

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Setelah melakukan beberapa observasi, penyusun menemukan beberapa gagasan dan ide tentang penyusunan Tugas Akhir yang berasal dari berbagai sumber yaitu berupa beberapa Jurnal maupun Tugas Akhir. Terdapat beberapa kesamaan pada beberapa sumber yang penyusun temukan terhadap Tugas Akhir yang penyusun buat. Namun, tetap terdapat beberapa perbedaan yang ada dalam perancangan Tugas Akhir oleh penyusun.

1. Berdasarkan jurnal berjudul “Rancang Bangun Sisem Monitoring Arus Bocor Isolator” penelitian yang dilakukan oleh Indah, Hulukati, dan Malago (2022), mereka merancang sistem monitoring arus bocor isolator menggunakan sensor arus SCT013 dan NodeMCU ESP8266. Sistem ini dirancang untuk memantau arus bocor pada isolator secara real-time dengan memanfaatkan platform Thingspeak sebagai media monitoring. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor arus dapat mendeteksi arus bocor mulai dari 0,001 A hingga 1,932 A pada tegangan uji 70 kV, dengan selisih pembacaan antara sensor dan multimeter yang relatif kecil [1].
2. Penelitian lain oleh Sitanggang dan Prabowo (2022) dengan jurnal berjudul “Perancangan Alat Monitoring Arus Bocor pada Kabel 20 kV Menggunakan Filter Kalman Berbasis Internet of Things”. Alat ini menggunakan sensor arus SCT-013 dan mikrokontroler Arduino Uno untuk mengukur arus bocor pada kabel 20 kV. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan filter Kalman dapat mengurangi noise pada pengukuran arus bocor, dengan rata-rata error sebesar 1,55% per fase [2].
3. Lalu Dharma Bagus Saputra, Aditya Pradana, Josua Febrian Togatorop, Lie Jasa, dan Rukmi Sari Hartati melakukan penelitian serupa dengan judul “Rancang Bangun Purwarupa Monitoring Arus Bocor Pada Kabel Grounding Trafo Incoming 20 KV di Gardu Induk Nusa Dua Berbasis Internet Of Things”. Mereka menggunakan sensor arus SCT-013, NodeMCU ESP8266, dan

platform Thingspeak serta Blynk untuk memantau arus bocor secara real-time. Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat ini memiliki akurasi yang baik dengan rata-rata error pembacaan sebesar 2,0% [3]

4. Selain itu, Sirait, Arisandi, dan Sitorus (2024) merancang sistem monitoring arus bocor pada ground kabel power trafo tenaga 150/20 kV berbasis Human Machine Interface (HMI). Mereka menggunakan sensor arus SCT-013 dan Arduino Mega 2560 untuk memproses data, serta aplikasi VTScada sebagai antarmuka HMI. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem ini mampu memantau arus bocor secara real-time dengan rata-rata error pembacaan sebesar 2,92% [4]
5. Shindy, Novizon, dan Rosnita (2023) merancang sistem pemantauan arus bocor arester secara terus-menerus berbasis web menggunakan NodeMCU. Sistem ini dirancang untuk memantau arus bocor pada arester yang disebabkan oleh sambaran petir. NodeMCU digunakan sebagai pengolah data dan pengirim data ke database web. Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem pemantauan berbasis IoT dapat meningkatkan efisiensi dan keandalan dalam mendeteksi arus bocor pada arester [5]

Dari beberapa penelitian di atas, dapat disimpulkan bahwa penggunaan sensor arus seperti SCT-013 dan mikrokontroler seperti NodeMCU atau Arduino telah terbukti efektif dalam memantau arus bocor pada berbagai peralatan listrik, seperti isolator, kabel, dan arester. Penggunaan platform IoT seperti Thingspeak, Blynk, dan VTScada juga memberikan kemudahan dalam memantau data secara real-time dan mengirimkan notifikasi jika terjadi anomali. Penelitian-penelitian ini menjadi dasar yang kuat untuk pengembangan sistem pemantauan arus bocor yang lebih canggih dan akurat di masa depan.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Kabel Power

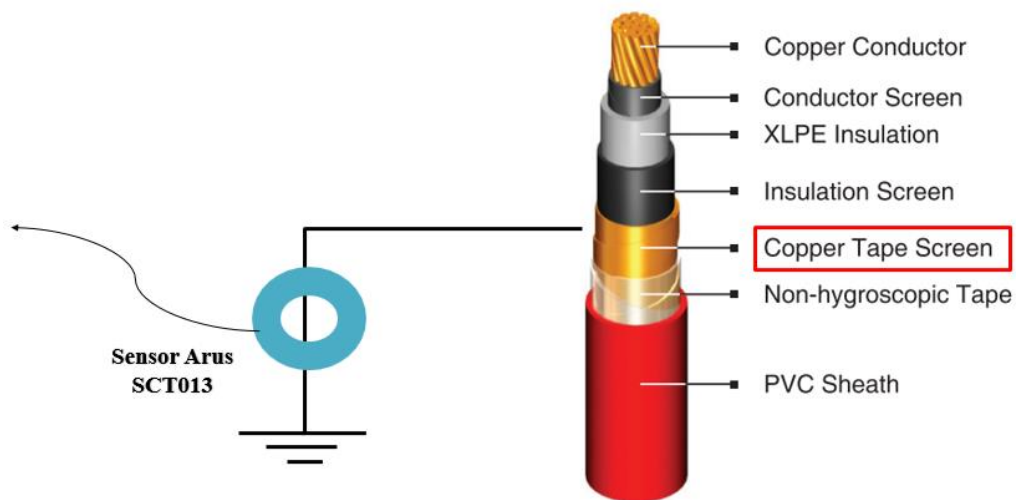
Kabel penghantar berfungsi sebagai media untuk menyalurkan arus listrik. Pemilihan material kabel, seperti tembaga atau aluminium, didasarkan pada beberapa pertimbangan, termasuk kemampuan menghantarkan arus dan biaya. Pada bagian sekunder transformator dengan tegangan 150/20 kV, jenis kabel yang umum

dipakai adalah XLPE. Kabel tersebut dipasang melalui jaringan bawah tanah dan dihubungkan ke ruang kubikel. Terdapat tiga kabel fasa, yaitu R, S, dan T, yang masing-masing dilengkapi dengan kabel daya [3].



Gambar 2. 1 Kabel XLPE 20 kV

Kabel XLPE (Cross-Linked Polyethylene) merupakan kabel listrik dengan isolasi berbahan polietilen yang telah melalui proses cross-linking, yang meningkatkan daya tahan termal dan mekanisnya, sehingga ideal untuk aplikasi pada tegangan menengah dan tinggi serta mampu bertahan dalam kondisi lingkungan yang ekstrem, seperti suhu tinggi, kelembaban, dan tekanan fisik [2]. Kabel ini sering digunakan dalam sistem distribusi listrik, khususnya pada saluran bawah tanah, karena ketahanannya yang baik dan umur pakai yang lebih lama [3]. Pentingnya memantau arus bocor pada kabel XLPE tidak dapat diabaikan, karena hal ini membantu mencegah kerusakan isolasi yang dapat mengakibatkan gangguan pada sistem distribusi listrik. Oleh karena itu, penerapan teknologi Internet of Things (IoT) dalam memantau arus bocor menjadi solusi efektif untuk memastikan keandalan sistem tetap terjaga.



