

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Gardu Distribusi

Pengertian umum Gardu Distribusi tenaga listrik yang paling dikenal adalah suatu bangunan gardu listrik berisi atau terdiri dari instalasi Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Menengah (PHB-TM), Transformator Distribusi (TD) dan Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR) untuk memasok kebutuhan tenaga listrik bagi para pelanggan baik dengan Tegangan Menengah (TM 20 kV) maupun Tegangan Rendah (TR 220/380V). Konstruksi Gardu distribusi dirancang berdasarkan optimalisasi biaya terhadap maksud dan tujuan penggunaannya yang kadang kala harus disesuaikan dengan peraturan Pemda setempat (Standar Konstruksi PLN, 2010)



Gambar 2. 1 Gardu Distribusi

Secara garis besar gardu distribusi dibedakan atas :

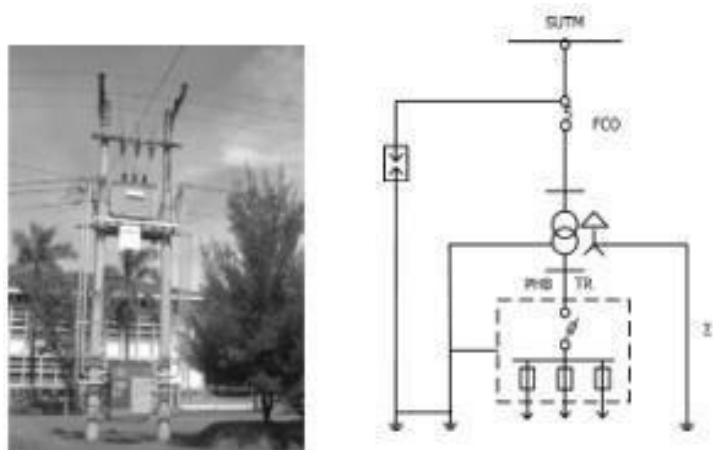
- a. Jenis pemasangannya :
 - a) Gardu pasangan luar : Gardu Portal, Gardu Cantol
 - b) Gardu pasangan dalam : Gardu Beton, Gardu Kios
- b. Jenis Konstruksinya :
 - a) Gardu Beton (bangunan sipil : batu, beton)
 - b) Gardu Tiang : Gardu Portal dan Gardu Cantol
 - c) Gardu Kios
- c. Jenis Penggunaannya :
 - a) Gardu Pelanggan Umum
 - b) Gardu Pelanggan Khusus

2.1.1.1 Gardu tiang

Menggunakan Tiang : beton, besi kayu

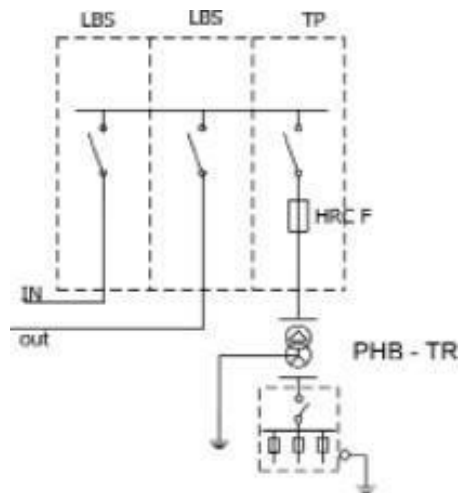
1. Gardu Portal

Umumnya konfigurasi Gardu Tiang yang dicatu dari SUTM adalah T section dengan peralatan pengaman Pengaman Lebur *Cut-Out (FCO)* sebagai pengaman hubung singkat transformator dengan elemen pelebur (*pengaman lebur link type expulsion*) dan *Lightning Arrester (LA)* sebagai sarana pencegah naiknya tegangan pada transformator akibat surja petir (Standar Konstruksi PLN, 2010).



Gambar 2. 2 Gardu Portal dan Bagan satu Garis

Untuk Gardu Tiang pada sistem jaringan lingkaran terbuka (*open-loop*), seperti pada sistem distribusi dengan saluran kabel bawah tanah, konfigurasi peralatan adalah π section dimana transformator distribusi dapat di catu dari arah berbeda yaitu posisi *Incoming – Outgoing* atau dapat sebaliknya (Standar Konstruksi PLN, 2010).



Gambar 2. 3 Bagan satu garis konfigurasi π section Gardu portal

Guna mengatasi faktor keterbatasan ruang pada Gardu Portal, maka digunakan konfigurasi switching/proteksi yang sudah terakit ringkas sebagai RMU (*Ring Main Unit*). Peralatan switching incoming-outgoing berupa Pemutus Beban atau LBS (*Load Break Switch*) atau Pemutus Beban Otomatis (PBO) atau CB (*Circuit Breaker*) yang bekerja secara manual (atau digerakkan dengan remote control).

Fault Indicator (dalam hal ini PMFD : *Pole Mounted Fault Detector*) perlu dipasang pada section jaringan dan percabangan untuk memudahkan pencarian titik gangguan, sehingga jaringan yang tidak mengalami gangguan dapat dipulihkan lebih cepat (Standar Konstruksi PLN, 2010).

2. Gardu Cantol

Pada Gardu Distribusi tipe cantol, transformator yang terpasang adalah transformator dengan daya ≤ 100 kVA Fase 3 atau Fase 1 (PLN, 2010).

Transformator terpasang adalah jenis CSP (*Completely Self Protected Transformer*) yaitu peralatan switching dan proteksinya sudah terpasang lengkap dalam tangki transformator (Standar Konstruksi PLN, 2010).



Gambar 2. 4 Gambar Gardu tipe Cantol

Perlengkapan perlindungan transformator tambahan LA (*Lightning Arrester*) dipasang terpisah dengan Penghantar pembumiannya yang dihubungkan langsung dengan badan transformator. Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR) maksimum 2 jurusan dengan saklar pemisah pada sisi masuk dan pengaman lebur (*type NH, NT*) sebagai pengaman jurusan. Semua Bagian Konduktif Terbuka (BKT) dan Bagian Konduktif Ekstra (BKE) dihubungkan dengan pembumian sisi Tegangan Rendah (Standar Konstruksi PLN, 2010).

2.1.2.1 Komponen Utama Gardu Tiang

Gardu tiang merupakan salah satu bentuk gardu distribusi yang banyak digunakan oleh PLN karena efisien dalam penggunaan lahan, mudah dibangun, serta praktis dalam pemeliharaan. Secara umum, gardu tiang terdiri dari beberapa komponen utama yang berfungsi untuk menyalurkan, menurunkan tegangan, serta melindungi jaringan distribusi listrik.

1. Tiang Penyangga

Tiang gardu biasanya menggunakan beton pratekan atau baja dengan tinggi 11–12 meter dan kekuatan beban kerja sekurang-kurangnya 350–500 daN. Fungsi utama tiang adalah menopang transformator, peralatan hubung, dan peralatan proteksi lainnya (Standar Konstruksi PLN, 2010).

2. Transformator Distribusi

Transformator berfungsi menurunkan tegangan menengah (20 kV) menjadi tegangan rendah (230/400 V). Pada gardu tiang digunakan:

- Transformator *CSP (Completely Self Protected)* untuk kapasitas ≤ 100 kVA.
- Transformator tiga fasa pasangan luar dengan kapasitas 50–400 kVA.

Jenis transformator ditentukan berdasarkan beban dan kondisi jaringan (Standar Konstruksi PLN, 2010).

3. Peralatan Hubung dan Proteksi Tegangan Menengah (TM)

Pada sisi TM dipasang *Fuse Cut Out (FCO)* sebagai proteksi hubung singkat dan *Lightning Arrester (LA)* untuk proteksi terhadap tegangan lebih akibat sambaran petir. Kedua peralatan ini menggunakan standar isolasi dasar 24 kV/125 kV BIL (Standar Konstruksi PLN, 2010).

4. Perangkat Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB TR)

PHB TR digunakan untuk menyalurkan energi listrik ke jaringan tegangan rendah. PHB TR dilengkapi *Molded Case Circuit Breaker (MCCB)* atau *Load Break Switch (LBS)* sebagai pemutus utama, serta sekering NH/NT sebagai proteksi jurusan (Standar Konstruksi PLN, 2010).

5. Sistem Pembumian (*Grounding*)

Seluruh bagian konduktif terbuka dan ekstra, termasuk badan transformator serta arrester, harus dihubungkan ke sistem pembumian untuk menjamin keselamatan dan mengurangi risiko tegangan sentuh berbahaya (Standar Konstruksi PLN, 2010).

6. Aksesori Mekanis

Aksesori pendukung terdiri dari baja kanal U, platform kerja, dudukan transformator, serta prasasti gardu yang berisi identitas dan data teknis gardu. Perangkat ini berfungsi sebagai elemen pendukung mekanis sekaligus dokumentasi teknis (Standar Konstruksi PLN, 2010).

2.1.2 Tegangan Standar dalam Sistem Tenaga Listrik

Dalam sistem tenaga listrik, tegangan merupakan salah satu parameter utama yang menentukan kinerja, keandalan, dan keselamatan suatu instalasi. Untuk memastikan keseragaman dan kompatibilitas peralatan listrik dalam sistem transmisi, distribusi, dan pemanfaatan tenaga listrik, PT PLN (Persero) menetapkan standar tegangan yang mengacu pada IEC 60038 – Standard Voltages. Standar ini tertuang dalam SPLN T6.001:2013, yang merupakan revisi dari SPLN No. 01 Tahun 1995, dan menjadi pedoman resmi dalam seluruh kegiatan perencanaan, pembangunan, pengusahaan, serta pengoperasian sistem kelistrikan di Indonesia (PT PLN (PERSERO), 2013).

