

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian (Wilutomo & Yuwono, 2017) dengan judul "Rancang Bangun Memonitor Arus dan Tegangan serta Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Web Berbasis Arduino Due" mengembangkan sistem monitoring yang memungkinkan pemantauan arus, tegangan, dan kecepatan motor induksi 3 fasa secara *real-time* melalui tampilan web. Sistem ini menggunakan Arduino Due sebagai pengendali utama, dengan modul WiFi ESP8266 untuk koneksi internet, sehingga pengguna dapat mengakses data dari mana saja. Sensor yang digunakan meliputi sensor arus ACS712-5A, sensor tegangan berbasis rangkaian pembagi, dan sensor kecepatan optocoupler. Data dari sensor diolah menjadi sinyal digital melalui ADC dan dikirim ke server untuk ditampilkan di halaman web menggunakan PHP. Pengujian menunjukkan perbedaan kecil antara pembacaan alat ukur dan tampilan web, dengan selisih $\pm 0,24\text{A}$ untuk arus, $\pm 4\text{V}$ untuk tegangan, dan perbedaan 22 RPM untuk kecepatan motor tanpa beban, yang menunjukkan akurasi sistem yang baik dalam monitoring motor induksi.

Menurut (Ismail, 2023) 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.

Penelitian yang dilakukan oleh (Putra et al., 2022) dengan judul "Rancang Bangun Sistem Proteksi dan Kontrol Kecepatan Motor 3 Phase Berbasis *Internet of Things* (IoT)" mengembangkan sistem kontrol dan proteksi pada motor 3 phase menggunakan *inverter*, yang dapat mengubah sumber tegangan AC satu fasa

menjadi tegangan 3 fasa dengan frekuensi yang dapat diatur antara 0-400 Hz. Alat ini mampu mengatur kecepatan motor dari 0 sampai 1370 RPM, dengan frekuensi yang berbanding lurus terhadap kecepatan motor. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pembacaan pada LCD dan aplikasi Blynk memiliki toleransi perbandingan kurang dari 10%. Dengan sistem ini, teknisi dapat dengan mudah memonitor dan mengontrol kecepatan motor serta melindungi motor dari kerusakan akibat kehilangan fase. Metode penelitian yang digunakan adalah penelitian dan pengembangan (R&D), dengan model desain media yang mengikuti langkah ADDIE. Perancangan alat meliputi penggunaan perangkat keras dan perangkat lunak, di mana perangkat keras terdiri dari rangkaian elektronik untuk kontrol dan proteksi motor, sementara perangkat lunak meliputi pemrograman mikrokontroler *ESP32* dan aplikasi Blynk untuk monitoring. Desain alat dilengkapi dengan sensor untuk mengukur arus, tegangan, dan kecepatan, serta sistem proteksi yang memutuskan aliran listrik saat terjadi kehilangan fase. Pengujian dilakukan untuk memastikan sistem berfungsi dengan baik, dan hasilnya menunjukkan bahwa sistem dapat mengendalikan kecepatan motor secara efektif serta memberikan proteksi yang memadai. Terdapat pada tabel 2.1 yang menunjukkan kelebihan dan kekurangan penelitian terdahulu sebagai berikut:

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

No	Peneliti	Judul	Kelebihan	Kekurangan
1.	Ismail (2023)	Rancang Bangun Sistem Kontrol Motor 3 Phase Berbasis IoT	Pada penelitian ini memiliki kelebihan dalam mengintegrasikan teknologi Internet of Things (IoT) untuk mengontrol motor 3 fasa secara efisien dan hemat biaya. Dengan memanfaatkan perangkat ESP32 dan aplikasi Blynk,	Jurnal ini memiliki beberapa kekurangan yang dapat menjadi perhatian untuk penelitian selanjutnya. Pertama, implementasi sistem kontrol berbasis IoT masih bergantung pada kestabilan jaringan internet, sehingga kurang optimal di lingkungan

