

BAB II

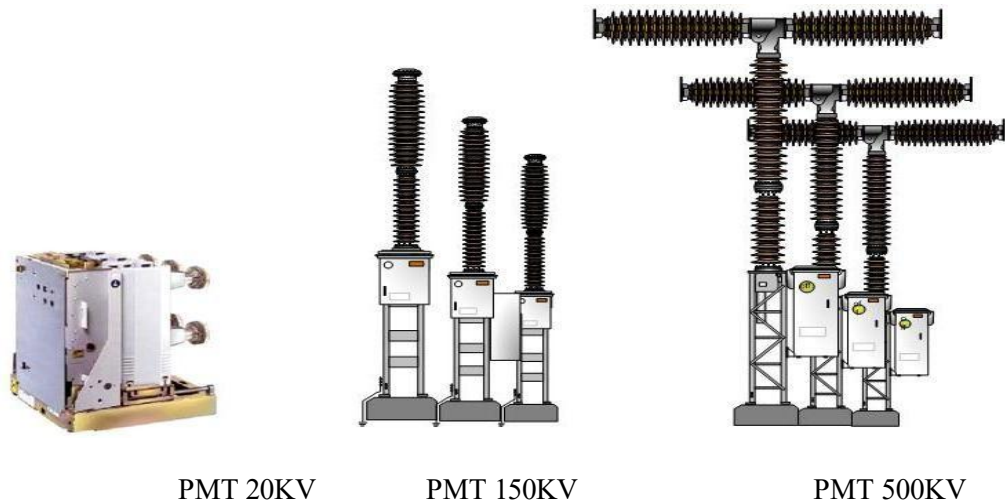
KAJIAN TEORI

2.1 Landasan Teori

2.1.1 PMT (*Circuit Breaker*)

Berdasarkan *IEV (International Electrotechnical Vocabulary)* 441-14-20 disebutkan bahwa *Circuit Breaker (CB)* atau Pemutus Tenaga (PMT) merupakan peralatan saklar / *switching* mekanis, yang mampu menutup, mengalirkan dan memutus arus beban dalam kondisi normal serta mampu menutup, mengalirkan (dalam periode waktu tertentu) dan memutus arus beban dalam spesifik kondisi abnormal / gangguan seperti kondisi *short circuit* / hubung singkat.

Fungsi utamanya adalah sebagai alat pembuka atau penutup suatu rangkaian listrik dalam kondisi berbeban, serta mampu membuka atau menutup saat terjadi arus gangguan (hubung singkat) pada jaringan atau peralatann lain.