Gambar 2. 2 Struktur Kabel XLPE

Kabel XLPE terdiri dari beberapa lapisan komponen, di antaranya Lapisan Anti Korosif (PVC), Selubung Logam (Lapisan Tembaga), Lapisan Semikonduktor Isolasi, Isolasi XLPE, Lapisan Konduktor, dan Konduktor. Lapisan Anti Korosif, yang terletak di bagian terluar kabel, berperan melindungi konduktor dari kerusakan fisik. Selubung Logam terbuat dari tembaga yang dibentuk menjadi pita dan dililitkan sepanjang konduktor. Fungsi utamanya adalah untuk menetralkan medan listrik eksternal serta bertindak sebagai elektroda kedua dalam pembentukan kapasitor pada kabel [3].

Struktur berlapis ini dirancang untuk memberikan perlindungan maksimal terhadap gangguan listrik dan mekanik, serta memastikan keamanan dalam penyaluran daya. Dalam konteks sistem monitoring arus bocor, copper tape screen menjadi titik penting karena di sinilah arus bocor dapat dideteksi sebelum dialirkan ke tanah. Oleh karena itu, pemasangan sensor arus bocor dilakukan pada bagian kabel yang terhubung langsung dengan copper tape screen, sehingga memungkinkan pemantauan secara real-time.

2.2.2 Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) adalah sebuah sistem komprehensif yang menghubungkan berbagai perangkat fisik ke internet, memungkinkan mereka untuk mengumpulkan, mengirimkan, dan memproses data secara mandiri guna meningkatkan efisiensi, kenyamanan, dan produktivitas dalam berbagai aspek

kehidupan manusia. Konsep ini mencakup perangkat-perangkat sehari-hari seperti alat rumah tangga, kendaraan, peralatan industri, hingga infrastruktur perkotaan yang dilengkapi dengan sensor, perangkat lunak, dan teknologi konektivitas untuk berkomunikasi secara otomatis baik dengan pengguna maupun sesama perangkat tanpa memerlukan interaksi manusia secara langsung. IoT bekerja melalui siklus yang dimulai dari pengumpulan data oleh sensor-sensor canggih yang tertanam dalam perangkat, kemudian mentransmisikan data tersebut melalui jaringan internet ke platform komputasi awan atau sistem edge computing untuk dianalisis dan diproses, yang akhirnya menghasilkan output berupa informasi yang bermanfaat atau tindakan otomatis sesuai dengan kebutuhan pengguna.

Sistem Internet of Things (IoT) bekerja melalui tiga komponen fundamental yang saling terintegrasi: perangkat fisik yang telah dilengkapi dengan modul IoT, infrastruktur jaringan internet termasuk modem dan router, serta pusat data cloud yang berfungsi sebagai penyimpanan aplikasi dan basis data. Dalam perkembangannya, setiap objek dapat diidentifikasi secara unik melalui alamat IP khusus, memungkinkannya berkomunikasi dengan perangkat lain yang juga memiliki identifikasi IP melalui jaringan internet. IoT mengimplementasikan logika pemrograman tertentu di mana setiap perintah yang dijalankan akan menciptakan interaksi otomatis antar perangkat yang terhubung, beroperasi secara mandiri tanpa memerlukan intervensi manusia dan tanpa terbatas oleh jarak fisik. Jaringan internet berperan sebagai media penghubung utama dalam proses komunikasi antar mesin ini, sementara peran manusia terbatas pada pengaturan awal sistem dan pengawasan operasionalnya. Mikrokontroler, yang merupakan inti dari sistem IoT, pada dasarnya merupakan unit komputer mini yang dikemas dalam sirkuit terpadu (IC) dan memerlukan pemrograman awal sebelum dapat berfungsi, artinya perangkat ini hanya akan bekerja sesuai dengan instruksi atau program yang telah dimuat sebelumnya ke dalam memorinya [6]

2.2.3 Standar Arus Bocor

Arus bocor merupakan aliran listrik yang dapat melewati atau menembus permukaan material isolator. Peran utama isolasi adalah untuk memisahkan dua atau lebih konduktor yang berdekatan secara elektrik, sehingga mencegah

terjadinya kebocoran arus. Selain itu, arus bocor juga dapat muncul karena adanya rongga atau celah pada material isolator, yang mungkin disebabkan oleh kesalahan dalam proses produksi atau pembuatan bahan isolasi tersebut. [3]

Menurut Pedoman Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2011 yang juga ditetapkan sebagai SNI 0225:2011, pengamanan terhadap arus bocor diwajibkan untuk melindungi manusia dari bahaya sengatan listrik maupun mencegah potensi kebakaran. PUIL mengatur bahwa perangkat proteksi arus bocor seperti Earth Leakage Circuit Breaker (ELCB) atau Residual Current Circuit Breaker (RCB/RCBO) harus dipasang pada instalasi tertentu. Perangkat ini bekerja dengan prinsip mendeteksi ketidakseimbangan antara arus yang mengalir pada penghantar fase dan netral. Apabila terdapat selisih arus yang signifikan, hal ini menunjukkan adanya kebocoran arus menuju tanah dan perangkat proteksi akan segera memutus aliran listrik.

Standar yang berlaku dalam PUIL menyebutkan bahwa nilai ambang sensitivitas arus bocor yang diperbolehkan untuk proteksi manusia adalah maksimal 30 mA. Nilai ini didasarkan pada penelitian mengenai efek arus listrik terhadap tubuh manusia, di mana arus di atas 10 mA sudah dapat menyebabkan kontraksi otot dan kesulitan melepaskan diri, sedangkan arus di atas 30 mA berpotensi menimbulkan gangguan pernapasan dan fibrilasi jantung. Oleh karena itu, batas 30 mA dianggap sebagai nilai ambang aman yang dapat digunakan untuk melindungi manusia dari risiko fatal akibat sengatan listrik.

Dengan demikian, standar arus bocor menurut PUIL menegaskan bahwa setiap instalasi listrik harus memperhatikan aspek keselamatan melalui pemasangan perangkat proteksi arus bocor. Ambang arus bocor sebesar 30 mA menjadi acuan utama dalam perancangan maupun pengujian sistem proteksi listrik. Ketentuan ini juga sejalan dengan standar internasional IEC yang digunakan secara luas pada sistem instalasi tenaga listrik modern.

