RANCANG BANGUN SISTEM PENGAMANAN PANEL REMOTE TERMINAL UNIT BERBASIS IOT DAN KAMERA

Aryasatya Herlambang Junior Kartono

[1,2,3]Teknik Elektronika, Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Indonesia
Email: [1]aryasatyaherlambang@gmail.com, [2]penulis.dua@email.ac.id (11pt)

Nomor Handphone : 081259041708

Abstrak

Abstrak Panel Remote Terminal Unit (RTU) merupakan bagian penting dalam sistem distribusi tenaga listrik sehingga aspek pengamanan, pemantauan kondisi, dan pemberian peringatan dini perlu dilakukan secara berkelanjutan. Penelitian ini merancang sistem pengamanan panel RTU berbasis Internet of Things (IoT) dengan ESP32 sebagai pengendali dan ESP32-CAM sebagai perangkat visual. Sistem menggabungkan RFID untuk autentikasi akses, magnetic switch untuk mendeteksi pembukaan panel, MQ-135 untuk mendeteksi perubahan kondisi udara atau asap, serta flame sensor untuk mendeteksi indikasi api. Data sensor diproses oleh ESP32 dan informasi kejadian dikirimkan melalui Telegram Bot sehingga kondisi panel dapat dipantau dari jarak jauh. Relay digunakan untuk mengendalikan sirine sebagai peringatan lokal, sedangkan ESP32-CAM digunakan untuk mengambil gambar ketika terjadi kejadian keamanan pada panel. Pengujian dilakukan melalui pengujian unit sensor, kalibrasi, dan pengujian integrasi sistem. Hasil pengujian menunjukkan bahwa RFID dapat melakukan autentikasi, MQ-135 dan flame sensor memberikan perubahan pembacaan ketika kondisi simulasi diberikan, serta ESP32-CAM mampu mengambil dan mengirimkan gambar melalui Telegram. Integrasi tersebut menghasilkan mekanisme pengamanan yang dapat memberikan informasi visual dan notifikasi secara otomatis.

Kata kunci: ESP32, ESP32-CAM, Internet of Things, Panel RTU, Telegram Bot

Abstract

Abstrak The Remote Terminal Unit (RTU) panel is an important part of electrical power distribution infrastructure, making security, condition monitoring, and early warning essential. This study develops an Internet of Things (IoT)-based RTU panel security system using ESP32 as the main controller and ESP32-CAM as a visual monitoring device. The system integrates RFID for access authentication, a magnetic switch for detecting panel opening, an MQ-135 sensor for detecting changes in air condition or smoke, and a flame sensor for detecting fire indications. Sensor data are processed by the ESP32 and event information is delivered through a Telegram Bot so that the panel can be monitored remotely. A relay is used to control a siren as a local warning, while the ESP32-CAM captures images when a security event occurs. Testing includes sensor unit tests, calibration, and system integration tests. The results indicate that RFID can authenticate access, the MQ-135 and flame sensors respond to simulated abnormal conditions, and the ESP32-CAM can capture and transmit images through Telegram. The integrated system provides an automated mechanism for delivering visual information and security notifications.

Keywords: *ESP32, ESP32-CAM, Internet of Things, RTU Panel, Telegram Bot*

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

Keandalan distribusi tenaga listrik tidak hanya ditentukan oleh kemampuan jaringan menyalurkan energi, tetapi juga oleh kondisi peralatan dan keamanan perangkat yang berada di lapangan. Panel Remote Terminal Unit (RTU) menjadi salah satu bagian yang mendukung proses pemantauan dan pengendalian peralatan distribusi. Karena berada pada lingkungan kerja yang memiliki komponen listrik dan aktivitas pemeliharaan, panel perlu dijaga dari akses yang tidak sah serta kondisi lingkungan yang berpotensi mengganggu peralatan. Permasalahan seperti pembukaan panel tanpa izin, perubahan kualitas udara akibat asap, dan indikasi api dapat berkembang menjadi gangguan yang lebih serius apabila tidak diketahui sejak awal[1].

Perkembangan Internet of Things (IoT) memberikan pendekatan yang memungkinkan perangkat lapangan mengirimkan informasi kondisi secara otomatis melalui jaringan komunikasi. ESP32 memiliki konektivitas Wi-Fi dan kemampuan pengolahan data yang sesuai untuk membaca beberapa masukan sensor sekaligus mengirimkan informasi ke layanan jaringan. Pemanfaatan ESP32 pada sistem pemantauan juga telah digunakan pada berbagai aplikasi monitoring berbasis IoT. Pada sisi visual, ESP32-CAM dapat digunakan untuk menambahkan bukti berupa gambar sehingga pengguna tidak hanya menerima informasi berbentuk teks[2].