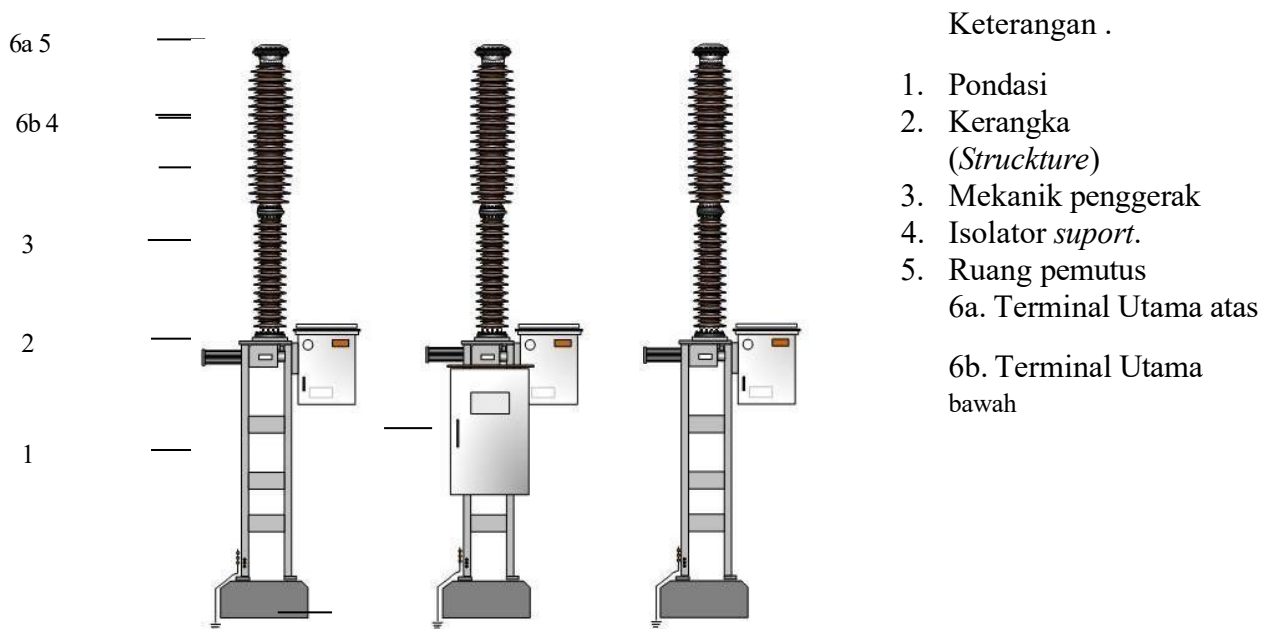


Gambar 2. 1 Macam – macam PMT

PMT atau sering disebut dengan *Circuit Breaker* merupakan alat penghubung atau pemutus aliran listrik dalam keadaan berbeban. Berdasarkan mekanik, PMT memiliki 2 jenis yaitu:

1. *Single Pole*

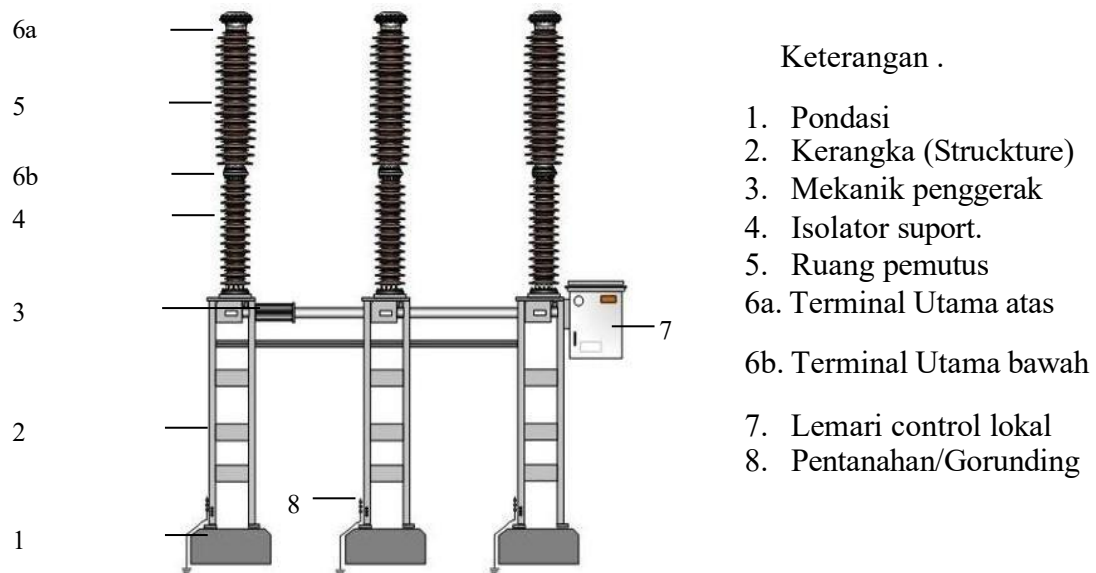
PMT type ini mempunyai mekanik penggerak pada masing-masing fasa, umumnya PMT jenis ini dipasang pada bay penghantar, PMT tipe ini biasa dilengkapi dengan fungsi *auto reclose* yang apabila ketika terjadi trip di salah satu fasa maka PMT pada saluran transmisi tersebut tentunya akan melepaskan fasanya dan kemudian PMT akan *Close* secara otomatis (*Reclousenya* PMT tergantung dari Spesifikasi PMT yang digunakan)



Gambar 2. 2 PMT *Single Pole*

2. *Three Pole*

PMT pada jenis ini mempunyai satu mekanik penggerak untuk tiga fasa, guna menghubungkan fasa satu dengan fasa lainnya di lengkapi dengan kopel mekanik, umumnya PMT jenis ini dipasang pada bay trafo dan bay *couple* serta PMT 20kV untuk Distribusi.