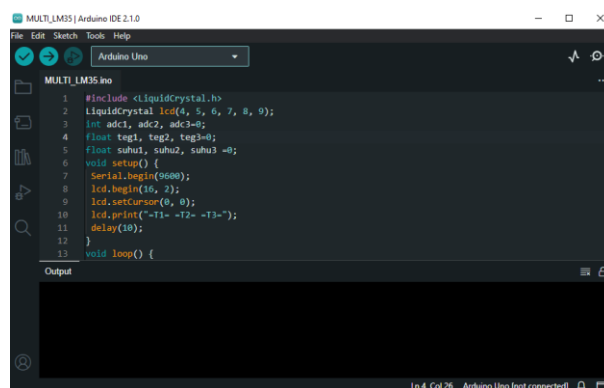
2.2.4 Arduino IDE



Gambar 2. 3 Arduino IDE

Arduino IDE adalah sebuah perangkat lunak (software) yang digunakan untuk menulis, mengedit, dan mengunggah kode program ke papan mikrokontroler Arduino. Dalam bahasa yang lebih sederhana, Arduino IDE adalah alat yang memungkinkan pengguna untuk membuat program (disebut juga "sketsa") dan mengirimkannya ke papan Arduino agar bisa menjalankan tugas-tugas tertentu, seperti mengontrol lampu, sensor, motor, atau perangkat elektronik lainnya.

Antarmuka Arduino IDE cukup mudah digunakan, bahkan untuk pemula. Pengguna dapat menulis kode dalam bahasa pemrograman C/C++, yang kemudian dikompilasi (diubah menjadi bahasa mesin) dan diunggah ke papan Arduino melalui kabel USB. Selain itu, Arduino IDE dilengkapi dengan berbagai contoh kode dan pustaka (library) yang memudahkan pengguna dalam mengembangkan proyek-proyek elektronik.

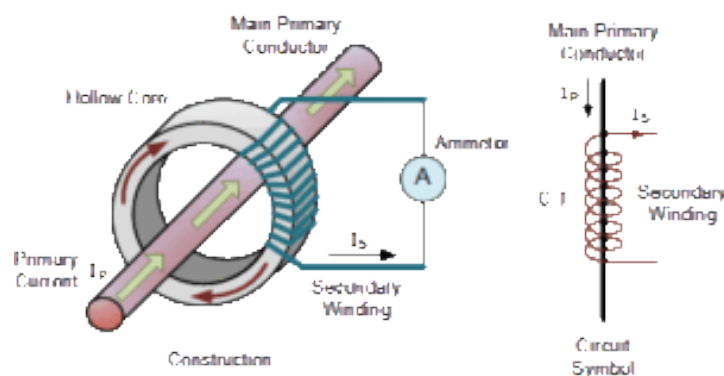


Gambar 2. 4 Arduino IDE

Pada tampilan awal *software* Arduino IDE terdiri dari beberapa *tools*, diantaranya:

- a. *Verify* berfungsi untuk melakukan checking kode yang sedang dibuat apakah sudah sesuai dengan kaidah pemrograman yang ada atau belum.
- b. *Upload* berfungsi untuk melakukan kompilasi program atau kode yang kamu buat menjadi bahasa yang dapat dipahami oleh mesin atau Arduino.
- c. *New* berfungsi untuk membuat *Sketch* baru
- d. *Open* berfungsi untuk membuka *Sketch* yang pernah buat dan membuka kembali untuk dilakukan editing atau sekedar upload ulang ke Arduino.
- e. *Save* berfungsi untuk menyimpan *Sketch* yang telah dibuat.
- f. *Serial Monitor* berfungsi untuk membuka serial monitor. Serial monitor disini merupakan jendela yang menampilkan data apa saja yang dikirimkan atau dipertukarkan antara arduino dengan sketch pada port serialnya. Serial Monitor ini sangat berguna sekali ketika kamu ingin membuat program atau melakukan debugging tanpa menggunakan LCD pada Arduino. Serial monitor ini dapat digunakan untuk menampilkan nilai proses, nilai pembacaan, bahkan pesan error [7].

2.2.5 Sensor Arus



Gambar 2. 5 Wiring Kerja Sensor Arus

Split-core Current Transformer (SCT) merupakan sensor arus AC yang bekerja berdasarkan prinsip transformator arus. Alat ini dirancang untuk menghasilkan arus pada sisi sekunder yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan arus pada sisi primernya. Fungsinya adalah untuk mengonversi arus besar dari jaringan transmisi daya menjadi arus yang lebih kecil dan aman, sehingga cocok digunakan dalam proses pengukuran. Struktur dari trafo arus ini terdiri atas lilitan sekunder yang dibalut pada inti cincin berbahan ferromagnetik, sementara bagian lilitan primer

berupa konduktor yang melewati bagian tengah cincin tersebut. Inti ferromagnetik berperan dalam menahan sebagian fluks magnet dari arus primer. Fluks ini kemudian menginduksi tegangan dan arus pada lilitan sekunder, yang pada akhirnya menentukan besarnya arus keluaran. Umumnya, transformator arus memiliki rasio perbandingan seperti 600:5, 800:5, atau 1000:5 ampere, di mana arus pada lilitan sekunder biasanya distandarkan sebesar 5 ampere.

Sensor arus SCT013 adalah salah satu jenis sensor arus yang menggunakan prinsip kerja diatas dan digunakan untuk mengukur arus bolak-balik. Salah satu contohnya adalah SCT013-100 yang dapat mengukur Arus AC sampai dengan 100 Ampere.



Gambar 2. 6 Sensor Arus SCT013-100

Sensor SCT013 tipe 100A:50mA memiliki rasio transformasi arus, di mana arus maksimum 100A akan dikonversikan menjadi arus sekunder sebesar 50mA. Karena output sensor ini berupa arus, maka biasanya dibutuhkan beban resistor (burden resistor) untuk mengubah arus menjadi tegangan agar bisa dibaca oleh pin analog pada mikrokontroler seperti ESP32.

2.2.6 Mikrokontroler ESP 32



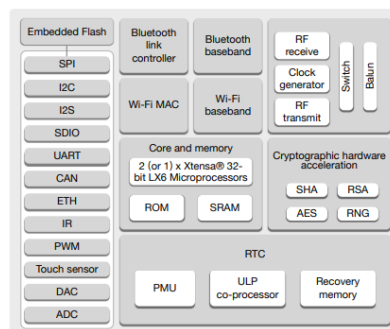
Gambar 2. 7 ESP 32 Devkit V1

Mikrokontroler merupakan sebuah perangkat elektronik terintegrasi yang digunakan untuk mengendalikan sistem atau perangkat lainnya secara otomatis. Sebuah mikrokontroler umumnya terdiri dari unit pemroses (CPU), memori (RAM, ROM, Flash), serta berbagai antarmuka input/output (I/O) seperti ADC, PWM, UART, SPI, dan I2C, yang semuanya dikemas dalam satu chip tunggal. Mikrokontroler bekerja berdasarkan instruksi atau program yang telah ditanamkan di dalamnya untuk menjalankan berbagai fungsi kendali terhadap komponen eksternal.

