

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian ini mengembangkan sistem proteksi tegangan berbasis Internet of Things (IoT) yang mengintegrasikan Over Voltage Relay (OVR) dan aplikasi Blynk untuk mendeteksi dan merespons gangguan tegangan lebih. Sistem ini menggunakan modul PZEM-004T 3.0 dan ESP32, memungkinkan pemantauan tegangan secara real-time dan perlindungan perangkat dari kerusakan akibat tegangan berlebih. Pengujian menunjukkan bahwa sistem ini mampu memberikan pemantauan yang efektif, meskipun ada sedikit perbedaan akurasi antara pembacaan OVR dan tampilan aplikasi Blynk.(Agus Kiswantono et al., 2024)

Konsep *IoT* ini menggambarkan objek-objek yang dapat dihubungkan dan dikendalikan melalui jaringan internet yang terhubung dengan jaringan lain. Idennya adalah untuk meningkatkan derajat integrasi antara dunia fisik dan digital guna menghasilkan pekerjaan yang lebih efisien dalam hal energi, akurasi, dan ekonomi. Konsep pemantauan dan pengendalian yang ditawarkan *IoT* untuk meningkatkan produktivitas dunia industri.(Anton Maulana Ibrahim & Akhmad Solikhin, 2023)

Rancang Bangun Pengendalian dan Monitoring Suhu Ruang Baterai dengan Kontrol *PID* Berbasis Mikrokontroller *STM32* .Pengontrolan *exhaust fan* dengan memanfaatkan hasil pembacaan suhu oleh sensor *DHT22*, kemudian data akan diolah menggunakan mikrokontroller dengan sistem kontrol *PID* yaitu sistem kontrol untuk menentukan presisi suatu sistem instrumentasi dengan karakteristik adanya umpan balik pada sistem tersebut. Pengontrol *PID* akan memberikan aksi kepada mikrokontroller berdasarkan besar error yang diperoleh. Mikrokontroller akan menjadi aktuator yang mengatur kecepatan dari kerja *exhaust fan* dalam proses penstabilan suhu ruang baterai yang diinginkan sesuai dengan *Set Point*. Suhu pada ruang baterai ini juga dapat termonitor secara online pada website *Thingspeak* dengan menggunakan modul *Wi-Fi ESP8266* sehingga memudahkan operator dalam melakukan pemantauan secara real time dan mencegah terjadinya anomali (Ferydianto Okta Pramudya et al., 2024)

Hasil penelitian ini adalah media pembelajaran mikrokontroler yang terdiri dari sebuah *STM32 ARM Cortex-M*, dua jenis input, empat jenis output dan sebuah projectboard. Hasil penilaian oleh ahli media mendapatkan skor persentase sebesar 88,04% dengan kategori sangat layak. Hasil penilaian oleh ahli materi mendapatkan skor persentase sebesar 82,5% dengan kategori sangat layak. Dan hasil ujicoba pemakaian oleh mahasiswa mendapatkan skor persentase sebesar 88,29% dengan kategori sangat layak. Berdasarkan hasil penilaian skor persentase tersebut maka dapat disimpulkan bahwa media pembelajaran mikrokontroler *STM32 ARM Cortex- M* sangat layak untuk digunakan.(Hasim Ashari, 2019)

Motor induksi adalah motor bertenaga listrik arus AC atau bolak balik yang dapat digunakan di industri penerbangan. Motor induksi satu fasa dan tiga fasa adalah jenis motor induksi yang paling umum. Karena harganya yang terjangkau dan sangat efektif, motor induksi 3 fasa banyak digunakan di industri. Kelemahan motor induksi tiga fasa adalah mereka tidak dapat mempertahankan kecepatan konstan saat beban berubah dengan cepat karena karakteristik parameternya yang tidak linier oleh karena itu, suatu pengontrol diperlukan untuk memastikan kecepatan yang konstan dan kinerja sistem yang lebih baik terhadap perubahan beban. Kecepatan motor induksi 3 fasa dapat dikendalikan dengan berbagai cara; penggunaan internet yang meningkat telah menghasilkan inovasi dalam sistem kontrol. *Internet of Things (IoT)* adalah inovasi yang memungkinkan orang untuk mengontrol sejumlah perangkat elektronik dari jarak jauh melalui internet. Ini memungkinkan sistem kontrol yang lebih efisien dan menghemat waktu.(KGS. M. Ismail et al., 2023).