Gambar 2. 3 PMT *Three Pole*

- Berdasarkan media isolasi

Jenis PMT dapat dibedakan menjadi :

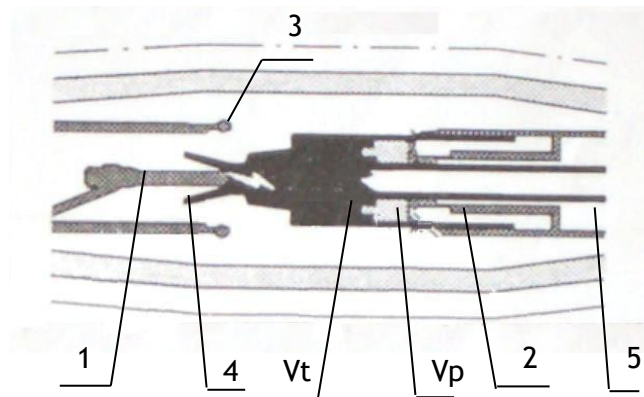
- a. PMT Gas SF₆
- b. PMT Minyak
- c. PMT Udara Hembus (*Air Blast*)
- d. PMT Hampa Udara (*Vacuum*)

- Berdasarkan proses pemadaman busur api listrik diruang pemutus

PMT SF6 dapat dibagi dalam 2 (dua) jenis, yaitu :

- PMT Jenis Tekanan Tunggal (*single pressure type*)
- PMT Jenis Tekanan Ganda (*double pressure type*)
- PMT Jenis Tekanan Tunggal

PMT terisi gas SF6 dengan tekanan kira-kira 5 Kg / cm², selama terjadi proses pemisahan kontak – kontak, gas SF6 ditekan (*fenomena thermal overpressure*) ke dalam suatu tabung/cylinder yang menempel pada kontak bergerak selanjutnya saat terjadi pemutusan, gas SF6 ditekan melalui *nozzle* yang menimbulkan tenaga hembus/tiupan dan tiupan ini yang memadamkan busur api.



Gambar 2. 4 *Interrupting chamber* PMT SF6 saat proses pemutusan arus listrik

- *Fixed contacts rod (Rod Kontak diam)*
- *Valve (katup)*
- *Main contacts (Kontak Utama)*
- *Insulating Nozle*
- *The Moving Contact suport Vt.*
Thermal Pressure Vp.The
Compression of the Volume

2. Komponen dan fungsi

Sistem Pemutus (PMT) terdiri dari beberapa sub-sistem yang memiliki beberapa komponen. Pembagian komponen dan fungsi dilakukan berdasarkan *Failure Modes Effects Analysis* (FMEA), sebagai berikut :

1. Penghantar arus listrik (*electrical current carrying*)

Bagian ini berfungsi untuk mengalirkan arus listrik dari satu terminal ke terminal lainnya Ketika PMT dalam kondisi *close* (terhubung). Komponen penghantar biasanya terbuat dari tembaga berlapis perak (*silver-plated copper*) atau Paduan tembaga (*CuCr*) untuk mengurangi *resistansi* dan oksidasi.

- Komponen Utama:

- a. *Main contact & arcing contact*
- b. *Current path (busbar connector)*
- c. *Terminal bushing*

- Potensi kegagalan (FMEA):

- a. Oksidasi kontak → resistansi meningkat → pemanasan berlebih.
- b. Kegagalan konduktor akibat *fatigue* atau getaran.
- c. Kontak tidak rapat → menyebabkan loncatan busur listrik (*arc*).

