

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Tinjauan pustaka digunakan untuk menelaah berbagai penelitian terdahulu yang memiliki keterkaitan dengan topik yang diteliti. Kajian ini berfungsi untuk memahami perkembangan teknologi yang telah ada, metode yang telah diterapkan, serta mengidentifikasi celah penelitian (*research gap*) yang dapat dijadikan dasar dalam pengembangan penelitian selanjutnya. Pada penelitian ini, tinjauan pustaka difokuskan pada sistem *monitoring* suhu panel listrik berbasis IoT, penggunaan sensor MLX90614, serta komunikasi data MQTT.

Penelitian oleh M. Dwi Albianto (2021) pada Repositori Politeknik Negeri Sriwijaya dengan judul “Rancang Bangun Sistem *Monitoring* Suhu pada Busbar PHB-TR Berbasis *Internet of Things* (IoT)”, mengembangkan sistem pemantauan suhu busbar PHB-TR menggunakan sensor inframerah MLX90614 dan mikrokontroler Arduino Uno. Sistem berfungsi memberikan notifikasi peringatan melalui aplikasi Blynk apabila suhu busbar melampaui ambang batas 50°C guna mencegah kerusakan isolasi akibat panas berlebih. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu mengirimkan data suhu secara *real-time*, namun mekanisme proteksinya masih terbatas pada peringatan dini tanpa tindakan pemutusan arus otomatis [2]. Penulis mengembangkan sistem proteksi aktif yang mengintegrasikan pemutusan beban otomatis menggunakan kontaktor magnetik serta penerapan logika *safety interlock*, yang serupa dengan saran pengembangan penelitiannya.

Penelitian berikutnya oleh Relif Hagler Sentosa Marbun dan Sukardi (2024) pada Jurnal Amplifier dengan judul “Sistem Peringatan Kerusakan Panel Listrik Berbasis *Internet of Things* dan *Mobile App*” mengembangkan alat peringatan dini untuk panel kontrol motor induksi (DoL) dengan memanfaatkan sensor DHT-11, MQ-6, dan *Flame Sensor* berbasis ESP32 dan Firebase. Pada bagian hasil pengujian menunjukkan keberhasilan sistem sebesar 97% dalam mendeteksi anomali suhu ruang (>35°C), asap, dan api, serta mematikan motor secara otomatis dan mengirimkan notifikasi alarm [3]. *Research Gap* penelitian ini adalah penggunaan

sensor DHT-11 yang hanya mengukur suhu udara panel, sedangkan penulis menggunakan sensor MLX90614 untuk mendeteksi titik panas spesifik pada terminal kabel PHB-TR secara non-kontak. Selain itu, penulis menambahkan fitur *safety interlock* sebagai pengunci keamanan sistem yang tidak dibahas dalam penelitian tersebut.

Penelitian lainnya dilakukan oleh Tandini Ulfa Urbach dan Wildian (2019) pada Jurnal Fisika Universitas Andalas dengan judul “Rancang Bangun Sistem *Monitoring* dan Kontrol Temperatur Pemanasan Zat Cair Menggunakan Sensor Inframerah MLX90614”, penelitian ini mengimplementasikan sensor MLX90614 dan Arduino Uno untuk memantau serta mengontrol suhu pemanas zat cair secara non-kontak. Hasil penelitian menunjukkan tingkat akurasi pengukuran mencapai 99,24%, serta mengungkap pentingnya penggunaan tabung pelindung sensor dan pengaturan jarak pengukuran yang sesuai untuk meminimalkan kesalahan pembacaan [4]. *Research Gap* penelitian ini terletak pada objek dan fungsionalitas sistem, di mana penelitian tersebut berfokus pada zat cair dengan kendali lokal, sementara penulis menerapkannya pada titik sambungan PHB-TR dengan integrasi IoT.

Dalam penelitian oleh Aryanto, dkk (2026) pada Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika Politeknik Negeri Lampung dengan judul “Implementasi Protokol MQTT pada Sistem *Monitoring Smart Greenhouse* Berbasis *Internet of Things* untuk Tanaman *Superfood*” protokol MQTT dimanfaatkan sebagai media komunikasi pada sistem *monitoring* berbasis ESP32 untuk mengirimkan data sensor secara *real-time* melalui metode *publish-subscribe*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa MQTT mampu menyediakan komunikasi data yang ringan, cepat, dan stabil untuk sistem IoT [5]. Perbedaan dengan penelitian yang penulis lakukan terletak pada objek dan fungsi sistem, di mana penelitian ini difokuskan pada deteksi dini titik panas pada PHB-TR menggunakan sensor MLX90614 yang dilengkapi proteksi otomatis, *safety interlock*, serta notifikasi Telegram berbasis IoT.

Berdasarkan pada literatur penelitian sebelumnya, dapat diketahui bahwa sebagian besar penelitian masih berfokus pada sistem *monitoring* berbasis IoT dan komunikasi data menggunakan protokol MQTT tanpa dilengkapi mekanisme proteksi aktif pada sistem kelistrikan. Selain itu, penerapan sistem deteksi dini titik panas pada PHB-TR yang terintegrasi dengan proteksi otomatis dan logika *safety interlock* masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan rancang bangun sistem deteksi dini titik panas pada terminal kabel PHB-TR menggunakan sensor inframerah MLX90614 berbasis IoT yang terintegrasi dengan web *monitoring* melalui protokol MQTT, notifikasi Telegram, serta sistem proteksi otomatis menggunakan kontaktor magnetik dan logika *safety interlock*. Sistem yang dirancang diharapkan mampu meningkatkan keandalan dan keselamatan instalasi listrik melalui pemantauan suhu dan respon proteksi secara *real-time*.