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu

No	Peneliti	Judul	Kelebihan	Kekurangan
1	Hamdani Dan Nirwan A Noor	Rancang Bangun Perangkat Monitoring Besaran Listrik Pada Panel Hubung Bagi Berbasis	Mengurangi Kebutuhan Untuk Membuka Panel Secara Manual, Sehingga Mengurangi Risiko	Sistem ini mungkin lebih cocok untuk aplikasi tertentu dan tidak dapat dengan mudah diadaptasi untuk semua jenis

		Augmented Operator Advisor (Hamdani & Nirwan A Noor, 2023)	Kecelakaan Kerja Bagi Teknisi.	monitoring dan kontrol beban.
2	Panangian Mahadi Sihombing	Prototipe Pengawasan Suhu secara Real-Time dan Pengontrolan Dua Motor Listrik secara Otomatis Berbasis IoT (Panangian Mahadi Sihombing, 2023)	Menggunakan teknologi Internet of Things (IoT) untuk memantau dan mengontrol suhu motor listrik secara real-time, yang meningkatkan efisiensi operasional.	Sensor infra merah mungkin tidak berfungsi optimal dalam kondisi lingkungan tertentu, seperti debu atau uap yang dapat mempengaruhi akurasi pengukuran suhu.
3	Agus Kiswantonono, Muhammad Fajri	Transformasi Proteksi Tegangan: Sistem Monitoring IoT untuk Pemantauan Real-Time (Agus Kiswantonono & Muhammad Fajri, 2024)	Menggunakan sistem berbasis Internet of Things (IoT) untuk pemantauan real-time, yang memungkinkan pengguna untuk mengawasi kondisi tegangan dari jarak jauh.	Sistem sangat bergantung pada koneksi internet untuk fungsi monitoring dan kontrol jarak jauh, yang dapat menjadi masalah jika terjadi gangguan jaringan.
4	Yoga Pangestu Hidayah	Rancang Bangun Sistem Kontrol Dan Monitoring Beban 1 dan 3 Fasa Pada Panel Distribusi Berbasis (Yoga	Pembagian mikrokontroler untuk kontrol dan monitoring memberikan fleksibilitas untuk memperbaiki atau mengupgrade sistem di masa depan tanpa	Sistem ini hanya mencakup kontrol ON/OFF beban dan monitoring dasar (tegangan, arus, frekuensi). Tidak ada fitur untuk mendeteksi atau menangani masalah seperti

		Pangestu Hidayah et al., 2024) Internet Of Things	mengubah keseluruhan perangkat.	overload, short circuit, atau gangguan lainnya.
5	Kurniawan Ewin Putraga	Rancang Bangun Sistem Proteksi Dan Monitoring Over Current Dan Over / Under Vontage Terhadap Motor 3 Fasa Berbasis Arduino (Kurniawan Ewin Putraga, 2022)	Fitur Monitoring: Data pembacaan arus dan tegangan dapat disimpan dalam microSD dan diakses melalui Microsoft Excel, memudahkan monitoring secara historis.	Pengaturan Ulang Setelah Restart: Sistem tidak dapat menyimpan pengaturan nilai input setelah restart, sehingga perlu dilakukan pengaturan ulang secara manual.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sensor PZEM004-T

Modul PZEM-004T merupakan perangkat pengukur daya listrik multifungsi yang dirancang khusus untuk memonitor parameter kelistrikan pada jaringan arus bolak-balik (AC). Pada penelitian ini, sensor PZEM-004T digunakan sebagai instrumen utama untuk mengakuisisi data tegangan dan arus listrik secara real-time.

Keunggulan utama dari modul ini terletak pada kemudahan integrasinya dengan berbagai mikrokontroler (seperti Arduino, NodeMCU ESP8266, atau ESP32) melalui antarmuka komunikasi serial komunikasi UART (TTL). Hal ini memungkinkan sistem untuk membaca data output secara langsung dan mengolahnya menjadi informasi digital yang mudah dipahami.

- Prinsip Kerja dan Keamanan

Untuk melakukan pengukuran arus, PZEM-004T menggunakan metode non-invasif melalui komponen Current Transformer (CT) atau transformator arus. Dengan menggunakan CT, kabel fasa (berarus) hanya perlu dilewatkan melalui inti kumparan sensor tanpa harus memotong kabel atau menyentuh konduktor secara langsung. Metode ini sangat meminimalisir risiko tersengat listrik.

Selain itu, modul ini dilengkapi dengan komponen optocoupler yang berfungsi sebagai isolasi galvanik. Isolasi ini memisahkan sirkuit AC bertegangan tinggi dengan sirkuit DC (mikrokontroler) bertegangan rendah, sehingga mikrokontroler tetap aman meskipun terjadi lonjakan tegangan atau korsleting pada jaringan AC.