Pada sistem keamanan panel, autentikasi akses diperlukan untuk membedakan aktivitas teknisi yang berwenang dari pembukaan yang tidak teridentifikasi. RFID dapat digunakan sebagai mekanisme identifikasi berbasis kartu atau tag. Selain autentikasi, kondisi fisik pintu panel dapat dipantau menggunakan magnetic switch. Ketika hubungan magnet berubah karena pintu dibuka, ESP32 dapat memproses perubahan tersebut sebagai sebuah peristiwa keamanan. Pendekatan kombinasi autentikasi dan pendeteksian pembukaan memberikan lapisan pengamanan yang lebih lengkap.

Deteksi kondisi abnormal di dalam panel juga dapat diperkuat dengan sensor MQ-135 dan flame sensor. MQ-135 digunakan untuk membaca perubahan kualitas udara, asap, atau gas tertentu, sedangkan flame sensor merespons pancaran inframerah yang berasal dari nyala api[3],[4]. Informasi dari kedua sensor dapat digunakan sebagai indikator awal sehingga alarm lokal dan notifikasi jarak jauh dapat diberikan ketika batas yang telah ditentukan tercapai.

Penelitian ini berfokus pada perancangan dan pengujian sistem pengamanan panel RTU yang mengintegrasikan ESP32, ESP32-CAM, RFID, magnetic switch, MQ-135, flame sensor, relay, sirine, dan Telegram Bot. Tujuan penelitian adalah menghasilkan prototipe yang dapat mengidentifikasi akses, mendeteksi kondisi abnormal, memberikan peringatan lokal, serta mengirimkan informasi kejadian kepada pengguna dari jarak jauh.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Pengumpulan Data

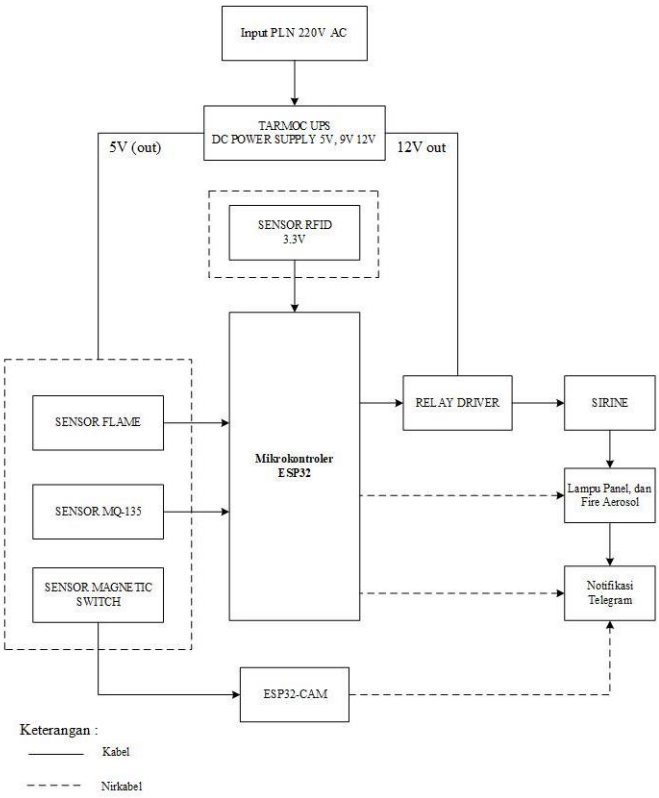
Penelitian menggunakan pendekatan Research and Development (R&D) atau rancang bangun. Pendekatan ini digunakan untuk menghasilkan prototipe, mengintegrasikan komponen, kemudian menguji fungsi sistem berdasarkan kondisi yang telah ditentukan. Tahapan penelitian meliputi identifikasi kebutuhan, perancangan sistem, perancangan perangkat keras, perancangan perangkat lunak, perakitan dan wiring, kalibrasi sensor, pengujian unit, pengujian integrasi, simulasi kondisi lapangan, serta analisis hasil[5].