Mikrokontroler ESP32 adalah perangkat yang dikembangkan oleh Espressif Systems. Mikrokontroler ini menggabungkan modul Wi-Fi dan Bluetooth dual-mode dalam satu chip (SoC), menjadikannya sangat cocok untuk aplikasi Internet of Things (IoT). Dirancang sebagai perangkat mobile yang user-friendly dan sebagai platform untuk mengimplementasikan IoT, ESP32 menawarkan efisiensi daya yang tinggi berkat fitur-fitur penghemat energi seperti resolusi clock gating yang optimal, berbagai mode daya, dan penskalaan daya yang dinamis [8].

Dalam perancangan sistem monitoring arus bocor berbasis Internet of Things (IoT) ini, digunakan mikrokontroler ESP32 sebagai otak utama pengendali sistem. ESP32 adalah sebuah mikrokontroler yang memiliki performa tinggi, efisiensi daya, serta telah terintegrasi dengan modul WiFi dan Bluetooth dalam satu chip. ESP32 dirancang untuk aplikasi IoT dan sistem tertanam yang membutuhkan koneksi nirkabel serta pengolahan data secara real-time.

ESP32 dilengkapi dengan dual-core CPU Xtensa® LX6 yang mampu bekerja hingga kecepatan 240 MHz, serta dilengkapi dengan SRAM 520 KB dan memori flash hingga 4 MB, bergantung pada versi modul yang digunakan. Selain itu, ESP32 memiliki banyak pin GPIO (General Purpose Input Output) yang mendukung berbagai antarmuka komunikasi seperti UART, SPI, I2C, ADC (Analog to Digital Converter), DAC (Digital to Analog Converter), PWM (Pulse Width Modulation), dan lain-lain.



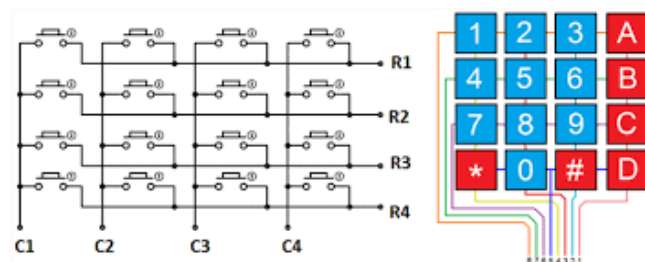
Gambar 2. 8 Blok Diagram ESP32

Dalam tugas akhir ini, ESP32 digunakan untuk menjalankan fungsi-fungsi utama sebagai berikut:

- a. Mengakses dan membaca data dari sensor arus SCT013 pada tiga fasa listrik.
- b. Melakukan koreksi dan pengolahan data pembacaan sensor arus menggunakan rumus kalibrasi tertentu.
- c. Menampilkan data pembacaan arus dan status sistem ke layar LCD I2C 20x4.
- d. Mencatat waktu dan tanggal pembacaan arus melalui integrasi dengan modul RTC (Real Time Clock) DS3231.
- e. Menyimpan data hasil pembacaan arus dan waktu ke dalam kartu memori Micro SD untuk keperluan log dan dokumentasi data.
- f. Mengirimkan notifikasi secara otomatis ke pengguna melalui aplikasi Telegram apabila nilai arus bocor melebihi batas aman yang telah ditentukan.
- g. Berinteraksi dengan pengguna melalui keypad 4x4 untuk pengaturan ambang batas arus dan tampilan data.
- h. Memonitoring jarak jauh menggunakan smartphone yang terdapat pada aplikasi IoT Remote.

Penggunaan ESP32 sangat ideal untuk sistem ini karena telah mendukung konektivitas internet (WiFi), yang memungkinkan pengiriman notifikasi ke perangkat pengguna melalui jaringan. Selain itu, kemudahan dalam pemrograman menggunakan Arduino IDE serta dukungan dari komunitas pengembang menjadikan ESP32 sebagai pilihan tepat dalam proyek monitoring berbasis IoT. Berikut spesifikasi dari modul ESP32 yang dijelaskan pada tabel.

2.2.7 Keypad 4x4



Gambar 2. 9 Konstruksi Matriks Keypad 4x4

Keypad 4x4 adalah perangkat input yang terdiri dari 16 tombol yang disusun dalam bentuk matriks 4 baris dan 4 kolom. Keypad ini biasanya digunakan untuk memasukkan data numerik, alfabet, atau perintah tertentu dalam berbagai aplikasi elektronik seperti sistem keamanan, panel kontrol, atau perangkat embedded [9]. Setiap tombol pada keypad terletak di persimpangan antara baris dan kolom, dan ketika tombol ditekan, ia akan menghubungkan baris dan kolom yang bersangkutan.

Keypad 4x4 bekerja berdasarkan prinsip matriks scanning, di mana mikrokontroler atau sistem elektronik akan mengirim sinyal ke setiap baris secara bergantian dan membaca nilai dari setiap kolom untuk mendeteksi tombol mana yang ditekan [10]. Dengan hanya menggunakan 8 pin (4 untuk baris dan 4 untuk kolom), keypad ini menghemat pin mikrokontroler dan mudah diintegrasikan ke dalam proyek-proyek elektronik [11]. Keypad 4x4 sering digunakan dalam aplikasi seperti sistem keamanan untuk memasukkan PIN, perangkat elektronik konsumen seperti microwave atau mesin cuci, serta proyek-proyek berbasis mikrokontroler [12].

Untuk menggunakannya, keypad dihubungkan ke mikrokontroler seperti Arduino, dan dengan bantuan library khusus, program dapat melakukan scanning

baris dan kolom untuk mendeteksi tombol yang ditekan [13]. Keypad 4x4 memiliki keunggulan seperti efisiensi pin, harga terjangkau, dan kemudahan penggunaan, membuatnya menjadi komponen yang populer dalam dunia elektronik dan embedded systems.. Berikut adalah struktur atau konstruksi dari matriks keypad 4x4 tersebut [14].

Keterangan:

- a. R1 Pin untuk mewakili baris ke-1
- b. R2 Pin untuk mewakili baris ke-2
- c. R3 Pin untuk mewakili baris ke-3
- d. R4 Pin untuk mewakili baris ke-4
- e. C1 Pin untuk mewakili kolom ke-1
- f. C2 Pin untuk mewakili kolom ke-2
- g. C3 Pin untuk mewakili kolom ke-3
- h. C4 Pin untuk mewakili kolom ke-4

Pada proyek ini, keypad 4x4 dihubungkan ke 8 pin GPIO ESP32, yang dikonfigurasi untuk melakukan pembacaan nilai tombol secara periodik di dalam program. Setiap tombol memiliki nilai unik (misalnya: tombol “1” berada di R1-C1, tombol “D” di R4-C4), dan ketika ditekan, ESP32 akan mendeteksinya serta menjalankan aksi sesuai dengan logika program yang telah ditentukan.

