

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Internet of Things

Indonesia memiliki potensi alam sebagai penghasil energi terbarukan. Jika ditinjau dari letak geografis, Indonesia memiliki potensi pengembangan energi matahari dan energi angin sebagai sumber energi terbarukan. Energi matahari dan angin memiliki sifat yang ramah lingkungan serta dapat diperbarui. Hal ini merupakan keuntungan dan potensi bagi Indonesia untuk memenuhi kebutuhan energi yang bersifat terbarukan di masa depan. Namun, untuk memaksimalkan potensi energi terbarukan, dibutuhkan pengelolaan energi yang optimal, efisien dan terkoordinasi dengan baik. Pengelolaan energi yang efisien dan terkoordinasi dapat dilakukan melalui pemanfaatan teknologi Internet of Things (IoT).

Internet of Things (IoT) adalah teknologi yang menghubungkan perangkat elektronik satu sama lain dan dapat berkomunikasi melalui jaringan internet. Penggunaan Internet of Things (IoT), memiliki dampak terhadap pengumpulan data produksi dan konsumsi energi secara *real-time*. Pengumpulan data secara *real-time* dapat mengoptimalkan konsumsi energi sehingga energi digunakan lebih efisien. Selain itu, Internet of Things (IoT) juga dapat digunakan untuk memantau dan memelihara sistem lebih efektif. Oleh sebab itu, pemanfaatan Internet of Things (IoT) dalam pengembangan energi terbarukan menjadi semakin penting mengingat kebutuhan, ketergantungan dan tantangan yang dihadapi oleh banyak negara di dunia terhadap kebutuhan energi semakin besar. Teknologi Internet of Things (IoT) telah banyak membantu memudahkan manusia dalam pengendalian dan pemantauan objek kapan pun dimanapun Sofia et al. (2025).

2.1.2 Protokol MQTT

Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) adalah protokol komunikasi yang bersifat ringan (lightweight), dirancang untuk perangkat IoT yang memiliki keterbatasan bandwidth dan daya. MQTT bekerja menggunakan pola publish-subscribe, di mana perangkat sensor bertindak sebagai publisher yang mengirimkan data ke sebuah broker, sementara sistem monitoring atau

server aplikasi menjadi subscriber yang menerima data tersebut Firdaus dan Pratama (2026).

Protokol *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) merupakan protokol komunikasi data berbasis *publish/subscribe* yang dirancang khusus untuk perangkat dengan sumber daya terbatas dan jaringan yang memiliki pita lebar (*bandwidth*) rendah. Dalam implementasi sistem monitoring stasiun pengecasan hibrida PV-TEG ini, MQTT bertindak sebagai tulang punggung pengiriman data dari modul Waveshare ESP32-P4-86-Panel-ETH-2RO menuju server lokal. Perangkat ESP32-P4 berperan sebagai *publisher* yang membungkus parameter proses seperti arus, tegangan, suhu, dan intensitas cahaya ke dalam format JSON, kemudian mengirimkannya ke sebuah *broker* MQTT melalui jaringan Wi-Fi. Mekanisme ini memungkinkan transmisi data terjadi secara efisien dan cepat tanpa membebani performa mikrokontroler secara berlebihan.

2.1.3 MongoDB

MongoDB merupakan sistem manajemen basis data NoSQL yang menyimpan data dalam format dokumen berbasis JSON (JavaScript Object Notation). MongoDB cocok digunakan pada aplikasi IoT karena mampu menangani data yang bersifat dinamis dan tidak terstruktur. Dalam pengembangan stasiun pengecasan hibrida PV-TEG ini, MongoDB berperan sebagai pusat penyimpanan data historis yang menerima seluruh parameter proses dari sensor arus, tegangan, suhu, dan intensitas cahaya. Karakteristik MongoDB yang *schemaless* sangat menguntungkan bagi sistem IoT, karena memungkinkan penyimpanan data sensor yang bervariasi tanpa harus mendefinisikan struktur tabel yang kaku di awal pengembangan.

Integrasi antara MongoDB dengan Node-RED dalam proyek ini dilakukan untuk menjamin pengelolaan data yang sistematis dan efisien. Setiap paket data yang masuk melalui protokol MQTT akan diteruskan oleh Node-RED ke dalam *collection* di MongoDB secara *real-time*. Kemampuan MongoDB dalam menangani volume data yang besar dengan kecepatan tulis (*write speed*) yang tinggi sangat krusial untuk mencatat fluktuasi parameter energi dari unit hibrida dalam jangka waktu lama. Dengan tersimpannya data pada MongoDB, operator dapat melakukan pemanggilan data masa lalu (*data retrieval*) untuk dianalisis

kembali melalui grafik pada *dashboard*, sehingga evaluasi efisiensi pengisian baterai dapat dilakukan secara akurat berdasarkan rekaman data yang terstruktur.

