

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Pengembangan sistem monitoring peralatan distribusi tenaga listrik berbasis teknologi komunikasi nirkabel dan IoT telah menjadi topik penelitian yang aktif dalam beberapa tahun terakhir seiring dengan semakin meluasnya kebutuhan akan pemantauan kondisi jaringan listrik secara real-time dan efisien.

Paryanto et al. (2019) melakukan survei lapangan mengenai kondisi trafo distribusi di Indonesia dan menemukan bahwa sebagian besar trafo distribusi 1 fasa masih menggunakan sistem monitoring manual atau bahkan tidak memiliki sistem monitoring terintegrasi. Hal ini menjadi salah satu hambatan utama dalam operasi dan *maintenance* yang efisien[2].

Beberapa penelitian telah mengembangkan sistem monitoring trafo distribusi dengan memanfaatkan berbagai platform komunikasi. Sistem monitoring berbasis GSM/GPRS telah dikembangkan dan mampu mengirimkan data tegangan, arus, dan suhu trafo secara berkala ke server pusat. Sistem ini berhasil memantau kondisi trafo dari jarak jauh, namun memiliki keterbatasan pada biaya operasional yang berkelanjutan akibat penggunaan kartu SIM dan paket data [9]. Penggunaan teknologi WiFi sebagai media transmisi data monitoring juga telah banyak dikembangkan. Namun, cakupan jangkauan WiFi yang terbatas menjadi kendala utama pada implementasi di lapangan, terutama untuk trafo distribusi yang berlokasi di area dengan infrastruktur WiFi yang belum tersedia.

Teknologi LoRa (Long Range) yang memanfaatkan modulasi Chirp Spread Spectrum (CSS) telah menunjukkan potensi yang signifikan dalam berbagai aplikasi IoT jarak jauh. Penelitian oleh Augustin et al. (2016) menunjukkan bahwa teknologi LoRa mampu mencapai jangkauan komunikasi hingga beberapa kilometer di area perkotaan dan lebih dari 10 km di area terbuka dengan konsumsi daya yang sangat rendah, menjadikannya pilihan yang tepat untuk aplikasi monitoring peralatan yang tersebar secara geografis [5].

Adelantado et al. (2017) dalam studi komprehensifnya menyatakan bahwa teknologi LoRa menawarkan kombinasi unik antara jangkauan jauh, konsumsi daya rendah, dan *bandwidth* yang cukup untuk aplikasi monitoring infrastruktur, sehingga menjadi dasar bagi banyak implementasi LoRa pada aplikasi smart metering dan monitoring grid distribusi[4].

Augustin et al. (2016) melakukan studi komparatif antara berbagai teknologi komunikasi wireless (WiFi, Bluetooth, cellular, LoRa) untuk aplikasi IoT. Kesimpulan menyatakan bahwa LoRa adalah pilihan terbaik untuk aplikasi monitoring infrastruktur jarak jauh dengan power budget terbatas, meskipun dengan trade-off pada bandwidth yang lebih rendah dibandingkan teknologi lain [5].

Pada bidang monitoring beban trafo secara khusus, penggunaan sensor PZEM-004T sebagai sensor parameter listrik telah banyak digunakan dalam berbagai penelitian karena kemampuannya mengukur tegangan, arus, daya, dan energi secara akurat dengan antarmuka komunikasi serial yang mudah diintegrasikan dengan berbagai platform mikrokontroler. Kurniawan et al. (2021) menunjukkan bahwa sensor PZEM-004T memiliki akurasi pengukuran mencapai 95% dibandingkan dengan *power analyzer* standar, dengan reliabilitas komunikasi UART yang sangat baik [7]. Sensor ini juga telah terbukti memberikan akurasi pengukuran yang memadai untuk keperluan monitoring sistem distribusi pada skala prototipe[10]

Riyanto et al. (2022) merancang sistem monitoring energi terukur (smart metering) untuk gedung perkantoran menggunakan kombinasi PZEM-004T dan ESP32 dengan integrasi *cloud*. Penelitian tersebut membuktikan bahwa sistem dapat beroperasi stabil dalam durasi *extended* (lebih dari 1000 jam *continuous operation*) dengan data *integrity* yang terjaga [6].