- Keterbatasan Pengukuran Arus Lemah

Meskipun sensor ini sangat andal untuk mengukur daya peralatan rumah tangga atau beban industri skala kecil, sensor ini tidak dirancang untuk membaca arus AC dengan akurasi skala miliampere (mA). Keterbatasan ini disebabkan oleh rasio lilitan pada Current Transformer (CT) dan batas resolusi Analog-to-Digital Converter (ADC) internalnya yang dioptimalkan untuk membaca arus beban dari skala menengah hingga sangat tinggi (hingga 100 Ampere). Pada arus yang sangat kecil, tingkat noise elektromagnetik dapat mengganggu pembacaan sehingga akurasinya menurun. Berikut gambar dari sensor pzem004t-t dapat di lihat pada gambar 2.1 dibawah ini:



Gambar 2.1 Sensor Pzem004t

Fitur dan Spesifikasi Teknis

Untuk mendukung proses pemantauan daya, sensor ini dilengkapi dengan sejumlah fitur dan spesifikasi teknis berikut:

A. Fitur Utama

- **Pengukuran Multi-Parameter:** Mampu mengukur Tegangan (V), Arus (A), Daya Aktif (W), Energi (Wh/kWh), Frekuensi (Hz), dan Faktor Daya (*Power Factor*).
- **Tombol Reset Energi:** Dilengkapi dengan fitur/tombol daya hapus (pada versi PZEM-004T V2.0 dan yang didukung oleh *software* di V3.0) untuk mereset akumulasi data konsumsi energi (kWh) kembali ke nol.
- **Batas Pengukuran Daya:** Memiliki rentang pengukuran daya aktif yang sangat lebar, yaitu dari 0 hingga 9.999 kW.
- **Batas Pengukuran Tegangan:** Mampu membaca tegangan AC pada rentang 80 hingga 260 VAC.
- **Batas Pengukuran Arus:** Menggunakan CT dengan rentang pengukuran arus dari 0 hingga 100 A.

B. Spesifikasi Kelistrikan

- **Tegangan Kerja Operasional:** 80 ~ 260 VAC (mengambil daya langsung dari jala-jala listrik yang diukur).
- **Daya Nominal Maksimal:** 100 A / 22.000 W (22 kW).
- **Frekuensi Pengoperasian:** 45 ~ 65 Hz (sesuai dengan standar frekuensi listrik PLN di Indonesia yaitu 50 Hz).
- **Tingkat Akurasi Pengukuran:** Kelas 1.0 (Margin kesalahan atau *error rate* maksimal sekitar 1%, menjadikannya cukup akurat untuk penelitian tingkat purwarupa/prototipe).
- **Antarmuka Data:** *Serial Communication* (TTL) pada *baud rate* standar 9600 bps.

2.2.2 Mikrokontroler ESP 32

Mikrokontroler ESP32 adalah sebuah chip yang berfungsi sebagai pusat pengontrol dalam suatu rangkaian elektronika. Secara umum, istilah mikrokontroler seperti Arduino (berbasis ATmega) dan NodeMCU (berbasis ESP8266) mungkin sudah tidak asing lagi dalam berbagai proyek pengembangan sistem komputer. Namun, ESP32 hadir sebagai varian mikrokontroler yang menawarkan lompatan teknologi signifikan, dengan detail spesifikasi, keunggulan, dan fitur yang jauh lebih komprehensif dibandingkan pendahulunya.

Secara definisi, ESP32 merupakan mikrokontroler bertipe *System on a Chip* (SoC) berbiaya rendah dan hemat daya yang dikembangkan oleh Espressif Systems. Chip ini dirancang khusus untuk memenuhi tingginya kebutuhan pengembangan sistem *Internet of Things* (IoT). Keunggulan utama dari SoC ini adalah telah terintegrasinya modul komunikasi Wi-Fi dan Bluetooth mode ganda di dalam satu papan sirkuit terpadu. ESP32 beroperasi menggunakan arsitektur prosesor berkinerja tinggi yang memungkinkannya menangani komputasi yang lebih berat dibandingkan mikrokontroler standar.

Untuk memahami lebih dalam mengenai kemampuan ESP32, berikut adalah penjabaran mengenai spesifikasi, fitur, dan keunggulannya:

1. Spesifikasi Teknis Inti ESP32 memiliki spesifikasi perangkat keras yang sangat mumpuni untuk ukuran sebuah mikrokontroler, antara lain:

- **Prosesor:** Menggunakan mikroprosesor Tensilica Xtensa Dual-Core 32-bit LX6. Adanya dua inti prosesor (dual-core) memungkinkan chip ini menjalankan beberapa tugas secara bersamaan (multitasking) dengan lebih efisien.
- **Kecepatan Clock:** Dapat beroperasi pada frekuensi yang dapat disesuaikan, mulai dari 80 MHz hingga 240 MHz. Kecepatan ini jauh mengungguli mikrokontroler seri ATmega328 pada Arduino Uno yang hanya memiliki kecepatan *clock* 16 MHz.
- **Memori:** Dilengkapi dengan 520 KB internal SRAM untuk penyimpanan data sementara dan instruksi program, serta dukungan eksternal *flash*

memory (biasanya 4MB pada modul standar) untuk menyimpan kode program yang diunggah.

- **Tegangan Operasi:** Beroperasi pada tegangan 3,3V (standar logika mikrokontroler modern), berbeda dengan Arduino Uno yang beroperasi pada 5V.