2. Sistem isolasi (*electrical insulation*)

Menjamin agar bagian bertegangan tinggi terisolasi dari bagian tanah dan antar fasa, sehingga tidak terjadi loncatan tegangan (*flashover*)

- Komponen Utama :
 - a. *Bushing isolator*
 - b. *Spacer & barrier internal*
 - c. Minyak isolasi / gas SF₆ / ruang vakum
- Potensi kegagalan:
 - a. Kebocoran gas SF₆ → menurunkan kemampuan isolasi.
 - b. Retak pada *bushing* → menyebabkan *partial discharge*.
 - c. Kontaminasi kelembapan → menurunkan tegangan tembus.

3. Media pemadam busur api

Saat PMT memutuskan arus beban atau arus gangguan, akan terjadi busur listrik (*arc*). Media pemadam berfungsi memadamkan busur tersebut dengan cepat agar tidak merusak kontak.

- Jenis media:
 - a. Minyak (*Oil CB*) – digunakan pada sistem lama.
 - b. Udara Tekan (*Air Blast CB*) – tekanan udara tinggi memadamkan arc.
 - c. Vakum (*Vacuum CB*) – kontak bekerja dalam ruang hampa.
 - d. Gas SF₆ (*Sulphur Hexafluoride CB*) – digunakan di sistem 150–500 kV karena kemampuan pemadaman tinggi.

- Potensi kegagalan:
 - a. Tekanan gas menurun → *arc* tidak padam sempurna.
 - b. Kontaminasi udara → gangguan *dielectric breakdown*.
 - c. Kebocoran gas SF₆ → menurunkan kemampuan isolasi.

4. Mekanik penggerak

Mekanisme penggerak berfungsi menggerakkan kontak utama untuk membuka dan menutup PMT. Sistem ini terdiri dari *spring operating mechanism* (mekanis pegas), *motor drive*, atau *hydraulic actuator*.

- Komponen Utama:
 - a. Motor pengisi pegas
 - b. *Spring release mechanism*
 - c. Lengan penggerak (*linkage arm*)
- Potensi kegagalan:
 - a. Pegas kehilangan elastisitas → respon terlambat.
 - b. Gangguan mekanik *linkage* → *pole discrepancy*.
 - c. Kegagalan motor pengisi → tidak bisa operasi otomatis.

5. Control / Auxiliary circuit

Mengatur sinyal *open* dan *close* dari panel kontrol menuju PMT. Termasuk dalam sistem ini adalah koil *trip/close*, *relay*, *interlock*, terminal *block*, dan sistem proteksi SCADA.

- Komponen Utama:
 - a. Koil *trip & close*
 - b. Terminal *wiring* dan *plug adapter*
 - c. *Control relay* dan *timer*
 - d. *Interlock* mekanis dan listrik

- Potensi kegagalan:
 - a. Salah sambungan terminal → gagal operasi.
 - b. Tegangan suplai kontrol *drop* → PMT tidak merespon.
 - c. Relay macet → tidak mengirim sinyal trip.

6. Struktur mekanik

Sebagai penopang seluruh komponen PMT agar stabil secara mekanis, tahan terhadap getaran, tekanan, dan perubahan suhu. Struktur juga memastikan *alignment* antar bagian tetap presisi agar kontak tidak macet.

- Potensi kegagalan:
 - a. Baut kendur akibat getaran.
 - b. Korosi pada rangka logam.
 - c. Perubahan dimensi karena ekspansi termal.

7. Sistem pentanahan (*grounding*)

Menyalurkan arus bocor, arus gangguan, atau induksi petir menuju tanah agar tidak membahayakan personel dan peralatan.

- Komponen Utama:
 - a. *Ground bar* dan konduktor tembaga
 - b. Klem pentanahan lokal
 - c. *Ground rod / grid* di bawah PMT

- Potensi kegagalan:
 - a. Koneksi pentanahan longgar → timbul tegangan sentuh tinggi.
 - b. Korosi konduktor → hambatan meningkat.
 - c. Tidak ada *bonding* antar sistem → beda potensial tinggi.