			sistem yang dirancang mampu mengatasi kelemahan motor induksi 3 fasa, seperti ketidakmampuan menjaga kecepatan konstan saat perubahan beban. Penelitian ini relevan untuk kebutuhan industri, menawarkan inovasi dalam pengendalian jarak jauh, serta menggunakan metode yang komprehensif mulai dari desain hingga pengujian. Solusi ini menjadi alternatif yang praktis, modern, dan sesuai dengan tren teknologi terkini..	dengan koneksi yang tidak stabil. Kedua, jurnal ini tidak membahas secara mendalam mengenai aspek keamanan data dalam sistem IoT, yang menjadi isu penting dalam pengendalian jarak jauh. Selain itu, pengujian sistem lebih terfokus pada aspek waktu respons tanpa membahas ketahanan jangka panjang atau performa dalam skenario industri yang kompleks. Kekurangan ini membuka peluang untuk pengembangan lebih lanjut dalam aspek keandalan dan keamanan sistem.
2.	Resnu Mauliyana Mukti Wilutomo,	RANCANG BANGUN MEMONITOR ARUS DAN TEGANGA	Jurnal ini menawarkan beberapa kelebihan yang signifikan dibandingkan penelitian terdahulu.	Jurnal ini juga memiliki beberapa kekurangan yang perlu diperhatikan. Pertama, meskipun sistem ini menawarkan

	Teguh Yuwono (2017)	N SERTA KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3 FASA MENGGUNAKAN WEB BERBASIS ARDUINO DUE	Pertama, penggunaan teknologi Arduino Due dan modul WiFi ESP8266 memungkinkan sistem monitoring yang lebih praktis, cepat, dan akurat, sehingga memudahkan pemantauan motor induksi 3 fasa dari jarak jauh. Kedua, pendekatan yang mengintegrasikan sensor arus, tegangan, dan kecepatan dalam satu sistem memberikan data yang komprehensif untuk analisis gangguan, yang sebelumnya mungkin tidak terjangkau dalam penelitian lain. Selain itu, pemrograman web dengan PHP untuk menampilkan data	kemudahan dalam monitoring, ketergantungan pada konektivitas internet dapat menjadi masalah jika jaringan tidak stabil, yang dapat mempengaruhi keakuratan dan kecepatan data yang ditampilkan. Kedua, penjelasan mengenai desain dan pemrograman sistem masih tergolong sederhana, dan tidak mencakup analisis mendalam tentang potensi kesalahan atau gangguan yang mungkin terjadi dalam implementasi nyata. Selain itu, penggunaan sensor tertentu, seperti optocoupler untuk pengukuran kecepatan, dapat menimbulkan keterbatasan dalam akurasi pengukuran, terutama dalam kondisi operasional
--	----------------------------	--	--	--

			secara real-time meningkatkan kemudahan akses informasi. Terakhir, hasil pengukuran yang menunjukkan perbedaan minimal dengan alat ukur konvensional menandakan validitas sistem ini, menjadikannya sebagai alternatif yang lebih efisien dan efektif dalam monitoring motor induksi.	yang ekstrim. Terakhir, penelitian ini tidak melibatkan pengujian jangka panjang untuk menilai daya tahan dan kinerja sistem dalam situasi industri yang sebenarnya, yang penting untuk memastikan bahwa sistem ini dapat diandalkan dalam jangka waktu yang lebih lama.
3.	Dwiky Kharisma Putra (2022)	RANCANG BANGUN SISTEM PROTEKSI DAN KONTROL KECEPATAN MOTOR 3 PHASE BERBASIS INTERNET OF THING (IoT)	Jurnal ini memiliki beberapa kelebihan yang menonjol dibandingkan penelitian terdahulu. Pertama, penggunaan teknologi Internet of Things (IoT) dalam sistem kontrol dan proteksi motor 3 fase memungkinkan monitoring dan pengendalian secara real-time melalui	Jurnal ini juga memiliki beberapa kekurangan yang perlu diperhatikan. Pertama, meskipun sistem berbasis IoT menawarkan kemudahan, ketergantungan pada konektivitas internet dapat menjadi masalah jika jaringan tidak stabil, yang dapat mengganggu proses monitoring dan