Integrasi Google Spreadsheet sebagai platform data logging berbasis cloud juga telah banyak digunakan dalam penelitian IoT karena kemudahannya dalam pengaturan, aksesibilitas yang tinggi, serta tidak memerlukan infrastruktur server yang khusus [11].

Wijaya et al. (2023) mengimplementasikan sistem alert berbasis Telegram API untuk notifikasi status perangkat IoT dan menunjukkan bahwa integrasi Telegram API dapat memberikan notifikasi *real-time* dengan *latency* rata-rata di bawah 2 detik, sehingga sangat cocok untuk aplikasi monitoring yang memerlukan respons cepat terhadap kondisi abnormal [12].

Berdasarkan kajian terhadap penelitian-penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa sistem monitoring beban trafo distribusi berbasis LoRa yang dilengkapi dengan data logging ke Google Spreadsheet dan notifikasi Telegram merupakan pengembangan yang relevan, khususnya dengan mekanisme komunikasi *polling* untuk mengatasi permasalahan tabrakan data pada sistem multi-transmitter.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Transformator Distribusi Satu Fasa



Gambar 2. 1 Trafo satu fasa

Trafo distribusi adalah perangkat elektromagnetis yang berfungsi untuk mentransfer energi listrik dari satu rangkaian ke rangkaian lain melalui induksi elektromagnetik, sekaligus mengubah level tegangan sesuai dengan kebutuhan. Trafo distribusi 1 fasa secara khusus digunakan pada jaringan distribusi tenaga listrik untuk pelanggan rumah tangga dan komersial skala kecil, dengan fungsi menurunkan tegangan dari jaringan tegangan menengah (JTM) 20 kV menjadi tegangan rendah 220 V.

Secara konstruksi, trafo distribusi satu fasa terdiri atas inti besi (core) sebagai media penghantar fluks magnetik, kumparan primer yang terhubung ke sisi tegangan menengah, dan kumparan sekunder yang terhubung ke sisi tegangan rendah. Prinsip kerja trafo didasarkan pada hukum induksi Faraday, di mana perubahan fluks magnetik pada inti besi akibat arus pada kumparan primer akan menginduksikan tegangan pada kumparan sekunder. Perbandingan tegangan antara sisi primer dan sekunder berbanding lurus dengan perbandingan jumlah lilitan masing-masing kumparan, yang dinyatakan sebagai:

$$V_1/V_2 = N_1/N_2$$

Di mana V_1 adalah tegangan primer, V_2 adalah tegangan sekunder, N_1 adalah jumlah lilitan primer, dan N_2 adalah jumlah lilitan sekunder [13].

Kapasitas trafo distribusi dinyatakan dalam satuan kilo Volt-Ampere (kVA) yang merepresentasikan daya semu maksimum yang dapat ditangani trafo secara kontinu tanpa melampaui batas termal yang diizinkan. Kapasitas trafo distribusi 1 fasa yang umum digunakan di jaringan distribusi PLN bervariasi, mulai dari 10 kVA, 25 kVA, 50 kVA, hingga 100 kVA, tergantung pada kebutuhan beban di area pelayanan masing-masing [13].

2.2.2 Beban Trafo dan Persentase Pembebanan

Beban trafo adalah nilai total daya semu yang dikonsumsi oleh seluruh konsumen yang terhubung ke sisi sekunder trafo pada suatu waktu tertentu. Nilai beban trafo dinyatakan dalam satuan Volt-Ampere (VA) atau kilo Volt-Ampere (kVA). Persentase pembebanan trafo merupakan rasio antara beban aktual yang ditanggung trafo terhadap kapasitas nominalnya, yang dinyatakan sebagai:

$$\% \text{ Beban} = \left(\frac{S_{beban}}{S_{nominal}} \right) \times 100\%$$

Di mana S_{beban} adalah daya semu beban aktual (VA) dan $S_{nominal}$ adalah kapasitas nominal trafo (VA).

