

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

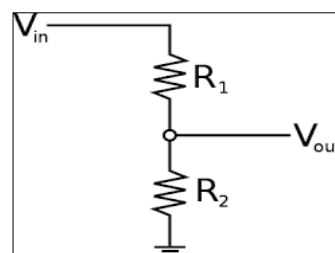
2.1 Landasan Teori Terkait Desain

Sebagai pendukung dalam pengerjaan rancangan ini, penulis mencantumkan beberapa referensi landasan teori yang relevan terhadap perancangan ini antara lain:

2.1.1. *Sensor Tegangan / Voltage Divider*

Sensor tegangan merupakan perangkat atau rangkaian yang dirancang untuk mengukur besarnya potensial listrik (tegangan) pada suatu sirkuit, baik arus bolak-balik (AC) maupun arus searah (DC). Dalam konteks proyek ini, sensor tegangan digunakan untuk mendeteksi nilai tegangan pada *power supply* 48VDC *multiplexer* di GI 150kV Data Center, di mana dalam pengukuran ini sensor digunakan untuk menurunkan tegangan dari rangkaian *power supply* menjadi tegangan yang dapat diterima oleh mikrokontroler. Sensor tegangan diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32, yang memiliki Analog-to-Digital Converter (ADC) dengan rentang input terbatas (0-3.3V), sehingga memerlukan penyesuaian skala untuk mengukur tegangan tinggi secara aman (Satrio et al., n.d.)

Prinsip dasar sensor tegangan didasarkan pada hukum Ohm dan pembagi tegangan (voltage divider), yang terdiri dari dua resistor seri (R_1 dan R_2) untuk membagi tegangan input (V_{in}) menjadi tegangan output (V_{out}) yang lebih rendah rentang ADC (Alexander et al., 2013). Hal ini mencegah kerusakan pada mikrokontroler dan memastikan akurasi pengukuran..



Gambar 2. 1 Rangkaian Pembagi Tegangan / Voltage Divider

Rumus dasar pembagi tegangan adalah:

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Di mana:

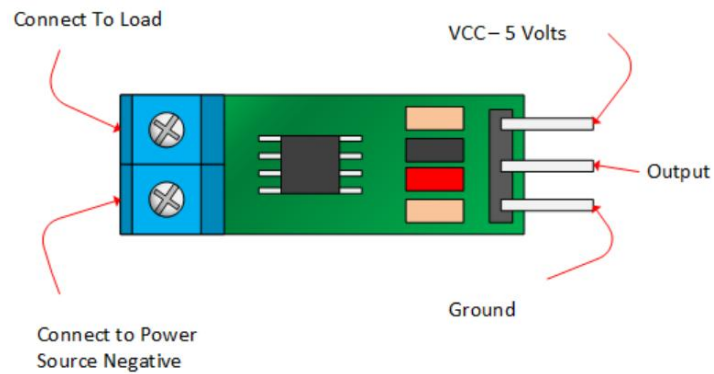
- V_{out} : Tegangan output yang akan dibaca oleh ADC
- V_{in} : Tegangan yang diukur (misalnya, 48VDC).
- R_1 : Resistor atas (terhubung ke Vin).
- R_2 : Resistor bawah (terhubung ke ground).

Menurut (Nahvi & Edminister, 2003) Rangkaian pembagi tegangan mempunyai fungsi yang krusial dalam menghubungkan sumber tegangan DC dengan tegangan tinggi ke mikrokontroler yang memerlukan tegangan rendah seperti ESP32, sehingga memungkinkan pengukuran yang aman dengan tingkat akurasi yang tinggi. Ini menekankan bahwa kalibrasi software diperlukan untuk mengkompensasi *non-linearitas* ADC ESP32, yang memiliki resolusi 12-bit (0-4095) tetapi rentan terhadap noise. Akurasi sensor tegangan dipengaruhi oleh faktor seperti toleransi resistor (idealnya 1%), suhu, dan noise. Dalam sistem IoT, pembacaan ADC dikonversi menjadi nilai tegangan aktual melalui rumus:

$$V_{read} = \left(\frac{ADC_{read}}{4095} \times VCC \right) \times \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

2.1.2. Sensor Arus ACS712

Sensor arus ACS712 merupakan perangkat pengukur arus listrik non-invasif yang dikembangkan oleh Allegro Microsystems, dirancang untuk mendeteksi arus searah (DC) maupun arus bolak-balik (AC) dengan rentang pengukuran hingga 30A, tergantung varian (5A, 20A, atau 30A). Dalam konteks proyek ini, ACS712 digunakan untuk mengukur arus pada *power supply* 48VDC *multiplexer* di GI 150kV Data Center. Sensor ini diintegrasikan dengan mikrokontroler seperti ESP32 melalui pin ADC, di mana output analognya (2.5V pada arus nol) dikonversi menjadi nilai digital untuk pembacaan secara *real-time* (Allegro Microsystems, 2018)



Gambar 2. 2 Konfigurasi Pin sensor ACS712

ACS712 berfungsi berdasarkan **efek Hall** (Sampebatu et al., 2022), di mana konduktor internal sensor (*chip Hall*) ditempatkan di sekitar jalur arus (IP+ dan IP-). Saat arus mengalir melalui jalur tersebut, ia menghasilkan medan magnet proporsional dengan besar arus (I). Medan magnet ini memengaruhi muatan pembawa dalam *chip Hall*, menghasilkan tegangan output (V_{out}) yang sebanding dengan arus input.