2.1.4 Node-RED

Node-RED adalah sebuah alat berbasis browser yang digunakan untuk membuat aplikasi Internet of Things (IoT) dengan menggunakan pendekatan pemrograman visual. Dengan antarmuka pemrograman berbasis flow, Node-RED memudahkan pengguna dalam menciptakan aplikasi dengan menghubungkan blok-blok pemrograman. Meskipun dirancang khusus untuk keperluan IoT, Node-RED juga dapat digunakan secara universal untuk berbagai jenis aplikasi. Kelebihan Node-RED terletak pada beragamnya jenis node yang disediakan, yang memungkinkan pengembang untuk lebih produktif dalam mengembangkan aplikasi Al Farizi et al. (2023). Dalam sistem monitoring hibrida PV-TEG ini, Node-RED berfungsi sebagai pusat kendali data (*middleware*) yang menerima input dari protokol MQTT, melakukan pengolahan data (*parsing*), serta mendistribusikannya secara simultan ke sistem penyimpanan database MongoDB dan antarmuka visualisasi pengguna.

Implementasi Node-RED dalam proyek ini memberikan keunggulan pada aspek penyajian informasi yang interaktif dan mudah dipahami oleh operator. Melalui fitur *Node-RED Dashboard*, data mentah berupa angka yang dikirim oleh modul Waveshare ESP32-P4-86-Panel-ETH-2RO dapat ditransformasikan menjadi representasi grafis seperti *gauge*, *chart*, dan tabel periodik. Visualisasi ini dirancang untuk mempermudah pemantauan kondisi *real-time*. Dengan sifatnya yang efisien dan memiliki dukungan pustaka yang luas, Node-RED menjamin integrasi sistem yang responsif antara perangkat keras di lapangan dengan sistem manajemen data berbasis *cloud* maupun lokal.

2.1.5 Protocol I2C

I2C atau Inter Integrated Circuit merupakan salah satu komunikasi serial yang sering dipakai untuk meminimalkan desain elektronik dikarenakan memiliki mode komunikasi Multimaster dan Multislave. I2C menggunakan sinyal dari SCL dan SDL yang digunakan untuk transfer data antara master dan slave Kusna et al. (2018). Komunikasi I2C cocok digunakan pada sistem *embedded* dan IoT karena efisien dalam penggunaan pin serta mampu menghubungkan banyak modul dalam

satu jalur bus. Dalam pengembangan stasiun pengecasan hibrida PV-TEG ini, komunikasi I2C berperan sebagai jalur utama akuisisi data yang menghubungkan mikrokontroler dengan sensor arus, tegangan, suhu, dan intensitas cahaya. Karakteristik I2C yang menggunakan arsitektur *Master-Slave* sangat menguntungkan bagi sistem, karena memungkinkan mikrokontroler mengendalikan alur lalu lintas data secara terpusat dari banyak sensor sekaligus.

Penggunaan komunikasi I2C dalam proyek ini dilakukan untuk menjamin proses pengiriman data antar perangkat berjalan secara sistematis dan efisien. Jalur bus I2C hanya membutuhkan dua baris kabel utama, yaitu SDA (*Serial Data*) untuk mentransfer data dan SCL (*Serial Clock*) untuk sinkronisasi sinyal detak. Setiap sensor yang terhubung pada bus I2C memiliki alamat unik (*slave address*) 7-bit, sehingga mikrokontroler dapat mengakses data dari masing-masing sensor tanpa membingungkan sinyal data. Kemampuan I2C dalam menangani komunikasi *multi-device* dengan kebutuhan kabel yang minimal sangat krusial untuk menjaga kerapihan serta keandalan perkabelan pada boks panel sistem pemantauan.

2.1.6 Waveshare ESP32-S3 Touch Display 4.3

Waveshare ESP32-S3 Touch Display 4.3 merupakan sebuah platform pengembangan sistem tertanam (*embedded system*) yang mengintegrasikan unit pemrosesan berperforma tinggi dengan antarmuka grafis interaktif berbasis *System on a Chip* (SoC). Modul ini ditenagai oleh mikrokontroler ESP32-S3 dengan arsitektur prosesor dual-core Xtensa® 32-bit LX7 yang beroperasi pada frekuensi hingga 240 MHz, sehingga mampu menjalankan manajemen tugas (*multitasking*) secara kompleks antara akuisisi data sensorik dan pembaruan visual pada layar LCD beresolusi 800×480 piksel secara simultan. Selain keunggulan komputasi, perangkat ini telah dilengkapi dengan konektivitas nirkabel Wi-Fi serta Bluetooth terintegrasi dan berbagai protokol komunikasi industri seperti SPI, I2C, dan UART, yang menjadikannya solusi komprehensif untuk perangkat IoT yang memerlukan kendali lokal sekaligus pemantauan jarak jauh dalam satu kesatuan perangkat keras.

Dalam sistem monitoring stasiun pengecasan hibrida PV-Termoelektrik ini, modul Waveshare ESP32-S3-Touch-LCD-4.3 (Type B) diimplementasikan

sebagai unit kendali pusat (*main controller*) yang mengintegrasikan seluruh proses akuisisi data. Perangkat ini menerima input parameter elektrik melalui bus komunikasi I2C pada pin SDA dan SCL yang terhubung ke tiga unit sensor INA219 serta sensor cahaya Gravity I2C. Secara simultan, modul ini juga mengolah data suhu dari sensor MLX90614 melalui protokol I2C. Data yang telah diproses kemudian divisualisasikan langsung pada layar LCD IPS 4.3 inci dengan resolusi 800×480 piksel, yang memberikan tampilan *dashboard* monitoring lebih luas dan detail dibandingkan versi sebelumnya. Informasi tersebut selanjutnya diteruskan menuju server melalui konektivitas nirkabel WiFi, memastikan sinkronisasi data yang akurat antara perangkat keras di lapangan dengan sistem pemantauan jarak jauh berbasis Node-RED dan MongoDB sebagai *database*.