Standar operasional PLN menetapkan bahwa trafo distribusi dioperasikan secara optimal pada kondisi beban antara 70% hingga 80% dari kapasitas nominalnya. Pembebanan yang melebihi 80% kapasitas nominal secara terus-menerus akan menyebabkan kenaikan suhu yang signifikan pada belitan trafo, yang

dapat mempercepat degradasi isolasi dan mengurangi umur pakai trafo secara drastis. Oleh karena itu, ambang batas 80% dari kapasitas nominal trafo dijadikan sebagai batas peringatan (threshold) pada sistem monitoring yang dirancang dalam penelitian ini [3]

2.2.3 Sensor PZEM-004T



Gambar 2. 2 Sensor PZEM-004T

PZEM-004T merupakan modul sensor multifungsi yang dirancang untuk mengukur parameter listrik arus bolak-balik (AC) secara real-time. Sensor ini mampu mengukur tegangan, arus, daya aktif, energi, frekuensi, dan faktor daya secara simultan. Modul ini menggunakan komunikasi serial melalui protokol Modbus RTU via antarmuka UART untuk mengirimkan data ke mikrokontroler. [14].

Tabel 2 - 1 Spesifikasi Sensor PZEM-004T

PARAMETER	SPESIFIKASI
Tegangan Kerja (AC)	80 – 260 V
Rentang Arus	0 – 100 A (Dengan CT Eksternal)
Resolusi Ukur Voltase	0,1 V
Resolusi Ukur Arus	0,001 A
Akurasi Pengukuran	0,5%
Rentang Daya	0 – 23 kW

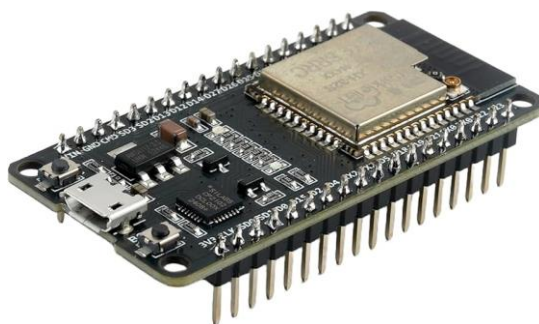
PARAMETER	SPESIFIKASI
Resolusi Ukur Daya	0,1 W
Antarmuka Komunikasi	UART / Modbus RTU

Penggunaan CT (Current Transformer) eksternal pada PZEM-004T memungkinkan pengukuran arus tanpa memutus rangkaian yang diukur (*non-intrusive measurement*), sehingga pengukuran dapat dilakukan secara aman pada instalasi yang sedang beroperasi. CT yang disertakan adalah 100A/1A, artinya 100A pada primary menghasilkan 1A pada secondary, dan PZEM-004T secara otomatis mengalikan dengan rasio CT untuk menampilkan arus primary yang sebenarnya.

Parameter yang dapat diukur oleh PZEM-004T meliputi: tegangan AC (VAC) pada rentang 80–260V dengan resolusi 0,1V; arus AC pada rentang 0–100A; daya aktif (W) pada rentang 0–23kW; daya reaktif (VAR); frekuensi (Hz) pada rentang 45–65Hz; faktor daya pada rentang 0,0–1,0; serta energi kumulatif (kWh) yang dapat di-reset melalui *command*.

Dalam penelitian ini, PZEM-004T digunakan pada sisi transmitter untuk mengukur tegangan dan arus beban pada sisi sekunder trafo distribusi yang dimonitor. Sensor PZEM-004T telah terbukti memberikan akurasi pengukuran yang memadai untuk keperluan monitoring sistem distribusi pada skala prototipe dengan akurasi mencapai 95% dibandingkan *power analyzer* standar.[15]

2.2.4 Mikrokontroler ESP32



Gambar 2. 3 ESP 32

ESP32 adalah mikrokontroler seri terbaru dari Espressif Systems yang dilengkapi dengan prosesor Xtensa LX6 dual-core 32-bit berkecepatan hingga 240 MHz. Keunggulan utama ESP32 dibandingkan mikrokontroler konvensional

adalah adanya modul WiFi 802.11 b/g/n dan Bluetooth 4.2/BLE yang terintegrasi langsung di dalam chip, sehingga memungkinkan implementasi sistem IoT tanpa memerlukan modul komunikasi tambahan.

ESP32 memiliki sejumlah besar pin GPIO (General Purpose Input/Output) yang dapat dikonfigurasi sebagai input digital, output digital, ADC (Analog to Digital Converter), DAC (Digital to Analog Converter), antarmuka UART, SPI, I2C, dan sebagainya. Ketersediaan antarmuka yang lengkap ini memungkinkan ESP32 untuk berkomunikasi dengan berbagai jenis sensor dan modul peripheral, termasuk sensor PZEM-004T melalui UART dan modul LoRa Ra-02 melalui SPI [16].