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Perangkat Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR)

Perangkat Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR) seperti pada Gambar 2.1 merupakan salah satu komponen vital dalam sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi sebagai titik pusat penerimaan daya dari transformator distribusi untuk kemudian dibagikan ke berbagai kelompok beban atau pelanggan. Menurut standar kelistrikan, PHB-TR tidak hanya berfungsi sebagai media pembagi arus, tetapi juga sebagai wadah pengaman, pengontrol, dan penyekat rangkaian listrik. Dalam sistem gardu distribusi, PHB-TR dipasang pada sisi sekunder transformator dan berperan sebagai titik sentral pemisahan arus listrik sebelum ke Jaringan Tegangan Rendah [6].



Gambar 2.1 Perangkat Hubung Bagi tegangan Rendah

Pemasangan PHB-TR pada sisi sekunder transformator memungkinkan petugas teknis untuk melakukan pemantauan beban melalui instrumen ukur yang terpasang, serta melakukan pemutusan arus secara manual maupun otomatis apabila terjadi keadaan darurat atau diperlukan pemeliharaan rutin pada jaringan distribusi [7]. Secara fisik PHB-TR berupa sebuah panel atau lemari yang di dalamnya terintegrasi berbagai peralatan, berikut komponen utama yang terdapat pada PHB-TR.

### 2.2.1.1 Saklar Utama



Gambar 2.2 Saklar Utama

Saklar utama (*Main Switch*) yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 merupakan perangkat mekanis yang berfungsi sebagai pemutus dan penghubung arus utama dari sisi sekunder transformator ke seluruh sistem busbar di dalam panel. Dalam PHB-TR, saklar ini biasanya berupa *Load Break Switch (LBS)* atau *Molded Case Circuit Breaker (MCCB)* dengan kapasitas arus yang besar. Fungsi utamanya adalah untuk memutus aliran listrik secara total pada saat terjadi pemeliharaan darurat atau gangguan besar, sehingga memberikan perlindungan menyeluruh bagi peralatan dan personel yang bekerja di sekitar panel.

### 2.2.1.2 Rel Tembaga (Busbar)



Gambar 2.3 Rel Tembaga

Rel tembaga atau *busbar* adalah batangan logam konduktif seperti pada Gambar 2.3, biasanya terbuat dari tembaga murni, yang berfungsi sebagai titik terminal bersama untuk mendistribusikan energi listrik ke berbagai jurusan. *Busbar* dipilih karena memiliki konduktivitas tinggi dan mampu memfasilitasi koneksi banyak kabel dalam satu jalur fasa (R, S, T) maupun Netral. Dimensi dan ketebalan *busbar* harus disesuaikan dengan kapasitas arus maksimal yang mengalir guna mencegah panas berlebih akibat rugi-rugi daya pada konduktor tersebut.

### 2.2.1.3 Unit Masukan (Incoming)



Gambar 2.4 Unit Masukan (*Incoming*) PHB-TR

Gambar 2.4 merupakan unit masukan (*Incoming*) yang di mana bagian dari PHB-TR yang menerima kabel daya langsung dari sisi sekunder transformator distribusi. Unit ini adalah gerbang pertama energi listrik masuk ke dalam panel sebelum didistribusikan. Pada bagian ini, aspek kekencangan sambungan skun kabel menjadi sangat krusial, karena seluruh beban arus dari trafo akan melewati titik ini. Kegagalan pada unit *incoming* dapat menyebabkan kegagalan distribusi pada seluruh jurusan di bawahnya.

#### 2.2.1.4 Unit Keluaran (*Outgoing*)



Gambar 2.5 Unit Keluaran (*Outgoing*) PHB-TR

Unit keluaran (*Outgoing*) atau sering disebut sebagai unit jurusan seperti pada Gambar 2.5 adalah bagian yang menyalurkan tenaga listrik dari busbar menuju Jaringan Tegangan Rendah (JTR) atau langsung ke beban pelanggan. Sebuah PHB-TR biasanya memiliki beberapa unit keluaran (misalnya 2 hingga 4 jurusan) yang masing-masing dilindungi oleh sistem pengaman tersendiri. Hal ini bertujuan agar gangguan yang terjadi pada satu jalur distribusi tidak akan memengaruhi kelangsungan aliran listrik pada jalur lainnya.

#### 2.2.1.5 Pengaman Lebur



Gambar 2.6 NH Fuse dan Holder Fuse

Gambar 2.6 merupakan pengaman lebur, atau yang dikenal dengan istilah *NH Fuse* atau *NT Fuse*, adalah komponen proteksi arus lebih yang bekerja berdasarkan efek termal. Komponen ini terdiri dari elemen logam yang dirancang untuk meleleh dan memutus rangkaian jika arus yang melewatinya melebihi nilai nominal yang ditetapkan dalam jangka waktu tertentu. Pengaman lebur dipasang pada setiap fasa di unit keluaran untuk melindungi transformator dari dampak arus hubung singkat dan beban lebih yang terjadi di sisi pelanggan.

### 2.2.2 Konsep *Overheating* pada Sambungan Terminal PHB-TR

*Overheating* pada sambungan terminal PHB-TR (Perangkat Hubung Bagi Tegangan Rendah) merupakan kondisi meningkatnya temperatur pada titik sambungan penghantar akibat kenaikan resistansi kontak yang tidak normal. Kondisi ini umumnya terjadi pada sambungan kabel, terminal, busbar, maupun kabel skun (*cable lug*) yang mengalami pelonggaran mekanis, oksidasi, korosi, atau penurunan kualitas kontak listrik. *Overheating* menjadi salah satu penyebab utama gangguan pada sistem distribusi tenaga listrik karena dapat mempercepat degradasi isolasi, menurunkan keandalan peralatan, serta meningkatkan risiko kerusakan komponen dan kebakaran panel.