Gambar 2. 1 Waveshare ESP32-S3 Touch Display 4.3¹

1) ESP32-S3-WROOM-1-N16R8

ESP32-S3-WROOM-1-N16R8 adalah modul *System-on-Module* (SoM) berbasis chip ESP32-S3 yang dirancang untuk aplikasi IoT berperforma tinggi. Modul ini ditenagai oleh prosesor Xtensa® Dual-Core 32-bit LX7 dengan frekuensi hingga 240 MHz. Kode spesifik "N16R8" merujuk pada kapasitas memori yang sangat besar, yaitu 16 MB Quad SPI Flash (N16) untuk penyimpanan kode program dan data permanen, serta 8 MB Octal SPI PSRAM (R8) untuk penyimpanan data sementara yang cepat. Modul ini mendukung konektivitas Wi-Fi 2.4 GHz dan Bluetooth® 5 (LE), serta dilengkapi dengan instruksi vektor untuk mempercepat pemrosesan sinyal

¹ Waveshare ESP32-S3 Touch Display. (n.d.). <https://share.google/ws65qgLVfafuNgw4y>

digital (DSP) dan komputasi kecerdasan buatan (*AI acceleration*) pada tingkat *edge*.

Dalam implementasi proyek stasiun pengecasan hibrida PV-Termoelektrik ini, spesifikasi memori N16R8 memberikan keunggulan dalam pengelolaan antarmuka grafis pada layar 4.3 inci. Kapasitas 16 MB Flash digunakan untuk menyimpan seluruh aset tampilan dashboard, sementara 8 MB PSRAM memastikan sistem dapat menjalankan berbagai tugas secara bersamaan (*multitasking*). Hal ini memungkinkan mikrokontroler untuk melakukan akuisisi data dari sensor INA219, Gravity, dan MLX90614, sekaligus memperbarui tampilan visual pada layar resolusi 800×480 dan mengirimkan data via MQTT ke server secara stabil tanpa mengalami kendala memori.



Gambar 2. 2 ESP32-S3R8²

2) Panel Layar IPS 4,3 Inch

Layar LCD 4.3 inci pada perangkat ini merupakan unit penampil visual berbasis teknologi *Thin Film Transistor* (TFT) yang dirancang untuk menyajikan antarmuka grafis berwarna dengan resolusi tinggi sebesar 800×480 piksel. Secara teknis, panel layar ini dikendalikan oleh unit pemroses melalui bus komunikasi data yang mendukung kedalaman warna hingga 16-bit atau 24-bit (RGB), sehingga mampu mereproduksi gradasi warna dan detail teks dengan sangat tajam. Komponen ini juga dilengkapi dengan lapisan sensor sentuh kapasitif (*capacitive touch*) yang terintegrasi

² ESP32-S3R8. (n.d.). <https://share.google/rBfgi9jTAMMzq1Ut6>

secara internal, memungkinkan interaksi pengguna yang responsif melalui deteksi perubahan muatan listrik pada permukaan layar. Dukungan pencahayaan latar (*backlight*) yang dapat diatur melalui sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) memberikan fleksibilitas visibilitas layar di berbagai kondisi pencahayaan lingkungan, mulai dari ruangan gelap hingga area dengan cahaya matahari langsung.

Dalam implementasi proyek stasiun pengecasan hibrida PV-Termoelektrik ini, layar LCD 4.3 inci berfungsi sebagai unit antarmuka grafis (*Human Machine Interface*) utama yang menyajikan data secara langsung di lokasi penelitian. Layar ini bertugas memvisualisasikan seluruh parameter yang diperoleh dari sensor secara *real-time*, mulai dari pembacaan arus dan tegangan pada sensor INA219, tingkat intensitas cahaya dari sensor Gravity, hingga monitoring suhu sisi panas dan dingin dari sensor MLX90614. Pemanfaatan memori 8 MB Octal SPI PSRAM pada chip ESP32-S3-WROOM-1-N16R8 memungkinkan layar untuk menampilkan grafik fluktuasi daya dengan pergerakan yang halus dan antarmuka yang modern tanpa mengalami kendala pemrosesan (*lagging*).



Gambar 2. 3 LCD Grafis 4,3 Inci³

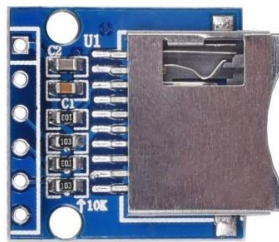
3) TF Card Slot

Slot kartu TF (*Trans-Flash*) atau yang lebih dikenal sebagai slot MicroSD merupakan antarmuka penyimpanan eksternal yang menggunakan jalur komunikasi SPI (*Serial Peripheral Interface*). Pada modul ESP32-S3, slot ini memungkinkan perangkat untuk mengakses ruang penyimpanan tambahan hingga kapasitas 32 GB atau lebih, melampaui keterbatasan

³ LCD Waveshare 4,3 Inci. (n.d.). <https://share.google/1CAmoWnb1nFqUCuOQ>

memori internal *Flash* yang ada pada chip. Secara teknis, slot ini berfungsi untuk menyimpan data dalam format file (seperti .csv atau .txt) secara permanen, sehingga data tidak akan hilang meskipun perangkat dimatikan atau mengalami pemutusan daya.