Tabel 2 - 2 Spesifikasi Mikrokontroler ESP32

PARAMETER	SPESIFIKASI
Prosesor	Xtensa LX6 Dual-core, hingga 240 MHz
Memori Flash	4 MB (tipikal)
RAM	520 KB SRAM
WiFi	802.11 b/g/n
Bluetooth	BT 4.2 / BLE
GPIO	30 pin programmable
Tegangan Operasi	3,3 V

Dalam penelitian ini, ESP32 digunakan pada kedua sisi sistem. Pada sisi transmitter, ESP32 bertugas membaca data sensor PZEM-004T melalui UART, menampilkan data pada LCD, dan merespons permintaan data dari receiver melalui LoRa. Pada sisi receiver, ESP32 bertugas mengirimkan permintaan data ke transmitter melalui LoRa, mengolah data yang diterima, mengirimkan data ke Google Spreadsheet melalui WiFi, serta mengirimkan notifikasi ke Telegram apabila kondisi *overload* terdeteksi.

Alasan memilih ESP32 antara lain: WiFi *built-in* untuk koneksi ke spreadsheet cloud tanpa modul eksternal; dual-core yang memungkinkan multitasking (satu core untuk LoRa, satu untuk WiFi); harga terjangkau; kompatibel

dengan Arduino IDE; serta telah banyak digunakan dalam penelitian sebelumnya dengan reliabilitas yang terbukti.

2.2.5 Modul LoRa Ra-02 SX1278



Gambar 2. 4 LoRa Ra-02 SX1278

Ra-02 adalah modul transceiver nirkabel jarak jauh yang dikembangkan oleh AI-Thinker dan berbasis chip SX1278 dari Semtech. Modul ini beroperasi pada frekuensi 433 MHz yang sesuai untuk penggunaan di wilayah Asia, termasuk Indonesia, sehingga tidak memerlukan lisensi khusus karena beroperasi pada pita ISM (Industrial, Scientific, Medical) yang bersifat license-free.

Modul Ra-02 SX1278 menggunakan antarmuka SPI untuk berkomunikasi dengan mikrokontroler dan memiliki pin tambahan untuk pengaturan parameter seperti Spreading Factor (SF), Bandwidth (BW), dan Coding Rate (CR) yang secara langsung mempengaruhi trade-off antara jangkauan komunikasi, kecepatan data, dan konsumsi daya [17]

Tabel 2 - 3 Spesifikasi Modul LoRa Ra-02 SX1278

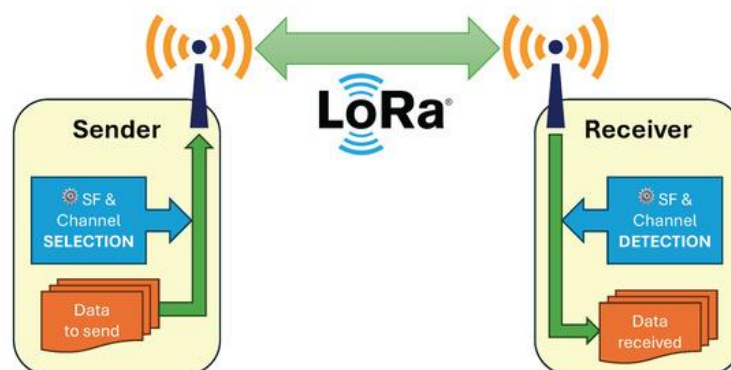
PARAMETER	SPESIFIKASI
Frekuensi Operasi	433 MHz
Daya Keluaran Maksimum	+20 dBm
Sensitivitas Penerima	-148 dBm
Jangkauan (Kondisi LoS)	Hingga 10 km
Antarmuka	SPI
Tegangan Operasi	3,3 V

PARAMETER	SPESIFIKASI
Modulasi	LoRa (CSS) / FSK
Spreading Factor	6-12
Bandwidth	10,4-500 kHz

Teknologi LoRa menggunakan teknik modulasi Chirp Spread Spectrum (CSS) yang menyebarkan sinyal pada bandwidth yang lebar sehingga menghasilkan ketahanan terhadap interferensi yang sangat baik dan memungkinkan komunikasi pada kondisi line-of-sight (LoS) yang terbatas. Keunggulan ini menjadikan LoRa sebagai pilihan yang tepat untuk komunikasi antar unit transmitter di lokasi trafo dengan unit receiver yang dibawa petugas [5].