2. Fitur Konektivitas Nirkabel Fokus utama dari pengembangan ESP32 adalah kemampuannya dalam terhubung ke jaringan tanpa kabel, yang meliputi:

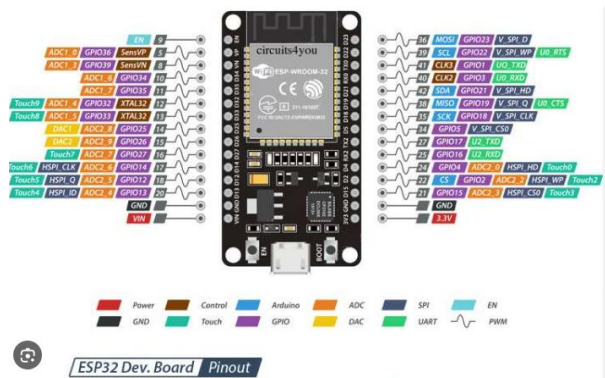
- **Wi-Fi:** Mendukung standar protokol 802.11 b/g/n (beroperasi pada pita frekuensi 2.4 GHz). ESP32 dapat bertindak sebagai *Station* (terhubung ke *router*), *Access Point* (memancarkan sinyal Wi-Fi sendiri), maupun keduanya secara bersamaan.
- **Bluetooth:** Mendukung Bluetooth v4.2 BR/EDR (Bluetooth klasik) serta *Bluetooth Low Energy* (BLE). Fitur BLE sangat krusial untuk perangkat IoT yang membutuhkan komunikasi jarak dekat dengan konsumsi daya yang sangat minimal.

3. Antarmuka dan Periferal (GPIO) ESP32 menyediakan pin *General Purpose Input/Output* (GPIO) yang lebih banyak dan fleksibel. Hampir semua pin pada ESP32 mendukung fungsi *multiplexing*, yang berarti satu pin dapat diprogram untuk berbagai fungsi keras. Fitur periferal di dalamnya mencakup:

- **ADC (*Analog to Digital Converter*):** Memiliki resolusi hingga 12-bit, memungkinkan pembacaan sensor analog dengan tingkat presisi yang tinggi.
- **DAC (*Digital to Analog Converter*):** Memiliki 2 saluran DAC 8-bit untuk menghasilkan sinyal tegangan analog yang sebenarnya.
- **Sensor Bawaan:** Terintegrasi dengan sensor sentuh kapasitif (*capacitive touch sensor*) dan sensor efek Hall (*Hall effect sensor*) yang dapat mendeteksi variasi medan magnet.
- **Protokol Komunikasi:** Mendukung antarmuka standar industri seperti SPI, I2C, UART, dan I2S.

4. Manajemen Daya dan Efisiensi Keunggulan lain dari ESP32 adalah fitur manajemen daya yang sangat efisien, yang disebut *Ultra-Low Power (ULP) co-processor*. ESP32 memiliki beberapa mode tidur (*sleep modes*), seperti *Deep Sleep* di mana chip hanya mengonsumsi daya dalam rentang mikroampere (μA). Dalam mode ini, inti prosesor utama dimatikan, namun ULP *co-processor* tetap aktif untuk membaca sensor atau menunggu sinyal *wake-up*, menjadikannya sangat ideal untuk perangkat IoT bertenaga baterai.

5. Lingkungan Pemrograman Dari segi perangkat lunak, ESP32 memiliki ekosistem yang sangat terbuka dan mudah diakses. Chip ini dapat diprogram menggunakan berbagai macam lingkungan pengembangan (IDE) dan bahasa pemrograman, antara lain *Arduino IDE* (menggunakan bahasa C/C++), *MicroPython*, *Lua*, serta *ESP-IDF* (kerangka kerja resmi dari Espressif untuk pengembangan tingkat lanjut). Dukungan dari komunitas Arduino yang luas membuat proses transisi pemrograman dari Arduino dasar ke ESP32 menjadi sangat mudah. Berikut gambar dari Esp32 dapat di lihat pada gambar 2.2 dibawah ini:



Gambar 2.2 Esp32

2.2.2 STM32 Nucleo

STM32 Nucleo adalah papan pengembangan (*development board*) yang dirancang dan diproduksi oleh STMicroelectronics. Papan ini berbasis mikrokontroler keluarga STM32 yang mengintegrasikan arsitektur prosesor ARM Cortex-M (mulai dari Cortex-M0, M0+, M3, M4, hingga M7). Kehadiran STM32

Nucleo ditujukan untuk memberikan kemudahan, efisiensi, dan fleksibilitas bagi para pengembang (*developer*), insinyur, maupun akademisi dalam melakukan proses *prototyping*, pengujian ide, serta pengembangan perangkat keras dan perangkat lunak untuk sistem tertanam (*embedded systems*).