Dalam implementasi proyek stasiun pengecasan hibrida PV-Termoelektrik ini, slot kartu TF berperan sebagai unit penyimpanan data lokal (*Local Data Logger*) yang krusial. Selain mengirimkan data ke server Node-RED melalui WiFi, sistem menggunakan slot ini untuk menyimpan seluruh riwayat pembacaan sensor secara cadangan (*backup*). Data arus dan tegangan dari INA219, intensitas cahaya dari sensor Gravity, serta fluktuasi suhu dari MLX90614 dicatat secara berkala ke dalam kartu memori. Fitur ini sangat penting untuk memastikan kontinuitas data penelitian, jika koneksi internet atau WiFi di lokasi stasiun pengecasan mengalami gangguan, seluruh parameter performa tetap tersimpan dengan aman di dalam kartu TF.



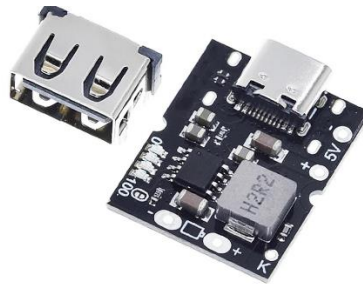
Gambar 2. 4 TF Card Slot ⁴

4) Port USB Type-C

Port USB Type-C merupakan antarmuka komunikasi dan pengisian daya modern yang mengadopsi protokol UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) melalui jembatan USB-to-Serial untuk menjamin kemudahan koneksi antar perangkat. Secara teknis, port ini pada modul Waveshare berfungsi sebagai jalur transmisi data utama untuk proses pengunggahan kode program (firmware) ke dalam memori mikrokontroler menggunakan komunikasi asinkron dengan baud rate tinggi. Selain berperan dalam aspek komunikasi data, port ini juga dilengkapi dengan rangkaian proteksi arus untuk menyalurkan tegangan operasional selama tahap

⁴ TF Card Slot. (n.d.). <https://share.google/yqHrtw3B6MrPf1zgr>

pengembangan, memastikan komponen internal tetap terlindungi dari risiko lonjakan arus saat dihubungkan ke komputer atau power source lainnya.



Gambar 2. 5 Port USB Type-C⁵

5) Terminal Blok Waveshare ESP32-S3-Touch-LCD-4.3 (Type B)

Modul Waveshare ESP32-S3-Touch-LCD-4.3 (Type B) dilengkapi dengan berbagai terminal blok standar industri untuk mendukung fleksibilitas konektivitas perifer, masukan daya, serta protokol komunikasi data. Rincian antarmuka terminal blok beserta fungsi umumnya disajikan pada Tabel 2.1 berikut:

Tabel 2. 1 1Blok Waveshare ESP32-S3-Touch-LCD-4.3 (Type B)

NO	Terminal Blok	Spesifikasi / Tegangan	Fungsi
1	Power Input	7 -36 V DC	Terminal masukan catu daya eksternal modul
2	I2C Bus	3,3 / 5V DC	Antarmuka komunikasi data serial dua arah untuk modul/sensor I2C
3	RS485	Differential Signal	Antarmuka komunikasi data serial standar industri jarak jauh
4	CAN Bus	Differential Signal	Antarmuka komunikasi data <i>controller area network</i> kecepatan tinggi
5	Digital Input (DI)	High-Voltage Compatible	Menerima sinyal masukan digital dari perangkat eksternal
6	Digital Output (DO)	High-Voltage Compatible	Mengirimkan sinyal kendali keluaran digital ke aktuator atau relai

6) Tombol BOOT

⁵ Port USB Type-C. (n.d.). <https://share.google/ZKGihy1SW5QR2xDea>

Tombol Boot berfungsi untuk mengalihkan fokus kerja mikrokontroler dari mode Eksekusi (menjalankan program) ke mode Penerimaan (menerima program baru). Ketika tombol ini ditekan, ESP32-S3 akan berhenti sejenak dari aktivitas monitoring sensor dan bersiap membuka gerbang komunikasi dengan komputer melalui port USB. Dengan menahan tombol Boot saat proses pengunggahan dimulai, komputer dapat memastikan bahwa data program baru benar-benar masuk dan tersimpan ke dalam memori flash perangkat tanpa terganggu oleh proses kerja sistem yang lama.

7) Tombol Reset

Tombol *Reset* berfungsi sebagai pemutus sementara yang digunakan untuk memulai ulang (*restart*) jalannya program pada mikrokontroler tanpa harus mematikan sumber daya utama. Fungsi ini sangat krusial dalam pengujian alat apabila sistem monitoring mengalami kegagalan proses atau ketika pengguna ingin melakukan inisialisasi ulang terhadap seluruh parameter sensor agar pembacaan dimulai kembali dari titik awal. Secara teknis, menekan tombol ini akan menarik pin *Enable* (EN) ke logika rendah (LOW), sehingga memaksa chip ESP32-S3 untuk mengulang eksekusi instruksi dari baris pertama.