Dibandingkan dengan teknologi komunikasi nirkabel lainnya, Ra-02 SX1278 menawarkan keunggulan yang signifikan. Dibanding GSM/4G, modul ini tidak memerlukan biaya langganan provider dan memiliki konsumsi daya yang jauh lebih rendah untuk penggunaan jangka panjang. Dibanding WiFi, jangkauan LoRa mencapai 10–15 km pada kondisi LoS sehingga tidak membutuhkan infrastruktur WiFi di setiap titik trafo. Dibanding Bluetooth dan Zigbee, jangkauan LoRa jauh lebih superior dengan tetap mempertahankan konsumsi daya yang rendah.

2.2.6 Protokol Komunikasi LoRa dan Mekanisme *Polling*



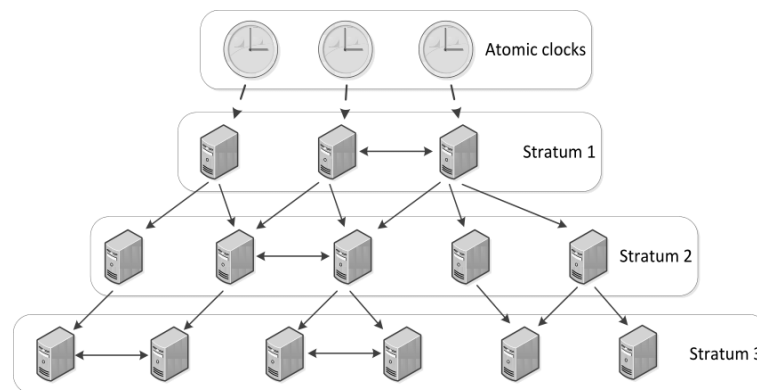
Gambar 2. 5 Protokol Komunikasi LoRa

Dalam sistem yang dirancang pada penelitian ini, arsitektur komunikasi LoRa menggunakan mekanisme *polling* (*receiver-initiated*), yaitu unit receiver yang secara aktif mengirimkan permintaan data (*request*) kepada unit transmitter berdasarkan ID node yang telah dikonfigurasi, dan transmitter akan merespons permintaan tersebut dengan mengirimkan paket data beban trafo. Mekanisme ini

dipilih sebagai alternatif dari arsitektur transmitter-initiated (*push*) untuk mencegah terjadinya tabrakan data (*packet collision*) yang dapat terjadi apabila dua atau lebih transmitter mengirimkan data secara bersamaan.

Pada mekanisme polling, receiver mengatur jadwal permintaan data kepada setiap transmitter secara bergantian dengan jeda waktu yang memadai, sehingga pada setiap saat hanya terdapat satu transmitter yang mengirimkan data di saluran LoRa yang digunakan. Interval waktu polling dapat dikonfigurasi melalui kode program sesuai dengan kebutuhan pemantauan.

2.2.7 NTP (Network Time Protocol) untuk *Time Synchronization*



Gambar 2. 6 *Network Time Protocol*

Network Time Protocol (NTP) adalah protokol jaringan yang digunakan untuk melakukan sinkronisasi waktu antara perangkat komputer atau mikrokontroler dengan server waktu referensi melalui jaringan internet. NTP mampu memberikan akurasi sinkronisasi waktu hingga dalam orde milidetik, yang lebih dari cukup untuk keperluan pencatatan waktu data monitoring beban trafo.

Dalam penelitian ini, NTP digunakan pada sisi receiver sebagai pengganti modul RTC (Real-Time Clock) yang memerlukan komponen hardware tambahan dan penggantian baterai secara berkala. Perbandingan antara NTP dan RTC dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2 - 4 Perbedaan Penggunaan NTP dan RTC

Aspek	NTP	RTC
Akurasi	$\pm 10\text{-}100$ ms dari UTC	$\pm 1\text{-}5$ detik per hari drift

Aspek	NTP	RTC
Komponen Tambahan	Tidak perlu (WiFi + software)	DS3231 (~Rp 50k)
Kalibrasi Manual	Tidak perlu (otomatis sync ke server)	Diperlukan setiap bulan
Keandalan	Akurat selama internet tersedia	Tetap akurat offline

Dengan memanfaatkan koneksi WiFi yang sudah tersedia pada ESP32 di sisi receiver, sinkronisasi waktu dapat dilakukan ke server NTP publik seperti pool.ntp.org setiap kali sistem dinyalakan atau pada interval tertentu, sehingga data waktu yang dicatat pada spreadsheet selalu akurat dan tidak memerlukan kalibrasi manual.