Rumus dasar hubungan output adalah:

$$V_{out} = (V_{CC} \times 0,5) + (S \times I)$$

Di mana:

- V_{out} : Tegangan output (tipikal 0-5V, offset 2.5V pada arus nol)
- V_{CC} : Tegangan catu sensor (5V atau 3.3V).
- S : Sensitivitas sensor (misalnya, 185mV/A untuk varian 5A, 100mV/A untuk 20A, atau 66mV/A untuk 30A).
- I : Arus yang diukur (positif atau negatif untuk arah aliran)

Untuk varian 5A yang umum digunakan pada aplikasi 48VDC (arus tipikal <5A), offset 2.5V memungkinkan pengukuran bidirectional ($\pm 5A$). Output analog ini dibaca oleh ADC ESP32, yang kemudian dikalibrasi untuk menghitung arus aktual:

$$I = \frac{(V_{out} - 2,5)}{S}$$

Tabel 2. 1 Spesifikasi Sensor Arus ACS712

	5A Module	20A Module	30A Module
Supply Voltage (VCC)	5Vdc Nominal	5Vdc Nominal	5Vdc Nominal
Measurement Range	-5 to +5 Amps	-20 to +20 Amps	-30 to +30 Amps
Voltage at 0A	VCC/2 (nominally 2.5Vdc)	VCC/2 (nominally 2.5Vdc)	VCC/2 (nominally 2.5Vdc)
Scale Factor	185 mV per Amp	100 mV per Amp	66 mV per Amp
Chip	ACS712ELC-05A	ACS712ELC-10A	ACS712ELC-30A

2.1.3. Catu Daya (Power Supply) 48VDC

Catu daya 48 VDC berfungsi sebagai sistem suplai utama untuk peralatan kontrol dan telekomunikasi di gardu induk, gardu hubung, maupun key point jaringan distribusi. Sistem ini menjamin ketersediaan daya arus searah (DC) yang andal dan kontinu, bahkan saat sumber utama AC padam (PT PLN (Persero), 2021). Catu daya ditempatkan terpisah dari perangkat utama seperti server, HMI, gateway, dan peripheral lainnya. Apabila penempatan terpisah tidak dimungkinkan, maka peralatan yang diletakkan bersama sistem catu daya harus memiliki ketahanan suhu tinggi ($> 60^{\circ}\text{C}$).

Berdasarkan Tabel 7 SPLN S3.001:2021, kebutuhan sumber catu daya di tiap lokasi adalah sebagai berikut:

Tabel 2. 2 Kebutuhan Catu Daya pada Infrastruktur Ketenagalistrikan

No	Lokasi	Tegangan Power Supply (-10% s.d $+10\%$)
1	Gardu Induk (GI/GITET)	110 VDC, 48 VDC, 24 VDC, 380/220 VAC
2	Gardu Hubung/Distribusi (GH/GD)	48 VDC
3	Jaringan SUTM	48 VDC
4	Pembangkit 20 kV	110 VDC dan 48 VDC

Spesifikasi besaran nominal toleransi serta sistem pentanahan mengacu pada SNI 04-7021.2.1-2004 tentang Peralatan dan Sistem Telekontrol – Bagian 2: Kondisi Operasi – Seksi 1 (Catu Daya dan Kompatibilitas Elektromagnetik) Adalah sebagai berikut:

Tabel 2. 3 Spesifikasi Catu Daya 48VDC

Parameter	Nilai / Spesifikasi
Rectifier	48 VDC
Tegangan Input	220/380 VAC $\pm$ 10 %
Tegangan Output	48 VDC $\pm$ 10 %
Pentanahan	Floating atau Positive Grounding (<i>menyesuaikan kondisi</i>)

Sistem 48 VDC wajib dilengkapi baterai cadangan dengan waktu backup minimal:

- a. GITET : 8 jam
- b. GI : 8 jam
- c. GH : 8 jam
- d. GT : 8 jam
- e. Key Point (LBS, Recloser, Fault Interrupter) : 8 jam

Kapasitas baterai ditentukan berdasarkan waktu backup di atas. Untuk key point, kapasitas minimum baterai adalah 17 Ah, dengan ketentuan sesuai SPLN D3.033-1, D3.033-2, dan D3.033-3. Baterai direkomendasikan menggunakan Battery Management System (BMS) yang mendukung protokol Modbus untuk monitoring status dan kapasitas (Susanto, 2018).

2.1.4. Multiplexer Siemens Connection Master

Multiplexer Siemens Connection Master (Connection Master, 2013), adalah sebuah platform akses multiservice yang dirancang untuk mendukung berbagai jenis layanan komunikasi penting seperti voice, data, SCADA, dan teleprotection. Perangkat ini berfungsi sebagai solusi hybrid

antara jaringan lama (legacy TDM/PDH/SDH) dan jaringan modern berbasis IP, sehingga memungkinkan transisi atau migrasi infrastruktur komunikasi secara bertahap tanpa harus mengganti seluruh perangkat lama. Dengan kemampuan mengelola berbagai protokol komunikasi dalam satu platform, *Connection Master* menjadi solusi yang efisien dan andal untuk aplikasi industri yang memerlukan performa tinggi dan waktu tanggap sangat rendah, seperti sistem proteksi tenaga listrik atau sistem kendali jarak jauh (*teleprotection*).



Gambar 2. 3 Multiplexer Siemens Connection Master

Dari sisi arsitektur, Connection Master dirancang dengan struktur modular dan fleksibel menggunakan bus *point-to-point* berkecepatan tinggi. Desain ini memungkinkan sistem untuk berkembang dari teknologi PDH menuju SDH hingga ke jaringan berbasis paket (IP) sesuai kebutuhan masa depan. Modul utama yang tersedia meliputi antarmuka *trunk SDH STM-1/4/16*, *Ethernet 1GE/10GE*, serta fitur *cross-connection 64 kbit/s* untuk layanan TDM klasik. Selain itu, sistem ini memiliki fungsi *Power-over-Ethernet (PoE)*, mendukung redundansi modul kritis untuk menjamin keandalan operasi, dan mampu menangani aplikasi dengan latensi yang sangat rendah.