8) Power Button

Pada modul ini, terdapat sakelar geser ON/OFF yang berfungsi untuk mengatur aliran listrik dari baterai ke seluruh komponen alat. Dalam proyek stasiun pengecasan hibrida ini, sakelar tersebut digunakan sebagai kendali utama untuk menghidupkan atau mematikan alat secara praktis saat sedang menggunakan tenaga baterai. Fungsi utamanya adalah untuk mencegah baterai habis sia-sia ketika alat sedang tidak digunakan atau saat dilakukan perbaikan pada stasiun pengecasan. Dengan adanya sakelar ini, pengguna tidak perlu repot mencabut kabel baterai dari soketnya, sehingga penggunaan alat menjadi lebih awet dan lebih mudah dioperasikan di lapangan.

9) Lampu Indikator PWR

Lampu indikator PWR berfungsi sebagai penanda utama operasional sistem yang menunjukkan bahwa modul sedang menerima suplai daya listrik, baik dari port USB maupun dari baterai. Dalam implementasi proyek ini,

lampu ini berperan penting untuk memastikan bahwa mikrokontroler ESP32-S3 telah aktif dan siap menjalankan proses akuisisi data dari seluruh sensor. Jika lampu ini menyala, berarti distribusi daya ke komponen internal seperti layar LCD dan modul WiFi telah berjalan dengan normal, sehingga sistem monitoring siap digunakan.

10) Lampu Indikator CHG (Charging)

Lampu indikator CHG dirancang khusus untuk memantau proses pengisian energi pada baterai Lithium yang terhubung ke modul. Ketika kabel USB Type-C dihubungkan ke sumber daya, lampu ini akan menyala untuk menunjukkan bahwa arus sedang dialirkan menuju baterai melalui IC manajemen daya. Pada stasiun pengecasan hibrida ini, lampu ini memberikan kepastian visual kepada pengguna bahwa proses pengisian daya baterai sedang berlangsung.

11) Lampu Indikator DONE

Lampu indikator DONE berfungsi sebagai indikator akhir yang menunjukkan bahwa kapasitas baterai telah terisi penuh. Saat sistem manajemen daya mendeteksi bahwa tegangan baterai telah mencapai batas maksimum pengisian, lampu CHG akan mati dan secara otomatis lampu DONE akan menyala. Fitur ini sangat memudahkan pengguna dalam mengawasi durasi pengisian daya, sehingga kabel USB dapat dilepas tepat waktu untuk menjaga kesehatan baterai.

2.1.7 INA 219

Sensor INA 219 adalah salah satu sensor yang berbentuk modul yang dapat membaca tegangan, arus, dan daya sekaligus dengan menggunakan interface I2C. Sensor ini bekerja pada tegangan DC antara 3.3 sampai 5V. Sensor ini dapat mengukur tegangan sampai dengan 26V dan arus sebesar 3.2A. Sensor INA 219 sudah banyak di gunakan di aplikasikan untuk pembacaan dan monitoring alat kelistrikan Nathasya (2024).

INA 219 merupakan modul sensor presisi yang dirancang khusus untuk mengukur parameter arus dan tegangan pada suatu rangkaian listrik dengan antarmuka digital. Secara teknis, sensor ini bekerja dengan prinsip penginderaan tegangan jatuh (*voltage drop*) pada sebuah resistor *shunt* internal yang memiliki

nilai resistansi sangat rendah. Perubahan arus yang mengalir melalui resistor tersebut akan menghasilkan tegangan *shunt* yang kemudian dikonversi oleh sirkuit ADC (*Analog-to-Digital Converter*) internal menjadi data digital berupa nilai arus dan tegangan bus. Seluruh data hasil konversi ini ditransmisikan menuju mikrokontroler melalui bus komunikasi I2C (*Inter-Integrated Circuit*) yang hanya memerlukan dua jalur kabel data (SDA dan SCL), sehingga memungkinkan pemantauan daya secara akurat dengan integrasi kabel yang sangat minimal.



Gambar 2. 6 1 INA 219⁶

2.1.8 MLX90614

MLX90614 merupakan modul sensor suhu digital non-kontak berbasis inframerah yang dirancang untuk memberikan hasil pengukuran temperatur dengan presisi tinggi melalui deteksi radiasi termal suatu objek tanpa menyentuh fisik permukaan benda kerja. Sensor ini mengintegrasikan chip detektor termopile sensitif inframerah dan sebuah chip ASSP (*Application Specific Signal Conditioning*) yang berfungsi mengolah sinyal analog menjadi data digital terkalibrasi melalui ADC 17-bit internal sirkuit sensor. Dibandingkan dengan sensor suhu konvensional tipe kontak seperti MLX90614 atau LM35, MLX90614 mempunyai kestabilan serta keunggulan respons pembacaan yang lebih cepat karena meniadakan hambatan termal konduksi material kontak dan memiliki tingkat akurasi tinggi dengan resolusi output mencapai 0,02°C.