2.2.8 Google Spreadsheet sebagai Platform Data Logging

Google Spreadsheet adalah aplikasi lembar kerja berbasis cloud yang dikembangkan oleh Google dan dapat diakses melalui browser maupun aplikasi mobile secara gratis. Dalam konteks sistem IoT, Google Spreadsheet dapat difungsikan sebagai platform data logging yang menerima dan menyimpan data pengukuran secara otomatis dari perangkat mikrokontroler.

Pada penelitian ini, integrasi antara ESP32 dan Google Spreadsheet dilakukan melalui Google Sheets API menggunakan metode autentikasi Service Account, bukan melalui Google Apps Script sebagai web app endpoint. Service Account merupakan akun khusus yang dibuat melalui Google Cloud Platform (GCP) dan diberikan izin akses langsung terhadap spreadsheet yang dituju, tanpa memerlukan proses login interaktif seperti pada akun pengguna biasa. Setiap Service Account memiliki satu set kredensial berupa PROJECT_ID, CLIENT_EMAIL, dan PRIVATE_KEY yang diperoleh dalam format JSON pada saat pembuatan akun tersebut [18].

Proses autentikasi pada sisi ESP32 diimplementasikan menggunakan pustaka (library) ESP_Google_Sheet_Client, yang menangani keseluruhan proses OAuth 2.0 berbasis JSON Web Token (JWT) secara otomatis, termasuk permintaan dan pembaruan (refresh) access token tanpa campur tangan pengguna. Setelah

proses autentikasi berhasil, ESP32 dapat berkomunikasi langsung dengan Google Sheets API untuk menuliskan data ke dalam spreadsheet melalui pemanggilan fungsi `values.append()` [18].

Metode Service Account dipilih karena beberapa pertimbangan berikut:

1. tidak memerlukan proses deploy web app terpisah sebagaimana pada metode Google Apps Script;
2. mendukung akses langsung ke spreadsheet melalui REST API dengan tingkat keamanan yang lebih terjamin karena menggunakan token autentikasi;
3. tetap dapat digunakan pada spreadsheet yang bersifat privat tanpa perlu dipublikasikan sebagai web app; serta
4. proses pembaruan token dilakukan secara otomatis oleh pustaka sehingga tidak memerlukan penanganan tambahan pada program utama.

Keunggulan Google Spreadsheet sebagai platform *data logging* antara lain: tidak memerlukan infrastruktur server yang khusus; dapat diakses oleh banyak pengguna secara bersamaan dari berbagai perangkat; mendukung pembuatan grafik dan visualisasi data secara langsung; menyediakan histori perubahan data secara otomatis; serta gratis untuk penggunaan kecil-menengah [11].

Dalam penelitian ini, data yang dicatat pada Google Spreadsheet meliputi:

Kolom A: Timestamp (YYYY-MM-DD HH:MM)

Kolom B: Nomor Tiang/ID Transmitter

Kolom C: Tegangan (V)

Kolom D: Arus (A)

Kolom E: Daya (W)

Kolom F: Frekuensi (Hz)

Kolom G: Faktor daya

Kolom H: Beban (%)

Kolom I: RSSI LoRa

Alur pengiriman data dari ESP32 ke Google Spreadsheet adalah sebagai berikut: ESP32 → Autentikasi Service Account (OAuth 2.0 JWT) → Google Sheets API → Fungsi `values.append()` → Data tersimpan pada Google Spreadsheet.

2.2.9 Bot Telegram sebagai Media Komunikasi

Telegram adalah platform pesan instan yang menyediakan antarmuka pemrograman aplikasi (API) Bot yang memungkinkan pengiriman pesan otomatis dari sistem eksternal, termasuk perangkat IoT, ke pengguna atau grup Telegram tertentu. Telegram Bot API menggunakan protokol HTTPS untuk pengiriman pesan, sehingga dapat diakses langsung dari ESP32 melalui koneksi WiFi menggunakan *library* HTTP yang tersedia. Integrasi Telegram API dapat memberikan notifikasi real-time dengan latency rata-rata di bawah 2 detik [12].