2.2 Perancangan Sistem

Perancangan sistem dilakukan untuk membangun sistem pengamanan panel Remote Terminal Unit (RTU) berbasis Internet of Things (IoT) yang mampu melakukan autentikasi akses, mendeteksi kondisi abnormal, memberikan peringatan lokal, serta mengirimkan informasi kondisi panel secara jarak jauh melalui Telegram. Sistem menggunakan dua mikrokontroler, yaitu ESP32 sebagai pengendali utama

dan ESP32-CAM sebagai modul pemantauan visual. Komunikasi antara kedua mikrokontroler menggunakan protokol ESP-NOW, sedangkan koneksi ESP32 dengan pengguna dilakukan melalui jaringan internet dan Telegram Bot.

2.3 Diagram Blok Sistem



Gambar 1 Diagram Blok Sistem

Pada diagram blok sistem menunjukkan interkoneksi antarkomponen pada sistem pengamanan panel Remote Terminal Unit (RTU) berbasis *Internet of Things* (IoT). Sistem ini menggunakan Tarmoc UPS TPS-18W10A-UM sebagai sumber catu daya utama yang terhubung ke input PLN 220V AC untuk menyediakan tegangan 5V DC bagi mikrokontroler dan sensor-sensor, serta tegangan 12V DC untuk mengoperasikan perangkat keluaran berdaya lebih besar. Pada bagian input, modul RFID RC522 (3,3V), sensor flame, dan sensor MQ-135 terhubung langsung ke mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengendali utama. Sensor RFID RC522 digunakan untuk autentikasi akses pengguna, sensor flame digunakan untuk mendeteksi keberadaan nyala api, sedangkan sensor MQ-135 berfungsi mendeteksi perubahan konsentrasi gas atau asap di dalam panel RTU. Seluruh data dari masukan sensor tersebut diproses oleh ESP32 untuk mengidentifikasi dan menentukan kondisi operasional sistem secara *real-time*. Mikrokontroler ESP32 terhubung dengan relay driver yang berfungsi sebagai pengontrol aktuator keluaran, salah satunya adalah sirine alarm 12V DC. Ketika sistem mendeteksi kondisi bahaya seperti indikasi asap atau nyala api, maupun pembukaan pintu tanpa akses RFID yang sah, ESP32 akan mengaktifkan relay driver untuk membunyikan sirine sebagai peringatan suara lokal. Selain sirine, keluaran sistem juga terhubung dengan Lampu Panel dan unit *Fire Aerosol Extinguishing*. Lampu panel berfungsi memberikan penerangan otomatis di dalam saat pintu panel dibuka oleh pengguna yang memiliki hak akses, sedangkan *Fire Aerosol* berfungsi sebagai pemadam api otomatis tahap awal yang diaktifkan langsung saat sensor flame mendeteksi keberadaan api di dalam panel RTU.

Pada bagian pemantauan visual, sistem memanfaatkan sensor magnetic switch yang terhubung langsung ke modul ESP32-CAM untuk mendeteksi status buka atau tutup pintu panel. Saat pintu panel terbuka, sensor *magnetic switch* memberikan sinyal kepada ESP32-CAM untuk melakukan

pengambilan gambar kondisi di depan panel. Informasi status kondisi sistem yang diproses oleh ESP32 utama beserta tangkapan foto dari ESP32-CAM kemudian dikirimkan secara nirkabel melalui Telegram Bot API sebagai media notifikasi dan pemantauan jarak jauh. Dengan demikian, petugas dapat memantau kondisi keamanan panel RTU secara *real-time* serta menerima peringatan dini otomatis apabila terjadi kondisi yang tidak normal.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Implementasi Sistem

Implementasi sistem merupakan tahap penerapan hasil perancangan menjadi prototipe sistem pengamanan panel Remote Terminal Unit (RTU) berbasis Internet of Things (IoT). Sistem diimplementasikan dengan mengintegrasikan perangkat keras dan perangkat lunak sehingga mampu melakukan autentikasi akses, pemantauan kondisi panel, pemberian peringatan, dokumentasi visual, serta pengiriman informasi secara jarak jauh melalui Telegram. Prototipe menggunakan ESP32 sebagai mikrokontroler utama dan ESP32-CAM sebagai modul pemantauan visual.