Untuk memberikan umpan balik kepada pengguna, setiap tombol yang ditekan dapat langsung ditampilkan di LCD 20x4 I2C, sehingga pengguna dapat melihat nilai ambang batas yang sedang disetel. Komunikasi antar keypad, ESP32, dan LCD dilakukan secara simultan untuk menciptakan sistem yang interaktif dan mudah digunakan.

2.2.8 LCD 20X4 I2C

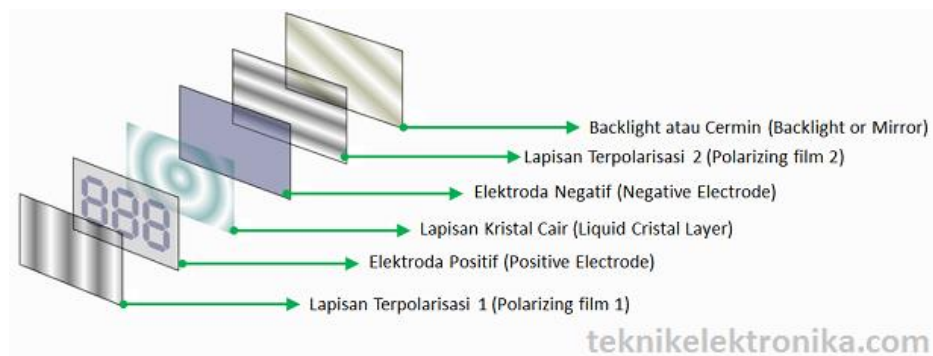


Gambar 2. 10 LCD 20X4 I2C

LCD 20x4 I2C adalah sebuah modul layar Liquid Crystal Display (LCD) berukuran 20 kolom dan 4 baris yang dilengkapi dengan antarmuka I2C (Inter-Integrated Circuit). Modul ini memungkinkan pengguna untuk menampilkan teks atau informasi dalam empat baris, dengan masing-masing baris mampu menampilkan hingga 20 karakter. Keunggulan utama dari LCD 20x4 I2C adalah kemudahan penggunaannya karena antarmuka I2C yang mengurangi jumlah kabel yang diperlukan untuk menghubungkan LCD ke mikrokontroler.

LCD ini menggunakan antarmuka I2C untuk menghemat jumlah pin yang diperlukan. Dengan menghubungkan LCD melalui I2C, hanya dibutuhkan 4 pin untuk terhubung ke mikrokontroler, yaitu SCL, SDA, VCC, dan GND. Pin VCC berfungsi sebagai input tegangan, sedangkan pin SCL digunakan untuk menyinkronkan waktu transfer data agar tepat. Pin SDA bertugas untuk mengirimkan data antara mikrokontroler dan LCD, sementara pin GND berperan sebagai kutub negatif atau ground pada komponen [7].

LCD 20x4 bekerja berdasarkan prinsip polaritas cahaya cair yang dikendalikan oleh tegangan. Saat tegangan tertentu diberikan ke setiap segmen piksel, segmen tersebut akan menampilkan karakter berdasarkan kode ASCII. Modul I2C yang menempel di belakang LCD bertindak sebagai konverter dari sinyal I2C menjadi paralel yang bisa dimengerti oleh modul LCD.



Gambar 2. 11 Struktur Dasar LCD

Sebagaimana kita pelajari dalam fisika, cahaya putih sebenarnya merupakan gabungan dari ratusan spektrum warna yang berbeda. Warna-warna ini dapat terlihat apabila cahaya putih mengalami pembelokan arah atau pemantulan, yang berarti sudut refleksi akan memengaruhi warna yang tampak.

Pada layar LCD, pencahayaan berasal dari backlight berwarna putih yang berfungsi menerangi kristal cair (liquid crystal). Kristal cair tersebut bertugas menyaring dan memantulkan cahaya backlight berdasarkan sudut tertentu, sehingga menghasilkan warna yang diinginkan. Perubahan sudut kristal cair ini terjadi ketika diberikan tegangan listrik dengan nilai tertentu.

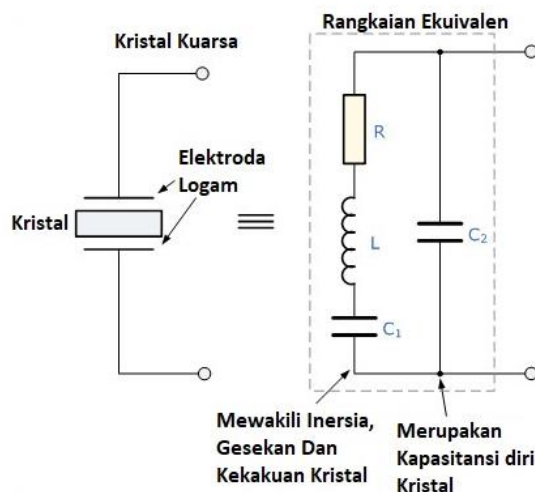
Karena kristal cair mampu mengubah arah dan intensitas cahaya yang diteruskannya, maka cahaya putih dari backlight dapat diatur untuk menghasilkan berbagai warna. Untuk menampilkan warna putih, kristal cair dibuka maksimal agar seluruh cahaya backlight dapat melewati lapisan LCD. Sebaliknya, untuk menghasilkan warna hitam, kristal cair ditutup sepenuhnya agar tidak ada cahaya yang lolos. Sedangkan untuk menampilkan warna lainnya, dilakukan pengaturan sudut kristal cair secara spesifik guna menyaring cahaya putih menjadi warna yang diinginkan.

Pada praktiknya, komunikasi antara ESP32 dan LCD I2C dikendalikan melalui pustaka khusus seperti `LiquidCrystal_I2C.h`, yang memungkinkan pemrograman lebih mudah, seperti pengaturan posisi kursor dan pencetakan karakter di layar.

2.2.9 Real Time Clock (RTC)

Real Time Clock (RTC) merupakan komponen elektronik yang digunakan untuk menjaga dan mencatat waktu secara terus-menerus, mencakup satuan detik, menit, jam, hari, hingga tahun. Fungsi ini sangat penting dalam sistem elektronik yang memerlukan pencatatan data berbasis waktu, seperti sistem monitoring arus bocor. RTC dirancang untuk tetap bekerja meskipun sistem utama dalam kondisi mati atau restart, dengan memanfaatkan sumber daya cadangan berupa baterai koin (coin cell).

Prinsip dasar RTC didasarkan pada kerja osilator kristal yang menghasilkan frekuensi stabil, umumnya sebesar 32,768 Hz. Frekuensi ini dipilih karena merupakan angka pangkat dua (2^{15}), sehingga memudahkan pembagian waktu secara digital menjadi satu detik. Osilator kristal bekerja menggunakan prinsip piezoelektrik, di mana kristal kuarsa akan bergetar secara alami ketika diberi tegangan AC. Getaran ini menghasilkan gelombang frekuensi yang sangat presisi, yang kemudian digunakan oleh rangkaian pencacah digital untuk menghitung waktu.