			aplikasi Blynk, yang menawarkan kemudahan akses dan interaksi yang lebih baik bagi teknisi. Kedua, inovasi dalam pengaturan frekuensi menggunakan inverter memberikan fleksibilitas dalam mengatur kecepatan motor dari 0 hingga 1370 rpm, yang dapat meningkatkan efisiensi operasional. Selain itu, penelitian ini menyertakan analisis toleransi perbandingan antara pembacaan pada LCD dan aplikasi Blynk, menunjukkan validitas dan akurasi sistem yang dikembangkan. Penggunaan sensor PZEM-004T untuk memantau arus dan tegangan juga memberikan data yang lebih akurat	kontrol motor. Kedua, penjelasan tentang metode pengujian dan analisis data masih terbatas, sehingga kurang memberikan gambaran mendalam tentang keandalan sistem dalam situasi nyata. Selain itu, penggunaan sensor PZEM-004T, meskipun efektif, memiliki keterbatasan dalam akurasi pemantauan arus AC pada level miliampere, yang mungkin mempengaruhi hasil pengukuran dalam kondisi tertentu. Terakhir, penelitian ini tidak menyertakan pengujian dalam jangka panjang untuk mengevaluasi daya tahan dan kinerja sistem dalam berbagai kondisi operasional, yang penting untuk memastikan sistem dapat diandalkan
--	--	--	---	--

			dan mudah diakses, sehingga mendukung pengambilan keputusan yang lebih baik dalam pemeliharaan dan pengoperasian motor induksi. Dengan demikian, jurnal ini tidak hanya menyajikan solusi praktis, tetapi juga mengintegrasikan teknologi terkini untuk menghadapi tantangan yang ada dalam pengaturan motor 3 fase.	dalam penggunaan industri yang sebenarnya.
--	--	--	--	--

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Motor Listrik 3 Fasa

Menurut (Fauzi Ikhsan et al., 2018) motor induksi tiga fasa adalah jenis motor listrik yang paling umum digunakan dalam industri. Motor ini beroperasi berdasarkan prinsip interaksi antara medan magnet yang dihasilkan oleh stator dan rotor, dengan menggunakan Hukum Faraday dan Hukum Lorentz sebagai dasar kerjanya. Hukum Faraday menyatakan bahwa perubahan medan magnet akan menghasilkan tegangan induksi, sedangkan Hukum Lorentz menjelaskan bahwa arus yang mengalir dalam medan magnet akan mengalami gaya.

Motor 3 fasa terdiri dari dua komponen utama:

- Stator: Bagian tetap yang menghasilkan medan magnet. Stator memiliki

kumparan yang terhubung ke sumber listrik tiga fasa.

- Rotor: Bagian yang berputar dan terpengaruh oleh medan magnet dari stator. Rotor dapat berupa jenis sangkar tupai atau belitan.

Motor ini beroperasi dengan memanfaatkan tiga fasa listrik yang saling berinteraksi. Setiap fasa memiliki siklus medan magnetik yang berbeda, menghasilkan torsi yang lebih besar dan stabil. Ketika arus listrik mengalir melalui kumparan stator, ia menciptakan medan magnet berputar yang memotong konduktor pada rotor, menyebabkan rotor berputar.