Standar ini berlaku untuk sistem arus bolak-balik (AC) dengan frekuensi 50 Hz yang memiliki tegangan nominal di atas 100 V, termasuk perlengkapan kelistrikan seperti baterai, peralatan kontrol, proteksi, telekomunikasi, serta sistem SCADA. Namun, standar ini tidak mencakup tegangan sinyal atau tegangan yang digunakan untuk transmisi data (PT PLN (PERSERO), 2013).

2.1.2.1 Klasifikasi Tegangan dalam Sistem Tenaga Listrik

Berdasarkan SPLN T6.001:2013, sistem tenaga listrik diklasifikasikan menjadi empat kelompok berdasarkan besar tegangannya:

1. Tegangan Rendah (TR)

Sistem dengan tegangan antara 100 V – 1.000 V. Contohnya adalah jaringan distribusi yang melayani konsumen rumah tangga dan perkantoran, biasanya memiliki tegangan 230/400 V untuk sistem tiga fasa empat kawat (PT PLN (PERSERO), 2013).

2. Tegangan Menengah (TM)

Sistem dengan tegangan di atas 1.000 V – 35.000 V. Umumnya digunakan pada jaringan distribusi primer dan sistem pembangkitan kecil.

3. Tegangan Tinggi (TT)

Sistem dengan tegangan di atas 35.000 V – 245.000 V, banyak digunakan untuk jaringan transmisi utama.

4. Tegangan Ekstra Tinggi (TET)

Sistem dengan tegangan di atas 245.000 V, misalnya saluran transmisi 500 kV yang digunakan untuk mentransfer daya jarak jauh.

2.1.2.2 Tegangan Pengenal dan Tegangan Operasi

Tegangan pengenal (*nominal voltage*) merupakan nilai tegangan yang ditetapkan pada suatu sistem atau peralatan, yang menjadi acuan utama dalam perencanaan dan pengujian. Sedangkan tegangan tertinggi sistem adalah tegangan maksimum yang dapat terjadi dalam kondisi operasi normal, tidak termasuk transien akibat switching atau gangguan sesaat. Tegangan terendah adalah nilai minimum yang dapat terjadi dalam kondisi normal (PT PLN (PERSERO), 2013).

2.1.2.3 Tegangan Pasok dan Tegangan Pemanfaatan

Tegangan Pasok adalah tegangan fase-ke-fase atau fase-ke-netral pada terminal suplai dari sistem distribusi ke konsumen. Tegangan Pemanfaatan adalah tegangan fase-ke-fase atau fase-ke-netral pada terminal peralatan pengguna, misalnya stopkontak atau panel.

Dalam kondisi normal, perbedaan antara tegangan tertinggi dan terendah tidak boleh lebih dari $\pm 10\%$ dari tegangan nominal sistem. Untuk instalasi tegangan rendah, penurunan tegangan (*voltage drop*) pada instalasi konsumen dibatasi hingga 5% (atau 4% menurut IEC), sehingga rentang tegangan pemanfaatan yang direkomendasikan adalah +10% hingga -15% dari tegangan nominal (PT PLN (PERSERO), 2013).

2.1.2.4 Tegangan Standar Sistem Distribusi

Berdasarkan standar, sistem distribusi tegangan rendah yang umum digunakan adalah:

- Sistem tiga fasa empat kawat: 230/400 V
- Sistem satu fasa tiga kawat: 2×230 V

Sedangkan untuk sistem tegangan menengah antara 1 kV hingga 35 kV, tegangan nominal yang lazim digunakan antara lain 6 kV, 11 kV, dan 20 kV. Untuk

sistem di atas 35 kV hingga 230 kV, digunakan tegangan nominal seperti 66 kV dan 150 kV, dan untuk sistem ekstra tinggi hingga 500 kV digunakan tegangan tertinggi peralatan 550 kV (PT PLN (PERSERO), 2013).

2.1.2.5 Relevansi Tegangan Standar dalam Pendeteksi Gangguan TR

Pemahaman terhadap standar tegangan sangat penting dalam merancang sistem monitoring dan deteksi dini gangguan sisi tegangan rendah. Sistem yang dirancang harus mampu memantau parameter utama (tegangan, arus, daya, faktor daya, dan frekuensi) secara *Real-Time* dan mendeteksi deviasi dari batas tegangan standar yang telah ditetapkan oleh SPLN T6.001:2013. Misalnya, gangguan undervoltage dapat diidentifikasi saat tegangan turun lebih dari -15% dari tegangan nominal, sedangkan kondisi overvoltage dapat terdeteksi saat tegangan naik melebihi +10%.

2.1.3 Monitoring dan Deteksi Gangguan

Monitoring gardu distribusi bertujuan untuk memastikan parameter penting seperti arus, tegangan, suhu, dan kondisi isolasi tetap dalam batas normal. Keterlambatan dalam deteksi gangguan dapat menimbulkan kerugian energi, kerusakan peralatan, hingga pemadaman luas. Saat ini, sistem SCADA PLN hanya mencakup gardu induk dan sebagian gardu distribusi besar, sehingga diperlukan sistem monitoring tambahan untuk gardu distribusi skala kecil atau yang tidak dilengkapi metering. Seiring dengan transformasi digital, gardu distribusi dapat dimonitor secara *Real-Time* menggunakan sensor dan teknologi *IoT*. Monitoring gardu distribusi pada sisi tegangan rendah (TR) memiliki peran yang sangat penting dalam menjaga kontinuitas suplai listrik ke konsumen. Pada gardu distribusi tiang, sisi TR umumnya terhubung langsung ke jaringan pelanggan rumah tangga maupun komersial, sehingga gangguan yang terjadi pada sisi ini dapat berdampak luas terhadap kualitas daya dan kepuasan pelanggan.

Salah satu masalah umum yang sering terjadi pada sisi tegangan rendah adalah ketidakseimbangan beban antar fasa, drop tegangan, arus lebih (overcurrent), serta gangguan hubung singkat (short circuit). Jika tidak terdeteksi lebih awal, gangguan

ini dapat mempercepat kerusakan transformator distribusi, menimbulkan rugi-rugi energi, dan bahkan berpotensi menyebabkan kebakaran pada instalasi jaringan (Standar Konstruksi PLN, 2010).

. Dalam penelitian mutakhir, teknologi *Internet of Things (IoT)* mulai banyak digunakan untuk mendeteksi dan memonitor kondisi abnormal pada sisi tegangan rendah gardu distribusi. Misalnya, sensor suhu dan kelembaban dipasang untuk memantau kondisi transformator, sensor arus dan tegangan untuk memantau beban, serta perangkat komunikasi berbasis mikrokontroler untuk mengirimkan data ke server. Penelitian Zein, Alam, & Gifson (2022) menunjukkan bahwa penggunaan NodeMCU dengan integrasi aplikasi Android mampu menampilkan data kelistrikan gardu secara langsung melalui ponsel pintar. Sensor arus dan tegangan yang terpasang pada keluaran TR transformator dapat mengukur parameter kelistrikan secara *Real-Time*. Data tersebut kemudian dikirimkan ke sistem monitoring berbasis mikrokontroler yang terhubung dengan platform cloud. Sistem ini memungkinkan operator untuk mengetahui kondisi beban setiap fasa, mendeteksi adanya ketidakseimbangan, serta mengidentifikasi indikasi hubung singkat atau beban berlebih sebelum menimbulkan kerusakan lebih lanjut (Msane dkk., 2024).

Penerapan monitoring sisi tegangan rendah berbasis *IoT* memiliki beberapa keunggulan, antara lain:

- Deteksi dini gangguan fasa – Sistem dapat memberikan notifikasi segera apabila terjadi hilang fasa, unbalance load, atau tegangan jatuh di bawah standar.
- Perlindungan transformator – Dengan memantau arus dan tegangan sisi TR, transformator terlindungi dari kondisi overload yang berulang.
- Efisiensi operasional – Monitoring jarak jauh mengurangi kebutuhan inspeksi manual pada gardu, sehingga menekan biaya operasional PLN.
- Mendukung smart grid – Data monitoring sisi TR dapat diintegrasikan ke pusat kontrol distribusi untuk analisis lebih lanjut dan pengambilan keputusan cepat.

Sebagai contoh lain, Msane dkk. (2024) menekankan bahwa sistem

monitoring *IoT* dengan sensor tegangan dan arus pada keluaran TR sangat efektif untuk mendeteksi kondisi *overload*, drop tegangan, dan *unbalance*, yang merupakan penyebab utama gangguan distribusi listrik. Dengan adanya sistem monitoring ini, deteksi gangguan dapat dilakukan dalam hitungan detik, sehingga mempercepat respon pemeliharaan dan meminimalisir dampak pemadaman.

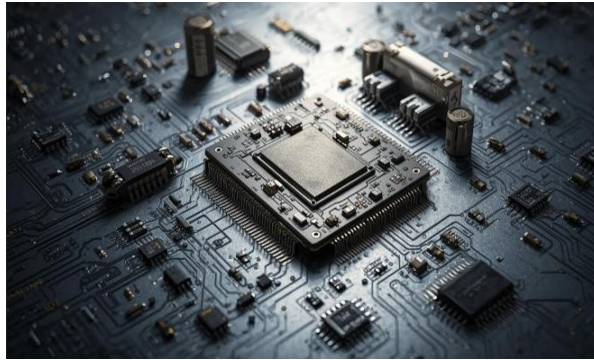
Dengan demikian, penerapan monitoring gardu distribusi pada sisi tegangan rendah berbasis *IoT* dapat meningkatkan reliabilitas pasokan listrik, memperpanjang umur transformator, serta mendukung program digitalisasi jaringan distribusi tenaga listrik.