Dalam hal pengelolaan jaringan, *Connection Master* menawarkan dua metode utama, yaitu melalui *Multiservice Manager* berbasis *GUI Windows* untuk pengaturan lokal, serta *Command Line Interface (CLI)* yang dapat diakses via SSH atau USB untuk konfigurasi tingkat lanjut. Lebih lanjut, sistem ini dapat diintegrasikan ke dalam *Network Management System (NMS)* milik DNWP yang memiliki fitur lengkap seperti tampilan

topologi jaringan, manajemen gangguan (*fault management*), manajemen konfigurasi dan performa, serta provisioning sirkuit end-to-end. Melalui NorthBound Interface (NBI) berbasis SNMP, *Connection Master* juga dapat dihubungkan ke sistem NMS pihak ketiga, memberikan fleksibilitas tinggi bagi pengguna yang memiliki infrastruktur campuran.

Dari sisi penerapan, *Connection Master* dapat digunakan pada berbagai konfigurasi jaringan industri. Misalnya, pada *meshed critical networks*, sistem ini menyediakan koneksi SCADA dan *teleprotection* dengan proteksi lintasan ganda. Pada *metro ring* dan *hybrid ring*, *Connection Master* menggabungkan antarmuka SDH dan IP dalam satu node, memungkinkan transportasi data kritikal dan IP secara simultan tanpa transformasi data. Dalam aplikasi TDM over IP, perangkat ini mendukung transmisi E1 atau VC-12 melalui jaringan paket dengan efisiensi tinggi. Selain itu, *Connection Master* juga banyak digunakan pada arsitektur SCADA *multipoint-to-point*, baik terpusat maupun terdistribusi, dengan dukungan mekanisme proteksi jalur dan komunikasi RS232 yang andal.

Setiap sistem *Connection Master* dilengkapi dengan berbagai core unit dan interface unit, seperti SDH STM-1/4/16, Packet Trunk 10G, Ethernet, E1/T1, VF/E&M, FXS/FXO, hingga Optical Teleprotection C37.94. Tersedia pula berbagai pilihan subrack (6-slot, 8+8-slot, dan 16-slot) serta power unit DC 24–110V yang kompatibel dengan lingkungan telekomunikasi industri. Keseluruhan desain ini menunjukkan orientasi sistem terhadap keandalan, modularitas, dan kompatibilitas tinggi dengan produk lama seperti Nokia Dynanet dan FMX2, sehingga pengguna dapat melakukan modernisasi jaringan tanpa kehilangan fungsi penting yang sudah ada.

2.1.5. *Internet of Things (IoT)*

Internet of Things (IoT) adalah konsep teknologi yang menghubungkan perangkat fisik (seperti sensor, aktuator, dan peralatan rumah tangga) dengan jaringan internet untuk mengumpulkan, bertukar, dan menganalisis data secara otomatis, menciptakan ekosistem cerdas antara

dunia fisik dan digital. Konsep IoT pertama kali diperkenalkan oleh Kevin Ashton pada 1999 dalam konteks RFID, tetapi berkembang pesat sejak 2010-an dengan kemajuan sensor murah, konektivitas 5G, dan cloud computing. IoT mencakup miliaran device (diprediksi 75 miliar pada 2025 oleh Statista), dengan aplikasi di sektor energi, kesehatan, dan manufaktur. Dalam konteks proyek ini, IoT digunakan untuk pemantauan real-time pasokan daya DC 48VDC multiplexer di GI 150kV Data Center, mendeteksi anomali seperti under-voltage ($<44V$) atau zero-current ($<0.1A$), dan mengintegrasikan sistem monitoring jarak jauh untuk respons cepat (Rizal et al., n.d.). Tantangan meliputi keamanan siber dan skalabilitas, yang diatasi melalui enkripsi dan *edge computing*.

Prinsip kerja *Internet of Things (IoT)* melalui arsitektur berlapis yang mencakup perception layer (pengumpulan data), network layer (transmisi), middleware layer (pemrosesan), dan application layer (visualisasi/respons). Sensing → transmission → analysis → actuation.

a. Perception Layer:

Dalam hal ini melibatkan sensor (misalnya, ACS712 untuk arus) dan aktuator (buzzer untuk alert) yang mengumpulkan data lingkungan. Data analog dikonversi menjadi digital melalui ADC, dengan resolusi tergantung device (misalnya, 12-bit pada ESP32).

b. Network Layer:

Menggunakan protokol ringan seperti MQTT (berbasis publish-subscribe untuk efisiensi bandwidth rendah) atau CoAP (untuk constrained devices). MQTT, misalnya, memungkinkan device publish data ke topic

c. Middleware dan Application Layer:

Pemrosesan di edge (lokal pada device seperti ESP32) atau cloud (AWS IoT, Azure) menggunakan AI/ML untuk analisis (misalnya, deteksi anomali via threshold atau anomaly detection algorithm). Keamanan melalui protokol seperti TLS untuk enkripsi *end-to-end*, autentikasi, dan blockchain untuk traceability.