Salah satu keunggulan utama dari seri Nucleo adalah kemudahan dalam meningkatkan skala proyek (*scalability*). Papan pengembangan ini secara umum dibagi menjadi beberapa varian berdasarkan jumlah pin mikrokontroler yang terpasang, yaitu Nucleo-32, Nucleo-64, dan Nucleo-144. Fleksibilitas ini memungkinkan pengguna untuk merancang prototipe dari sistem yang sangat sederhana hingga sistem berkinerja tinggi yang membutuhkan banyak *Input/Output* (I/O) tanpa harus mengubah platform pengembangan secara drastis.

Berikut adalah penjabaran fitur-fitur dan karakteristik utama dari STM32 Nucleo:

1. **Skalabilitas dan Kompatibilitas Keluarga STM32:** Papan ini dirancang agar kompatibel dengan berbagai seri mikrokontroler STM32. Pengguna dapat memilih *chip* yang paling sesuai dengan kebutuhan sistem, mulai dari seri *Ultra-low-power* (seperti STM32L0, STM32L4) untuk perangkat berbasis baterai, seri *Mainstream* (STM32F0, STM32F1, STM32F3, STM32G0, STM32G4), hingga seri *High-performance* (STM32F4, STM32F7, STM32H7) untuk komputasi berat.
2. **Dukungan Ekosistem Perangkat Lunak Terbuka (*Open Development Platform*):** Nucleo didukung penuh oleh ekosistem STM32Cube. Hal ini mencakup *STM32CubeMX* untuk konfigurasi perangkat keras berbasis grafis, dan *STM32CubeIDE* sebagai lingkungan pengembangan terpadu (IDE). Pengembang dapat menggunakan pustaka *Hardware Abstraction Layer* (HAL) atau *Low-Layer* (LL) untuk mempercepat penulisan kode. Selain itu, Nucleo juga kompatibel dengan platform pihak ketiga yang populer seperti Arduino IDE, ARM mbed OS, dan MicroPython.
3. **Konektivitas dan Ekspansi Header Ganda (*Dual Header Expansion*):** Untuk memberikan fleksibilitas maksimal, papan Nucleo (khususnya seri

Nucleo-64 dan Nucleo-144) menyediakan dua jenis antarmuka konektor ekspansi:

- **Arduino™ Uno V3 Connectivity:** Memungkinkan pengguna untuk langsung memasang berbagai *shield* Arduino yang sudah banyak tersedia di pasaran, mempercepat penambahan modul seperti sensor, LCD, atau modul nirkabel.
- **ST morpho Extension Pin Headers:** Menyediakan akses penuh ke seluruh pin I/O mikrokontroler STM32 yang ada di papan tersebut. Hal ini memfasilitasi integrasi antarmuka komunikasi tingkat lanjut seperti UART, SPI, I2C, CAN, ADC, dan USB.

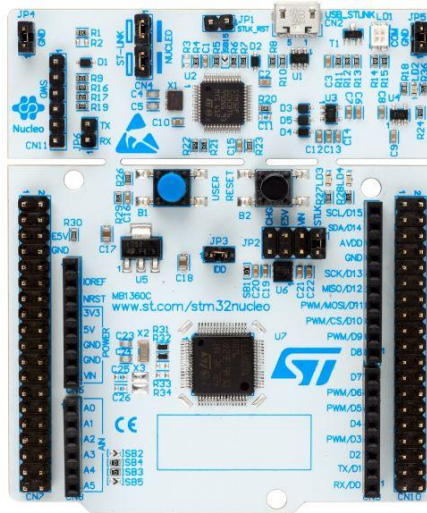
4. **Debugger dan Programmer Terintegrasi (On-board ST-LINK):**

Berbeda dengan banyak mikrokontroler lain yang membutuhkan alat *flashing* terpisah, setiap papan STM32 Nucleo sudah mengintegrasikan *debugger* dan *programmer* ST-LINK/V2-1 (atau ST-LINK-V3 pada versi terbaru) di dalam sirkuitnya. ST-LINK ini mendukung fungsionalitas *Virtual COM port* untuk komunikasi serial ke PC, antarmuka *Mass storage* untuk *drag-and-drop flash programming*, serta antarmuka *debug port* untuk melacak (*debugging*) baris kode secara *real-time*.

5. **Sistem Catu Daya yang Fleksibel (Flexible Power-Supply):**

STM32 Nucleo dapat ditenagai dari berbagai sumber tegangan. Papan ini dapat menyala langsung saat dihubungkan ke komputer melalui kabel USB (VBUS), atau dapat ditenagai menggunakan sumber daya eksternal (VIN) dari adaptor atau baterai dengan rentang tegangan 7V hingga 12V, serta pin 3,3V dan 5V yang disediakan pada *header*.