2.1.4 Mikrokontroler

Mikrokontroler adalah sistem komputer kecil dalam satu chip yang terdiri dari CPU, memori, port input-output, serta fitur tambahan seperti ADC/DAC dan komunikasi serial. Mikrokontroler dirancang untuk mengendalikan fungsi tertentu dalam perangkat elektronik secara otomatis dan efisien (Jatnika dkk., 2021).

Jenis prosesor yang digunakan sebagai mikrokontroler sangat beragam, mulai dari arsitektur 8-bit, 16-bit, hingga 32-bit. Pada masa awal, mikroprosesor digunakan dalam komputer rumah dan perangkat portabel, kemudian berkembang menjadi chip mikrokontroler khusus yang lebih kecil, hemat daya, dan murah. Mikrokontroler modern kini hadir dalam berbagai varian, mulai dari tipe sederhana dengan memori terbatas hingga prosesor berperforma tinggi yang mendukung *IoT* (Sitorus dkk., 2020).

Mikrokontroler low-end biasanya hanya memiliki memori beberapa kilobyte dan jumlah pin I/O terbatas, namun tetap andal untuk aplikasi sederhana (Zein dkk., 2022). Sebaliknya, mikrokontroler high-end, seperti yang digunakan dalam *IoT* dan sistem monitoring tenaga listrik, mampu mendukung komunikasi nirkabel, multitasking, serta integrasi dengan sensor cerdas (Sitorus dkk., 2020).



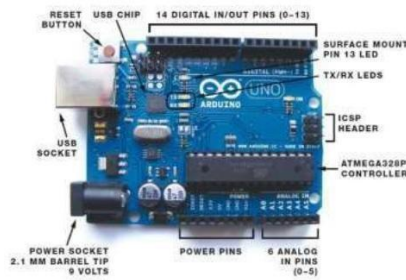
Gambar 2. 5 Mikrokontroler

a. Bagian-bagian Mikrokontroler

Mikrokontroler merupakan sistem komputasi kecil yang terintegrasi dalam sebuah chip. Secara umum, mikrokontroler mengandung beberapa komponen utama berikut:

- *Central processing unit (CPU)*
- *Random Access Memory) (RAM)*
- *Read Only Memory (ROM)*
- *Input/output ports*
- *Timers and Counters*
- *Interrupt Controls*
- *Analog to digital converters*
- *Digital – analog converters*
- *Serial interfacing ports*
- *Oscillatory circuits*

Mikrokontroler secara internal terdiri dari semua fitur yang diperlukan untuk sistem komputasi dan berfungsi sebagai komputer tanpa menambahkan komponen digital eksternal di dalamnya. Sebagian besar pin dalam chip mikrokontroler dapat diprogram oleh pengguna. Mikrokontroler memiliki banyak instruksi penanganan bit yang dapat dengan mudah dipahami oleh seorang programmer. Mikrokontroler mampu menangani fungsi Boolean. Kecepatan dan kinerja yang lebih tinggi. Struktur *ROM on-chip* dalam mikrokontroler memberikan keamanan *firmware* yang lebih baik. Mudah dirancang dengan biaya rendah dan ukuran kecil (Jatnika dkk., t.t.).

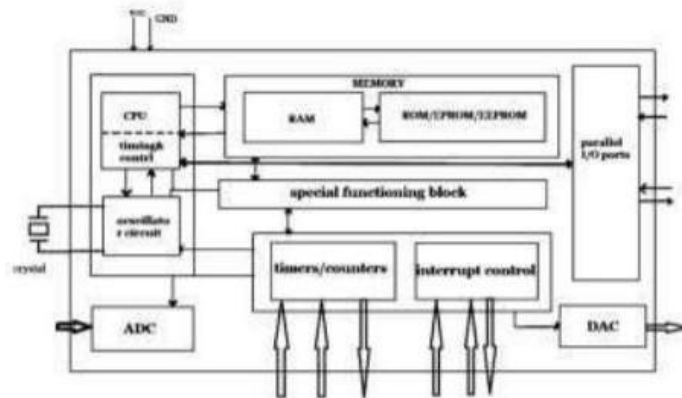


Gambar 2. 6 Bagian-bagian Mikrokontroler

b. Struktur Mikrokontroler

Struktur dasar mikrokontroler dapat dijelaskan melalui blok fungsional berikut:

- *CPU (Central Processing Unit)*: mengambil, mendekode, dan mengeksekusi instruksi dari memori program. CPU mengoordinasikan seluruh aktivitas mikrokontroler.
- Memori: terdiri dari *RAM*, *ROM*, *EEPROM*, atau *Flash*. *RAM* menyimpan data sementara, sedangkan *ROM/Flash* menyimpan instruksi program secara permanen.
- *Parallel Input/Output Ports*: digunakan untuk menghubungkan perangkat seperti LCD, LED, printer, atau memori eksternal.
- *Serial Ports*: menyediakan komunikasi serial dengan perangkat lain, seperti sensor atau modul komunikasi.
- *Timers/Counters*: memungkinkan pengukuran waktu, pencacahan pulsa, serta fungsi lain seperti *PWM (Pulse Width Modulation)*.
- *ADC (Analog to Digital Converter)*: mengubah sinyal analog menjadi data digital sehingga dapat diproses oleh *CPU*, misalnya pembacaan sensor suhu atau tegangan.
- *DAC (Digital to Analog Converter)*: melakukan proses sebaliknya, yaitu mengubah data digital menjadi sinyal analog untuk mengontrol perangkat seperti motor.
- *Interrupt Control*: memberikan mekanisme agar *CPU* dapat segera merespons suatu kondisi khusus atau kejadian mendadak.
- *Special Functioning Block*: pada mikrokontroler tertentu, tersedia modul tambahan khusus untuk aplikasi spesifik, misalnya komunikasi nirkabel, sistem otomasi, atau robotika (Jatnika dkk., 2021).



Gambar 2. 7 Struktur Mikrokontroler

c. Jenis Mikrokontroler yang Umum Digunakan

- Arduino: *platform open-source* berbasis ATmega yang mudah diprogram dan digunakan secara luas untuk pendidikan, riset, dan prototipe *IoT* (Jatnika dkk., 2021).
- NodeMCU/ESP8266: dilengkapi modul Wi-Fi, banyak digunakan dalam sistem monitoring berbasis *IoT* (Zein dkk., 2022).
- ESP32: mikrokontroler modern dengan prosesor dual-core, mendukung Wi-Fi & Bluetooth, ADC/DAC internal, sangat sesuai untuk monitoring gardu distribusi (Espressif Systems, 2023).
- Mikrokontroler berbasis ARM atau AVR digunakan untuk aplikasi lebih kompleks, termasuk instrumentasi virtual dan smart metering (Husada & Samsurizal, 2020).

2.1.5 Arduino sebagai Platform Mikrokontroler

Arduino merupakan platform mikrokontroler open-source yang banyak digunakan dalam bidang pendidikan, penelitian, hingga industri. Arduino pertama kali diperkenalkan tahun 2005 dengan tujuan memudahkan pengembangan perangkat elektronik tanpa memerlukan keahlian mendalam di bidang elektronika. Arduino terdiri dari perangkat keras (*board*) dan perangkat lunak (Arduino IDE) yang bekerja bersama untuk membuat sistem prototipe berbasis mikrokontroler lebih mudah diakses (Jatnika dkk., 2021).

Arduino mendukung berbagai model board, seperti Arduino Uno, Mega 2560, Nano, Leonardo, Due, hingga Arduino Yún, masing-masing dengan spesifikasi CPU, jumlah pin, dan kapasitas memori yang berbeda (Jatnika dkk., 2021). Kelebihan Arduino antara lain:

- Mendukung pemrograman dengan bahasa yang sederhana (C/C++).
- Memiliki ekosistem library yang luas dan komunitas besar.
- Tersedia banyak shield tambahan seperti Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth, dan GSM.
- Dapat digunakan untuk berbagai aplikasi, mulai dari otomasi rumah, robotika, hingga *Internet of Things (IoT)* (Jatnika dkk., 2021).

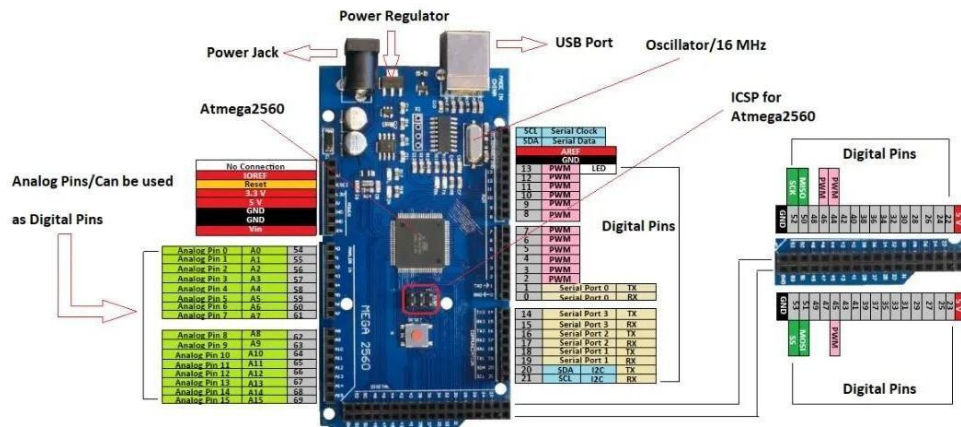
Dengan fleksibilitas tinggi, Arduino sering menjadi pilihan utama untuk membangun sistem monitoring maupun kontrol pada aplikasi kelistrikan, termasuk pemantauan kondisi gardu distribusi.