2.1.6. Konsep Internet of Things (IoT) dalam Monitoring Infrastruktur Ketenagalistrikan

Konsep Internet of Things (IoT) dalam monitoring infrastruktur ketenagalistrikan merujuk pada integrasi jaringan perangkat terhubung (seperti sensor, aktuator, dan gateway) dengan internet untuk memantau, menganalisis, dan mengoptimalkan sistem kelistrikan secara *real-time* (Wijayanto et al., n.d.). IoT memungkinkan transformasi dari grid konvensional menjadi smart grid yang adaptif, di mana data dari aset seperti trafo, saluran transmisi, dan substation dikumpulkan secara otomatis untuk mendeteksi anomali, memprediksi kegagalan, dan meningkatkan efisiensi distribusi daya. Di Indonesia, konsep ini relevan dengan tantangan seperti kehilangan daya (*non-technical losses*) hingga 10% dan peningkatan permintaan energi (PLN, 2022), di mana IoT dapat mengurangi *downtime* hingga 30% melalui pemantauan proaktif.

Prinsip dasar IoT di sektor ini adalah penggunaan *edge computing* untuk pemrosesan lokal dan *cloud analytics* untuk wawasan global, selaras dengan visi smart grid IEEE. Menurut (Irsyad Baihaqi Janwar et al., n.d.), dengan IoT memungkinkan penyediaan sistem terintegrasi *cyber* pada jaringan listrik, di mana data *real-time* dari sensor yang tersebar mendukung deteksi dini adanya gangguan serta pengelolaan jaringan, sehingga meningkatkan keandalan jaringan listrik modern.

Konsep IoT diterapkan luas untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi grid, dengan contoh antara lain:

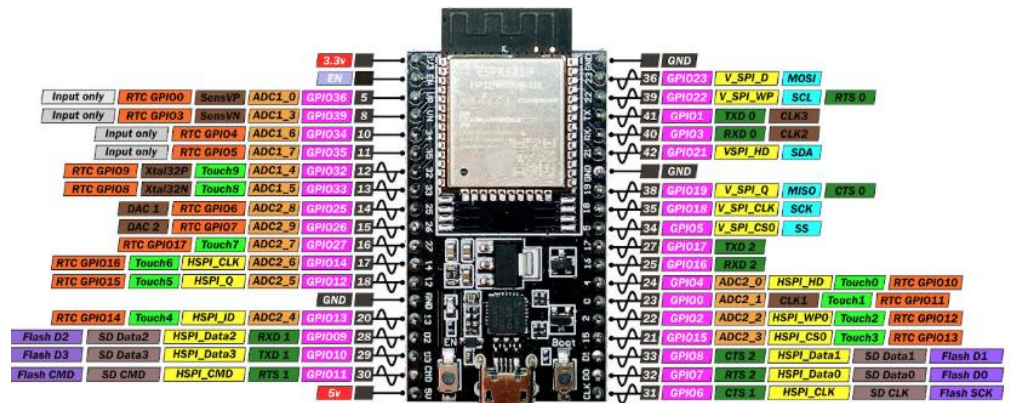
- a. Sensor IoT memantau tegangan/arus di gardu induk (seperti GI 150kV), mendeteksi zero-current atau overload secara real-time, dan memicu isolasi otomatis via aktuator. Di AS, sistem seperti GE's Grid IQ menggunakan IoT untuk mengurangi outage 25%.
- b. Analisis data IoT dari vibrasi dan suhu trafo memprediksi kegagalan, menghemat biaya hingga 40% (McKinsey, 2021). Aplikasi di Eropa (misalnya, Enel Group) menggunakan drone IoT untuk inspeksi saluran.

- c. Monitoring konsumsi daya rumah tangga atau panel surya dengan IoT, mengoptimalkan distribusi untuk mengintegrasikan energi terbarukan (seperti PLTS di Indonesia), mengurangi peak load hingga 15% (Wijayanto et al., n.d.).
- d. Di Cina, IoT dengan PMU mendeteksi short-circuit dalam <50ms, mencegah blackout besar. Khan et al. (2020) menekankan, Aplikasi IoT pada *smart grid* menyediakan fasilitas *Automatic Metering Infrastructure* melalui komunikasi dua arah untuk keperluan transaksi energi, dan penanganan gangguan, sehingga meningkatkan keandalan *grid* secara keseluruhan. Hal tersebut menggambarkan peran IoT dalam manajemen permintaan.

Di Indonesia, konsep ini selaras dengan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PLN, yang menargetkan smart grid untuk mendukung transisi energi hijau.

2.1.7. ESP32 Sebagai Platform Mikrokontroler IoT.

ESP32 merupakan platform mikrokontroler *System on Chip (SoC)* yang dikembangkan oleh *Espressif Systems*, dirancang khusus untuk aplikasi *Internet of Things (IoT)* dengan integrasi konektivitas nirkabel, pemrosesan efisien, dan konsumsi daya rendah. Diluncurkan pada 2016, ESP32 menawarkan performa tinggi (*dual-core* hingga 240MHz) dan biaya terjangkau, menjadikannya pilihan populer untuk *prototype IoT* dibandingkan mikrokontroler tradisional seperti Arduino atau STM32. Sebagai platform IoT, ESP32 mendukung *edge computing*, di mana pemrosesan data dilakukan secara lokal sebelum transmisi ke cloud. Dalam ekosistem IoT, ESP32 memfasilitasi integrasi sensor, aktuator, dan protokol seperti MQTT, ideal untuk aplikasi monitoring, otomatisasi, dan smart devices. Menurut (Espressif Systems, 2023), ESP32 menyediakan *platform IoT* andal dengan konektivitas Wi-Fi dan Bluetooth yang tersedia, sehingga memungkinkan konektivitas yang lancar untuk berbagai perangkat terhubung serta dukung mode hemat daya untuk aplikasi berbasis baterai, ini menekankan peranannya sebagai pondasi untuk inovasi IoT global.