Prinsip kerja motor listrik 3 fasa berdasarkan prinsip elektromagnetis. Yang dimana motor tersebut menciptakan medan magnet untuk menggerakkan motor. Adapun penjelasan prinsip motor listrik 3 fasa yaitu:

a) Sumber Tegangan Tiga Fasa

Motor tiga fasa dihubungkan dengan sumber tegangan tiga fasa yang terdiri dari tiga arus bolak-balik (AC) dengan perbedaan fase sebesar 120 derajat. Arus ini dialirkan ke lilitan stator

b) Pembentukan Medan Magnet Putar di Stator

Arus tiga fasa yang mengalir pada lilitan stator menciptakan medan magnet yang berubah-ubah (medan magnet bolak-balik). Karena perbedaan fasa pada tiga lilitan, medan magnet yang dihasilkan akan berputar secara kontinu di sekitar stator. Medan magnet putar ini dikenal sebagai rotating magnetic field.

c) Induksi Elektromagnetik pada Rotor

Ketika medan magnet putar stator melewati rotor, ia memotong konduktor pada rotor dan menghasilkan arus induksi (jika rotor adalah jenis sangkar tupai) atau menarik rotor mengikuti medan magnet (jika rotor adalah jenis belitan). Proses ini mengikuti Hukum Faraday tentang induksi elektromagnetik.

d) Rotasi Rotor

Arus induksi di rotor menciptakan medan magnetnya sendiri, yang berinteraksi dengan medan magnet putar dari stator. Gaya tarik-menarik dan tolak-menolak antara medan magnet ini menyebabkan rotor mulai berputar, mengikuti arah putaran medan magnet stator.

e) Sinkronisasi Kecepatan (*Slip*)

Pada motor induksi, kecepatan rotor lebih rendah daripada kecepatan medan magnet stator. Selisih ini disebut slip, yang memungkinkan adanya arus induksi di rotor. Pada motor sinkron, rotor berputar pada kecepatan yang sama dengan medan magnet stator (tanpa slip).

f) Konversi Energi

Energi listrik yang diterima dari sumber tiga fasa diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran rotor, yang kemudian digunakan untuk menggerakkan beban seperti pompa, conveyor, atau mesin industri lainnya.

g) Keuntungan Motor Listrik Tiga Fasa

- Efisiensi tinggi.
- Torsi lebih stabil.
- Tidak memerlukan kapasitor start seperti motor satu fasa.
- Cocok untuk aplikasi industri dan beban berat.

Motor tiga fasa sangat andal dan banyak digunakan di berbagai sektor industri karena kemampuannya menggerakkan beban besar dengan efisiensi. Contoh gambar motor listrik 3 fasa terdapat pada gambar 2.1 dibawah ini.



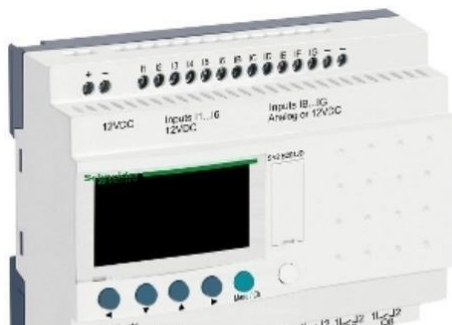
Gambar 2. 1 motor 3 fasa

2.2.2 *Smart Relay*

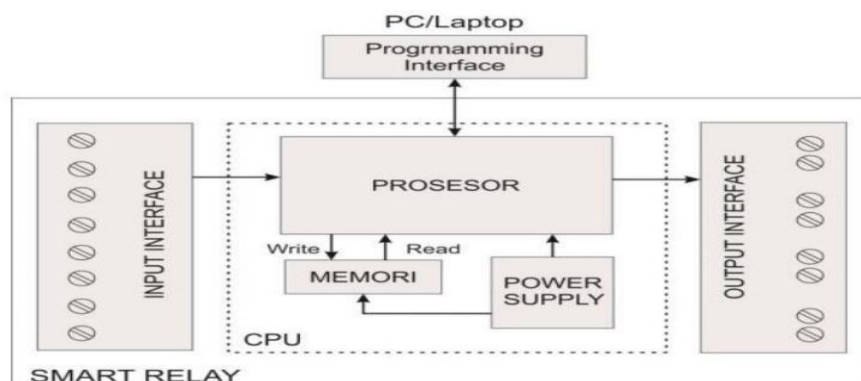
Menurut (Imron, 2018) *Smart Relay* adalah sebuah perangkat kendali otomatis yang dapat diprogram untuk menjalankan proses sekuensial tertentu. *Smart Relay* adalah suatu perangkat kendali *relay* virtual yang didesain dari *mikrokontroller* sebagai pengganti dari fungsi kendali relay dan kontaktor konvensional. *Smart Relay* juga sering disebut sebagai mini PLC atau mikro PLC karena secara fungsional *Smart Relay* hampir sama dengan dengan kendali PLC,

hanya saja fitur-fitur yang dimiliki oleh kendali *Smart Relay* lebih sederhana.(Bahri et al., 2023).