2.1.5.1 Arduino Mega 2560

Arduino mega 2560 adalah perangkat keras dan perangkat lunak yang berbasis mikrokontroler. Arduino bersifat *open source* dan diagram elektroniknya gratis untuk semua sarjana dan profesional untuk menggunakan Arduino dalam berbagai proyek. Untuk mendukung mikrokontroler agar dapat digunakan, maka Arduino Mega2560 perlu dihubungkan ke komputer menggunakan kabel USB atau dengan memberi daya dengan adaptor *AC-to-DC* atau baterai agar dapat bekerja (Pratama Rizal, 2023).

Arduino Mega 2560 merupakan salah satu varian Arduino dengan kapasitas lebih tinggi, berbasis pada mikrokontroler ATmega2560. Board ini memiliki 54 digital I/O pins (14 di antaranya dapat digunakan sebagai output PWM), 16 pin input analog, 4 UART (*port serial hardware*), osilator 16 MHz, port USB, power jack, serta tombol reset (Arduino, 2016).

Arduino Mega 2560 menyediakan memori yang cukup besar, yaitu 256 KB flash memory (8 KB digunakan untuk *bootloader*), 8 KB SRAM, dan 4 KB EEPROM. Dengan spesifikasi ini, Arduino Mega sangat sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan pengolahan data yang kompleks dan integrasi dengan banyak sensor. Rentang tegangan input yang direkomendasikan adalah 7–12 V, dengan batas aman antara 6–20 V.



Gambar 2. 8 Arduino Mega 2560

Selain itu, Arduino Mega mendukung komunikasi melalui protokol UART, SPI, dan I2C, yang memungkinkan integrasi dengan modul eksternal seperti sensor arus dan tegangan (PZEM-004T), LCD 20x4, modul *IoT* berbasis ESP32, serta komponen pengendali beban seperti *Solid State Relay (SSR)*.

Tabel 2. 1 Pin Komunikasi Serial (UART)

UART	TX Pin	RX Pin	Keterangan
Serial 0	1	0	Terhubung ke USB
Serial 1	18	19	Untuk perangkat eksternal
Serial 2	16	17	Untuk komunikasi tambahan
Serial 3	14	15	Port serial keempat

Tabel 2. 2 Pin Analog Input (A0-A15)

Pin Analog	Alias Digital	ADC
A0-A7	54-61	ADC0-ADC7
A8-A15	62-69	ADC8-ADC15

Dalam penelitian ini, Arduino Mega 2560 dipilih sebagai pusat kendali (*control unit*) karena:

- Menyediakan jumlah pin I/O yang banyak, sehingga dapat digunakan untuk mengakomodasi kebutuhan pengukuran dan monitoring tiga fasa secara simultan.
- Memiliki kapasitas memori besar yang mendukung pengolahan data real- time, seperti perhitungan daya aktif, daya reaktif, dan faktor daya.
- Mendukung konektivitas ke modul komunikasi IoT untuk monitoring jarak jauh melalui webserver, sekaligus terhubung dengan LCD 20x4 untuk monitoring lokal.

Tabel 2. 3 Perbandingan antara Arduino Mega dan Arduino Uno

Fitur	Arduino Uno	Arduino Mega
Mikrokontroler	ATmega328P	ATmega2560
Digital I/O	14	54
PWM	6	15
Analog Input	6	16
UART	1	4
Flash	32 KB	256 KB
SRAM	2 KB	8 KB
EEPROM	1 KB	4 KB

Dengan spesifikasi tersebut, Arduino Mega 2560 berperan sebagai otak sistem prototipe monitoring beban listrik tiga fasa, yang menjamin kinerja sistem tetap *Real-Time*, stabil, dan akurat dalam menampilkan data hasil pengukuran.

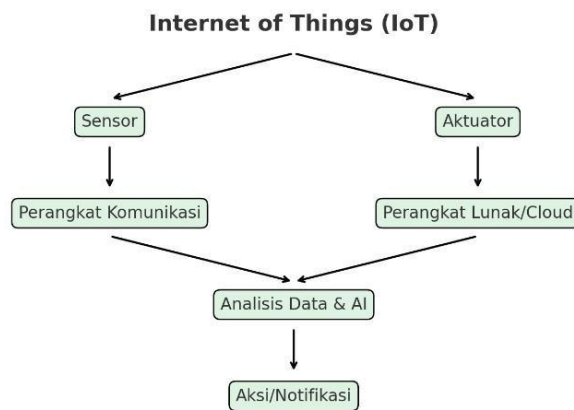
2.1.6 Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) merupakan konsep teknologi yang memungkinkan berbagai objek fisik saling terhubung dan berkomunikasi melalui jaringan internet, sehingga dapat bertukar data dan berinteraksi secara otomatis tanpa campur tangan manusia secara langsung. sehingga mampu mengumpulkan, mentransmisikan, dan menukar data secara

otomatis tanpa ketergantungan penuh pada intervensi manusia. Objek yang terhubung ini biasanya dilengkapi dengan sensor, aktuator, perangkat komunikasi, dan perangkat lunak yang memungkinkan integrasi antara dunia fisik dan digital (Jatnika dkk., 2021). Objek yang dimaksud termasuk sensor, perangkat, mesin, orang, hewan, pohon, bangunan, kendaraan, dan lain-lain; dengan demikian *IoT* merupakan persimpangan antara *Internet*, *things*, dan data (Jatnika dkk., 2021). Tujuan utama *IoT* bukan sekadar menghubungkan benda, melainkan mengumpulkan kecerdasan dari objek-objek tersebut untuk memperkaya produk dan layanan, meningkatkan efisiensi operasional, dan memungkinkan fungsi monitoring dan kontrol jarak jauh (Zein dkk., 2022). *IoT* berperan penting dalam mendukung sistem monitoring, pengendalian, serta deteksi dini gangguan pada berbagai sektor, termasuk jaringan distribusi tenaga listrik (Zein dkk., 2022).

Secara historis, istilah *IoT* diperkenalkan pertama kali oleh Kevin Ashton pada tahun 1999 dalam konteks *Radio Frequency Identification (RFID)* yang digunakan untuk sistem rantai pasok. Perkembangan selanjutnya pada dekade 2000-an ditandai dengan munculnya *Wireless Sensor Networks (WSN)*, peningkatan konektivitas internet, serta kemajuan komputasi awan yang memperluas implementasi *IoT*. Pada periode 2016–2020, *IoT* semakin matang dengan munculnya konsep *Industrial Internet of Things (IIoT)* yang diterapkan untuk meningkatkan efisiensi operasional, pemeliharaan prediktif, dan pemantauan aset industri (Sitorus dkk., 2020).

Dalam perkembangannya saat ini, *IoT* tidak hanya berfungsi sebagai penghubung perangkat, tetapi juga berintegrasi dengan kecerdasan buatan (*AI*) yang melahirkan konsep *Artificial Intelligence of Things (AIoT)*. Integrasi ini memungkinkan sistem *IoT* melakukan analisis prediktif, mendeteksi anomali, dan memberikan notifikasi dini secara *Real Time*. Selain itu, implementasi *edge computing* mempercepat pemrosesan data di dekat sumber sehingga memperkecil latensi, yang sangat relevan untuk sistem kritis seperti monitoring gardu distribusi (Elgazzar dkk., 2022).



Gambar 2. 9 Definisi Internet of Things

a. Persyaratan dasar solusi *IoT*

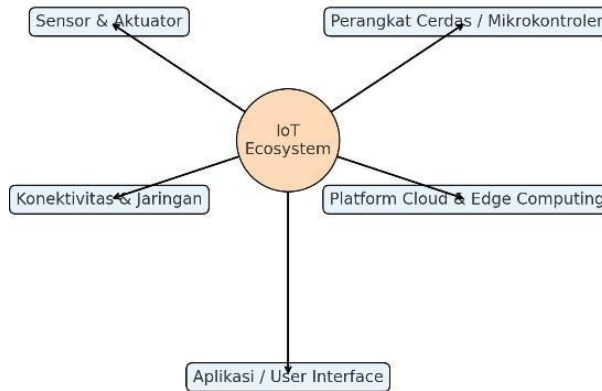
Untuk dapat memantau dan mengendalikan perangkat dari mana saja, solusi *IoT* harus memenuhi persyaratan dasar: identitas unik per perangkat (mis. alamat/ID), kemampuan komunikasi (nirkabel atau berkabel), serta kemampuan penginderaan (sensor) untuk memperoleh informasi spesifik tentang perangkat. Selain itu diperlukan media komunikasi (operator telekomunikasi/gateway) dan mekanisme manajemen perangkat (registrasi, autentikasi, provisioning) sehingga perangkat dapat diadministrasikan sepanjang siklus hidupnya (Jatnika dkk., 2021).

b. Komponen utama *IoT*

Komponen inti sistem *IoT* meliputi:

- Sensor: untuk mengumpulkan informasi dari dunia fisik.
- Identifiers: untuk mengidentifikasi sumber data (sensor, perangkat).
- Perangkat lunak: untuk analisis data.
- Konektivitas internet: untuk komunikasi antar perangkat dan ke infrastruktur cloud/edge.