Gambar 2. 4 Aristektur ESP32 DevKitC v4

ESP32 banyak diterapkan sebagai mikrokontroler IoT di berbagai domain, memanfaatkan fleksibilitasnya untuk prototype cepat dan *deployment* produksi:

- a. *Smart Home*: Sebagai pusat kontrol untuk lampu pintar (via Zigbee bridge) atau sistem keamanan, ESP32 memantau sensor pintu/jendela dan mengirim pemberitahuan via app mobile.
- b. *Monitoring Lingkungan dan Industri*: Dalam IoT industri, ESP32 mengintegrasikan sensor untuk memantau suhu, kelembaban, atau kualitas udara di pabrik, dengan data dikirim ke cloud seperti ThingSpeak untuk analisis.
- c. *Wearable dan Healthcare*: Bluetooth BLE memungkinkan koneksi ke smartphone untuk *tracking fitness* atau *vital signs*, mendukung aplikasi *telemedicine*.
- d. *Otomotif dan Transportasi*: ESP32 sebagai gateway untuk *telematics*, memantau lokasi kendaraan via GPS dan mengirim data ke server untuk fleet management.

Di aplikasi ketenagalistrikan, seperti monitoring grid, ESP32 membaca sensor arus/tegangan untuk deteksi fault *real-time*. Singh et al. (2022) menekankan, Platform ESP32 memfasilitasi berkembangnya IoT untuk penggunaan di infrastruktur gardu induk, mengintegrasikan berbagai sensor melalui ADC, menggambarkan aplikasinya dalam infrastruktur penting.

Keunggulan utama dari ESP32 diantaranya Adalah:

- a. ADC dan DAC: 12-bit ADC (hingga 18 channel) untuk membaca sensor analog,
- b. Konektivitas: Wi-Fi 802.11 b/g/n (hingga 150Mbps) dan Bluetooth 4.2/BLE untuk protokol IoT seperti HTTP, MQTT, atau WebSocket. Modul RF 2.4GHz memodulasi data digital menjadi sinyal nirkabel.
- c. GPIO dan Interfacing: 34 pin GPIO mendukung PWM, I2C, SPI, UART untuk sensor (misalnya, DHT22 untuk suhu) dan aktuator (relay). Mode low-power (deep sleep $<10\mu\text{A}$) mendukung operasi.
- d. Pemrosesan IoT: Data diproses secara lokal menggunakan library seperti *PubSubClient* untuk MQTT, di mana ESP32 bertindak sebagai *publisher* (pengirim data ke broker) atau *subscriber* (terima perintah). Keamanan melalui WPA3 dan TLS untuk enkripsi. Gupta dan Kumar (2021) menyatakan, Arsitektur *dual-core ESP32* memungkinkan pemrosesan *edge IoT* efisien, mengurangi latensi cloud hingga 50% pada aplikasi *real-time* melalui filtering dan agregasi local, hal tersebut menyoroti efisiensi dalam menangani data stream IoT.

2.1.8. Pentingnya Sistem Monitoring Tegangan dan Arus DC

Sistem monitoring tegangan dan arus DC merupakan mekanisme pengawasan *real-time* terhadap parameter listrik pada jaringan DC, seperti pasokan 48VDC yang umum digunakan dalam infrastruktur telekomunikasi dan peralatan SCADA. Sistem ini melibatkan sensor (misalnya, ACS712 untuk arus dan *voltage divider* untuk tegangan), mikrokontroler (seperti ESP32), dan *platform* IoT untuk deteksi anomali seperti under-voltage ($<44\text{V}$), over-current ($>5\text{A}$), atau zero-current yang menandakan kegagalan koneksi. Menurut (Pratama et al., 2023) pentingnya sistem ini terletak pada kemampuannya mencegah *downtime*, mengoptimalkan efisiensi energi, dan memastikan keselamatan operasional di lingkungan kritis seperti GI 150kV Data Center. Tanpa monitoring, risiko kegagalan sistem bisa mencapai 20-30% akibat fluktuasi DC yang tidak terdeteksi, yang berdampak pada

hilangnya data atau kerusakan perangkat. Menurut (Dian & Vahidnia, 2020), dimana monitoring sistem DC pada infrastruktur ketenagalistrikan sangat penting untuk menjaga keandalan *grid* serta mencegah kegagalan fungsi pada infrastruktur terintegrasi energi terbarukan. Hal tersebut jelas menekankan peran monitoring sebagai pondasi keandalan ketenagalistrikan modern.

Sistem monitoring DC krusial karena sifat DC yang stabil namun rentan terhadap *degradasi gradual*.

Berikut aspek utama pentingnya:

a. Keandalan dan Pencegahan Kegagalan:

Monitoring memungkinkan deteksi dini anomali, seperti penurunan tegangan akibat baterai lemah atau arus nol pada *multiplexer*, mencegah *blackout* lokal. Dalam industri Data Center, *downtime* akibat kegagalan DC bisa merugikan hingga Rp1 miliar per jam (Uptime Institute, 2022). Sistem ini mendukung *predictive maintenance*, di mana data tren (misalnya, $V = IR$ dari hukum Ohm) dianalisis untuk memprediksi umur komponen.

b. Efisiensi Energi dan Optimasi:

Dengan menghitung daya ($P = V \times I$) secara *real-time*, sistem mengidentifikasi inefisiensi seperti kebocoran arus, mengurangi konsumsi energi hingga 15-20% di sistem telekomunikasi. Integrasi IoT memungkinkan *remote adjustment*, seperti *load balancing* pada pasokan 48VDC untuk multiple device.

c. Keselamatan dan Kepatuhan Standar:

Over-voltage (>60V) berisiko korsleting atau kebakaran, sementara *under-current* menandakan isolasi buruk. Monitoring memicu peringatan otomatis (buzzer atau notifikasi MQTT), memastikan kepatuhan dengan standar seperti IEC 62133 untuk baterai DC.

d. Integrasi dengan Sistem Lebih Besar:

Dalam SCADA atau smart grid, data DC dari monitoring diintegrasikan dengan cloud untuk analisis global, mendukung transisi ke energi terbarukan (misalnya, solar DC). (Setiawan et al., n.d.) menyatakan, sistem monitoring arus dan tegangan DC memiliki peran penting pada sistem *hybrid* AC-DC, karena mampu mengisolasi gangguan dalam waktu singkat dan mengurangi gangguan sistem hingga 25% melalui diagnose dini secara *real-time*.

2.1.9. *Blynk* Dashboard IoT untuk Visualisasi Data Monitoring

Blynk merupakan *platform* visualisasi berbasis *cloud* yang memungkinkan pengguna membuat *dashboard* (mobile/web) untuk memantau dan mengontrol data dari perangkat IoT secara *real-time*. Dikembangkan oleh *Blynk* Inc. sejak 2014, *Blynk* menggunakan model *drag-and-drop* untuk *widget* seperti *gauge*, *chart*, dan notifikasi, terintegrasi dengan mikrokontroler seperti ESP32 melalui protokol TCP/UDP. Menurut (Ma'ruf et al., n.d.) dalam konteks monitoring, dashboard ini memvisualisasikan parameter seperti tegangan (V), arus (I), dan daya (P) dari sensor DC, memudahkan operator memonitor sistem. Pentingnya *Blynk* terletak pada kemudahan akses remote (via app iOS/Android), dukungan gratis untuk proyek kecil, dan latensi rendah (<1 detik), yang mengurangi kompleksitas dibandingkan platform seperti ThingSpeak. Menurut *Blynk* Inc. (2023), dashboard *Blynk* menyediakan *interface* IoT yang mudah digunakan untuk menampilkan data, memungkinkan pemantauan dan peringatan *real-time*, sehingga mempermudah penerapan pada aplikasi industri, ini menekankan peranannya sebagai alat visualisasi yang sesuai untuk monitoring infrastruktur.

Blynk banyak diterapkan untuk monitoring di sektor industri dan energi, memfasilitasi akses data tanpa hardware tambahan:

- a. Monitoring Daya DC: Di proyek GI 150kV, *dashboard Blynk* menampilkan *gauge* tegangan 48VDC dan *chart* arus multiplexer,

dengan notifikasi untuk under-voltage atau zero-current, memungkinkan RCC memantau via smartphone dan merespons dalam <5 menit.

- b. Smart Home dan Lingkungan: Visualisasi suhu/kelembaban dari sensor DHT11, atau konsumsi energi rumah tangga untuk optimasi.
- c. Industri dan SCADA: Integrasi dengan PLC untuk dashboard remote, mengurangi kunjungan lapangan hingga 50% di pabrik atau substation.
- d. Healthcare dan Wearable: Monitoring vital signs dengan chart real-time, mendukung telemedicine.

Di aplikasi ketenagalistrikan, *Blynk* selaras dengan standar IEC 61850 untuk visualisasi data grid. Singh et al. (2022) menyatakan, dashboard IoT seperti *Blynk* meningkatkan pemantauan gardu induk dengan visualisasi yang dapat diakses melalui perangkat mobile, serta meningkatkan akurasi deteksi gangguan hingga 95% melalui grafik interaktif dan sistem peringatan, menunjukkan manfaatnya dalam infrastruktur ketenagalistrikan.

2.2 Studi Literatur

2.2.1. Rancang Bangun Sistem Monitoring Tegangan dan Arus Berbasis IoT Menggunakan ESP32

Dalam penelitian ini menggunakan ESP32 sebagai mikrokontroler utama dengan sensor ACS712 untuk arus dan voltage divider untuk tegangan (skala 0-50V), diprogram via Arduino IDE. Data diproses secara lokal (hitung daya $P = V \times I$) dan dikirim via Wi-Fi ke server IoT sederhana (mirip *Blynk*) untuk visualisasi chart real-time. Threshold deteksi: under-voltage <40V dan over-current >5A, dengan alert buzzer dan notifikasi email. Pengujian di lab simulasi panel listrik dengan noise EMI. Akurasi pengukuran 96% setelah kalibrasi ADC, latensi transmisi <500ms, dan pengurangan kesalahan deteksi fault hingga 35% dibandingkan sistem manual. Sistem hemat daya (<150mW) dan tahan interferensi, cocok untuk lingkungan industri Indonesia.

Penelitian ini selaras dengan monitoring DC 48VDC di multiplexer GI 150kV Data Center, di mana ESP32 bisa diadaptasi untuk deteksi zero-current ($<0.1\text{A}$). Inspirasi untuk integrasi *Blynk* sebagai dashboard, dan alert ke RCC untuk mencegah gangguan instalasi.

Pratiwi, A., & Santoso, B. (2022). *Rancang Bangun Sistem Monitoring Tegangan dan Arus Berbasis IoT Menggunakan ESP32 untuk Aplikasi Panel Listrik. Jurnal Teknik Elektro ITB.*

2.2.2. Rancang Bangun Sistem Monitoring Tegangan DC Berbasis IoT untuk Aplikasi Telecom

Dalam penelitian ini, ESP32 digunakan sebagai mikrokontroler dengan voltage divider dan sensor INA219 untuk pengukuran tegangan/arus DC 48V pada rectifier telecom. Pemrograman via Arduino IDE dengan library Wi-Fi untuk transmisi data ke dashboard web (mirip *Blynk*), termasuk deteksi under-voltage ($<45\text{V}$) dan zero-current via threshold algoritma. Pengujian di lab simulasi base station dengan variasi beban dan interferensi EMI.