Zelio Smart Relay merupakan salah satu jenis PLC keluaran Schneider elektrik. *Zelio* atau *Smart Relay* memiliki ukuran yang kecil dan relatif ringan. *Smart Relay* didesain untuk sistem otomatis yang biasa digunakan pada aplikasi industri dan komersial. Contoh pengaplikasian *Smart Relay* pada industri salah satunya digunakan untuk proses pengemasan barang yang siap untuk dipasarkan. Untuk sektor komersial atau bangunan biasa digunakan untuk alat penggulung, pintu masuk, instalasi listrik, dan lain-lain yang menggunakan sistem otomatis. Terdapat dua tipe *Smart Relay* , yaitu tipe compact dan tipe modular. *Smart Relay* tipe compact adalah *Smart Relay* yang menggunakan sistem rak, dimana CPU dan I/O dijadikan satu kesatuan dan memorinya terbatas, sedangkan tipe modular terdiri dari modul CPU dan modul I/O yang merupakan bagian yang terpisah-pisah. Perbedaan lainnya adalah pada tipe modular dapat ditambahkan extension module sehingga dapat ditambahkan input dan *output*. Bentuk fisik *Smart Relay* terdapat gambar 2.2 dibawah ini.



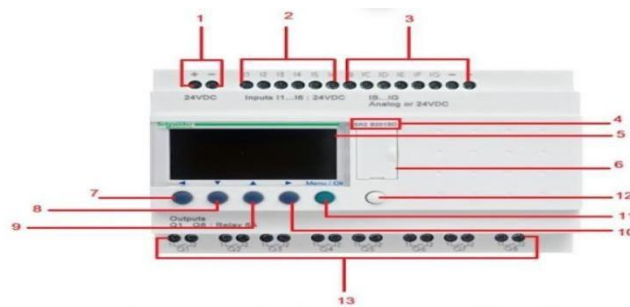
Gambar 2. 2 *Smart Relay Zelio*



Gambar 2. 3 Arsitektur *Smart Relay*

Pada gambar 2.3 diatas secara garis besar arsitektur dari *Smart Relay* Zelio, terdiri dari dua elemen utama, yaitu:

1. Elemen input dan *output* yang terdiri dari sejumlah port untuk masukan dan keluaran dari *Smart Relay* Zelio. Elemen input berfungsi membaca data masukan agar dapat diproses oleh CPU. Sedangkan elemen *output* berfungsi untuk menerjemahkan data dari CPU agar data tersebut dapat menjalankan perangkat *outputan*.
2. CPU (*Central Processing Unit*) terdiri dari prosesor, memori dan juga *Power supply* . CPU ini berfungsi untuk menyimpan program kemudian mengeksekusinya dengan data masukan sehingga menghasilkan data *output*.



Gambar 2. 4 Bagian – bagian *Smart Relay*

Adapun gambar 2.4 diatas menjelaskan tentang fungsi dari bagian-bagian *Smart Relay* Zelio sebagai berikut:

1. Lubang terminal *Power supply* , berfungsi sebagai tempat untuk memberikan sumber tegangan pada *Smart Relay* Zelio.
2. Lubang terminal input diskrit, berfungsi sebagai terminal inputan diskrit atau inputan digital On/Off.
3. Lubang terminal input analog, berfungsi sebagai terminal inputan berupa tegangan analog 0-10VDC.
4. Nomor tipe *Smart Relay* untuk menunjukkan tipe *Smart Relay* yang digunakan.
5. LCD display
6. Lubang memori cartridge atau port untuk koneksi antarmuka *Smart Relay*
7. Zelio dengan PC.