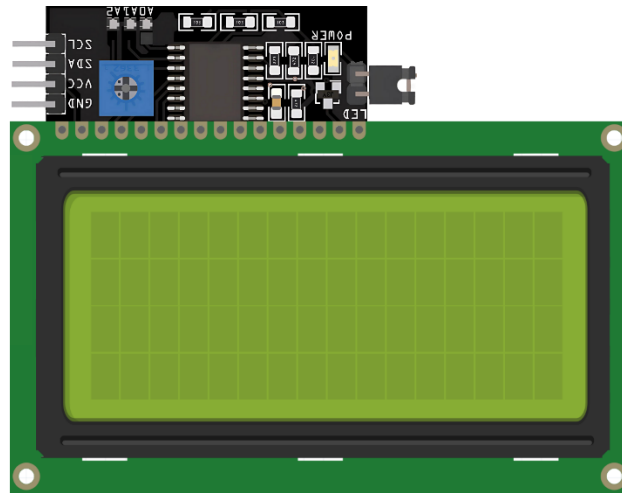
Keunggulan Telegram Bot API antara lain: pengiriman notifikasi dalam hitungan detik (*instant delivery*); tidak memerlukan infrastruktur server lokal; mendukung format rich text, inline buttons, dan emoji; dapat mengirim ke *multiple chats/users*; serta gratis tanpa biaya langganan.

Dalam penelitian ini, Bot Telegram diimplementasikan pada sisi receiver untuk mengirimkan pesan notifikasi peringatan secara otomatis apabila kondisi kelistrikan yang dipantau menyimpang dari batas normal yang dikonfigurasi. Terdapat tiga jenis kondisi yang dipantau, yaitu persentase pembebanan trafo yang berlebih (overload), tegangan yang berada di bawah batas minimum (undervoltage), dan tegangan yang melebihi batas maksimum (overvoltage).

Ambang batas persentase pembebanan trafo ditetapkan sebesar 80% dari kapasitas nominal, mengacu pada SPLN 50:1997 [19]. Sementara itu, ambang batas tegangan mengacu pada SPLN 1:1978 yang menetapkan toleransi tegangan pelayanan sebesar +5% dan -10% dari tegangan nominal 220 V, sehingga diperoleh rentang tegangan normal antara 198 V hingga 231 V [20]. Apabila tegangan yang terukur berada di bawah 198 V, sistem akan mengirimkan notifikasi undervoltage, sedangkan apabila tegangan melebihi 231 V, sistem akan mengirimkan notifikasi overvoltage.

Selain notifikasi otomatis, Bot Telegram pada penelitian ini juga dilengkapi dengan fitur perintah (command) yang memungkinkan komunikasi dua arah antara pengguna dan sistem. Pengguna dapat mengirimkan perintah /cek atau /status kapan saja melalui aplikasi Telegram untuk memperoleh data monitoring terkini.

2.2.10 LCD (Liquid Crystal Display) pada Unit Transmitter

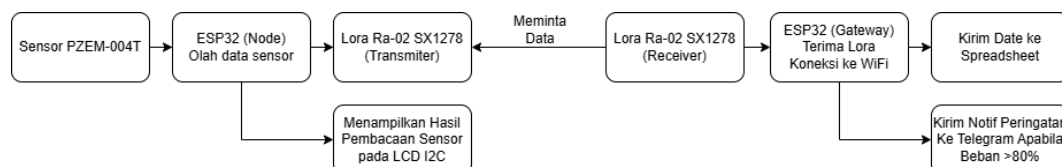


Gambar 2. 7 LCD (Liquid Crystal Display)

LCD (Liquid Crystal Display) adalah komponen tampilan elektronik yang banyak digunakan pada sistem *embedded* untuk menampilkan informasi kepada pengguna secara lokal. Pada penelitian ini digunakan LCD karakter berukuran 16×2 atau 20×4 yang dihubungkan dengan ESP32 menggunakan antarmuka I2C melalui modul ekspander I2C PCF8574, sehingga hanya memerlukan 2 pin GPIO untuk komunikasi data.