Berkat kombinasi antara performa arsitektur ARM Cortex-M, kemudahan integrasi perangkat keras, dan ekosistem perangkat lunak yang matang, STM32 Nucleo banyak diimplementasikan sebagai landasan riset untuk berbagai aplikasi modern. Aplikasi tersebut mencakup *Internet of Things* (IoT), sistem robotika, kendali motor presisi (*motor control*), otomasi industri, hingga perangkat pemantauan medis pintar. Berikut gambar dari STM32 Nucleo dapat di lihat pada gambar 2.3 dibawah ini:



Gambar 2.3 STM32 Nucleo

2.2.3 Kontaktor

Kontaktor magnetik, atau sering disebut kontaktor, adalah sakelar mekanis atau perangkat listrik yang beroperasi berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Alat ini berfungsi untuk menyambung dan memutuskan aliran arus listrik secara jarak jauh (kendali remote) pada rangkaian daya. Kontaktor umumnya digunakan untuk aplikasi dengan beban arus dan tegangan tinggi, seperti pengendalian motor listrik 3 fasa, sistem pemanas, sistem penerangan terpusat, hingga sistem distribusi daya pada industri maupun instalasi gedung.

Secara konstruksi, kontaktor terdiri dari tiga komponen utama, yaitu kumparan elektromagnetik (coil), inti besi (inti besi diam dan bergerak), dan seperangkat kontak (pegas dan terminal).

1. Prinsip Kerja Kontaktor

Prinsip kerja kontaktor didasarkan pada tarikan medan magnet. Ketika kumparan (coil) tembaga pada kontaktor dialiri arus listrik, inti besi diam akan menjadi elektromagnet dan menarik inti besi yang bergerak. Gerakan tarikan ini melawan gaya pegas, sehingga menyebabkan perubahan kondisi (status) pada terminal kontak. Saat arus yang menuju kumparan diputus, gaya pegas akan mengembalikan inti besi ke posisi semula, yang berakibat pada kembalinya status kontak ke kondisi awal (normal).

2. Jenis Kontak pada Kontaktor

Terdapat dua jenis kontak utama pada kontaktor yang memiliki peran berbeda, yaitu:

Kontak Utama (Main Contacts): Dirancang khusus untuk mengalirkan arus beban yang besar. Pada sistem 3 fasa, kontak ini memiliki tiga kutub utama (biasanya diberi label L1-T1, L2-T2, L3-T3) dan secara bawaan dalam kondisi Normally Open (NO).

Kontak Bantu (Auxiliary Contacts): Dirancang untuk dialiri arus yang kecil dan digunakan pada rangkaian kontrol atau sistem interlocking. Kontak bantu terdiri dari dua kondisi dasar, yaitu Normally Open (NO) yang terbuka saat tidak ada tegangan dan menutup saat kontaktor bekerja, serta Normally Closed (NC) yang tertutup saat tidak ada tegangan dan membuka saat kontaktor bekerja.

3. Implementasi Kontaktor pada Sistem Proteksi

Dalam kaitannya dengan rancang bangun sistem monitoring dan proteksi tegangan 3 fasa berbasis STM32, kontaktor bertindak sebagai aktuator pemutus dan penyambung daya utama yang menuju ke beban. Ketika sensor tegangan mendeteksi adanya anomali daya—seperti tegangan lebih (overvoltage), tegangan turun (undervoltage), atau hilangnya salah satu fasa (phase loss)—mikrokontroler STM32 akan mengirimkan sinyal perintah (biasanya melalui modul relay perantara) untuk memutus aliran listrik ke kumparan (coil) kontaktor. Putusnya kumparan dari sumber tegangan akan membuat kontak utama terbuka, sehingga beban 3 fasa terisolasi dari jaringan listrik dan terlindungi dari potensi kerusakan. Berikut gambar dari kontaktor dapat di lihat pada gambar 2.4 dibawah ini:



Gambar 2.4 Kontaktor

2.2.4 Modul Relay

Modul relay adalah komponen elektronik yang memungkinkan kontrol perangkat berdaya tinggi (seperti lampu, motor, atau peralatan rumah tangga) dengan menggunakan sinyal arus rendah dari mikrokontroler atau rangkaian digital, seperti Arduino atau *Raspberry Pi*. Modul ini bekerja sebagai saklar elektrik yang diaktifkan oleh sinyal kecil untuk mengendalikan beban dengan tegangan atau arus yang lebih tinggi.