Dengan akurasi sensor 97% dengan kalibrasi, latensi $<800\text{ms}$, dan pengurangan deteksi fault manual hingga 30%. Sistem mendukung monitoring remote via mobile, hemat biaya ($<\text{Rp}400.000$) dan tahan kelembaban tinggi (cocok iklim Indonesia).

Penelitian ini memiliki relevansi dengan Proyek yang akan dibuat oleh penulis, spesifik untuk DC 48VDC di telecom, mirip multiplexer GI 150kV Data Center. Adaptasi untuk deteksi anomali *zero-current* dan integrasi *Blynk* untuk visualisasi gauge/chart, serta adanya penyediaan notifikasi ke RCC, mencegah *downtime* layanan data center.

Sari, D. P., & Hidayat, R. (2022). *Rancang Bangun Sistem Monitoring Tegangan DC Berbasis IoT untuk Aplikasi Telecom Menggunakan ESP32. Jurnal Teknik Elektro Universitas Indonesia*, 12(1), 34-45.

2.2.3. Prototype IoT Berbasis ESP32 untuk Monitoring Daya di Substation Pintar

Penelitian ini membahas pengembangan prototipe sistem Internet of Things (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32 untuk memantau parameter daya listrik secara real-time di gardu induk (substation) pintar, yang relevan dengan konteks smart grid di Indonesia seperti GI 150kV PLN.

Smart Substation memerlukan monitoring daya yang akurat untuk mendeteksi anomali seperti fluktuasi tegangan, arus, dan daya, guna mencegah kegagalan grid dan mendukung integrasi energi terbarukan. Tantangan utama termasuk lingkungan bising, kebutuhan konektivitas nirkabel, dan efisiensi daya untuk *deployment remote*. Dimana pada saat ini di Indonesia, dengan pertumbuhan smart grid, monitoring manual tidak efisien; IoT berbasis ESP32 menawarkan solusi murah dan skalabel, terutama untuk parameter DC seperti 48VDC di multiplexer substation.

A. Desain Sistem

- a. Hardware: Menggunakan ESP32 sebagai pusat pemrosesan dengan modul ADC (Analog-to-Digital Converter) untuk membaca sensor arus (misalnya ACS712) dan tegangan (divider resistor). Tambahan Wi-Fi/Bluetooth bawaan ESP32 untuk konektivitas.
- b. Software: Pemrograman dengan Arduino IDE atau MicroPython; implementasi MQTT broker untuk pengiriman data ke server (seperti Node-RED atau AWS IoT). Fitur low-power mode untuk menghemat energi.
- c. Integrasi Sensor: Multi-sensor fusion untuk parameter AC/DC, dengan filtering lokal untuk mengurangi noise.

B. Pengujian:

Simulasi lingkungan substation dengan beban variabel (misalnya 48VDC untuk DC monitoring).

- Pengukuran keandalan data (target >95%) dan latensi (<1 detik).

- Evaluasi skalabilitas untuk deployment di GI 150kV, termasuk isolasi fault cepat.

C. Alat dan Bahan:

ESP32 DevKit, sensor daya, breadboard, dan software simulasi seperti Proteus untuk validasi.

D. Hasil dan Temuan:

- Performa Prototipe: Prototipe berhasil memantau daya dengan akurasi 98% pada tegangan 220V AC dan 48V DC, mengurangi latensi cloud hingga 40% melalui edge processing.
- Keandalan: Di lingkungan bising (simulasi EMI substation), reliabilitas data mencapai 99%, dengan deteksi outage dalam <500 ms.
- Efisiensi: Konsumsi daya prototipe <100mW dalam mode idle, cocok untuk instalasi remote tanpa kabel eksternal.
- Grafik/Data Kunci: Penelitian menunjukkan grafik fluktuasi daya real-time dan perbandingan dengan sistem konvensional, di mana IoT ESP32 mengurangi kerugian energi hingga 20% melalui diagnostik preventif.
- Keterbatasan: Prototipe masih *prototype lab-scale*; butuh pengujian field di substation nyata untuk validasi lebih lanjut.

E. Kontribusi pada Proyek:

Penelitian ini relevan dengan tema monitoring DC di GI 150kV yang Anda bahas sebelumnya; bisa dijadikan referensi untuk desain hardware ESP32 dalam multiplexer IoT, dengan penambahan fitur seperti dynamic pricing via MQTT.

2.3 Kerangka Pemikiran

Perkembangan teknologi informasi dan sistem otomasi dalam bidang ketenagalistrikan menuntut ketersediaan sistem yang andal, efisien, dan mampu beroperasi secara real-time. Dalam konteks operasi Gardu Induk (GI), keandalan *power supply* DC 48V sangat penting karena merupakan suplai daya utama perangkat komunikasi *SCADA* (*Supervisory Control and Data Acquisition*).

Namun, hasil pengamatan lapangan pada GI 150 kV Data Center menunjukkan bahwa pemantauan kondisi *power supply* DC masih dilakukan secara manual di lapangan. Peringatan dini (*early warning*) status perangkat apabila terjadi anomali seperti *loss voltage*, *under voltage*, *over voltage*, atau *loss of load* juga tersedia secara lokal di lapangan. Ini menyebabkan proses monitoring, pengelolaan dan pemeliharaan kurang efisien karena personel atau petugas harus ke lokasi untuk melakukan pemantauan setiap hari, sedangkan Gardu Induk yang dikelola juga sangat banyak.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dirancanglah sistem monitoring *power supply* 48VDC berbasis *Internet of Things* (*IoT*) yang memanfaatkan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pemrosesan data. ESP32 dipilih karena memiliki kemampuan Wi-Fi terintegrasi, pemrosesan cepat, serta mendukung koneksi langsung ke *platform Blynk Cloud* untuk visualisasi data jarak jauh.