3.2 Pengujian Sensor RFID

Pengujian sensor RFID RC522 dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam membaca Unique Identifier (UID) kartu RFID dan melakukan autentikasi terhadap pengguna yang memiliki hak akses pada panel Remote Terminal Unit (RTU). Pengujian dilakukan menggunakan kartu RFID yang telah didaftarkan pada sistem dan kartu RFID yang tidak terdaftar. UID kartu yang terbaca oleh RFID RC522 diproses oleh ESP32 dan dibandingkan dengan UID yang tersimpan pada program. Kartu dengan UID yang sesuai diberikan hak akses untuk membuka panel, sedangkan kartu yang tidak terdaftar ditolak oleh sistem dan menghasilkan notifikasi melalui Telegram.

Tabel 1 Pengujian Sensor RFID

No	UID Kartu	Status Kartu	Waktu Respon (detik)	Hasil
1.	03 F6 F8 33	Terdaftar	1,18	Berhasil
2.	23 12 66 37	Terdaftar	1925	Berhasil
3.	13 D7 6C 37	Terdaftar	1,14	Berhasil
4.	D3 31 5D 37	Tidak Terdaftar	1,20	Berhasil
5.	83 21 65 33	Tidak Terdaftar	1,16	Berhasil
	Rata-Rata	-	1,19	Berhasil

Berdasarkan analisis hasil pengujian, rata-rata waktu yang dibutuhkan sistem mulai pembacaan kartu RFID hingga notifikasi diterima melalui telegram adalah sekitar 1,19 detik. Hasil ini mengunjukkan bahwa sistem mampu memberikan informasi secara cepat sehingga dapat mendukung proses monitoring keamanan panel Remote Terminal Unit secara *real-time*.

3.3 Pengujian Sensor MQ-135

Pengujian sensor MQ-135 dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam mendeteksi keberadaan asap atau gas di dalam panel Remote Terminal Unit. Sensor MQ-135 berfungsi sebagai pendeteksi perubahan konsentrasi gas yang dapat menjadi indikasi awal terjadinya gangguan, seperti korsleting maupun kebakaran di dalam panel. Data yang diperoleh dari sensor berupa nilai ADC, tegangan (Voltage), resistansi sensor (RS), resistansi referensi (RO), rasio RS/RO, serta estimasi konsentrasi gas yang selanjutnya diproses oleh mikrokontroler ESP32.

Tabel 2 Pengujian Sensor MQ-135 status Normal

Parameter	Percobaan 1	Percobaan 2	Percobaan 3	Percobaan 4	Percobaan 5
Nilai ADC	62	52	8	10	29
Tegangan	0,05V	0,04V	0,01V	0,01V	0.02V
RS	650,48 kΩ	777,50 kΩ	5108,75 kΩ	4085,00 kΩ	1402,07 kΩ
RO	226,52 kΩ	226,52 kΩ	288,00 kΩ	288,00 kΩ	178,79 kΩ
RS/RO	2,87	3,43	17,74	14,18	7,84
Konsentrasi	1,5%	1,3%	0,2%	0,2%	0,7%
Status	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal

Tabel 3 Pengujian Sensor MQ-135 status Kritis

Parameter	Percobaan 1	Percobaan 2	Percobaan 3	Percobaan 4
Nilai ADC	140	143	141	133
RS(Ω)	282,50	276,36	280,43	297,89
PPM Asap	40,08	43,70	41,26	32,53
Status	Kritis	Kritis	Kritis	Kritis

Pengujian sensor MQ-135 dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam mendeteksi perubahan kualitas udara akibat adanya gas maupun asap di dalam panel Remote Terminal Unit (RTU). Sebelum digunakan pada sistem, sensor terlebih dahulu dikalibrasi pada kondisi udara normal untuk memperoleh nilai referensi resistansi sensor (R0). Selanjutnya sensor diuji menggunakan beberapa kondisi lingkungan, yaitu udara normal, paparan gas/uap, serta paparan asap. Parameter yang diamati meliputi nilai ADC, nilai resistansi sensor (RS), hasil konversi konsentrasi gas/asap (PPM), dan status kondisi yang ditampilkan oleh sistem. Sensor MQ-135 pada penelitian ini digunakan sebagai indikator perubahan kualitas udara, sehingga tidak mengidentifikasi jenis gas tertentu secara spesifik, melainkan mendeteksi peningkatan konsentrasi gas maupun asap yang mengindikasikan kondisi abnormal pada panel RTU.