Protokol komunikasi data utama yang digunakan untuk pembacaan sensor MLX90614 adalah SMBus (*System Management Bus*) yang kompatibel secara elektrik dengan protokol I2C (*Inter-Integrated Circuit*). Fisik sensor ini memiliki 4 pin utama, yaitu VDD (+3,3 V atau +5 V), GND, SDA (*Serial Data*), dan SCL (*Serial Clock*). Pemanfaatan jalur I2C ini memungkinkan komunikasi

⁶ INA 219. (n.d.). <https://share.google/jFtF6tu4FpZpU4AEw>

dua arah dalam mentransmisikan data registri temperatur objek maupun temperatur internal sensor menuju mikrokontroler. Melalui integrasi alamat I2C lokal yang spesifik atau dibantu dengan pemanfaatan modul pengondisi sinyal seperti *I2C Multiplexer*, beberapa unit sensor MLX90614 dapat dihubungkan secara paralel pada satu pasang pin GPIO yang sama untuk melakukan pemantauan multi-titik suhu secara simultan tanpa adanya risiko tabrakan data (*data collision*). Selain itu, komunikasi bus ini membutuhkan konfigurasi resistor *pull-up* eksternal pada jalur SDA dan SCL untuk menjaga stabilitas level tegangan sinyal logika digital saat proses transmisi frekuensi tinggi berlangsung, sehingga menjamin akurasi data pembacaan parameter termal tetap terjaga secara optimal.



Gambar 2. 7 MLX90614⁷

2.1.9 Gravity I2C IP68 Waterproof Ambient Light Sensor

Sensor cahaya ambien seri Gravity ini merupakan perangkat sensor optik yang dirancang khusus untuk penggunaan di lingkungan luar ruangan (*outdoor*) yang ekstrem dengan standar perlindungan IP68 yang tahan air dan debu. Cara kerja sensor ini berbasis pada sirkuit terintegrasi fotodiode yang sensitif terhadap spektrum cahaya tampak, di mana sensor akan mengonversi intensitas cahaya yang diterima menjadi sinyal digital melalui antarmuka komunikasi I2C (*Inter-Integrated Circuit*). Berbeda dengan sensor analog, penggunaan protokol I2C memungkinkan transmisi data intensitas cahaya dalam satuan Lux dilakukan secara presisi tanpa terpengaruh oleh rugi tegangan pada kabel, serta memudahkan proses pengkabelan karena hanya membutuhkan dua jalur data (SDA dan SCL) untuk berkomunikasi dengan mikrokontroler.

⁷ MLX90614. (n.d.). <https://share.google/TXi4H9J6IUfOjuaoU>

Dalam pengembangan stasiun pengecasan hibrida ini, sensor Gravity I2C IP68 Waterproof Ambient Light dipasang pada bagian luar unit untuk memantau besarnya intensitas paparan sinar matahari yang menyinari Photovoltaic sebagai sumber energi utama. Data hasil pembacaan sensor ini sangat krusial sebagai parameter pembanding untuk menganalisis korelasi antara tingkat kecerahan matahari dengan besaran arus listrik yang dihasilkan oleh sistem PV (*Photovoltaic*). Informasi intensitas cahaya tersebut akan ditampilkan secara *real-time* pada *dashboard* layar LCD Waveshare dan dikirimkan melalui protokol MQTT menuju server Node-RED. Melalui integrasi ini, data intensitas cahaya tidak hanya divisualisasikan pada UI *Dashboard* guna memberikan laporan kondisi lingkungan secara informatif, tetapi juga disimpan secara otomatis ke dalam Database MongoDB untuk dianalisis bersama data elektrik lainnya.



Gambar 2. 8 Gravity I2C IP68 Waterproof Ambient Light Sensor⁸

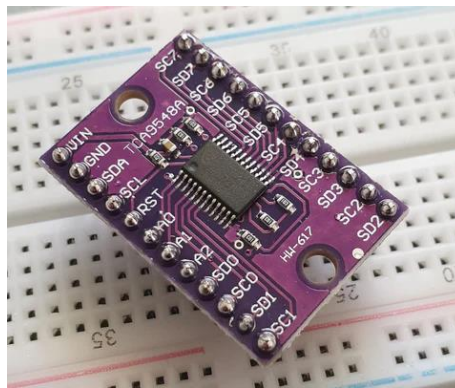
2.1.10 TCA9548A

TCA9548A merupakan modul pengondisi sinyal digital bertipe *I2C Multiplexer* yang dirancang khusus untuk mengatasi keterbatasan alamat (*address conflict*) pada perangkat sensor berprotokol *I2C (Inter-Integrated Circuit)* yang memiliki alamat perangkat keras (*hardware address*) kembar di dalam satu jalur bus komunikasi. Perangkat keras ini mengintegrasikan sirkuit sakelar elektronik delapan arah (*8-directional bidirectional translating switches*) yang dikendalikan secara langsung melalui instruksi data dari master mikrokontroler. Dibandingkan dengan konfigurasi bus *I2C* konvensional yang membatasi sistem hanya dapat membaca satu sensor dengan alamat yang sama, TCA9548A mempunyai

⁸ Gravity I2C IP68 Waterproof Ambient Light Sensor. (n.d.).
<https://share.google/ZAJEnuIgaUJeDqG5m>

kemampuan untuk mendistribusikan satu jalur master menjadi delapan jalur cabang independen (saluran CH0 hingga CH7), sehingga meniadakan terjadinya tabrakan data (*data collision*) ketika membaca parameter dari sensor sejenis secara bersamaan.