Peningkatan suhu pada sambungan listrik dipengaruhi oleh besarnya arus yang mengalir dan resistansi kontak pada sambungan. Berdasarkan hukum Joule, energi panas yang dihasilkan pada penghantar dirumuskan sebagai:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (1)$$

dengan:

- $Q$  = energi panas (Joule)
- $I$  = arus listrik (Ampere)
- $R$  = resistansi penghantar ( $\Omega$ )
- $t$  = waktu (s)

Berdasarkan Hukum Joule, setiap penghantar yang dialiri arus listrik akan menghasilkan panas yang besarnya dipengaruhi oleh nilai arus, resistansi, dan waktu [8]. Oleh karena itu, kenaikan suhu pada kabel atau penghantar merupakan fenomena yang normal selama masih berada dalam batas operasi yang diizinkan. Namun, *overheating* pada sambungan terminal memiliki karakteristik yang berbeda. kondisi ini tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya arus yang mengalir, tetapi juga oleh peningkatan resistansi kontak pada titik sambungan akibat terminal yang longgar, korosi, oksidasi, atau penurunan kualitas kontak penghantar. Akibatnya, panas terakumulasi pada area yang relatif kecil sehingga membentuk titik panas dengan kenaikan suhu yang lebih tinggi dibandingkan bagian penghantar

lainnya [9]. Dalam beberapa kasus, titik panas dapat terjadi meskipun arus beban masih beada dalam rentang operasi normal.

Berdasarkan SPLN D3.016-1:2018 tentang PHB-TR pasangan luar memiliki batas kenaikan suhu yang masih diperbolehkan terhadap suhu lingkungan sesuai karakteristik dan fungsinya. Batas tersebut digunakan sebagai acuan dalam menjaga keandalan dan keselamatan operasi peralatan [10]. Pada sistem *monitoring* suhu, nilai ambang (*thershold*) digunakan untuk mengklasifikasikan kondisi operasi peralatan berdasarkan tingkat kenaikan suhu yang terdeteksi. Dalam penerapan deteksi dini dan proteksi, nilai ambang umumnya ditetapkan lebih rendah dari batas operasi maksimum sehingga sistem dapat memberikan respon sebelum kondisi *overheating* semakin menjadi gangguan yang lebih serius.

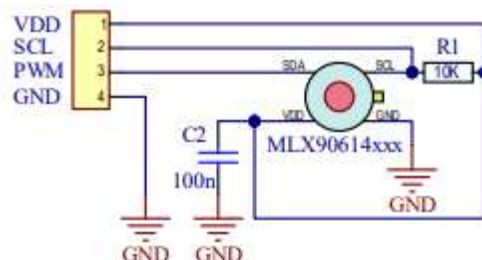
### 2.2.3 Sensor Suhu Inframerah MLX90614



Gambar 2.7 Sensor Suhu Inframerah MLX90614 GY-906 BCC

Sensor MLX90614 yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 merupakan perangkat sensor suhu *thermopile* non-kontak yang dirancang untuk mendeteksi energi inframerah yang dipancarkan oleh suatu objek. Prinsip kerja sensor ini didasarkan pada Hukum Stefan-Boltzmann, di mana setiap benda dengan suhu di atas nol mutlak akan memancarkan radiasi elektromagnetik yang intensitasnya sebanding dengan pangkat empat suhu absolut benda tersebut. Penggunaan teknologi inframerah memungkinkan pengukuran suhu pada titik kritis PHB-TR, seperti baut kabel skun, dilakukan tanpa kontak fisik, sehingga mengeliminasi risiko induksi listrik atau gangguan mekanis pada sistem yang sedang bertegangan.

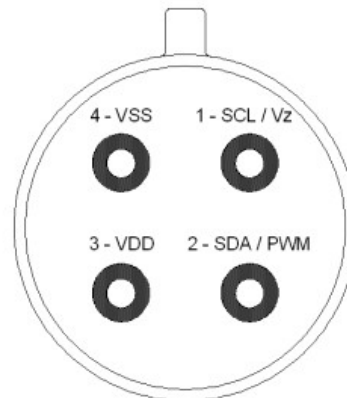
Secara teknis, MLX90614 mengintegrasikan dua chip utama dalam satu kemasan TO-39, yaitu detektor *thermopile* inframerah dan *Application Specific Integrated Circuit* (ASIC) untuk pemrosesan sinyal. ASIC tersebut mencakup ADC 17-bit dengan resolusi tinggi serta unit *Digital Signal Processing* (DSP) yang berfungsi mengonversi data radiasi menjadi nilai suhu linier. Sensor ini memiliki rentang pengukuran suhu objek yang luas, mulai dari  $-70^{\circ}\text{C}$  hingga  $+380^{\circ}\text{C}$ , dengan tingkat akurasi mencapai  $0,5^{\circ}\text{C}$  pada suhu ruangan, yang sangat memadai untuk mendeteksi anomali panas pada komponen panel distribusi. Data suhu yang telah diproses oleh DSP dikeluarkan melalui protokol komunikasi digital dua kawat (I2C) atau *System Management Bus* (SMBus). Karakteristik ini memudahkan integrasi dengan mikrokontroler seperti ESP32, di mana pembacaan suhu objek (*object temperature*) dan suhu lingkungan (*ambient temperature*) dapat diakses melalui alamat register yang spesifik. Dalam perancangan ini, MLX90614 difungsikan sebagai unit sensorik utama untuk memantau titik panas secara real-time guna memberikan data input bagi sistem proteksi otomatis [11].