LCD pada sisi transmitter berfungsi menampilkan data beban trafo secara *real-time*, yaitu nilai tegangan dan arus yang dibaca oleh sensor PZEM-004T, sehingga petugas yang berada di lokasi trafo dapat membaca kondisi beban secara langsung tanpa memerlukan perangkat tambahan. Tampilan ini bersifat lokal dan independen dari koneksi LoRa maupun WiFi, sehingga tetap dapat berfungsi meskipun komunikasi nirkabel sedang tidak aktif.

2.2.11 Internet of Things (IoT) dalam Sistem Monitoring



Gambar 2. 8 Diagram Sistem Monitoring Berbasis IoT

Internet of Things (IoT) adalah konsep jaringan perangkat fisik yang saling terhubung melalui internet dan mampu mengumpulkan, bertukar, serta memproses

data secara otomatis tanpa memerlukan interaksi manusia secara langsung. Dalam konteks sistem monitoring peralatan ketenagalistrikan, IoT memungkinkan implementasi pemantauan kondisi peralatan secara *real-time* dari jarak jauh, pencatatan data historis secara otomatis, serta pengiriman notifikasi peringatan dini apabila terdeteksi kondisi yang menyimpang dari parameter normal.

Arsitektur umum sistem IoT terdiri dari tiga lapisan utama: lapisan persepsi yang mencakup sensor dan aktuator sebagai antarmuka dengan dunia fisik; lapisan jaringan yang mencakup media transmisi data baik kabel maupun nirkabel; dan lapisan aplikasi yang mencakup platform pengolahan dan penyajian data kepada pengguna. Pada penelitian ini, ketiga lapisan tersebut diimplementasikan melalui sensor PZEM-004T sebagai lapisan persepsi, komunikasi LoRa dan WiFi sebagai lapisan jaringan, serta Google Spreadsheet dan Bot Telegram sebagai lapisan aplikasi [8], [21].

2.2.12 Power Supply Unit (PSU)



Gambar 2. 9 Power Supply Unit 5V 2A

Power Supply Unit (PSU) merupakan komponen yang berfungsi mengubah sumber tegangan listrik dari satu bentuk ke bentuk lain sesuai kebutuhan rangkaian elektronik yang disuplainya. Berdasarkan prinsip kerjanya, PSU dapat dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu linear power supply dan switching power supply (SMPS/Switch Mode Power Supply). Linear power supply bekerja dengan menurunkan tegangan menggunakan transformator step-down yang kemudian disearahkan dan diregulasi secara linier, sehingga menghasilkan efisiensi yang relatif rendah (berkisar 40–60%) akibat disipasi daya dalam bentuk panas. Sebaliknya, switching power supply bekerja dengan menyearahkan tegangan AC

input terlebih dahulu, kemudian melakukan proses switching pada frekuensi tinggi menggunakan komponen semikonduktor daya sebelum diturunkan dan diregulasi melalui transformator berukuran kecil, sehingga menghasilkan efisiensi yang jauh lebih tinggi (dapat mencapai 70–90%), ukuran fisik yang lebih ringkas, serta panas yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan linear power supply [22].

Pada penelitian ini, catu daya untuk unit transmitter maupun unit receiver menggunakan modul switching power supply dengan merk M-510. Modul ini merupakan unit catu daya kompak yang mengubah tegangan masukan AC 110 V–220 V menjadi tegangan keluaran DC 5 V dengan arus maksimum 2 A, sehingga daya keluaran maksimum yang dapat disediakan adalah sebesar 10 Watt. Ukuran fisik modul yang kompak, yaitu sekitar $7 \times 3,9 \times 2,9$ cm, menjadikannya sesuai untuk diintegrasikan langsung ke dalam rangkaian elektrik pada skala laboratorium tanpa memerlukan ruang tambahan yang besar di dalam casing perangkat.

Tegangan keluaran 5 V DC dari modul PSU M-510 ini selanjutnya digunakan untuk menyuplai ESP32 melalui pin Vin, yang kemudian meregulasi dan mendistribusikan tegangan sesuai kebutuhan setiap modul pendukung lain yang terhubung pada rangkaian, seperti sensor PZEM-004T, modul LoRa Ra-02 SX1278, dan LCD I2C.