3.4 Pengujian Sensor Flame

Pengujian sensor *flame* dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam mendeteksi keberadaan nyala api di sekitar panel Remote Terminal Unit. Sensor flame berfungsi sebagai pendeteksi dini terhadap potensi kebakaran yang dapat membahayakan peralatan di dalam panel. Apabila sensor mendeteksi adanya nyala api dengan intensitas yang melebihi ambang batas yang telah ditentukan, maka mikrokontroler ESP32 akan memproses informasi tersebut dan mengirimkan notifikasi peringatan melalui aplikasi telegram. Selain itu, sistem juga mengaktifkan sirine sebagai alarm lokal dan menginstruksikan ESP32-CAM untuk mengambil gambar kondisi panel sebagai bukti visual.

Tabel 4 Pengujian Sensor Flame status Aman

Parameter	Percobaan
Nilai ADC	4095
Intensitas	0,0%
Status	Aman

Tabel 5 Pengujian Sensor Flame status Kritis

Parameter	Percobaan 1	Percobaan 2	Percobaan 3	Percobaan 4
Nilai ADC	471	0	126	439
Intensitas	88,5%	100%	96.9%	89,3%
Status	Kritis	Kritis	Kritis	Kritis

Berdasarkan hasil pengujian, sensor *flame* mampu mendeteksi keberadaan nyala api sesuai dengan kondisi yang diberikan. Pada kondisi normal, sensor tidak mendeteksi adanya api sehingga sistem tetap berada dalam kondisi siaga tanpa mengaktifkan sirine maupun mengirimkan notifikasi. Sebaliknya, ketika terdapat nyala api di sekitar sensor, ESP32 berhasil mengenali kondisi tersebut sebagai potensi kebakaran dan secara otomatis mengirimkan notifikasi melalui telegram, mengaktifkan sirine. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa sensor *flame* telah bekerja sesuai dengan fungsi yang dirancang sebagai pendeteksi dini kebakaran pada panel Remote Terminal Unit.

3.5 Pengujian ESP32-CAM

Pengujian ESP32-CAM dilakukan untuk memastikan bahwa kamera dapat mengambil gambar kondisi panel Remote Terminal Unit ketika panel dibuka. Pada sistem yang dikembangkan, ESP32-CAM hanya diaktifkan apabila sensor magnetic switch mendeteksi panel dalam kondisi terbuka, baik pembukaan dilakukan oleh pengguna yang memiliki hak akses maupun oleh pihak yang membuka panel tanpa hak akses. Pengambilan gambar bertujuan untuk memberikan dokumentasi visual kondisi panel pada saat terjadi aktivitas pembukaan panel.

Tabel 6 Pengujian ESP32-CAM

No.	Kondisi pengujian	Jabatan pengguna	Kondisi panel	ESP32-CAM mengambil gambar	Foto terkirim ke telegram	Hasil
1.	Akses 1 RFID 1 (UID: 03 F6 F8 33)	Teknisi Pemeliharaan	Terbuka	Berhasil mengambil gambar	Terkirim ke telegram	Berhasil
2.	Akses 2 RFID 2 (UID: 23 12 66 37)	Supervisor	Terbuka	Berhasil mengambil gambar	Terkirim ke telegram	Berhasil
3.	Panel dibuka tanpa hak akses	-	Terbuka	Berhasil mengambil gambar	Terkirim ke telegram	Berhasil

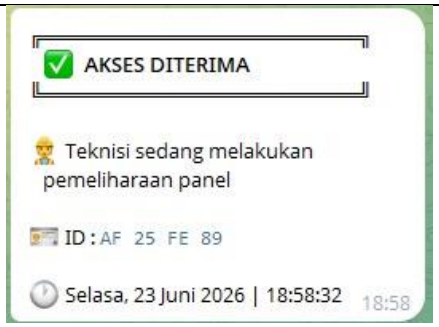
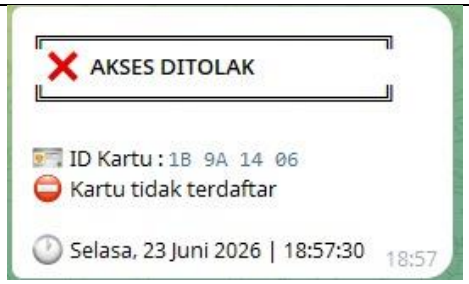
Hasil pengujian menunjukkan bahwa proses pengambilan gambar dan pengiriman foto berlangsung dengan baik sehingga pengguna dapat memperoleh informasi visual mengenai kondisi panel Remote Terminal Unit secara real-time. Dokumentasi berupa foto yang diterima melalui telegram dapat membantu pengguna dalam melakukan verifikasi terhadap aktivitas pembukaan panel untuk keperluan

pemeliharaan maupun sebagai bukti apabila terjadi akses yang tidak sah. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa integrasi antara ESP32, ESP32-CAM, dan telegram telah bekerja sesuai dengan fungsi yang dirancang sehingga mampu meningkatkan efektivitas sistem pengamanan panel Remote Terminal Unit melalui penyediaan dokumentasi visual secara otomatis.