Gambar 2.8 Skematik Rangkaian Sensor MLX90614

Berdasarkan pada Gambar 2.8 yang menunjukkan skematik rangkaian sensor MLX90614, fitur *Pulse Width Modulation* (PWM) pada sensor MLX90614 dapat dikonfigurasi sebagai relai termal berbasis ambang batas suhu, yang berfungsi sebagai unit kendali sederhana untuk aplikasi thermostat maupun sistem peringatan dini suhu ekstrem. Melalui protokol SMBus, fitur ini berperan sebagai mekanisme interupsi bagi prosesor (ESP32) untuk memicu pemindaian seluruh perangkat *slave* pada jalur bus secara simultan. Hal ini memungkinkan sistem untuk melakukan validasi kondisi riil secara cepat dan responsif saat parameter suhu terdeteksi melampaui batas yang ditetapkan. Sensor MLX90614 memiliki konfigurasi standar

untuk mendeteksi objek dengan nilai emisivitas 1, namun tetap mendukung proses kalibrasi fleksibel pada rentang emisivitas 0,1 hingga 1. Perangkat ini dapat beroperasi secara optimal menggunakan dua pilihan sumber tegangan, yaitu 5V atau baterai 3,3V [11]. Detail mengenai konfigurasi pinout dan deskripsi teknis masing-masing pin dapat dirujuk pada Gambar 2.9 dan Tabel 2-1 berikut:



Gambar 2.9 Pin Sensor MLX90614

Tabel 2-1 Fungsi Pin pada Sensor MLX90614

Pin	Fungsi
VSS	Ground
SCL / Vz	<i>Input clock serial</i> untuk protokol 2 komunikasi kabel
SDA / PWM	Digital <i>input</i> atau <i>output</i>
VDD	Sumber tegangan eksternal

#### 2.2.4 Sistem *Multiplexing* Data I2C (Multiplexer TCA9548A)

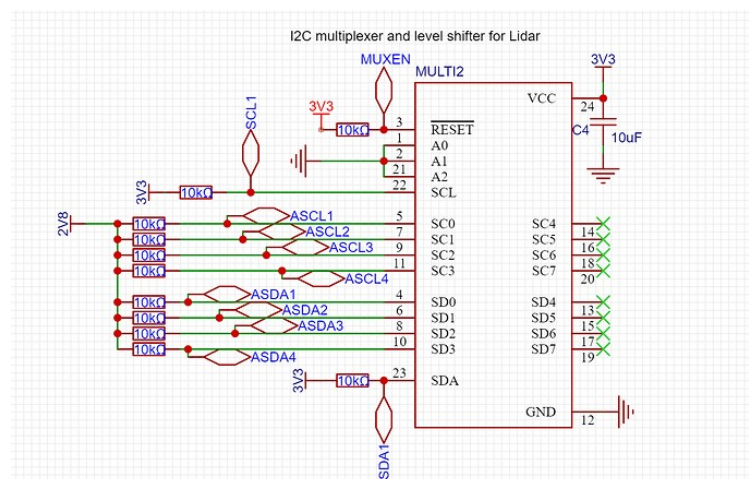
Sistem *multiplexing* data merupakan suatu teknik yang digunakan untuk menggabungkan beberapa sinyal input ke dalam satu jalur transmisi tunggal, sehingga pengiriman data menjadi lebih efisien. Dalam arsitektur mikrokontroler, komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C) pada dasarnya mendukung topologi banyak perangkat (*multi-slave*) pada satu bus data (SDA) dan bus *clock* (SCL) yang sama. Kendali ini dilakukan berdasarkan alamat unik (*address*) yang dimiliki oleh masing-masing perangkat keras. Namun, permasalahan teknis akan muncul apabila sistem menggunakan beberapa perangkat *slave* dengan tipe yang identik, seperti tiga buah sensor MLX90614 yang memiliki alamat bawaan pabrik yang sama, yaitu

0x5A. Jika ketiga sensor tersebut dihubungkan secara paralel pada satu bus I2C tanpa intervensi, akan terjadi tabrakan data (*data collision*) yang menyebabkan mikrokontroler tidak dapat membedakan sumber data dari masing-masing fasa listrik.



Gambar 2.10 Modul Multiplexer I2C TCA9548A

Untuk mengatasi batasan tersebut, sistem *multiplexing* diimplementasikan menggunakan modul TCA9548A seperti pada Gambar 2.10. TCA9548A adalah sebuah sakelar (*switch*) translasi dua arah 8-saluran yang dikendalikan melalui bus I2C. Modul ini bertindak sebagai "gerbang lalu lintas" yang menghubungkan satu bus I2C utama (*master*) dari mikrokontroler menuju maksimal delapan bus I2C turunan (*sub-branches*). Modul ini memiliki alamat I2C mandiri, sehingga mikrokontroler dapat memberikan perintah spesifik ke TCA9548A untuk membuka salah satu saluran (misalnya saluran SD0/SC0) dan menutup saluran lainnya [12].



Gambar 2.11 Skematik Rangkaian Multiplexer TCA9548A

Implementasi skematik Multiplexer TCA9548A seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11 berfungsi sebagai solusi untuk mengatasi keterbatasan alamat

I2C yang sama pada sensor MLX90614 dengan memanfaatkan konfigurasi pin pengalamatan fisik A0-A2 yang dihubungkan ke *ground* guna menetapkan alamat dasar pada 0x70. Pada jalur bus utama (*Master*), pin SCL dan SDA dilengkapi dengan resistor *pull-up* 10k  $\Omega$  untuk menjaga kestabilan logika sinyal saat berkomunikasi dengan ESP32, sementara pin RESET diposisikan *active-high* agar perangkat tetap beroperasi secara kontinu. Keunggulan utama dari konfigurasi ini terletak pada kemampuannya melakukan *voltage level shifting*, di mana jalur cabang (SCn/SDn) dapat ditarik ke level tegangan yang berbeda (seperti 2,8V atau 3,V) sesuai dengan spesifikasi sensor yang digunakan. Secara sistematis, skematik ini memungkinkan mikrokontroler untuk melakukan pemindaian data secara bergantian pada setiap saluran sensor tanpa risiko bentrok data, sehingga integritas pembacaan suhu pada masing-masing fasa tetap terjaga.

### 2.2.5 *Internet of Things*

*Internet of Things* (IoT) merupakan konsep komunikasi antarperangkat fisik yang saling terhubung melalui jaringan internet untuk melakukan pertukaran data secara otomatis dan *real-time*. Konektivitas ini memungkinkan perangkat untuk melakukan akuisisi data, pertukaran informasi, serta pengendalian jarak jauh secara bersamaan. Dalam proses ini, menggunakan infrastruktur nirkabel seperti Wi-Fi, operasional IoT mengandalkan algoritma cerdas untuk memfasilitasi komunikasi *Machine-to-Machine* (M2M) dan eksekusi fungsi otomatis tanpa intervensi manusia kontinu.