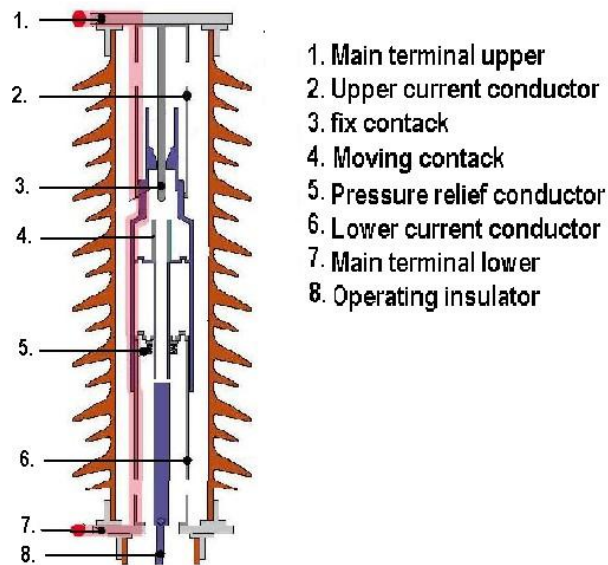
3. Penghantar arus listrik (*electrical current carrying*)

Merupakan bagian PMT yang bersifat konduktif dan berfungsi untuk menghantarkan / mengalirkan arus listrik. Penghantar arus listrik pada PMT terdiri dari beberapa bagian antara lain :

a. *Interrupter*

Merupakan bagian terjadinya proses membuka atau menutup kontak PMT. Didalamnya terdapat beberapa jenis kontak yang berkenaan langsung dalam proses penutupan atau pemutusan arus, yaitu:

- Kontak bergerak / *moving contact*
- Kontak tetap / *fixed contact*
- Kontak arcing / *arcing contact*



Gambar 2. 5 Interrupter

1. Main terminal upper

Terminal utama bagian atas yang menghubungkan konduktor *eksternal* (busbar atau penghantar) ke sistem PMT. Terminal ini berfungsi sebagai jalur masuk arus listrik (*incoming terminal*) saat PMT dalam posisi *close*.

- Standar IEC:

Menurut IEC 62271-100 Klausul 6.101, terminal utama harus memiliki:

- a. Kekuatan arus nominal (*Rated Current*): 630–4000 A, tergantung kapasitas PMT.
- b. Kemampuan menahan arus hubung singkat (*Rated Short-time Withstand Current*) minimal 25–50 kA selama 1–3 detik.

2. *Upper current conductor*

Merupakan penghantar arus bagian atas yang menyalurkan energi listrik dari terminal utama atas (1) menuju kontak tetap (3). Biasanya terbuat dari paduan tembaga berlapis perak (*silver-plated copper*) untuk mengurangi rugi resistansi dan menghindari oksidasi.

- Standar IEC:
 - a. *IEC 62271-100:2021, Annex D* – menetapkan bahwa seluruh konduktor utama harus mampu membawa arus nominal dengan kenaikan suhu tidak lebih dari 65°C di atas suhu lingkungan.

3. *Fixed contact* (kontak tetap)

Komponen konduktor yang diam dan berfungsi sebagai titik sambungan tetap dengan moving contact (4) saat PMT menutup. Kontak ini dibuat dari paduan *CuCr* (tembaga-kromium) yang memiliki ketahanan tinggi terhadap busur listrik (*arc erosion*).

- Standar IEC:
 - a. *IEC 62271-100:2021, Clause 7.101 – Design and construction of arcing contacts.*
 - b. Ketahanan erosi akibat *arc* harus ≥ 2000 operasi mekanis sesuai kategori *Class M2/E2*.

4. *Moving contact* (Kontak bergerak)

Bagian konduktor yang bergerak secara aksial untuk menutup (*close*) atau membuka (*trip*) sirkuit listrik. Kontak ini terhubung dengan mekanik penggerak (*operating mechanism*) melalui *operating rod*.

Saat PMT menutup, *moving contact* menyentuh *fixed contact*; saat membuka, keduanya terpisah dan *arc* dipadamkan oleh media SF₆.