Gambar 2. 12 Rangkaian Osilator Kristal

Namun, penggunaan osilator kristal eksternal seperti pada RTC tipe konvensional (misalnya DS1307) memiliki kekurangan, yaitu sensitivitas terhadap perubahan suhu dan tegangan. Dalam jangka panjang, perubahan lingkungan ini dapat menyebabkan penyimpangan waktu atau drift, bahkan hingga beberapa detik.

per hari. Ketidakakuratan ini tentu menjadi kendala dalam sistem yang membutuhkan ketepatan waktu tinggi, terutama untuk pencatatan data secara periodik.

Untuk mengatasi kelemahan tersebut, digunakan modul RTC DS3231, yaitu modul waktu nyata dengan osilator kristal presisi tinggi yang sudah dilengkapi kompensasi suhu internal (Temperature Compensated Crystal Oscillator, TCXO). DS3231 menawarkan tingkat akurasi yang jauh lebih tinggi, dengan deviasi waktu hanya sekitar ± 2 ppm (parts per million), atau setara dengan sekitar ± 1 menit dalam satu tahun.



Gambar 2. 13 RTC DS3231

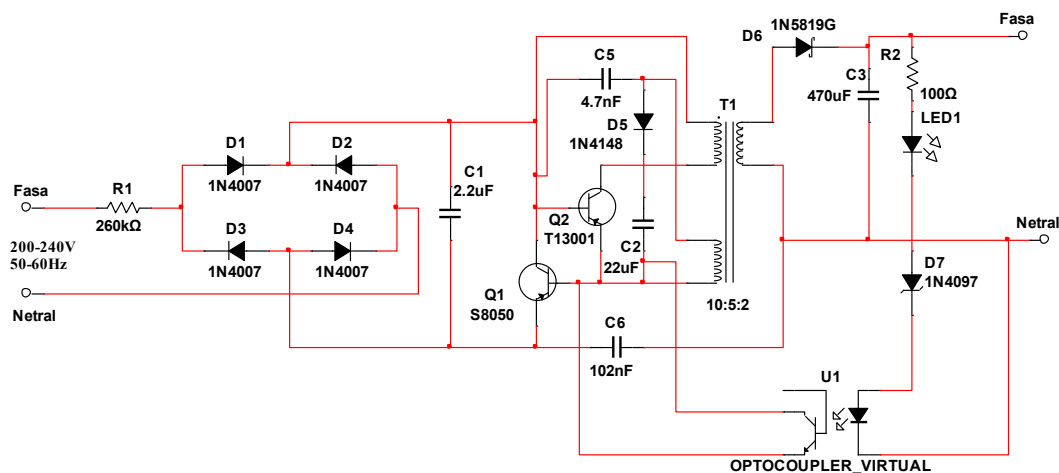
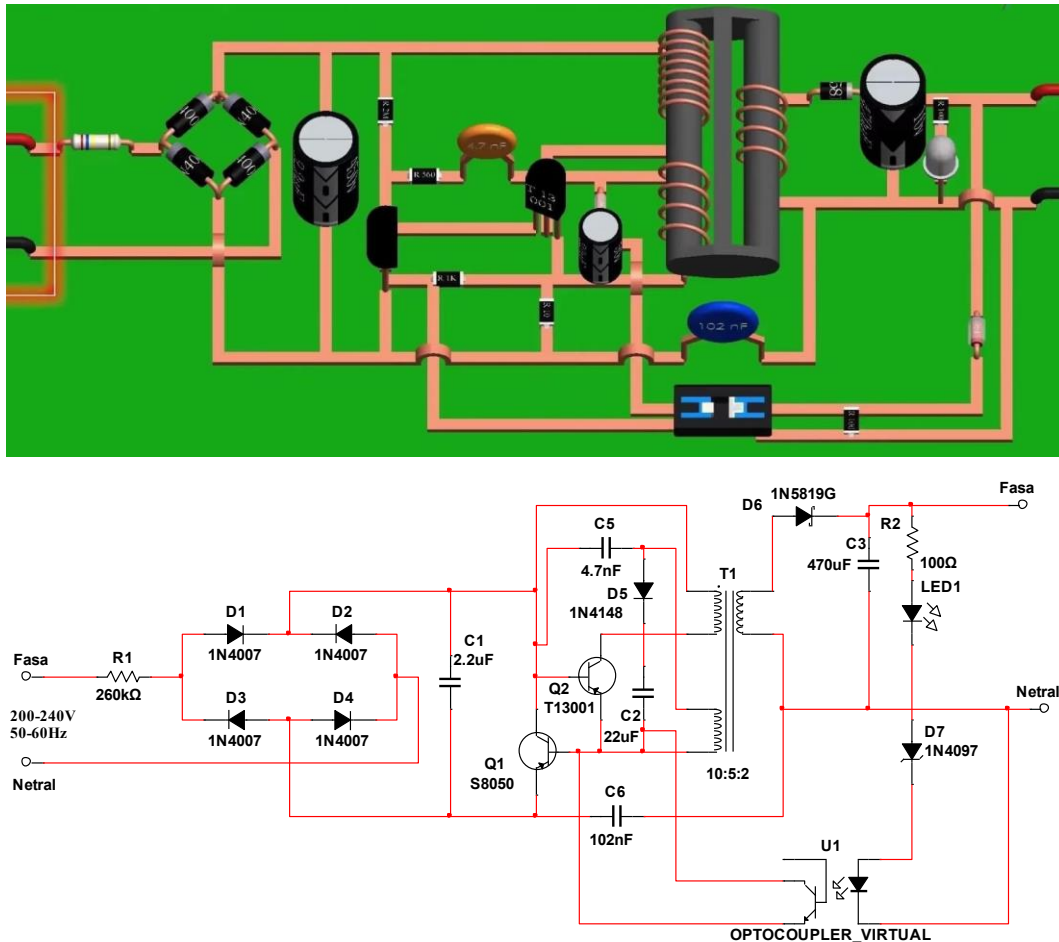
Modul DS3231 memiliki berbagai keunggulan, antara lain:

- Stabil terhadap suhu lingkungan, karena dilengkapi dengan kompensasi suhu otomatis.
- Konsumsi daya sangat rendah, sehingga tetap dapat bekerja dengan hanya menggunakan baterai cadangan.
- Komunikasi mudah melalui antarmuka I2C, yang hanya memerlukan dua jalur data (SDA dan SCL).
- Fitur tambahan, seperti alarm waktu dan deteksi kehilangan daya (power-fail detection), yang mendukung keandalan sistem monitoring.