8. Tombol navigasi kiri untuk mengarahkan kursor ke kiri.
 9. Tombol navigasi bawah untuk mengarahkan kursor ke bawah.
 10. Tombol menu/ok untuk menampilkan dan memilih menu, submenu, program ataupun parameter pada program.
- bat tegangan yang tidak stabil.

2.2.3 *Magnetic Contactor*

Menurut (Ubaidillah et al., 2024) magnetic contactor adalah perangkat listrik yang berfungsi untuk menyambung dan memutuskan aliran listrik dengan menggunakan mekanisme elektromagnetik. Perangkat ini dirancang untuk mengalirkan arus besar, mulai dari beberapa ampere hingga ratusan ampere, dan dapat bekerja dengan tegangan AC atau DC hingga 1000 V, sehingga cocok untuk aplikasi seperti motor listrik, pemanas, penerangan, dan distribusi daya. Dengan memanfaatkan medan magnet yang dihasilkan oleh koil, kontaktor dapat menggerakkan kontak utama untuk mengontrol daya utama dan kontak bantu untuk rangkaian kontrol tambahan, seperti lampu indikator atau relay kontrol. *Magnetic contactor* memiliki isolasi yang baik, mendukung integrasi dengan sistem otomasi seperti PLC, dan dirancang untuk memutus atau menyambung arus dengan cepat guna mengurangi risiko lonjakan arus yang dapat merusak peralatan. Selain itu, kontaktor dikenal tahan lama, mampu bertahan hingga jutaan siklus operasi, dan bekerja andal dalam kondisi lingkungan berat seperti suhu tinggi, debu, atau getaran. Keamanan tambahan seperti *arc chute* untuk memadamkan busur api dan fitur opsional seperti *overload protection* juga tersedia. Tersedia dalam berbagai ukuran, kontaktor mudah dipasang dengan rel DIN atau lubang baut, menjadikannya solusi yang praktis untuk kebutuhan rumah tangga maupun industri. dan integrasi yang mudah dalam panel kontrol . Contoh gambar kontaktor terdapat pada gambar 2.5 dibawah ini.



Gambar 2. 5 *Magnetic Contactor*

2.2.4 *Miniatur Circuit Breaker*



Gambar 2. 6 *Miniature Circuit Breaker*

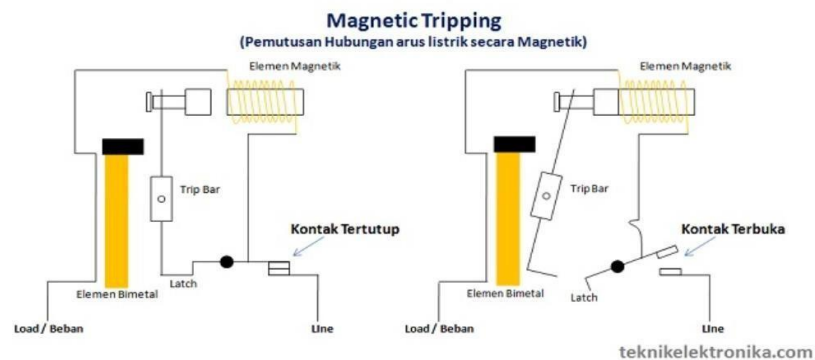
Terdapat gambar diatas 2.6 adalah bentuk fisik dari MCB. Menurut (Mesin et al., 2024) MCB adalah singkatan dari *Miniature Circuit Breaker*. MCB (*Miniature Circuit Breaker*) atau Miniatur Pemutus Sirkuit adalah sebuah perangkat elektromekanikal yang berfungsi sebagai pelindung rangkaian listrik dari arus yang berlebihan. Dengan kata lain, MCB dapat memutuskan arus listrik secara otomatis ketika arus listrik yang melewati MCB tersebut melebihi nilai yang ditentukan. Namun saat arus dalam kondisi normal, MCB dapat berfungsi sebagai saklar yang bisa menghubungkan atau memutuskan arus listrik secara manual.