Komponen Utama Internet of Things (IoT)



Gambar 2. 10 Komponen Utama Internet of Things (IoT)

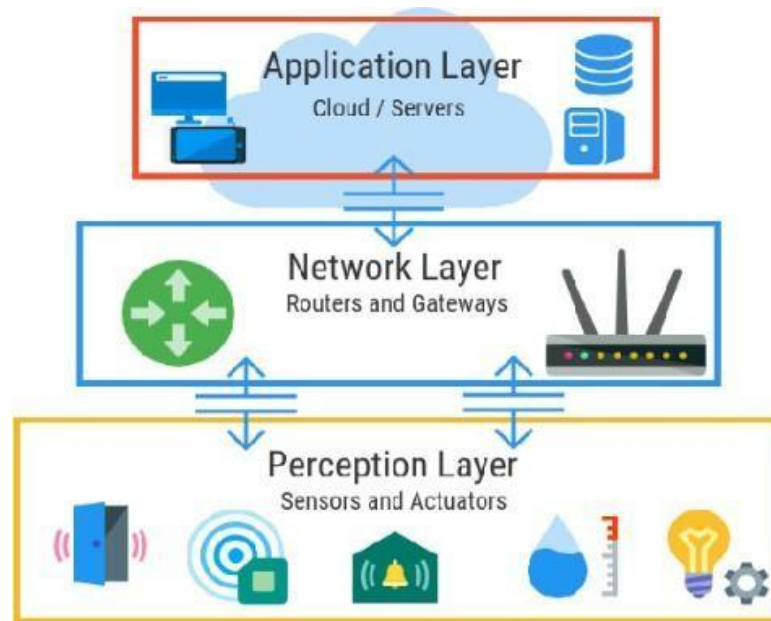
c. Arsitektur *IoT*

Arsitektur *IoT* adalah system yang terdiri dari berbagai elemen: sensor, protokol, aktuator, layanan cloud, dan lapisan-lapisan. Mengingat kompleksitasnya, terdapat 4 tahap arsitektur *IoT* untuk dapat membentuk sebuah jaringan yang terpadu. Selain itu, lapisan arsitektur *Internet of Things* dibedakan untuk melacak konsistensi sistem. Ini juga harus dipertimbangkan sebelum proses arsitektur *IoT* dimulai (Jatnika dkk., 2021).

Pada dasarnya, ada tiga lapisan arsitektur *IoT*:

1. Sisi klien (Lapisan Perangkat *IoT*)
2. Operator di sisi server (*IoT* Getaway Layer)
3. Jalur untuk menghubungkan klien dan operator (Lapisan Platform *IoT*)

Faktanya, menangani kebutuhan semua lapisan ini sangat penting pada semua tahap arsitektur *IoT*. Menjadi dasar kriteria kelayakan, konsistensi ini akan membuat hasil yang dirancang benar-benar berfungsi. Selain itu, fitur dasar arsitektur *IoT* berkelanjutan juga termasuk fungsionalitas, skalabilitas, ketersediaan, dan pemeliharaan. Tanpa mengenali dan membuat kondisi ini, hasil arsitektur *IoT* dapat saja dikatakan gagal (Jatnika dkk., 2021).

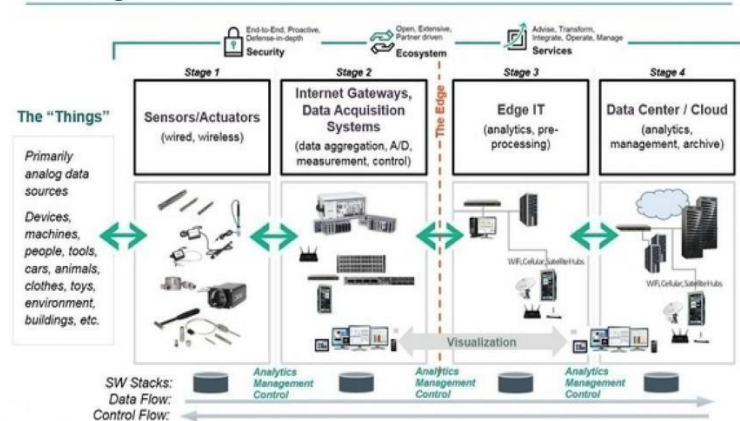


Gambar 2. 11 Tiga Lapisan Arsitektur IoT

Secara operasional arsitektur *IoT* dapat dibagi menjadi empat tahap/lapisan utama:

- *Sensors & Actuators (Perception layer)*: node yang mengindra dan/atau melakukan aksi fisik (misalnya sensor suhu, CT, aktuator SSR).
- *Internet Gateways & Data Acquisition Systems (DAS)*: pengumpul data lokal, melakukan konversi analog ke digital, kompresi, dan pengiriman awal.
- *Edge IT / Fog* : pemrosesan di tepi (*edge/fog*) untuk ekstraksi peristiwa, reduksi data, dan deteksi anomali sebelum meneruskan ke cloud, sangat penting untuk mengurangi latensi dan bandwidth pada aplikasi kritis seperti monitoring gardu distribusi.
- *Data Center & Cloud (Application layer)*: analitik mendalam, penyimpanan historis, machine learning, manajemen perangkat, dan dasbor pengguna (Elgazzar dkk., 2022).

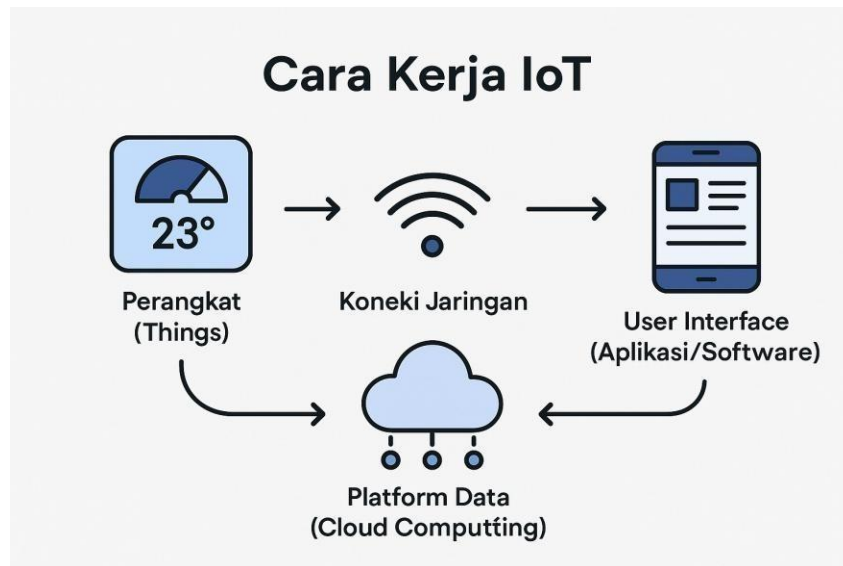
The 4 Stage IoT Solutions Architecture



Gambar 2. 12 Empat Lapisan Utama Arsitektur IoT

d. Cara Kerja *Internet of Things* (IoT)

Secara umum, cara kerja *Internet of Things* (IoT) dapat dijelaskan melalui empat tahap utama, yaitu perolehan data, transmisi data, pemrosesan data, dan aksi/output. Pertama, sensor yang terpasang pada objek fisik berfungsi untuk mengukur parameter tertentu, misalnya suhu, kelembaban, arus, atau tegangan. Kedua, data dari sensor tersebut dikirim ke mikrokontroler atau perangkat akuisisi data untuk dilakukan pengolahan awal. Ketiga, data ditransmisikan melalui jaringan komunikasi (Wi-Fi, GSM, LoRa, atau teknologi nirkabel lainnya) menuju server atau *cloud computing*. Tahap keempat adalah pemrosesan lanjutan dan visualisasi data, yang memungkinkan pengguna melakukan pemantauan, analisis, serta pengendalian perangkat secara *Real-Time* melalui aplikasi berbasis web atau *mobile* (Jatnika dkk., 2021).



Gambar 2. 13 Cara Kerja Internet of Things (IoT)

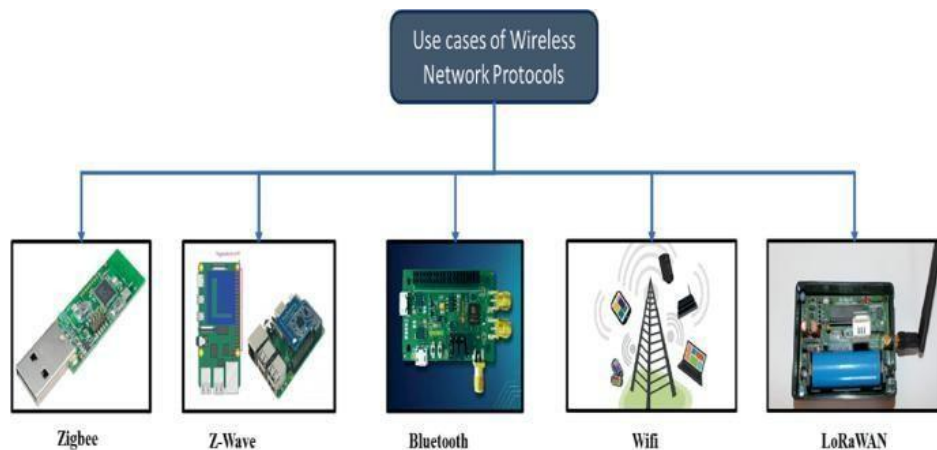
Dengan alur kerja tersebut, *IoT* mampu mengintegrasikan dunia fisik dengan dunia digital sehingga objek-objek yang terhubung dapat saling berinteraksi, berbagi data, dan menjalankan fungsi otomatisasi. Hal ini menjadikan *IoT* sebagai solusi penting dalam sistem monitoring, termasuk untuk mendukung pemantauan gardu distribusi tenaga listrik secara efisien dan akurat.

e. Pilihan Jaringan Nirkabel & Karakteristik

Pemilihan jaringan tergantung *trade-off* daya, jangkauan, dan *bandwidth*:

- Seluler (*LTE-M, NB-IoT*): cakupan luas, hemat daya, cocok untuk sensor terdistribusi.
- *LAN/PAN (Wi-Fi, BLE)*: *throughput* tinggi untuk area lokal, namun relatif haus daya.
- *LPWAN (LoRaWAN, Sigfox)*: *throughput* ideal untuk pengiriman data kecil berkala dengan konsumsi daya rendah.
- *Mesh (Zigbee, Thread)*: multi-hop untuk area interior/gedung.

Protokol aplikasi ringan seperti MQTT atau CoAP sering dipakai untuk efisiensi komunikasi antara node, gateway, dan cloud (Rytel dkk., 2020).