Relay berfungsi sebagai saklar elektromekanis yang menghubungkan atau memutuskan rangkaian beban melalui sinyal kontrol. Di dalam relay terdapat elektromagnet (kumparan atau coil) yang, saat dialiri arus, menghasilkan medan magnet untuk menarik saklar mekanis. Medan magnet ini akan membuka atau menutup kontak saklar, sehingga perangkat yang terhubung pada sisi output relay dapat dikendalikan. Berikut gambar dari modul relay dapat di lihat pada gambar 2.5 dibawah ini:



Gambar 2. 5 Modul Relay

Struktur dan Komponen Utama Modul Relay:

1. **Kumparan (Coil):** Bagian ini menghasilkan medan magnet saat mendapatkan arus dari sinyal kontrol.
2. **Kontak Saklar:** Terdiri dari tiga jenis kontak:
 - **Common (COM):** Titik tengah atau titik umum yang menjadi bagian koneksi utama.
 - **Normally Open (NO):** Kontak ini akan tertutup saat relay aktif, memungkinkan arus mengalir ke beban.
 - **Normally Closed (NC):** Kontak ini akan terbuka saat relay aktif, memutus arus ke beban.
3. **Dioda Flyback:** Pada beberapa modul relay, dioda *flyback* dipasang untuk melindungi mikrokontroler dari lonjakan arus balik (*back EMF*) yang terjadi saat kumparan dimatikan.
4. **Driver Transistor:** Digunakan untuk meningkatkan daya sinyal kontrol sehingga cukup kuat untuk mengaktifkan kumparan relay. Komponen ini juga melindungi mikrokontroler dari arus tinggi yang dibutuhkan oleh relay.
5. **LED Indikator:** Memberikan indikator visual ketika relay diaktifkan atau dinonaktifkan, menunjukkan status operasi modul.

2.2.5 Dht22

Sensor DHT22, atau yang sering juga dikenal dengan seri AM2302, adalah modul sensor elektronik yang berfungsi untuk mengukur suhu lingkungan (temperature) dan kelembapan udara relatif (relative humidity). Sensor ini merupakan sensor berjenis digital, yang berarti sinyal keluaran yang dihasilkannya sudah berupa data digital terkalibrasi dan bukan tegangan analog. Karena kemudahan penggunaannya serta tidak dibutuhkannya pin input analog pada mikrokontroler, DHT22 sangat populer diaplikasikan dalam berbagai sistem pemantauan cuaca, perangkat rumah pintar (smart home), dan proyek Internet of Things (IoT).

Secara prinsip kerja, komponen ini mengandalkan dua elemen penginderaan utama di dalamnya. Untuk mengukur tingkat kelembapan, DHT22 menggunakan elemen sensor kapasitif (capacitive humidity sensor), di mana material dielektrik di dalamnya akan mengalami perubahan nilai kapasitansi seiring dengan perubahan kandungan uap air di udara sekitarnya. Sementara itu, untuk mengukur suhu, sensor ini menggunakan komponen termistor jenis NTC (Negative Temperature Coefficient), yang nilai resistansinya akan menurun secara terprediksi ketika suhu lingkungan meningkat. Kedua elemen analog ini kemudian dibaca oleh sebuah mikrokontroler 8-bit internal yang terintegrasi di dalam wadah sensor. Mikrokontroler ini bertugas melakukan proses kalibrasi dan konversi Analog-to-Digital (ADC) sebelum data dikirimkan keluar.

Dalam hal spesifikasi teknis dan kinerja, DHT22 menawarkan rentang pengukuran dan akurasi yang lebih unggul dibandingkan dengan pendahulunya (seperti DHT11). Sensor ini mampu mengukur kelembapan udara pada rentang 0% hingga 100% RH (Relative Humidity) dengan tingkat akurasi sebesar $\pm 2\%$ hingga $\pm 5\%$. Untuk parameter suhu, sensor ini dapat mendeteksi kondisi ekstrem dari -40°C hingga 80°C dengan margin kesalahan (akurasi) yang sangat kecil, yaitu sekitar $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Komponen ini dirancang untuk beroperasi pada rentang tegangan catu daya antara 3,3 Volt hingga 5 Volt, sehingga sangat kompatibel dengan berbagai jenis development board modern.

Untuk antarmuka komunikasinya, DHT22 menggunakan protokol komunikasi data single-wire bi-directional atau komunikasi kabel tunggal. Data hasil pembacaan suhu dan kelembapan dikirimkan secara serial melalui satu pin data khusus menuju mikrokontroler eksternal (seperti Arduino, ESP32, atau Raspberry Pi). Meskipun menawarkan presisi pengukuran yang sangat baik untuk kelas harganya, hal yang perlu diperhatikan dari DHT22 adalah laju pengambilan sampelnya (sampling rate). Sensor ini memiliki laju sampel maksimal sebesar 0,5 Hz, yang berarti mikrokontroler hanya dapat meminta data pembacaan terbaru secara aman setiap dua detik sekali. Berikut gambar dari dht22 dapat di lihat pada gambar 2.6 dibawah ini:



Gambar 2. 6 DHT22

2.2.6 Kipas pendingin (*cooling fan*)

Kipas pendingin (*cooling fan*) adalah komponen elektromekanis yang berfungsi sebagai sistem pendingin aktif pada perangkat elektronik dan komputasi. Komponen ini dirancang untuk menghasilkan sirkulasi udara (*airflow*) guna membuang panas dari sirkuit ke lingkungan sekitar melalui proses perpindahan panas konveksi paksa. Dengan adanya aliran udara yang konstan, suhu operasional perangkat keras dapat dijaga agar tetap berada pada batas aman, sehingga mencegah terjadinya panas berlebih (*overheating*) yang dapat merusak komponen.