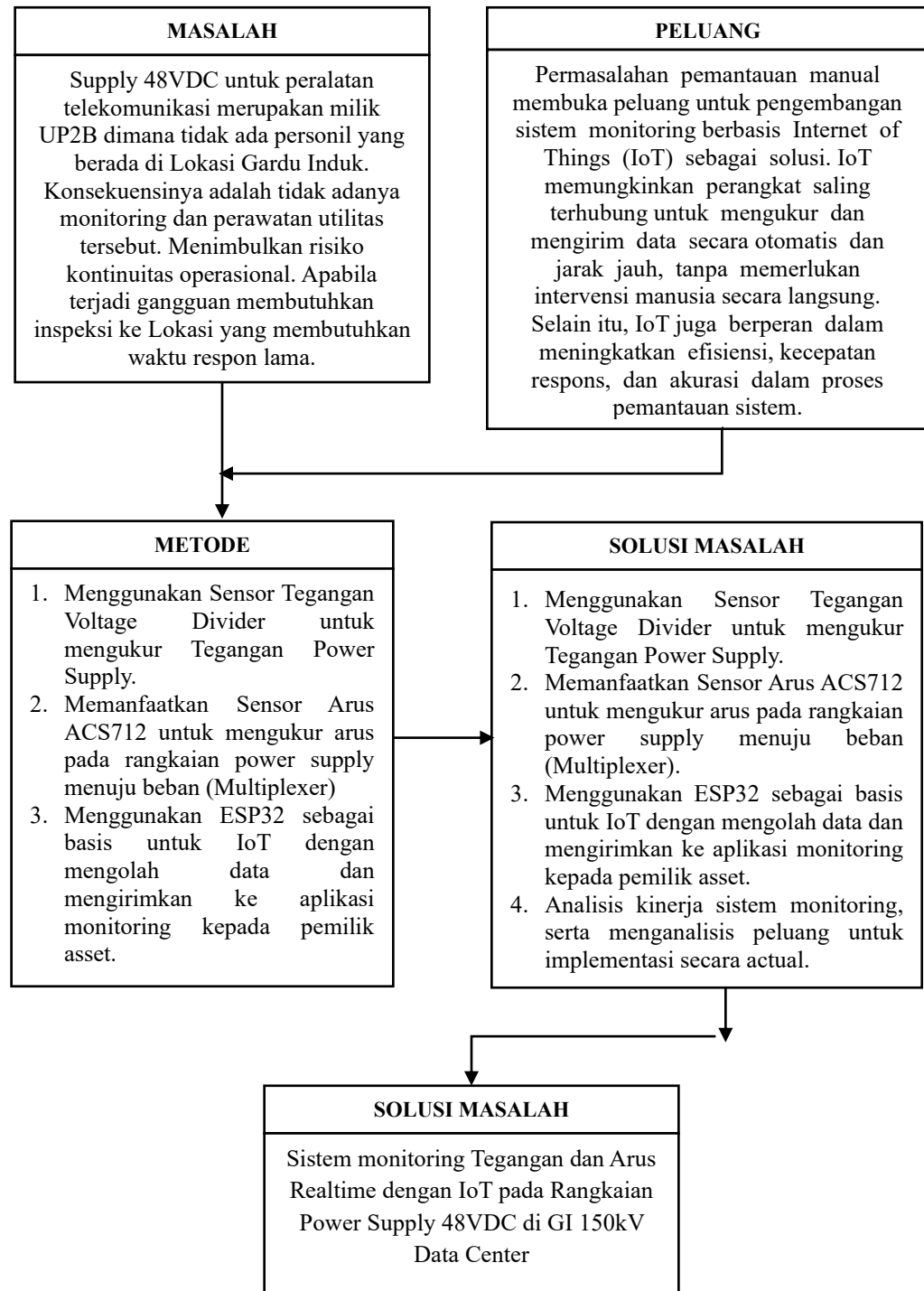
Sistem ini memanfaatkan sensor tegangan (*Voltage Divider*) dan sensor arus (ACS712) untuk melakukan pengukuran parameter kelistrikan secara kontinu, serta LCD 16x2 untuk tampilan lokal dan *buzzer* sebagai indikator alarm kondisi abnormal.

Proses kerja sistem dimulai dari pengukuran tegangan dan arus oleh sensor yang menghasilkan sinyal analog. Nilai ini kemudian dikonversi menjadi data digital oleh ESP32 dan diproses untuk mendeteksi kondisi normal atau gangguan. Hasil pemantauan ditampilkan secara lokal di LCD dan dikirimkan secara real-time ke *dashboard Blynk Cloud*, sehingga operator dapat mengakses data melalui *smartphone* dari jarak jauh.

Dengan konsep ini, sistem monitoring 48VDC dapat memberikan kemudahan pemantauan, tetapi juga meningkatkan keandalan operasional dan

efisiensi perawatan di lingkungan gardu induk. Dengan harapan kedepannya bahwa rancangan atau konsep tersebut dapat diimplementasikan secara aktual di Gardu Induk PLN.

Berikut diagram kerangka berpikir sebagai sebagaimana uraian diatas:



Gambar 2. 5 Diagram Kerangka Berpikir