Gambar 2. 14 Jaringan Nirkabel Internet of Things (IoT)

f. Desain Hemat Daya & Event-Driven Processing

Sistem *IoT* seringkali dioperasikan dengan paradigma *event-driven* atau *aperiodic sampling* untuk mengurangi konsumsi daya dan *bandwidth*. *Edge processing* memungkinkan node kecil mengekstrak peristiwa penting (misal lonjakan suhu) sehingga hanya peristiwa relevan yang dikirim ke *cloud*, menghemat energi dan biaya operasi (Jatnika dkk., 2021).

g. Manajemen Perangkat (*Device Management*)

Pengelolaan perangkat mencakup registrasi, autentikasi/otorisasi, *provisioning*, konfigurasi, pemantauan, diagnosa, dan *troubleshooting*. Standar seperti OMA DM dan LwM2M, serta layanan *platform cloud* (*AWS IoT*, *Azure IoT Hub*), memudahkan skala, *provisioning*, dan pemeliharaan keamanan perangkat (Elgazzar dkk., 2022).

h. Keamanan Dan Privasi

Keamanan dan privasi menjadi faktor penting dan menantang. Isu-isu krusial meliputi: kurangnya pembaruan *firmware*, kredensial *default* yang mudah ditebak (*brute-force*), *malware/Botnet* (contoh Mirai/Dyn), pelanggaran data, *ransomware*, serta serangan mikro sulit terdeteksi. Praktik mitigasi yang dianjurkan: pembaruan *firmware* berkala, otentikasi dan manajemen kunci yang kuat, *enkripsi end-to-end* (misal TLS/DTLS), segmentasi jaringan, pengujian keamanan sebelum *deployment*, serta kebijakan privasi dan anonimisasi data (Rytel dkk., 2020).

i. Aplikasi & Manfaat Untuk Monitoring Gardu Distribusi

Dalam penerapannya, *IoT* memungkinkan: monitoring parameter listrik (tegangan, arus, daya, PF) dan lingkungan (suhu, kelembaban), deteksi dini gangguan, manajemen beban, dan predictive maintenance. Dengan integrasi *edge computing* dan *AI*, sistem dapat memberikan notifikasi *Real-Time* dan rekomendasi tindakan (Zein dkk., 2022).

2.1.7 ESP32

ESP32 adalah *system-on-chip (SoC) Wi-Fi dan Bluetooth* terintegrasi yang dikembangkan oleh Espressif Systems menggunakan teknologi proses 40 nm hemat daya. ESP32 dirancang untuk menghadirkan kinerja *RF (Radio Frequency)* yang unggul, konsumsi daya rendah, dan fleksibilitas tinggi dalam berbagai aplikasi, khususnya pada sistem berbasis *Internet of Things (IoT)*. Chip ini mengintegrasikan prosesor inti Xtensa® 32-bit LX6 dengan konfigurasi single-core maupun dual-core yang mampu beroperasi hingga frekuensi 240 MHz. ESP32 juga dilengkapi dengan 448 KB ROM, 520 KB SRAM, dan dukungan eksternal flash hingga 16 MB. Arsitektur ini memungkinkan pengolahan data yang cepat sekaligus efisien untuk berbagai aplikasi monitoring dan kendali jarak jauh (Espressif Systems, 2023).



Gambar 2. 15 System on Chip ESP32

Fitur Utama ESP32

1. Konektivitas

- Mendukung Wi-Fi 802.11 b/g/n dengan kecepatan hingga 150 Mbps.
- Mendukung Bluetooth v4.2 BR/EDR dan Bluetooth Low Energy (BLE), dengan sensitivitas penerimaan hingga -94 dBm dan daya pancar hingga $+9$ dBm.
- Mendukung mode Station, Access Point (AP), dan Promiscuous Mode secara simultan.

2. Periferal Digital & Analog

- Hingga 34 GPIO yang dapat diprogram.
- 12-bit ADC dengan hingga 18 channel dan 2 DAC 8-bit.
- Antarmuka komunikasi: UART, SPI, I²C, I²S, SDIO, Ethernet MAC, CAN (TWAI®).
- Mendukung PWM hingga 16 channel untuk kendali motor maupun LED.
- Sensor sentuh kapasitif (hingga 10 channel) untuk aplikasi antarmuka interaktif.

3. Manajemen Daya

ESP32 mendukung lima mode operasi daya: Active, Modem-sleep, Light-sleep, Deep-sleep, dan Hibernation. Pada mode Deep-sleep, konsumsi daya dapat ditekan hingga $10\text{ }\mu\text{A}$, menjadikannya ideal untuk perangkat berbasis baterai.

4. Keamanan

- Mendukung secure boot dan flash encryption untuk melindungi firmware.
- Dilengkapi dengan akselerator kriptografi untuk AES, SHA, RSA, dan ECC, serta generator bilangan acak (RNG).

5. Aplikasi

ESP32 banyak digunakan pada sistem: Smart Home, Industrial Automation, Smart Grid, Smart Agriculture, Healthcare, hingga *IoT* Sensor Hub. Dalam konteks penelitian ini, ESP32 berperan sebagai pengendali utama (main controller) yang menghubungkan sensor PZEM-004T, menampilkan hasil di LCD 20x4, serta mengirimkan data ke webserver monitoring tiga fasa.

2.1.8 Power Supply Unit (PSU) 12V

PSU 12V yang digunakan pada prototipe ini merupakan Regulated AC Power Adapter dengan output 12V DC / 2A dan daya maksimum 24W. Unit ini berfungsi sebagai sumber daya utama yang menyalurkan tegangan stabil ke seluruh rangkaian, termasuk mikrokontroler, sensor, dan modul komunikasi. Pemilihan PSU jenis regulated adaptor dilakukan untuk memastikan kestabilan tegangan meskipun terjadi variasi pada beban maupun tegangan input.



Gambar 2. 16 Regulated AC Power Adapter 12 V

Spesifikasi teknis PSU 12V (28-19376):

Input:

- Tegangan: 100 – 240V AC (rentang 90 – 264V AC).
- Frekuensi: 50/60Hz (rentang 47 – 63Hz).
- Arus maksimum: 0.6A.
- Inrush current: 35A maksimum pada cold start di 240V AC.
- AC leakage current: 0.25mA maksimum pada input 240V AC.

Output:

- Tegangan nominal: 12V DC.
- Arus maksimum: 2A.
- Daya output: 24W.
- Regulasi tegangan: $\pm 1\%$ (line regulation) dan $\pm 3\%$ (load regulation).
- Ripple & noise: 120 mVp-p (20 MHz bandwidth, dengan kapasitor elektrolit 10 μ F + keramik 0.1 μ F).

Waktu Respon:

- Turn on delay: ≤ 2 detik pada 115V AC.
- Rise time: ≤ 40 ms.
- Hold up time: ≥ 5 ms pada full load.

Efisiensi:

PSU ini memiliki efisiensi rata-rata 87.4% pada beban 25%, 50%, 75%, dan 100%. Konsumsi tanpa beban sangat rendah, hanya $\leq 0.1W$, sehingga sesuai standar Energy Star level VI .

Kondisi Operasional:

- Suhu operasi: 0°C hingga 40°C pada beban penuh.
- Suhu penyimpanan: -40°C hingga 85°C.
- Kelembaban relatif: 5% – 95% RH.

Dimensi dan Mekanis:

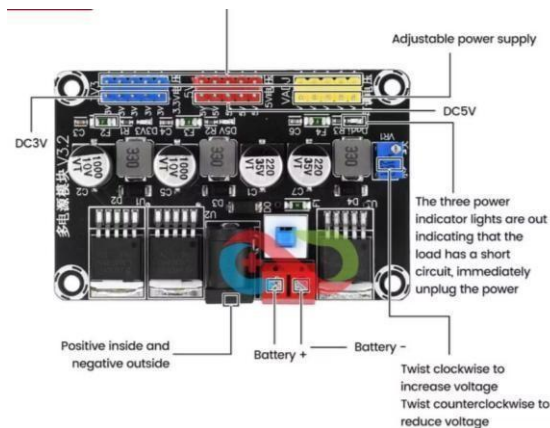
- Ukuran: $82.4 \times 43.7 \times 30.3$ mm.
- Panjang kabel: 1.2 m.
- Plug DC: $5.5 \times 2.1 \times 12$ mm.
- Input connector: 2 pin plug.

Dalam penelitian ini, PSU 12V digunakan untuk:

- Menyediakan suplai daya utama yang stabil bagi ESP32 dan Arduino Mega 2560.
- Mengalirkan energi ke modul PZEM-004T, LCD 20x4, dan modul komunikasi.
- Mendukung pengoperasian buck converter (LM2596) yang kemudian menurunkan tegangan menjadi 5V atau 3.3V sesuai kebutuhan komponen tertentu.

2.1.9 Buck Converter LM2596

LM2596 adalah regulator switching step-down (buck converter) monolitik yang berfungsi menurunkan tegangan DC input yang lebih tinggi menjadi tegangan DC output yang lebih rendah dengan efisiensi tinggi. LM2596 mampu menyuplai arus hingga 3A pada berbagai tegangan output tetap (3.3V, 5V, 12V) maupun versi adjustable dengan rentang 1.2V hingga 37V (Texas Instrumen, 2023).



Gambar 2. 17 Buck Converter LM2596

Spesifikasi Utama LM2596:

- Tegangan input: hingga 40V.
- Arus output maksimum: 3A.
- Frekuensi switching internal: tetap 150 kHz.
- Efisiensi: hingga 90% pada kondisi optimal.
- Versi output: fixed (3.3V, 5V, 12V) dan adjustable.
- Proteksi: thermal shutdown dan current limit.
- Konsumsi arus standby: sangat rendah, sekitar 80 μ A.
- Kebutuhan komponen eksternal: hanya 4 komponen utama (induktor, diode, input/output capacitor).