Berdasarkan spesifikasi pada gambar, perangkat ini menggunakan penggerak jenis DC Brushless Motor (BLDC). Berbeda dengan motor arus searah konvensional, motor BLDC beroperasi menggunakan pergantian (*commutation*) secara elektronik dan tidak menggunakan sikat mekanis (*brush*). Sistem ini umumnya memanfaatkan sirkuit terpadu untuk mendeteksi posisi rotor dan mengarahkan arus secara presisi untuk menghasilkan putaran. Ketidadaan gesekan fisik dari sikat mekanis ini memberikan berbagai keunggulan, seperti tingkat kebisingan yang rendah, efisiensi yang tinggi, tidak memicu percikan api, serta masa pakai (*lifespan*) yang jauh lebih lama.

Kinerja operasional kipas ini sangat bergantung pada parameter kelistrikkannya. Kipas tersebut dirancang untuk beroperasi pada tegangan DC 12V dengan kuat arus sebesar 0,30A. Berdasarkan persamaan daya listrik arus searah $P = V \times I$, kipas ini memiliki konsumsi daya nominal sebesar 3,6 Watt. Penggunaan

tegangan 12 Volt merupakan standar industri yang paling umum ditemukan pada sistem komputer (PC) maupun catu daya perangkat elektronik tingkat menengah.

Selain aspek kelistrikan, efektivitas pendinginan juga ditentukan oleh parameter aerodinamika, seperti kecepatan putaran (RPM), volume aliran udara yang diukur dalam CFM (Cubic Feet per Minute), dan tekanan statis (static pressure). Desain fisik kipas, seperti jumlah dan sudut kelengkungan bilah (impeller)—yang pada kasus ini berjumlah tujuh bilah—dirancang secara khusus untuk menghasilkan keseimbangan yang optimal antara besaran aliran udara yang didorong dan kemampuan kipas dalam mengatasi hambatan udara dari komponen di sekitarnya. Berikut gambar dari fan dapat di lihat pada gambar 2.7 dibawah ini:



Gambar 2. 7 FAN

2.2.7 Power Supply

Power Supply, atau dalam bahasa Indonesia disebut sebagai catu daya, adalah perangkat elektronik yang memiliki fungsi utama untuk menyediakan daya listrik dengan spesifikasi yang sesuai dengan kebutuhan perangkat yang dioperasikan. Dalam pengertian lebih luas, power supply adalah sumber daya yang mengubah bentuk energi listrik dari sumber utamanya (seperti listrik jaringan AC dari PLN atau baterai DC) menjadi bentuk energi listrik yang diinginkan oleh perangkat, baik dalam bentuk tegangan DC (*direct current*) atau AC (*alternating current*) dengan besaran dan stabilitas tersebut.

Secara umum, *power supply* digunakan pada hampir semua perangkat elektronik, mulai dari komputer, ponsel, televisi, hingga peralatan laboratorium

atau mesin industri, karena hampir semua peralatan ini membutuhkan energi listrik yang stabil dengan tegangan dan arus yang sesuai.

Power supply berfungsi dengan mengubah arus listrik yang tersedia dari sumber utama menjadi bentuk dan level tegangan yang dibutuhkan oleh perangkat. Berikut gambar dari power supply dapat di lihat pada gambar 2.8 dibawah ini:



Gambar 2. 8 Power Supply

Pada *power supply* yang mengubah tegangan AC menjadi DC, proses ini melibatkan beberapa tahapan:

1. **Penurunan Tegangan (Transformasi):** Jika sumber utama adalah AC, tegangan diturunkan melalui sebuah transformator untuk mencapai level yang lebih sesuai dengan perangkat. Misalnya, dari tegangan AC 220V diturunkan menjadi 12V AC atau 24V AC.
2. **Penyearahan:** Tegangan AC kemudian disearahkan (dirubah dari AC menjadi DC) menggunakan dioda atau komponen penyearah lainnya, yang mengubah sinyal bolak-balik AC menjadi sinyal searah DC.
3. **Filtrasi:** Sinyal DC yang dihasilkan dari proses penyearahan biasanya masih mengandung *ripple* atau *fluktuasi*. Maka, kapasitor dan komponen lainnya digunakan untuk menyaring *ripple* tersebut sehingga tegangan DC menjadi lebih rata dan stabil.
4. **Regulasi Tegangan:** Langkah terakhir adalah menstabilkan tegangan dengan menggunakan *regulator* tegangan. Komponen ini memastikan

bahwa output tegangan tetap stabil meskipun terdapat perubahan pada tegangan input atau beban yang diterapkan. Hal ini penting agar perangkat dapat berfungsi dengan baik tanpa mengalami kerusakan akibat tegangan yang tidak stabil.