Protokol kendali utama yang digunakan untuk mengoperasikan chip TCA9548A adalah melalui pengiriman data bit kontrol register pada bus I2C utama. Fisik modul ini dilengkapi dengan pin catu daya (VCC dan GND), sepasang pin kontrol master (SDA dan SCL), serta deretan pin output saluran cabang (SD0/SC0 hingga SD7/SC7). Mekanisme kerja komunikasi pada komponen ini dilakukan dengan cara mengaktifkan salah satu saluran cabang secara spesifik melalui penulisan nilai register internal chip, sehingga master mikrokontroler dapat terhubung secara eksklusif ke perangkat sensor pada saluran aktif tersebut sebelum berpindah ke saluran lainnya secara bergantian (*multiplexing*). Selain itu, sirkuit penunjang modul ini memerlukan pemasangan resistor *pull-up* eksternal pada setiap jalur cabang yang digunakan untuk menjaga integritas dan stabilitas level tegangan sinyal logika digital pada saat proses pengalihan saluran frekuensi tinggi berlangsung, guna memastikan transmisi data parameter fisik tetap terjaga secara konsisten.



Gambar 2. 9 TCA9548A⁹

2.2 Penelitian Terdahulu

Implementasi teknologi *Internet of Things* (IoT) pada sistem monitoring panel surya telah berkembang pesat seiring meningkatnya kebutuhan terhadap pemantauan kinerja sistem pembangkit listrik tenaga surya secara real-time.

⁹ TCA9548A. (n.d.). <https://share.google/RXFDALNOZHlkBGyAm>

Berbagai penelitian telah mengembangkan sistem monitoring dengan memanfaatkan mikrokontroler, sensor kelistrikan, sensor suhu, serta platform berbasis internet untuk memperoleh informasi kondisi operasional panel surya secara kontinu. Perbedaan metode, perangkat yang digunakan, serta parameter yang diamati pada setiap penelitian menjadi dasar dalam mengidentifikasi peluang pengembangan sistem monitoring yang lebih komprehensif. Perbandingan beberapa penelitian terdahulu disajikan pada Tabel 2.2

Tabel 2. 2 Penelitian terdahulu

Peneliti (Tahun)	Fokus Penelitian	Hasil Penelitian
Sari et al. (2024)	Sistem monitoring arus listrik berbasis Internet of Things (IoT) pada panel surya menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor arus ACS712, dan sensor tegangan dengan media monitoring aplikasi Blynk.	Sistem berhasil melakukan pemantauan arus dan tegangan panel surya secara real-time melalui aplikasi Blynk dengan tingkat akurasi yang tinggi sehingga mempermudah proses monitoring tanpa harus berada di lokasi.
Gunoto et al. (2022)	Perancangan sistem monitoring daya panel surya berbasis Internet of Things menggunakan ESP8266 yang terintegrasi dengan sensor arus, sensor tegangan, LCD, dan aplikasi Blynk.	Sistem mampu membaca parameter kelistrikan panel surya dengan rata-rata tingkat ketepatan di atas 95% serta dapat menampilkan data secara lokal maupun melalui smartphone.
Fahruri et al. (2021)	Monitoring arus, tegangan, dan suhu pada prototype thermoelectric generator berbasis IoT menggunakan sensor arus, sensor tegangan, sensor suhu, dan modul GSM SIM800L sebagai media komunikasi.	Sistem berhasil melakukan monitoring parameter arus, tegangan, dan suhu secara jarak jauh melalui SMS Gateway sehingga pengguna dapat mengetahui kondisi prototype secara real-time.

Utami dan Daud (2020)	Analisis pengaruh temperatur terhadap efisiensi panel surya menggunakan ESP32, sensor INA219, sensor temperatur MLX90614, dan aplikasi Blynk.	Data hasil pengukuran arus, tegangan, dan temperatur berhasil dikirimkan dan ditampilkan secara real-time melalui aplikasi Blynk sehingga dapat digunakan untuk menganalisis pengaruh suhu terhadap efisiensi panel surya.
Sutikno et al. (2023)	Sistem monitoring tegangan dan arus panel surya berbasis Internet of Things menggunakan NodeMCU ESP8266 dan sensor INA219.	Sistem mampu melakukan monitoring tegangan dan arus secara real-time dengan tingkat akurasi sebesar 99,17% untuk tegangan dan 98,8% untuk arus melalui aplikasi Blynk.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Sari et al. (2024), sistem monitoring panel surya berbasis Internet of Things dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32 dengan sensor arus ACS712 dan sensor tegangan sebagai perangkat akuisisi data. Seluruh data hasil pembacaan sensor dikirimkan melalui jaringan Wi-Fi dan ditampilkan pada aplikasi Blynk sehingga pengguna dapat memantau kondisi panel surya secara real-time. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat akurasi yang tinggi meskipun terdapat sedikit fluktuasi pembacaan arus akibat perubahan kondisi cuaca. Penelitian ini membuktikan bahwa implementasi teknologi IoT mampu meningkatkan efektivitas proses monitoring dibandingkan metode konvensional yang masih dilakukan secara langsung di lokasi. Namun demikian, penelitian tersebut masih berfokus pada parameter arus dan tegangan sehingga belum memberikan informasi mengenai pengaruh suhu terhadap performa panel surya maupun perhitungan daya dan energi listrik yang dihasilkan.