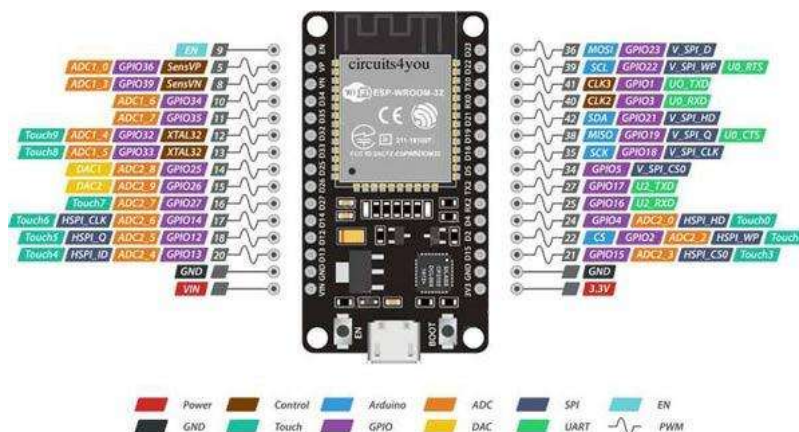
Secara struktural, ekosistem IoT terdiri dari empat lapisan utama, yaitu lapisan persepsi (sensor), lapisan jaringan (konektivitas), lapisan pemrosesan, dan lapisan aplikasi (antarmuka pengguna). Dalam penelitian ini, sensor inframerah MLX90614 digunakan untuk mendeteksi suhu pada terminal PHB-TR, kemudian data diproses oleh *Espressif Systems* ESP32 dan dikirim melalui jaringan WiFi menggunakan protokol MQTT menuju web *monitoring*. Pada sistem yang dirancang, teknologi IoT digunakan untuk *monitoring* suhu pada terminal PHB-TR secara *real-time* melalui web *monitoring*. Sistem juga dilengkapi fitur notifikasi dan

proteksi otomatis saat suhu melebihi *threshold* yang ditentukan, sehingga dapat membantu deteksi dini *overheating* dan meminimalisasi potensi gangguan.

### 2.2.6 Mikrokontroler ESP32

ESP32 adalah mikrokontroler berbasis *System on a Chip* (SoC) berkinerja tinggi yang dikembangkan oleh *Espressif Systems*. Perangkat ini menggunakan prosesor *dual-core* Tensilica Xtensa LX6 dengan kecepatan *clock* yang dapat diatur hingga 240 MHz. Keunggulan utama ESP32 terletak pada integrasi modul komunikasi nirkabel Wi-Fi (802.11 b/g/n) dan Bluetooth dalam satu chip [13].

Selain memiliki kemampuan komunikasi nirkabel, ESP32 juga menyediakan berbagai antarmuka komunikasi dan pin *input/output* yang mendukung integrasi dengan sensor maupun aktuator. Beberapa antarmuka yang tersedia meliputi GPIO (*General Purpose Input Output*), ADC (*Analog to Digital Converter*), UART (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*), SPI (*Serial Peripheral Interface*), dan I2C (*Inter-Integrated Circuit*). Ketersediaan berbagai antarmuka tersebut memberikan fleksibilitas tinggi dalam pengembangan sistem elektronika dan IoT. Gambar 2.12 dan tabel 2-2 menunjukkan *pinout* ESP32 DevKit V1 serta fungsinya yang umum digunakan dalam pengembangan sistem berbasis mikrokontroler.



Gambar 2.12 *Pin Out* Modul ESP32 DevKit V1

Tabel 2-2 Fungsi Umum Pin ESP32 DevKit V1

<b>Kelompok Pin</b>	<b>Fungsi</b>
VIN / 5V	Masukan tegangan dari sumber daya eksternal
3V3	Keluaran tegangan 3,3V untuk mensuplai modul atau sensot
GND	Ground atau referensi tegangan sistem
GPIO	Pin digital yang dapat dikonfigurasi sebagai <i>input</i> atau <i>output</i>
ADC	Pin masukan analog yang digunakan untuk membaca sinyal analog
DAC	Pin keluaran analog untuk menghasilkan sinyal tegangan analog tertentu
UART (TX/RX)	Antarmuka komunikasi serial untuk pemrograman dan pertukaran data
I2C (SDA/SCL)	Antarmuka komunikasi dua kabel yang umum digunakan pada sensor dan modul eksternal
SPI (MOSI, MISO, SCK, CS)	Antarmuka komunikasi serial berkecepatan tinggi untuk berbagai perangkat perifer
EN	Pin <i>enable</i> untuk mengaktifkan atau melakukan reset mikrokontroler

Dalam penelitian ini, ESP32 digunakan sebagai pusat pengendali sistem yang mampu bertugas mengolah data suhu dari sensor, menjalankan logika proteksi, mengendalikan aktuator, serta mengirimkan data *monitoring* melalui jaringan internet.

### 2.2.7 Protokol Komunikasi MQTT

MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) merupakan protokol komunikasi data ringan yang dirancang untuk mendukung pertukaran data antar perangkat pada sistem *Internet of Things* (IoT). Protokol ini bekerja menggunakan arsitektur *publish-subscribe* dan berjalan di atas protokol TC/IP. MQTT dikembangkan untuk komunikasi data pada perangkat dengan sumber daya

terbatas, penggunaan *bandwith* rendah, serta kondisi jaringan yang tidak selalu stabil [14].