3.6 Pengujian Notifikasi Telegram

Pengujian notifikasi Telegram dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengirimkan informasi kondisi panel Remote Terminal Unit kepada pengguna secara otomatis melalui aplikasi Telegram. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap kondisi yang terdeteksi oleh sensor dapat diteruskan oleh mikrokontroler ESP32 menjadi notifikasi yang informatif sehingga pengguna dapat melakukan pemantauan panel dari jarak jauh.

Tabel 7 Pengujian Notifikasi Telegram

No.	Kondisi Pengujian	Notifikasi Telegram	Hasil Pengujian
1.	Kartu RFID terdaftar		Berhasil
2.	Kartu RFID tidak terdaftar		Berhasil
3.	Panel dibuka tanpa hak akses		Berhasil

4.	Sensor MQ-135 mendeteksi asap		Berhasil
5.	Sensor flame mendeteksi api		Berhasil
6.	ESP32-CAM mengambil gambar		Berhasil

Hasil pengujian menunjukkan bahwa telegram mampu berfungsi sebagai media monitoring jarak jauh yang efektif. Seluruh informasi yang dikirimkan sesuai dengan kondisi aktual yang terdeteksi oleh sistem, sehingga pengguna dapat menerima informasi keamanan panel Remote Terminal Unit secara otomatis tanpa harus berada di lokasi panel.

3.7 Pengujian Sumber Tegangan Tarmoc UPS

Sumber tegangan pada sistem menggunakan Tarmoc UPS DC yang berfungsi sebagai catu daya utama sekaligus sumber daya cadangan (*backup power*). Penggunaan Tarmoc UPS bertujuan agar seluruh perangkat, seperti ESP32, ESP32-CAM, sensor MQ-135, sensor Flame, RFID, *magnetic switch*, relay, dan sirine tetap memperoleh suplai tegangan ketika terjadi pemadaman listrik PLN. Dengan demikian, sistem pengamanan panel tetap dapat beroperasi secara kontinu tanpa mengalami gangguan.

Tabel 8 Pengujian Sumber Tegangan Tarmoc UPS

No.	Alat ukur yang digunakan	Tegangan Keluar	Tanpa beban	Dengan beban	Persentase voltage drop	Kondisi
1.	Multimeter Digital	5V DC	5,2V DC	4,9V DC	5,76%	Normal
2.	Multimeter Digital	9V DC	9,4V DC	9,4V DC	0%	Normal
3.	Multimeter Digital	12V DC	12,5V DC	11,8V DC	5,60%	Normal