Pada kondisi Normal, MCB berfungsi sebagai sakelar manual yang dapat menghubungkan (ON) dan memutuskan (OFF) arus listrik. Pada saat terjadi Kelebihan Beban (*Overload*) ataupun Hubung Singkat Rangkaian (*Short Circuit*), MCB akan beroperasi secara otomatis dengan memutuskan arus listrik yang melewatinya. Secara visual, kita dapat melihat perpindahan Knob atau tombol dari kondisi ON menjadi kondisi OFF. Pengoperasian otomatis ini

dilakukan dengan dua cara seperti yang terlihat pada gambar dibawah ini yaitu dengan cara *Magnetic Tripping* (Pemutusan hubungan arus listrik secara Magnetik) dan *Thermal Tripping* (Pemutusan hubungan arus listrik secara Thermal/Suhu).

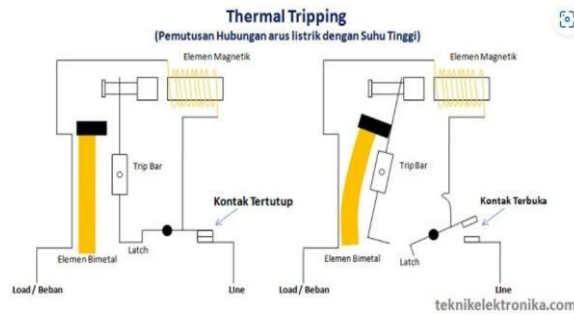
MCB dapat berfungsi sebagai saklar yang bisa menghubungkan atau memutuskan arus listrik secara manual. Pengoperasian otomatis ini dilakukan dengan dua cara yaitu :

- a) *Magnetic Tripping* (Pemutusan hubungan arus listrik secara Magnetik)
- Ketika terjadi Hubung Singkat Rangkaian secara mendadak ataupun Kelebihan Beban yang sangat tinggi (*Heavy Overload*), *Magnetic Tripping* atau pemutusan hubungan arus listrik secara Magnetik akan diberlakukan. Pada saat terjadi hubungan singkat ataupun kelebihan beban berat, Medan magnet pada Solenoid MCB akan menarik latch (palang) sehingga memutuskan kontak MCB (Trip).



Gambar 2. 7 *Magnetic Tripping*

- b) *Thermal Tripping* (Pemutusan hubungan arus listrik secara Termal/Suhu).
- Pada saat kondisi *Overload* (Kelebihan Beban), Arus yang mengalir melalui Bimetal menyebabkan suhu Bimetal itu sendiri menjadi tinggi. Suhu panas tersebut mengakibatkan Bimetal melengkung sehingga memutuskan kontak MCB (Trip).



Gambar 2. 8 *Thermal Tripping*

2.2.5 *Pilot Lamp*



Gambar 2. 9 *Pilot Lamp*

Terdapat gambar diatas 2.9 adalah bentuk fisik dari *Pilot Lamp*. *Pilot Lamp* adalah komponen indikator visual yang digunakan pada panel kontrol listrik untuk menunjukkan kondisi atau status suatu rangkaian listrik. *Pilot Lamp* bekerja dengan mengubah energi listrik menjadi cahaya sehingga operator dapat mengetahui apakah suatu sistem sedang aktif, mati, atau berada pada kondisi tertentu. Komponen ini banyak digunakan pada panel kontrol industri, panel motor, sistem otomasi, dan peralatan listrik lainnya karena mampu memberikan informasi kondisi sistem secara cepat dan mudah dipahami.