Dalam perancangan sistem monitoring arus bocor berbasis Internet of Things ini, penggunaan RTC DS3231 dipilih karena akurasinya yang tinggi dan keandalannya menjaga waktu dalam berbagai kondisi lingkungan. Modul ini sangat ideal untuk mencatat waktu kejadian arus bocor secara tepat, memastikan integritas data, serta memudahkan proses analisis dan pelacakan gangguan. Kemampuannya mempertahankan waktu meskipun sistem dimatikan juga menjadikannya solusi

yang stabil dan efisien dalam sistem otomatis yang membutuhkan pelacakan waktu jangka panjang

2.2.10 Power Supply



Gambar 2. 14 Rangkaian SMPS

Power supply atau catu daya merupakan salah satu komponen penting dalam sistem elektronika yang berfungsi untuk menyediakan sumber energi listrik dengan karakteristik tertentu agar sesuai dengan kebutuhan rangkaian. Secara umum, power supply bertugas mengubah energi listrik dari satu bentuk ke bentuk lainnya, misalnya dari arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC), serta mengatur besar tegangan dan arus agar sesuai dengan perangkat yang digunakan. Dalam konteks sistem berbasis mikrokontroler, kestabilan dan kesesuaian tegangan sangat berpengaruh terhadap keandalan sistem secara keseluruhan.

Salah satu jenis power supply yang umum digunakan adalah switching power supply. Switch Mode Power Supply (SMPS) merupakan jenis catu daya yang digunakan untuk mengubah tegangan AC (arus bolak-balik) menjadi tegangan DC (arus searah) dengan efisiensi tinggi dan ukuran fisik yang lebih ringkas dibandingkan catu daya konvensional berbasis transformator besar. Proses konversi tegangan pada SMPS tidak sesederhana sekadar merubah AC menjadi DC, melainkan melalui beberapa tahapan yang kompleks dan terstruktur.

Secara umum, prinsip kerja SMPS dimulai dari penyearahan sinyal AC masukan menjadi tegangan DC menggunakan rangkaian penyearah (rectifier) dan kapasitor filter. Setelah itu, tegangan DC ini dikonversi kembali menjadi sinyal AC, namun pada frekuensi tinggi (sekitar 15–50 kHz) melalui rangkaian osilator dan switching. Tujuan dari konversi ini adalah agar proses penurunan tegangan menggunakan transformator berfrekuensi tinggi menjadi lebih efisien dan memungkinkan penggunaan inti ferit berukuran kecil.



Gambar 2. 15 Power Supply Adaptor 5V/2A

Sebagai ilustrasi, pada adaptor yang mengubah tegangan AC 220V menjadi DC 5V, proses konversinya melibatkan berbagai komponen penting seperti dioda, kapasitor, transistor, resistor, transformator, dan optocoupler. Rangkaian dimulai dari input AC 220V yang melewati resistor pembatas, kemudian disearahkan oleh dioda bridge (misalnya 1N4007) dan difilter oleh kapasitor elektrolit (misalnya 2,2 μ F/450V). Tegangan DC hasil penyearahan ini menjadi input bagi rangkaian switching yang terdiri dari transistor switching (seperti S8050 dan 13001), dioda ultrafast (misalnya 1N4148), serta komponen pendukung lainnya.

Transformator frekuensi tinggi dalam SMPS memiliki tiga lilitan, yaitu lilitan primer, sekunder, dan tambahan (auxiliary). Lilitan tambahan digunakan sebagai

umpan balik untuk mempertahankan osilasi transistor melalui mekanisme induksi. Switching transistor akan menyala dan padam secara bergantian dengan kecepatan tinggi (hingga puluhan ribu kali per detik), menyebabkan arus mengalir secara terputus-putus melalui lilitan primer transformator dan menimbulkan tegangan induksi di lilitan sekunder dan tambahan.

Tegangan dari lilitan sekunder kemudian disearahkan oleh dioda (misalnya 1N5819) dan difilter kembali oleh kapasitor ($470\ \mu\text{F}/10\text{V}$) untuk menghasilkan tegangan DC 5V pada output. Tegangan ini juga mengaktifkan indikator LED sebagai penanda kerja sistem.

Stabilitas tegangan output dijaga oleh sistem umpan balik yang terdiri dari optocoupler (misalnya PC817) dan dioda zener (misalnya 4,2V). Saat tegangan output melebihi nilai yang ditentukan, dioda zener mulai menghantarkan arus dan mengaktifkan LED pada optocoupler. Cahaya LED ini memicu fototransistor dalam optocoupler, yang akan memengaruhi jalur switching pada sisi primer sehingga mengurangi atau memutuskan arus pada lilitan primer. Akibatnya, tegangan output turun kembali hingga berada dalam batas yang diinginkan, dan proses kontrol ini terus berlangsung secara otomatis.

Keunggulan utama dari SMPS dibandingkan power supply konvensional adalah efisiensinya yang tinggi dan ukuran fisik yang lebih kecil. Hal ini dimungkinkan karena transformator SMPS bekerja pada frekuensi tinggi, berbeda dengan transformator konvensional yang bekerja pada frekuensi 50–60 Hz dan membutuhkan ukuran yang lebih besar untuk mentransfer daya yang sama.

Dengan demikian, proses konversi daya pada SMPS jauh lebih kompleks namun memberikan performa yang lebih baik dalam hal efisiensi, stabilitas, dan ukuran. Oleh karena itu, SMPS banyak digunakan dalam perangkat elektronik modern yang membutuhkan catu daya DC dengan spesifikasi yang presisi dan bentuk fisik yang ringkas

2.2.11 Telegram Bot



Gambar 2. 16 Tampilan Telegram Bot

Telegram merupakan platform perpesanan yang ringan, cepat, dan tanpa iklan, menjadikannya efisien untuk digunakan. Salah satu fitur unggulannya adalah dukungan terhadap bot, atau yang biasa disebut Telegram bot, yang memungkinkan interaksi dengan perangkat mikrokontroler secara otomatis [17].

Dalam sistem monitoring arus bocor ini, Telegram Bot digunakan sebagai media notifikasi berbasis Internet of Things (IoT) untuk mengirimkan pesan peringatan kepada pengguna apabila terjadi kebocoran arus yang melebihi batas aman yang telah ditentukan. Hal ini memberikan kemudahan dan fleksibilitas karena pengguna dapat menerima informasi dari jarak jauh melalui perangkat seluler yang terhubung ke jaringan internet.

Telegram Bot bekerja dengan prinsip client-server, di mana ESP32 sebagai client akan mengakses API Telegram melalui koneksi internet (menggunakan WiFi), kemudian mengirimkan perintah untuk mengirim pesan ke ID pengguna tertentu. Secara umum, alur kerja Telegram Bot dalam sistem ini adalah sebagai berikut:

1. ESP32 terhubung ke jaringan WiFi.
2. Ketika arus bocor melebihi batas, ESP32 memicu perintah untuk mengirimkan notifikasi.