Pada MQTT, proses komunikasi data tidak dilakukan secara langsung antar perangkat, melainkan melalui sebuah server perantara yang disebut *broker*. *Broker* berfungsi menerima, mengelola, dan mendistribusikan data dari perangkat pengirim (*publisher*) ke perangkat penerima (*subscriber*) sesuai dengan *topic* yang digunakan. Dengan metode ini, setiap perangkat tidak perlu saling mengetahui alamat satu sama lain karena seluruh komunikasi dipusatkan melalui *broker*.

Terdapat beberapa komponen utama dalam protokol MQTT, yaitu *broker*, *publisher*, *subscriber*, dan *topic*. *Broker* merupakan pusat komunikasi data yang bertugas mengatur proses distribusi pesan. *Publisher* adalah perangkat yang mengirimkan data ke *broker*, sedangkan *subscriber* merupakan perangkat yang menerima data dari *broker*. Data yang dikirimkan dikelompokkan berdasarkan *topic*, yaitu alamat atau jalur komunikasi tertentu yang digunakan untuk membedakan jenis data pada sistem [15]. Cara kerja MQTT dimulai ketika perangkat *publisher* terhubung ke *broker* melalui jaringan internet. Setelah kondisi berhasil dilakukan, *publisher* akan mengirimkan data ke *broker* menggunakan *topic* tertentu. *Broker* kemudian meneruskan data tersebut kepada seluruh *subscriber* yang telah berlangganan (*subscribe*) pada *topic* yang sama. Proses komunikasi ini berlangsung secara *real-time* sehingga data dapat diterima dengan cepat oleh perangkat *monitoring*.

Pada penelitian ini, ESP32 berfungsi sebagai *publisher* yang mengirimkan data suhu sensor MLX90614 ke *broker* MQTT, sedangkan web *monitoring* bertindak sebagai *subscriber* yang menerima dan menampilkan data suhu secara *real-time*. Selain untuk *monitoring*, MQTT juga digunakan untuk menerima perintah reset sistem proteksi dari web menuju ESP32 melalui *topic* tertentu. Pada penelitian ini, data MQTT dikirim menggunakan format JSON (*JavaScript Object Notation*) karena ringan dan mudah diproses. Data yang dikirim meliputi nilai suhu tiap fasa, status sistem, dan waktu pembacaan sensor.

### 2.2.8 Telegram Bot

Telegram merupakan platform komunikasi digital berbasis *cloud* yang dirancang untuk mendukung pengiriman dan penerimaan pesan secara efisien, aman, serta kompatibel dengan berbagai sistem operasi dan perangkat. Telegram mendukung fitur Bot API, yaitu antarmuka pemrograman aplikasi yang memungkinkan suatu sistem eksternal untuk berinteraksi secara otomatis dengan pengguna melalui pengiriman pesan, perintah, maupun notifikasi berbasis internet. Telegram Bot dapat dibuat menggunakan layanan BotFather yang berfungsi untuk menghasilkan token autentikasi sebagai identitas unik bot, sehingga dapat digunakan oleh perangkat seperti ESP32 dalam mengakses layanan Telegram melalui protokol HTTP atau HTTPS [16].

Penggunaan Telegram Bot dipilih karena kemudahan integrasi, kecepatan pengiriman pesan, serta tidak memerlukan pengembangan aplikasi tambahan. Dalam arsitektur sistem, Telegram berperan sebagai media komunikasi tambahan yang bersifat non-kritis, sehingga tidak memengaruhi kinerja utama sistem proteksi yang tetap berjalan secara lokal pada perangkat.

### 2.2.9 Kontaktor Magnetik



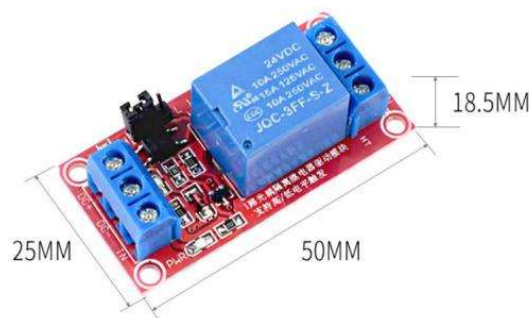
Gambar 2.13 Kontaktor Magnetik

Gambar 2.13 merupakan kontaktor magnetik yang digunakan sebagai perangkat sakelar elektromekanis dengan bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik untuk menghubungkan atau memutuskan arus listrik pada beban daya besar secara *remote*. Komponen ini terdiri dari koil, inti besi, dan kontak utama yang akan tertutup (*Close*) saat koil dialiri arus listrik, sehingga menciptakan medan magnet yang menarik jangkar besi ke arah inti. Secara spesifik, kontaktor yang

digunakan dalam sistem ini dipilih berdasarkan spesifikasi tegangan koil (220V AC), kapasitas arus maksimum (*Current Rating*) yang disesuaikan dengan beban (25 A), daya motor sebesar 11 kW, serta jumlah kontak utama (*Main Contacts*) untuk memutus ketiga fasa (R, S, T) secara simultan. Selain itu, perangkat ini memiliki kontak bantu (*Auxiliary Contacts*) bertipe *Normally Open* (NO) atau *Normally Closed* (NC) yang dapat diintegrasikan sebagai sinyal umpan balik (*feedback*) ke mikrokontroler.

Mekanisme kerja ini memastikan bahwa aliran listrik ke beban hanya akan terhubung jika koil bertegangan, sehingga apabila sistem proteksi mendeteksi anomali suhu, ESP32 dapat menginterupsi suplai pada koil yang secara mekanis akan memutus kontak utama dan mengamankan seluruh instalasi dari risiko kerusakan lebih lanjut. Integrasi kontaktor dengan konsep *safety interlock* memungkinkan pemutusan arus ke beban secara instan saat sensor MLX90614 mendeteksi suhu kritis guna mencegah kerusakan isolasi atau kebakaran akibat *hotspot*. Penggunaan kontaktor sebagai pemutus utama memberikan ketahanan fisik yang memadai untuk memadamkan busur api pada arus beban tinggi, sehingga menjamin keandalan sistem proteksi otomatis yang dirancang.