Secara umum, *Pilot Lamp* terdiri dari sumber cahaya berupa lampu pijar atau LED, lensa penutup, dan terminal penghubung listrik. Saat tegangan diberikan pada terminal *Pilot Lamp*, arus listrik akan mengalir ke elemen lampu sehingga menghasilkan cahaya. Warna cahaya yang ditampilkan biasanya disesuaikan dengan fungsi tertentu, misalnya warna hijau menunjukkan sistem beroperasi normal (*RUN*), warna merah menunjukkan kondisi berhenti (*STOP*) atau gangguan (*FAULT*), dan warna kuning menunjukkan kondisi peringatan (*WARNING*).

Dalam sistem kontrol motor 3 phase berbasis *smart relay*, *Pilot Lamp*

berfungsi sebagai indikator kondisi operasi sistem. Lampu indikator dapat digunakan untuk menunjukkan status sumber daya masuk, kondisi motor berjalan, kondisi *standby*, maupun kondisi gangguan. Dengan adanya *Pilot Lamp*, operator dapat memantau kondisi sistem tanpa harus melakukan pengukuran secara langsung pada rangkaian listrik.

2.2.6 Metering Digital

Metering digital merupakan alat ukur elektronik yang digunakan untuk mengukur, menampilkan, dan memantau berbagai parameter kelistrikan secara real-time. Berbeda dengan alat ukur analog yang menggunakan jarum penunjuk, metering digital menampilkan hasil pengukuran dalam bentuk angka pada layar digital sehingga lebih mudah dibaca, memiliki tingkat ketelitian yang lebih tinggi, serta mampu mengurangi kesalahan pembacaan oleh operator.

Prinsip kerja metering digital dimulai dengan mendeteksi besaran listrik, seperti tegangan, arus, frekuensi, daya aktif, daya semu, faktor daya, dan konsumsi energi. Besaran listrik tersebut diterima oleh rangkaian sensor internal yang kemudian dikonversi menjadi sinyal digital melalui proses *Analog to Digital Converter (ADC)*. Data digital selanjutnya diproses oleh mikrokontroler internal menggunakan algoritma pengukuran sehingga menghasilkan nilai parameter listrik yang akurat. Hasil perhitungan tersebut kemudian ditampilkan pada layar LCD atau LED yang terdapat pada metering digital.

Penggunaan metering digital memberikan berbagai keunggulan dibandingkan alat ukur analog. Beberapa keunggulannya antara lain memiliki akurasi pengukuran yang tinggi, mampu menampilkan beberapa parameter listrik secara bersamaan, respon pembacaan yang cepat, serta memudahkan proses monitoring sistem kelistrikan secara kontinu. Selain itu, metering digital memiliki tampilan yang jelas sehingga mengurangi kemungkinan terjadinya kesalahan pembacaan oleh operator (Joelianto et al., 2020). Terdapat gambar diatas 2.10 dibawah ini adalah bentuk gambaran metering digital.



Gambar 2. 10 Metering digital

2.2.5 *Current Transformer*

Current Transformer (CT) atau Transformator Arus merupakan transformator instrumen yang digunakan untuk menurunkan nilai arus listrik yang besar menjadi arus yang lebih kecil dan terstandarisasi sehingga aman untuk diukur oleh alat ukur maupun sistem proteksi. CT banyak digunakan pada sistem tenaga listrik, panel distribusi, motor listrik, serta peralatan monitoring untuk mengukur arus tanpa harus menghubungkan alat ukur secara langsung ke penghantar yang dialiri arus besar.

Prinsip kerja *Current Transformer* didasarkan pada prinsip induksi elektromagnetik. Ketika arus bolak-balik (AC) mengalir pada penghantar utama yang melewati inti besi CT, arus tersebut akan menghasilkan medan magnet yang berubah-ubah. Perubahan fluks magnet pada inti besi akan menginduksi tegangan pada kumparan sekunder sesuai dengan Hukum Faraday. Akibatnya, pada kumparan sekunder akan mengalir arus yang besarnya sebanding dengan arus primer sesuai dengan rasio lilitan transformator. (Latupeirissa, 2017). Terdapat gambar 2.11 dibawah ini adalah contoh gambar *Current Transformer*.



Gambar 2. 11 *Current Transformer*