Penelitian selanjutnya yang dilakukan oleh Gunoto et al. (2022) merancang sistem monitoring daya panel surya menggunakan mikrokontroler ESP8266 yang diintegrasikan dengan sensor arus, sensor tegangan, layar LCD, dan aplikasi Blynk. Penggunaan LCD memungkinkan pengguna melakukan pemantauan secara langsung di lokasi, sedangkan aplikasi Blynk memberikan kemudahan dalam melakukan monitoring dari jarak jauh melalui smartphone. Berdasarkan hasil pengujian, sistem yang dikembangkan mampu membaca parameter

kelistrikan dengan tingkat ketepatan lebih dari 95% dibandingkan alat ukur standar. Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem monitoring berbasis IoT dapat mendukung proses pemeliharaan PLTS secara lebih efisien. Akan tetapi, penelitian tersebut belum mengintegrasikan sensor suhu sehingga analisis terhadap pengaruh temperatur panel terhadap performa sistem belum dapat dilakukan.

Berbeda dengan dua penelitian sebelumnya, Fahruri et al. (2021) mengembangkan sistem monitoring pada prototype *thermoelectric generator* (TEG) berbasis Internet of Things. Sistem yang dirancang menggunakan sensor arus, sensor tegangan, sensor suhu, serta modul GSM SIM800L sebagai media komunikasi melalui SMS Gateway. Dengan pendekatan tersebut, data hasil pengukuran dapat dikirimkan secara otomatis kepada pengguna tanpa memerlukan koneksi internet berbasis Wi-Fi. Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa konsep IoT tidak hanya dapat diterapkan pada sistem PLTS, tetapi juga pada pembangkit listrik alternatif lainnya. Meskipun demikian, objek penelitian yang digunakan berbeda dengan panel surya sehingga karakteristik sistem serta parameter yang dianalisis tidak sepenuhnya sesuai dengan kebutuhan penelitian ini.

Penelitian yang dilakukan oleh Utami dan Daud (2020) lebih menitikberatkan pada analisis pengaruh temperatur terhadap efisiensi panel surya. Sistem monitoring yang dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32 dengan sensor INA219 untuk mengukur arus dan tegangan serta sensor MLX90614 untuk mengukur temperatur permukaan panel surya. Data hasil pengukuran dikirimkan melalui jaringan internet dan ditampilkan secara real-time menggunakan aplikasi Blynk. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur panel surya berpengaruh terhadap perubahan efisiensi panel sehingga parameter suhu menjadi salah satu aspek penting yang perlu dipantau dalam sistem PLTS. Walaupun demikian, penelitian ini lebih difokuskan pada analisis hubungan temperatur terhadap efisiensi panel dan belum melakukan penghitungan energi listrik yang dihasilkan selama proses pengoperasian.

Selanjutnya, penelitian oleh Sutikno et al. (2023) mengembangkan sistem monitoring tegangan dan arus panel surya menggunakan mikrokontroler

NodeMCU ESP8266 dan sensor INA219. Sensor INA219 dipilih karena mampu mengukur arus dan tegangan secara bersamaan melalui komunikasi I²C dengan tingkat akurasi yang tinggi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki akurasi pengukuran tegangan sebesar 99,17% dan arus sebesar 98,8%. Seluruh data pengukuran juga berhasil ditampilkan secara real-time melalui aplikasi Blynk sehingga mempermudah pengguna dalam melakukan pemantauan kondisi panel surya. Namun demikian, penelitian ini masih terbatas pada pemantauan parameter kelistrikan berupa arus dan tegangan sehingga informasi mengenai temperatur panel, daya, maupun energi listrik belum tersedia.

Berdasarkan kajian terhadap penelitian-penelitian terdahulu tersebut, dapat disimpulkan bahwa sebagian besar penelitian telah berhasil menerapkan teknologi Internet of Things sebagai media monitoring sistem pembangkit listrik tenaga surya secara real-time. Penggunaan mikrokontroler ESP32 maupun ESP8266 yang dipadukan dengan platform Blynk terbukti mampu mempermudah proses pengiriman dan visualisasi data melalui jaringan internet. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada pengukuran arus dan tegangan, sedangkan integrasi parameter suhu panel serta perhitungan daya dan energi listrik masih belum banyak diterapkan dalam satu sistem monitoring yang terintegrasi.

Oleh karena itu, penelitian ini dikembangkan dengan mengintegrasikan sensor INA219 sebagai pengukur arus dan tegangan serta sensor DS18B20 sebagai pengukur suhu panel surya pada mikrokontroler ESP32. Selain menampilkan data secara real-time melalui aplikasi Blynk, sistem juga menghitung daya dan energi listrik berdasarkan hasil pembacaan sensor sehingga informasi yang diperoleh menjadi lebih lengkap. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan mampu memberikan sistem monitoring yang tidak hanya menampilkan kondisi kelistrikan panel surya, tetapi juga memberikan informasi mengenai kondisi termal dan performa energi secara menyeluruh sebagai dasar evaluasi kinerja sistem PLTS.