Kelebihan LM2596:

- Efisiensi tinggi – jauh lebih hemat daya dibandingkan regulator linear, sehingga lebih cocok untuk aplikasi *IoT* yang memerlukan suplai stabil.
- Ukuran kompak – frekuensi switching 150 kHz memungkinkan penggunaan kapasitor dan induktor dengan ukuran lebih kecil.
- Proteksi internal – dilengkapi proteksi panas berlebih dan

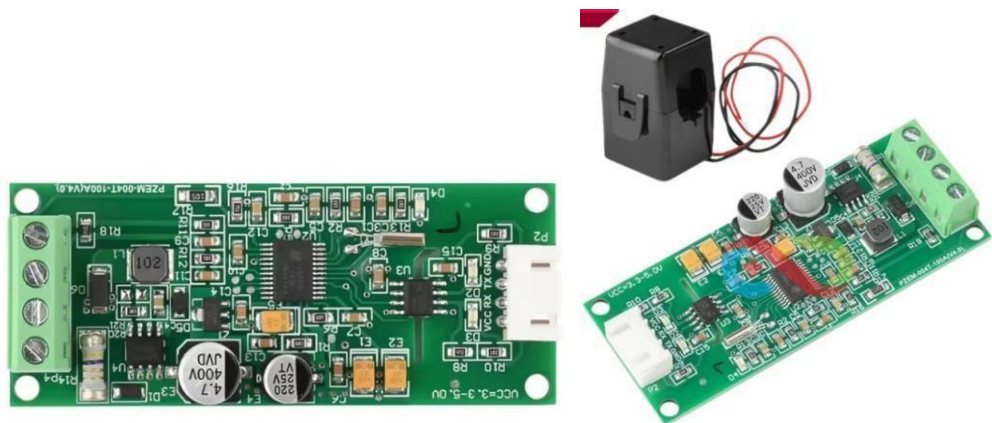
pembatas arus, menjadikannya aman digunakan pada sistem kritis.

- Mudah diaplikasikan – pinout sederhana dan hanya memerlukan sedikit komponen tambahan membuatnya populer di berbagai modul DC-DC converter siap pakai.

2.10 Sensor PZEM-004T V4.0

PZEM-004T V4.0 merupakan modul komunikasi AC yang dirancang khusus untuk pengukuran parameter listrik pada sistem distribusi. Modul ini digunakan untuk mengukur tegangan AC, arus, daya aktif, frekuensi, faktor daya, serta energi aktif. Modul tidak dilengkapi dengan tampilan (display), sehingga seluruh data hasil pengukuran dibaca melalui antarmuka TTL dengan dukungan komunikasi RS485 berbasis protokol Modbus-RTU (Peacefair Electronic Co., 2020). Modul ini tersedia dalam dua varian, yaitu:

- PZEM-004T-10A dengan batas ukur arus hingga 10A (menggunakan built-in shunt).
- PZEM-004T-100A dengan batas ukur arus hingga 100A (menggunakan external transformer).



Gambar 2. 18 Sensor PZEM-004T

Spesifikasi Utama:

Tabel 2. 4 Tabel Spesifikasi Sensor PZEM 400T

Spesifikasi	Tegangan	Arus	Daya Aktif	Faktor Daya (PF)	Frekuensi	Energi Aktif
Rentang pengukuran	80–260 V	0–10A, 0–100A	2,3 kW (10A), 23 kW (100A)	0,00– 1,00	45–65 Hz	0– 9999,99 kWh
Resolusi	0,1 V	0,001 A	0,1 W	0,01	0,1 Hz	1 Wh
Akurasi	±0,5%	±0,5%	±1%	±1%	±0,5%	±0,5%
Catatan	Reset energi dapat dilakukan melalui perangkat lunak					

Selain itu, modul ini dilengkapi dengan alarm beban lebih (over power alarm) yang dapat diprogram, sehingga akan memberikan peringatan ketika daya yang terukur melampaui ambang batas tertentu.

Komunikasi Data:

PZEM-004T V4.0 menggunakan RS485 dengan protokol Modbus-RTU. Parameter komunikasi standar adalah baud rate 9600 bps, 8 data bit, 1 stop bit, tanpa parity. Modul ini mendukung fungsi Modbus seperti:

- Membaca holding register (0x03)
- Membaca input register (0x04)
- Menulis single register (0x06)
- Kalibrasi (0x41)
- Reset energi (0x42)

Melalui sistem register ini, pengguna dapat mengakses nilai tegangan, arus, daya, energi, frekuensi, faktor daya, serta status alarm secara *Real Time*.

Kelebihan:

- Akurasi tinggi (±0,5%) dalam pengukuran parameter kelistrikan.

- Komunikasi fleksibel karena mendukung RS485 sehingga cocok untuk sistem monitoring jarak jauh.
- Mendukung kalibrasi perangkat lunak, sehingga memudahkan penyesuaian ulang.
- Cocok untuk aplikasi monitoring gardu distribusi karena dapat membaca multi-parameter secara simultan dan memberikan alarm ketika beban melebihi batas aman.

2.11 LCD (*Liquid Cristal Display*) 20×4

LCD (Liquid Cristal Display) adalah modul tampilan karakter berbasis teknologi *Liquid Crystal Display (LCD)* yang mampu menampilkan hingga 80 karakter dalam format 20 kolom × 4 baris. Modul ini menggunakan controller HD44780 yang sangat populer dalam sistem mikrokontroler, sehingga kompatibel dengan berbagai *platform*, termasuk Arduino maupun ESP32 (Handson Technology, 2008).

LCD ini menggunakan *STN (Super Twisted Nematic)* dengan warna tampilan karakter hitam di atas latar belakang hijau-kuning, serta dilengkapi *LED backlight* sehingga tetap terbaca pada kondisi cahaya rendah. Sudut pandang utama adalah pukul 6:00 (vertikal bawah), yang berarti layar paling jelas dilihat dari arah depan bawah.



Gambar 2. 19 LCD (Liquid Crystal Display) 20×4

Spesifikasi Utama LCD 20x4

- Format Tampilan: 20 karakter $\times$ 4 baris
- Tipe LCD: STN, yellow-green background, black character
- Backlight: LED (Yellow/Green)
- Metode drive: 1/16 duty, 1/5 bias
- Tegangan operasi logika (VDD): 4,5 – 5,5 V (standar 5 V)
- Tegangan penggerak LCD (VDD-V_o): $\pm 4,7$ V
- Arus konsumsi tanpa backlight: 2 – 5 mA
- Arus konsumsi dengan backlight: 72 – 80 mA
- Suhu operasi: -20 °C hingga $+60$ °C

Karakteristik LCD (Liquid Cristal Display) 20x4Y

1. Antarmuka Data

LCD 20x4 mendukung komunikasi data 4-bit maupun 8-bit paralel, menggunakan pin *RS* (*Register Select*), *RW* (*Read/Write*), dan *E* (*Enable*). Hal ini memberikan fleksibilitas dalam integrasi dengan berbagai jenis mikrokontroler.

2. Konsumsi Daya

Modul ini hemat energi dengan konsumsi arus hanya 2–5 mA tanpa backlight, dan sekitar 72–80 mA dengan backlight aktif.

3. Fungsi dalam Sistem Monitoring

Pada penelitian ini, LCD 20x4 digunakan sebagai tampilan lokal. Layar ini akan menampilkan informasi parameter listrik secara *Real Time*, seperti:

- Tegangan (V) Arus (A) Daya (W) Energi (kWh)
- Frekuensi (Hz) Faktor daya (PF)

Dengan kemampuannya menampilkan 4 baris data sekaligus, LCD 20x4 memungkinkan penyajian informasi dari tiga fasa (R, S, T) beserta total daya secara ringkas. Hal ini menjadikannya komponen vital untuk pemantauan lokal di lapangan, sebelum data dikirimkan ke *webserver* melalui ESP32.

2.2 Penelitian yang Relevan

Dalam penelitian ini, penulis melakukan kajian pustaka terhadap berbagai penelitian terdahulu yang memiliki relevansi dengan topik yang dibahas. Sumber referensi yang digunakan mencakup jurnal ilmiah, artikel, buku, serta karya ilmiah lain seperti skripsi yang mendukung penyusunan penelitian ini. Penelitian terkait monitoring gardu distribusi berbasis *Internet of Things (IoT)* telah banyak dilakukan sebelumnya dan menjadi rujukan dalam penyusunan tugas akhir ini. Beberapa penelitian yang relevan diantaranya:

- 2.2.1 (Pratama Rizal, 2023) melakukan penelitian berjudul “Rancang Bangun Alat Monitoring Arus dan Tegangan Berbasis Mikrokontroler pada Studi Kasus Prototype Gardu Distribusi PLN”. Sistem yang dikembangkan memanfaatkan mikrokontroler Arduino dan NodeMCU ESP8266 sebagai pengolah dan pengirim data, serta aplikasi Android sebagai antarmuka pengguna (Human Machine Interface). Parameter utama yang dimonitor adalah arus dan tegangan keluaran gardu distribusi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat mampu membaca data dengan tingkat akurasi tinggi, selisih pengukuran arus hanya sekitar 0,03 A dibandingkan alat ukur standar (avometer). Selain itu, sistem juga dilengkapi notifikasi *Real Time* ketika terjadi kondisi abnormal, seperti hilangnya arus pada salah satu fasa.
- 2.2.2 (Samsinar dkk., 2024) dalam penelitiannya “Indikator Gangguan Trafo Distribusi Menggunakan *IoT* di PT PLN Unit Induk Jakarta Raya” berfokus pada percepatan deteksi lokasi gangguan di jaringan distribusi PLN. Penelitian ini mengimplementasikan sensor arus dan tegangan yang terhubung ke perangkat *IoT* untuk memantau kondisi trafo distribusi dan mengirimkan data ke pusat monitoring. Hasil penelitian menunjukkan adanya peningkatan signifikan dalam kecepatan deteksi lokasi gangguan, dari sebelumnya membutuhkan ± 30 menit menjadi hanya ± 15 menit pada jarak antar gardu 1,3 km. Hal ini sangat penting bagi PLN untuk menekan kerugian akibat energi tidak terjual dan mempercepat proses pemulihan layanan.
- 2.2.3 (Prasetyo dkk., 2020) memperkenalkan Distributed Transformer Management System (DTMS) dalam penelitian berjudul “Sistem Monitoring Trafo