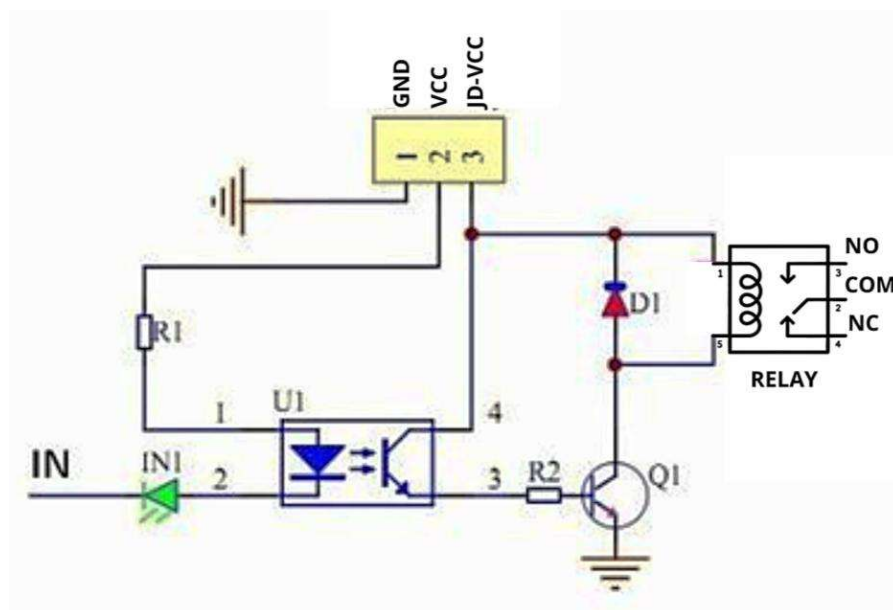
### 2.2.10 Modul *Relay* Berbasis Optocoupler



Gambar 2.14 Modul Optocoupler *Relay* 5V

Modul *relay* berbasis optocoupler seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.14 merupakan rangkaian antarmuka yang digunakan untuk menghubungkan mikrokontroler dengan beban atau perangkat yang membutuhkan arus dan tegangan lebih besar. Modul ini menggabungkan fungsi *relay* sebagai saklar elektromagnetik dan optocoupler sebagai isolator listrik sehingga dapat meningkatkan keamanan serta keandalan sistem kendali.

Optocoupler adalah komponen elektronik yang terdiri dari LED inframerah dan fototransistor yang ditempatkan dalam satu kemasan. Ketika sinyal logika diberikan pada sisi input, LED inframerah akan menyala dan menghasilkan cahaya yang diterima oleh fototransistor pada sisi *output*. Proses transfer sinyal dilakukan melalui cahaya sehingga tidak terdapat hubungan listrik secara langsung antara rangkaian kendali dan rangkaian daya. Mekanisme ini memungkinkan mikrokontroler terlindungi dari gangguan listrik seperti lonjakan tegangan (*voltage spike*), arus balik, maupun gangguan elektromagnetik yang berasal dari beban.



Gambar 2.15 Rangkaian Modul *Relay* Berbasis Optocoupler

Berdasarkan pada Gambar 2.15 merupakan rangkaian modul *relay* berbasis optocoupler dengan menerapkan konfigurasi *active low*, yaitu *relay* akan aktif ketika pin *input* menerima logika LOW (0) dan tidak aktif ketika menerima logika HIGH (1). Konfigurasi *active low* banyak digunakan pada modul *relay* berbasis optocoupler karena mampu meningkatkan kestabilan sistem saat proses inialisasi mikrokontroler. Modul *relay* terdiri atas optocoupler PC817 sebagai isolasi antara rangkaian kendali dan rangkaian daya, transistor driver sebagai penguat arus dan saklar elektronik, kumparan *relay* sebagai aktuator elektromagnetik, serta dioda flyback sebagai proteksi terhadap tegangan induksi balik yang dihasilkan oleh kumparan *relay*.

Pada kondisi *input* bernilai HIGH (1), pin *input* berada pada tegangan mendekati tegangan sumber sehingga tidak terdapat beda potensial yang cukup untuk mengalirkan arus melalui LED internal optocoupler PC817. Akibatnya LED internal optocoupler berada dalam kondisi mati dan tidak menghasilkan cahaya inframerah. Tidak ada cahaya yang diterima oleh *phototransistor* pada sisi *output* optocoupler sehingga *phototransistor* tetap berada pada kondisi OFF dan tidak dapat menghantarkan arus menuju basis transistor driver. Kondisi ini menyebabkan transistor berada pada keadaan *cut-off*, yaitu kondisi ketika jalur antara kolektor dan emitter tidak terhubung. Akibatnya arus tidak dapat mengalir melalui kumparan *relay* sehingga tidak terbentuk medan magnet pada *relay*. Dengan demikian kontak *relay* tetap berada pada posisi normal dan *relay* dalam kondisi OFF,

Sebaliknya, ketika pin *input* diberikan logika LOW (0), pin mikrokontroler akan terhubung ke ground sehingga terdapat beda potensial yang kemudian terbentuk jalur arus dari sumber tegangan menuju LED internal optocoupler. Arus mengalir dari VCC melalui resistor R1, melewati LED internal PC817, menuju pin *input* yang bernilai LOW, kemudian kembali ke ground. Aliran arus tersebut menyebabkan LED internal optocoupler menyala dan memancarkan cahaya inframerah. Cahaya yang dihasilkan mengenai material semikonduktor pada *phototransistor* sehingga *phototransistor* berubah dari kondisi OFF menjadi ON.

