTT dan ThingsBoard mampu mengirimkan data dengan rata-rata *delay* 2,156 detik, sedangkan pengujian proteksi menghasilkan rata-rata waktu respons 7,85 detik. Seluruh skenario proteksi yang diuji berhasil menghasilkan tindakan switching, notifikasi, dan *recovery* sesuai kondisi sistem. Dengan demikian, penerapan proteksi multi-parameter dan verifikasi gangguan berbasis waktu dapat digunakan sebagai pendekatan dalam meningkatkan kemampuan ATS dalam mendeteksi kondisi abnormal dan mempertahankan kontinuitas suplai pada sistem PLTS *off-grid*.

## 5. DAFTAR PUSTAKA


[1] O. E. Olabode, T. O. Ajewole, I. K. Okakwu, A. S. Alayande, and D. O. Akinyele, "Hybrid power systems for off-grid locations: A comprehensive review of design technologies, applications and future trends," Scientific African, vol. 13, p. e00884, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.sciaf.2021.e00884.

[2] A. W. A. Kristanto, U. T. Kartini, A. I. Agung, and B. Suprianto, "Pemodelan Automatic Transfer Switch (ATS) Pada System Smartgrid Pembangkit Photovoltaic dan PLN Berbasis Internet of Things (IoT) untuk Monitoring Penggunaan Daya Listrik," Jurnal Teknik Elektro, vol. 11, no. 2, pp. 351–360, 2022.

[3] D. A. Ratnasari, B. Suprianto, and F. Baskoro, "Monitoring daya listrik pada panel surya berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan aplikasi Telegram," Indonesian Journal of Engineering and Technology (INAJET), vol. 5, no. 1, pp. 1–10, 2022..

[4] J. W. Jokanan, A. Widodo, N. Kholis, and L. Rakhmawati, "Rancang bangun alat monitoring daya listrik berbasis IoT menggunakan firebase dan aplikasi," Jurnal Teknik Elektro, vol. 11, no. 1, pp. 47–55, 2022.

[5] N. Salsabila and S. I. Haryudo, "Sistem Kontrol dan Monitoring Automatic Transfer Switch (ATS) Model Hybrid Berbasis Internet of Things," Journal of Telecommunication Electronics and Control Engineering (JTECE), vol. 5, no. 2, pp. 119–131, 2023.

[6] A. M. Sutopo, N. Prastomo, and P. G. A. Bayuntara, "IoT-Based Automatic Transfer Switch System Design on Solar Home System", IJIE, vol. 16, no. 5, pp. 265–274, Sep. 2024.

[7] A. Bachri, A. B. Laksono, and A. M. Abdillah, "Rancang Bangun Smart Inverter dan ATS Tenaga Panel Surya Berbasis Internet of Things (IoT)," JASIEK (Jurnal Aplikasi Sains, Informasi, Elektronika dan Komputer), vol. 6, no. 1, pp. 23–32, 2024.

[8] N. Aini and D. Hariyanto, "Rancang bangun kontrol monitoring Automatic Transfer Switch (ATS) dan Automatic Main Failure (AMF) pada sistem hybrid berbasis Internet of Things (IoT)," dalam *Prosiding SNITP (Seminar Nasional Inovasi Teknologi Penerbangan)*, vol. 6, no. 1, 2022.

[9] D. T. Laksono, R. Afrianti, M. W. Fatma, M. Prasafitri, and H. Alchudri, "Rancang Bangun Sistem Pemantauan Energi Listrik dengan Automatic Transfer Switch," Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan, vol. 13, no. 1, 2025.

[10] Bimantara Budi Arifin, Ghulam Zaky Dzulqarnain, Ridwan Rizqulloh, Muchlishah, and Yani Haryani, "Pengembangan Automatic Transfer Switch (ATS) Berbasis IoT Pada PLTS Off- grid di Pendopo Gedung D", *SNTE*, vol. 11, no. 1, 2025.

[11] Yusra and Dani, "Integrasi SCADA dan Internet of Things pada sistem PLTS berbasis ESP32," *Jurnal Teknologi Elektro*, vol. 17, no. 1, 2026.

[12] M. R. Hikmatullah, S. Baqaruzi, and A. Muhtar, "The Integration of Photovoltaics with an IoT-Based Automatic Transfer Switch System for Telecommunication Applications," *Jurnal Edukasi Elektro*, vol. 10, no. 1, pp. 97–111, 2026.

[13] A. E. Riftianto and A. Amirullah, "Implementasi Visual Studio pada Sistem Monitoring Daya dan Proteksi Rele Arus Lebih Menggunakan Automatic Transfer Switch/Automatic

Main Failure (ATS/AMF) Disuplai oleh Kombinasi Grid dan Photovoltaic (PV)," *Rekayasa*, vol. 17, no. 1, pp. 96–107, 2024.

[14] S. Baqaruzi, C. S. A. Nandar, A. Muhtar, M. R. Hikmatullah, and N. Rosmin, "Deficit Threshold Optimization of an Automatic Transfer Switch for Hybrid Grid-Photovoltaic Systems in Tropical Climates," *Universitas Islam Sumatera Utara*, vol. 11, no. 1, 2026.

[15] A. S. Permadi, P. Gunoto, and E. Susanti, "Rancang Bangun Kontrol dan Monitoring *Automatic Transfer Switch* Antara Panel Surya dan PLN Berbasis IoT," *Sigma Teknika*, vol. 8, no. 2, pp. 307–315, Nov. 2025.

[16] I. Surya, J. Kustija, R. E. Pawinanto, R. Pramudita, M. A. Rizqulloh, D. Wahyudin, and E. Haritman, "Sistem monitoring beban listrik dan perbaikan faktor daya menggunakan PZEM004T dan dashboard Adafruit berbasis IoT," *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, dan Listrik Tenaga)*, vol. 3, no. 3, pp. 235–246, Nov. 2023.

[17] Y. Mahaseng, M. Masarrang, Y. Arifin, M. Mustofa, and S. Dewi, "Rancang Bangun Panel Automatic Transfer Switch (Ats) Berbasis Photovoltaic," *Foristek*, vol. 12, no. 1, pp. 12–20, Mei 2022.