Distribusi PT PLN (Persero) Berbasis *IoT*". DTMS dirancang sebagai sistem manajemen aset skala besar untuk mendukung PLN dalam menjaga performa trafo distribusi. Sistem ini terdiri dari embedded system untuk pengukuran parameter (tegangan, arus, suhu), modul komunikasi RF 2,4 GHz dan GPRS untuk pengiriman data, serta web service RESTful untuk pengelolaan data yang ditampilkan melalui antarmuka web. Fitur utama DTMS adalah early warning system yang dapat mendeteksi anomali seperti overload, overvoltage, blackout, dan kenaikan suhu berlebih. Keunggulan penelitian ini adalah integrasinya dengan decision support system (DSS) yang membantu pengambilan keputusan dalam optimalisasi trafo.

- 2.2.4 (Falakh dkk., 2024) dalam penelitiannya "Sistem Monitoring Tegangan dan Arus pada Gardu Distribusi Berbasis *IoT*" merancang sistem berbasis mikrokontroler ESP8266 dengan sensor tegangan dan arus. Data dikirimkan ke server berbasis web untuk ditampilkan dalam bentuk tabel maupun grafik sehingga memudahkan pengguna dalam memahami kondisi gardu distribusi. Sistem ini mampu menampilkan data secara *Real Time*, dengan delay yang relatif rendah berkat pemanfaatan komunikasi berbasis Wi-Fi.
- 2.2.5 (Ridho dkk., 2023) meneliti "Perancangan Monitoring Arus dan Tegangan Pada Trafo Distribusi Berbasis *Internet of Things (IoT)* Di PT PLN (Persero) ULP Medan Baru" dengan memanfaatkan sensor suhu dan arus yang dikombinasikan dengan modul GSM untuk komunikasi data. Sistem ini mampu mengirimkan notifikasi otomatis kepada pengguna ketika terjadi kenaikan suhu berlebih atau arus melebihi ambang batas. Penelitian ini menunjukkan bagaimana *IoT* dapat diintegrasikan dengan sistem notifikasi berbasis SMS atau aplikasi untuk mendukung pemeliharaan preventif.

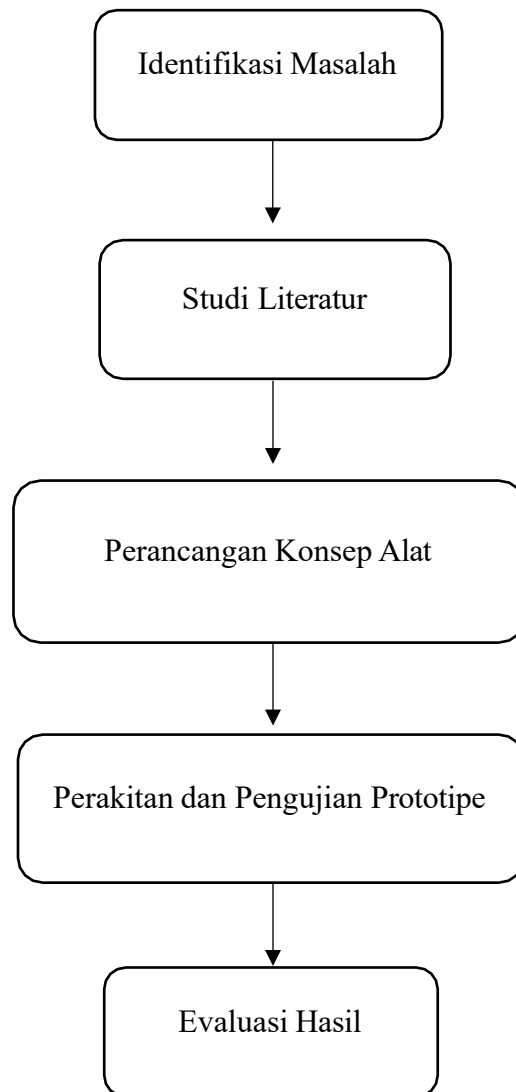
Tabel 2. 5 Penelitian yang Relevan

No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
1.	“Rancang Bangun Alat Monitoring Arus dan Tegangan Berbasis Mikrokontroler pada Studi Kasus Prototype Gardu Distribusi PLN” (Pratama Rizal, 2023)	Belum tersedia sistem monitoring prototipe sederhana untuk gardu distribusi	Arduino + NodeMCU ESP8266, sensor arus dan tegangan, antarmuka Android (HMI)	Akurasi tinggi (selisih pengukuran 0,03 A), notifikasi <i>Real Time</i> saat arus hilang	Penelitian ini fokus hanya pada pengukuran arus dan tegangan, belum ada sistem deteksi dini gangguan yang komprehensif, sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut.
2.	“Indikator Gangguan Trafo Distribusi Menggunakan <i>IoT</i> di PT PLN UID Jakarta Raya”	Deteksi gangguan trafo masih lambat (± 30 menit)	<i>IoT</i> berbasis sensor arus dan tegangan dengan integrasi sistem indikator PLN	Deteksi gangguan dipercepat menjadi ± 15 menit, akurasi lokasi lebih baik	Penelitian ini hanya berfokus pada percepatan deteksi lokasi gangguan, belum mencakup prototipe gardu distribusi,

	(Samsinar dkk., 2024)				sehingga perlu penelitian lebih lanjut.
3.	“Sistem Monitoring Trafo Distribusi PT PLN (Persero) Berbasis <i>IoT</i> (DTMS)” (Prasetyo dkk., 2020)	Sulitnya memantau kondisi ribuan trafo distribusi PLN	Embedded system, sensor arus-tegangan-suhu, komunikasi RF 2,4 GHz + GPRS, RESTful Web Service	Early warning system untuk overload, overvoltage, blackout, suhu berlebih; integrasi DSS	Penelitian ini terlalu kompleks, mahal, dan skala besar; sulit diterapkan sebagai prototipe kecil tanpa metering, penelitian ini hanya dapat dijadikan acuan untuk penelitian yang akan dilakukan.
4.	“Sistem Monitoring Tegangan dan Arus pada Gardu Distribusi Berbasis	Belum ada sistem monitoring berbasis <i>IoT</i> sederhana untuk gardu distribusi	ESP8266, sensor arus dan tegangan, komunikasi Wi-Fi, server web	Data <i>Real Time</i> ditampilkan dalam tabel/grafik, delay rendah	Penelitian ini hanya monitoring tegangan dan arus, belum mendukung deteksi dini

	<i>IoT</i> (Falakh dkk., 2024)				gangguan, sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut.
5.	“Perancang an Monitoring Arus dan Tegangan Pada Trafo Distribusi Berbasis <i>Internet of Things</i> (<i>IoT</i>) Di PT PLN (Persero) ULP Medan Baru” (Ridho dkk., 2023)	Keterlambatan identifikasi kondisi abnormal pada trafo	Sensor suhu dan arus, modul GSM, notifikasi otomatis via SMS/aplikasi	Sistem memberi peringatan otomatis saat suhu/arus melebihi batas	Penelitian ini fokus pada suhu dan arus saja, tanpa prototipe gardu distribusi utuh dan tanpa integrasi ke sistem monitoring <i>Real Time</i> berbasis <i>IoT</i>

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2. 20 Kerangka Pemikiran

Sesuai dengan kerangka pemikiran penulis, sebelum dilakukan pembuatan prototipe diawali dengan identifikasi masalah, yaitu keterbatasan monitoring kondisi gardu distribusi, khususnya pada gardu tiang tanpa metering, yang sering mengakibatkan keterlambatan deteksi maupun penanganan gangguan. Setelah itu dilakukan studi literatur untuk memperoleh landasan teori yang mendukung, meliputi kajian tentang mikrokontroler, sensor arus dan tegangan, modul komunikasi *IoT*, serta standar konstruksi gardu distribusi menurut PLN, sekaligus meninjau penelitian-penelitian terdahulu sebagai referensi dalam menentukan metode dan komponen. Selanjutnya, dilakukan perancangan konsep alat dengan menentukan komponen utama seperti sensor PZEM-004T, mikrokontroler ESP32 atau Arduino Mega 2560, LCD 20x4 untuk tampilan lokal, serta modul komunikasi berbasis webserver, yang dirancang dalam bentuk skema rangkaian dan alur komunikasi data. Tahapan berikutnya adalah perakitan dan pengujian prototipe guna memastikan alat berfungsi sesuai dengan rancangan, meliputi pengujian akurasi pembacaan arus dan tegangan, kestabilan komunikasi, serta kemampuan sistem mendeteksi kondisi abnormal. Terakhir, dilakukan evaluasi hasil dengan membandingkan kinerja alat terhadap standar pengukuran, menilai kehandalan sistem dalam memberikan data *Real Time*, dan mengevaluasi efektivitasnya dalam mendukung monitoring gardu distribusi sehingga dapat ditarik kesimpulan mengenai kelebihan, keterbatasan, dan peluang pengembangan di masa mendatang.