Pada jalur 9V DC, hasil pengukuran Multimeter Digital mencatat nilai tegangan konstan sebesar 9,4V DC baik dalam kondisi tanpa beban maupun dengan beban, sehingga persentase voltage drop terukur sebesar 0% Hal ini disebabkan karena jalur 9V DC difungsikan sebagai terminal keluaran cadangan (*standby*) dan tidak terhubung ke beban aktif. Sementara itu, pada jalur 12V DC, pengukuran Multimeter Digital menunjukkan tegangan 12,5V DC saat tanpa beban dan turun menjadi 11,8V DC ketika menyuplai beban aktif berupa sirine alarm 12V DC. Penurunan tersebut menghasilkan persentase voltage drop sebesar 5,60%. Nilai 11,8V DC ini sangat memadai dan berada dalam batas operasional sirine 12V DC sehingga sirine tetap dapat berbunyi dengan nyaring saat terjadi kondisi darurat. Secara keseluruhan, persentase *voltage drop* pada seluruh jalur beban terukur di bawah 6%, yang menandakan bahwa Tarmoc Mini UPS DC memiliki regulasi daya yang sangat baik dan andal dalam menjaga kelangsungan operasional sistem pengamanan panel RTU.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian, dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem pengamanan panel Remote Terminal Unit (RTU) berbasis Internet of Things (IoT) pada PT. PLN Electricity Services telah berhasil dibangun dan berfungsi secara optimal secara real-time. Integrasi mikrokontroler utama ESP32 dengan sensor MQ-135, sensor flame, RFID RC522, magnetic reed switch, sirine alarm, dan modul kamera ESP32-CAM menunjukkan performa yang presisi dan andal. Sensor MQ-135 mampu membedakan tingkat konsentrasi udara secara akurat dari kondisi normal hingga kondisi kritis pada tegangan maksimum 3,30 V, sementara sensor flame berhasil mendeteksi pemicuan nyala api dengan penurunan nilai ADC hingga rentang 14-18 (intensitas 99,7%). Sistem autentikasi RFID dan pemantauan pintu juga mencatatkan tingkat keberhasilan pembacaan 100% dalam mengenali akses sah maupun pembukaan paksa. Ketika kondisi kritis atau vandalisme terdeteksi, sistem terbukti tanggap mengaktifkan sirine alarm lokal dan mentransmisikan notifikasi teks beserta tangkapan citra visual dari ESP32-CAM ke grup Telegram teknisi dalam waktu kurang dari 2detik, sehingga meningkatkan keandalan pemantauan dan kecepatan respon darurat di lapangan.

5. SARAN

Untuk pengembangan dan penyempurnaan sistem pengamanan panel RTU pada penelitian selanjutnya, disarankan beberapa poin berikut:

1. Penggunaan Jalur Komunikasi Cadangan (Redundansi Jaringan):
   Pengiriman data saat ini sangat bergantung pada jaringan Wi-Fi/Internet lokal. Untuk meningkatkan keandalan di area terpencil (remote area), disarankan menambahkan modul komunikasi seluler berbasis GSM/LTE (seperti SIM800L atau SIM7600) atau teknologi LoRa (Long Range) sebagai jalur komunikasi cadangan ketika jaringan Wi-Fi mengalami kegagalan (down).

2. Penerapan Pemasok Daya Cadangan (Uninterruptible Power Supply):
   Disarankan untuk menambahkan sistem manajemen daya baterai cadangan (UPS DC) dengan modul pengisian otomatis (automatic battery charger). Hal ini penting agar sistem proteksi dan modul pengirim notifikasi tetap berfungsi secara optimal meskipun terjadi pemadaman total daya utama (blackout) pada suplai lokal panel.
3. Peningkatan Kualitas Kamera dan Pemrosesan Citra:
   Penggunaan modul kamera ESP32-CAM dapat ditingkatkan ke modul kamera dengan resolusi lebih tinggi serta dilengkapi pemancar inframerah (IR Night Vision). Fitur ini penting untuk memastikan pengambilan citra visual di dalam maupun luar panel tetap jernih dan detail pada kondisi pencahayaan minim atau malam hari.

6. DAFTAR PUSTAKA

[1] I. G. P. M. Eka Putra, I. A. D. Giriantari, and L. Jasa, "Monitoring Penggunaan Daya listrik Sebagai Implementasi Internet of Things Berbasis Wireless Sensor Network," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 16, no. 3, p. 50, 2017, doi: 10.24843/mite.2017.v16i03p09.

[2] E. V. Manullang and S. Rumere, "RANCANG BANGUN SISTEM KEAMANAN RUMAH BERBASIS INTERNET OF THINGS (IoT) DENGAN MENGGUNAKAN SENSOR PIR DAN ESP32-CAM," *J. Teknol. Inf.*, vol. 12, no. 1, pp. 9–15, 2024, doi: 10.58839/jti.v12i1.1359.

[3] S. Nasional and T. Elektro, "SNTE-FORTEI ' Peralatan Pencegahan Kebakaran Akibat Kebocoran Tabung Gas Menggunakan Sensor MQ- 135 Berbasis IoT (Internet of Things),'" no. 3, pp. 238–247.

[4] P. Sistem, P. Dini, and K. Berbasis, "Swadharma (jeis)," vol. 06, pp. 137–145, 2026.

[5] Ade Rahayu, "Metode Penelitian dan Pengembangan (R&D) : Pengertian, Jenis dan Tahapan," *DIAJAR J. Pendidik. dan Pembelajaran*, vol. 4, no. 3, pp. 459–470, 2025, doi: 10.54259/diajar.v4i3.5092.