Ketika *phototransistor* aktif, arus akan mengalir menuju basis transistor driver melalui resistor basis. Arus basis ini menyebabkan transistor masuk ke kondisi saturasi menjadikan jalur kolektor dan emitter terhubung, sehingga transistor bekerja seperti saklar tertutup. Akibatnya arus dapat mengalir pada kumparan relay yang di mana menghasilkan medan magnet yang menarik armature sehingga kontak common (COM) berpindah dari terminal Normally Closed (NC) menuju terminal Normally Open (NO). Perpindahan kontak ini menyebabkan kondisi keluaran relay berubah sesuai logika pengendalian yang dirancang. Perpindahan kontak tersebut menandakan *relay* telah aktif. Penggunaan optocoupler memungkinkan sinyal kendali diteruskan melalui cahaya tanpa hubungan listrik langsung antara ESP32 dan rangkaian *relay*, sehingga mikrokontroler lebih terlindungi dari gangguan listrik pada sisi beban. Selain itu,

dioda flyback berfungsi meredam tegangan induksi balik yang muncul saat *relay* dinonaktifkan sehingga transistor dan komponen lainnya tetap aman.

### 2.2.11 Catu Daya (*Power Supply*)

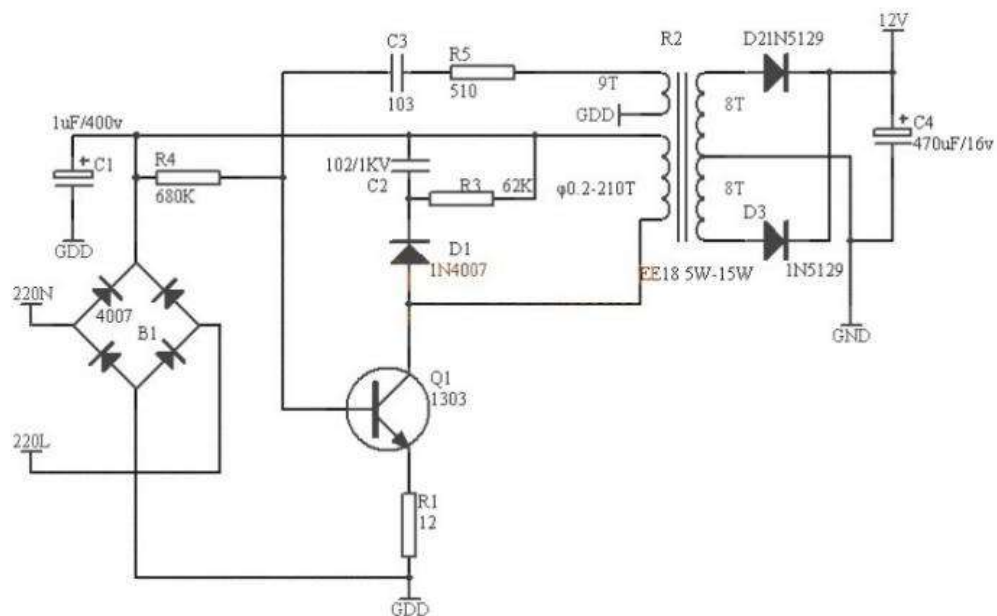


Gambar 2.16 Catu Daya

Catu daya (*power supply*) seperti pada Gambar 2.16 merupakan perangkat elektronika daya yang berfungsi mengubah energi listrik dari sumber utama menjadi tegangan dan arus yang sesuai dengan kebutuhan sistem elektronika. Pada sistem kelistrikan dan instrumentasi, catu daya digunakan untuk menyediakan suplai tegangan DC yang stabil agar perangkat kontrol, sensor, maupun aktuator dapat bekerja dengan baik. Secara umum, catu daya dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu catu daya linear, dan SMPS (*Switching Mode Power Supply*). Pada penelitian ini digunakan catu daya jenis *Switching Mode Power Supply* (SMPS) dengan tegangan keluaran 12V DC karena memiliki efisiensi tinggi, disipasi panas rendah, serta mampu menghasilkan tegangan keluaran yang stabil.

Prinsip kerja *Switching Mode Power Supply* (SMPS) dilakukan dengan mengubah tegangan AC menjadi DC melalui proses *switching* frekuensi tinggi. Tegangan masukan 220 V AC 50 Hz terlebih dahulu disearahkan oleh diode bridge menjadi tegangan DC, kemudian diratakan oleh kapasitor filter untuk mengurangi ripple. Tegangan DC tersebut selanjutnya dikendalikan oleh transistor daya yang bekerja sebagai saklar elektronik dengan frekuensi tinggi dalam orde kilohertz (kHz). Proses *switching* ini menghasilkan sinyal pulsa yang diteruskan ke transformator ferrite sehingga tegangan dapat diturunkan secara efisien. Pada sisi sekunder transformator, tegangan kembali disearahkan dan difilter untuk

menghasilkan tegangan keluaran DC yang stabil sesuai kebutuhan beban, yaitu sebesar 12 V DC.



Gambar 2.17 Rangkaian *Power Supply Switching*

Berdasarkan rangkaian skematik *power supply switching* pada Gambar 2.17, diode bridge B1 berfungsi menyearahkan tegangan AC menjadi DC, sedangkan kapasitor C1 berfungsi menghaluskan tegangan hasil penyearahan dengan mengurangi ripple. Transistor Q1 tipe 13003 bekerja sebagai saklar frekuensi tinggi yang mengatur proses transfer energi ke transformator ferrite. Penggunaan frekuensi tinggi memungkinkan ukuran transformator menjadi lebih kecil dibandingkan transformator konvensional. Pada sisi sekunder, dioda D2 dan D3 berfungsi menyearahkan tegangan keluaran transformator, sedangkan kapasitor C4 digunakan sebagai filter akhir untuk meredam ripple sehingga diperoleh tegangan keluaran 12 V DC yang lebih stabil dan dapat digunakan untuk mensuplai rangkaian elektronik.

Dalam implementasinya, catu daya 12V DC digunakan sebagai sumber utama sistem kontrol dan aktuator. Tegangan keluaran kemudian diturunkan kembali menjadi 5V DC menggunakan buck converter untuk menyuplai ESP32, modul *relay*, LCD, sensor dan perangkat pendukung lainnya.