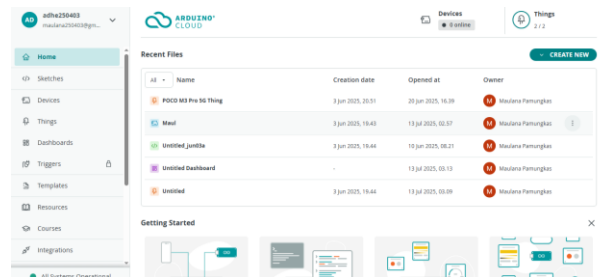
3. Notifikasi dikirim dalam bentuk pesan teks melalui Telegram Bot Token ke Chat ID pengguna.
4. Pengguna menerima pesan peringatan langsung di aplikasi Telegram.

Komponen Utama dalam Implementasi Telegram Bot:

1. Bot Token: Merupakan kunci autentikasi yang diperoleh dari BotFather di Telegram dan digunakan oleh ESP32 untuk mengakses API Telegram.
2. Chat ID: ID pengguna atau grup yang menjadi tujuan pengiriman pesan.
3. Library Arduino (Universal Telegram Bot): Digunakan dalam pemrograman ESP32 untuk berkomunikasi dengan API Telegram.

Dengan memanfaatkan Telegram Bot, sistem monitoring arus bocor menjadi lebih responsif, efisien, dan adaptif terhadap kebutuhan pengawasan jarak jauh, sekaligus meningkatkan keselamatan pengguna dan mencegah potensi bahaya listrik lebih awal

2.2.12 Arduino IoT Cloud



Gambar 2. 17 Tampilan Arduino IoT Cloud

Arduino IoT Cloud adalah layanan berbasis cloud dari Arduino yang memudahkan pengguna dalam membuat, menghubungkan, dan mengelola perangkat Internet of Things (IoT) secara remote [18] .

Platform ini memungkinkan perangkat mikrokontroler seperti ESP32, ESP8266, atau Arduino MKR series untuk terhubung ke internet dan mengirimkan data sensor secara real-time ke dashboard berbasis cloud, sehingga pengguna dapat melakukan pemantauan dari jarak jauh melalui komputer maupun perangkat mobile.

Dalam sistem monitoring arus bocor ini, Arduino IoT Cloud digunakan untuk menampilkan data arus bocor secara online, sehingga pengguna dapat mengetahui kondisi sistem kelistrikan kapan saja. Arduino IoT Cloud bekerja dengan cara

menghubungkan mikrokontroler ke server cloud Arduino menggunakan koneksi Wi-Fi. Setelah terhubung, data yang dikirimkan dari sensor (misalnya data arus bocor dari sensor SCT013) akan diproses dan ditampilkan pada IoT Dashboard. Untuk mendukung komunikasi antara perangkat dan cloud, Arduino menyediakan library dan tools seperti:

1. ArduinoIoTCloud.h
2. Arduino_ConnectionHandler.h
3. Thing Properties (.ino)
4. Device ID dan Secret Key

Perangkat mikrokontroler perlu ditautkan ke akun pengguna melalui Arduino Device Manager, kemudian dikonfigurasi melalui "Thing" yang berisi variabel data, koneksi Wi-Fi, dan pengaturan lainnya.

2.2.13 Arduino Iot Remote

Arduino IoT Remote adalah aplikasi mobile resmi dari Arduino yang memungkinkan pengguna mengontrol dan memantau perangkat IoT berbasis Arduino secara real-time dari smartphone [19].

Dalam implementasi sistem monitoring arus bocor berbasis IoT, Arduino IoT Remote berperan sebagai antarmuka pengguna (user interface) untuk melihat data pembacaan arus bocor dari jarak jauh melalui smartphone. Aplikasi ini terhubung langsung dengan akun Arduino Cloud pengguna dan menampilkan data dalam format yang interaktif. Cara Menggunakan Arduino IoT Remote yaitu:

1. Unduh aplikasi Arduino IoT Remote dari Google Play Store atau Apple App Store.
2. Login menggunakan akun yang sama dengan akun Arduino Cloud.
3. Aplikasi akan menampilkan daftar “Things” yang telah dibuat pada Arduino IoT Cloud.
4. Pilih perangkat yang diinginkan untuk melihat data dan status secara langsung.

Dengan adanya aplikasi ini, pengguna tidak perlu membuka komputer atau laptop untuk memeriksa data. Semua informasi penting terkait sistem dapat dilihat melalui ponsel.

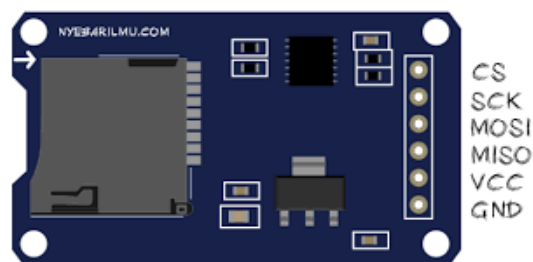
2.2.14 Micro SD Card Modul



Gambar 2. 18 Micro SD Card Modul

Modul MicroSD card merupakan salah satu komponen penting dalam sistem monitoring arus bocor berbasis mikrokontroler. Modul ini berfungsi sebagai media penyimpanan eksternal yang digunakan untuk mencatat dan menyimpan data hasil pengukuran arus bocor dalam bentuk file teks (.txt atau .csv). Penyimpanan data ini sangat berguna dalam proses dokumentasi, analisis, dan pelacakan kejadian arus bocor pada sistem kelistrikan.

Dalam sistem yang dirancang, modul MicroSD card secara khusus digunakan untuk menyimpan data arus bocor ketika nilai arus yang terdeteksi melewati ambang batas yang telah ditentukan sebelumnya. Ketika kondisi tersebut terjadi, sistem akan secara otomatis mencatat nilai arus yang terukur beserta waktu kejadian (yang diperoleh dari modul RTC) ke dalam kartu memori. Dengan demikian, data historis gangguan dapat disimpan secara berurutan dan dapat diakses kembali untuk keperluan analisis atau evaluasi sistem.



Gambar 2. 19 Pinout Micro SD Card Modul

Modul ini bekerja dengan menggunakan protokol komunikasi SPI (Serial Peripheral Interface). SPI adalah protokol sinkron yang menggunakan beberapa jalur sinyal utama, yaitu

- a. MISO (Master In Slave Out): Jalur data dari microSD ke ESP32.
- b. MOSI (Master Out Slave In): Jalur data dari ESP32 ke microSD.
- c. SCK (Serial Clock): Jalur sinyal clock untuk sinkronisasi data.
- d. CS (Chip Select): Jalur untuk memilih perangkat SPI aktif.

Selain itu, modul ini juga dilengkapi dengan konverter level tegangan, yang memungkinkan microSD bekerja pada tegangan logika 3.3V meskipun mikrokontroler bekerja pada 5V, sehingga aman digunakan dengan berbagai jenis mikrokontroler termasuk ESP32.

Penggunaan modul ini juga memungkinkan pengolahan data lebih lanjut menggunakan komputer dengan membuka file data hasil pencatatan, sehingga pengguna dapat melakukan analisis tren gangguan arus bocor secara periodik.