- Standar IEC:
 - a. *IEC 62271-100:2021, Clause 7.102 – Mechanical endurance and motion requirements.*
 - b. Kelas mekanis minimum M2 (10.000 operasi) dan listrik E2 (kemampuan pemutusan berulang).

5. *Pressure relief conductor*

Saluran pelepasan tekanan internal untuk mengeluarkan gas SF_6 berlebih saat terjadi pemutusan arus besar (*arc interruption*). Berfungsi sebagai sistem *pressure relief channel* untuk menjaga kestabilan tekanan di dalam tabung kontak.

- Standar IEC:
 - a. *IEC 62271-1:2017, Clause 7.9 – Pressure relief and gas-tightness.*
 - b. Tekanan kerja normal SF_6 : 0.4–0.6 MPa (pada 20°C).
 - c. Sistem harus tahan terhadap tekanan puncak hingga 1 MPa tanpa kebocoran.

6. *Lower current conductor*

Mengalirkan arus dari *moving contact* (4) ke terminal bawah (7) saat PMT dalam posisi tertutup. Menjadi bagian penting dalam jalur konduktor utama PMT.

- Standar IEC:
 - a. *IEC 62271-100, Annex D – menetapkan batas kenaikan suhu maksimum konduktor.*
 - b. Harus tahan terhadap gaya elektromagnetik selama arus hubung singkat (*short-time withstand current*).

7. *Main terminal lower*

Terminal utama bagian bawah yang menghubungkan PMT ke sirkuit eksternal (biasanya ke sisi trafo atau penghantar bawah). Memiliki fungsi sama seperti terminal atas (1), namun arah arusnya berlawanan saat operasi.

- Standar IEC:
 - a. *IEC 62271-100:2021, Clause 6.101*
 - b. Harus memiliki kemampuan arus dan *rating* isolasi identik dengan terminal atas.

4. Pedoman Pemeliharaan

Berdasarkan fungsinya dan kondisi peralatan bertegangan atau tidak, jenis pemeliharaan pada Pemutus dapat dikelompokkan sebagai berikut :

1. *In Service / Visual Inspection*
2. *In Service Measurement / On Line Montoring*
3. *Shutdown Measurement / Shutdown Function Check*
4. *Overhaul*
5. Pasca relokasi / Pasca Gangguan

In Service Inspection, In Service Measurement/On Line Montoring, Shutdown Measurement / Shutdown Function Check dan Overhaul sebagaimana dimaksud dalam butir 1 s/d 4 di atas, merupakan bahagian dari uraian kegiatan pemeliharaan yang tertuang dalam *review* SE.032/PST/1984 dan Suplemennya.

Hal-hal yang direview pada SE.032/PST/1984 antara lain adalah perubahan periode pemeliharaan dari 1 Tahun menjadi 2 Tahun dan penyesuaian item kegiatan pemeriksaan maupun pengujian yang mengacu kepada analisis efek modus gangguan (*Failure Mode Effect Analysis / FMEA*) dari setiap komponen peralatan tersebut.

1. *In service / visual inspection*

In Service Inspection adalah inspeksi/pemeriksaan terhadap peralatan yang dilaksanakan dalam keadaan peralatan beroperasi/bertegangan (*on-line*), dengan menggunakan 5 panca indera (*five senses*) dan *metering* secara sederhana, dengan pelaksanaan periode tertentu (Harian, Mingguan, Bulanan, Tahunan).

Inspeksi ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui/memonitor kondisi peralatan dengan menggunakan alat ukur sederhana/umum (seperti *Thermo Gun*) yang dilaksanakan oleh petugas operator/asisten supervisor di gardu induk (untuk Tragi/UPT PLN P3B Sumatera/Wilayah) atau petugas pemeliharaan/supervisor gardu induk (untuk UPT/Region PLN P3B JB).

2. *In service Measurement / on line monitoring*

Merupakan pengukuran yang dilakukan pada periode tertentu dalam keadaan peralatan bertegangan (*On Line*).

Pengukuran dan/atau pemantauan yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui/memonitor kondisi peralatan dengan menggunakan alat ukur yang *advanced* (seperti *Thermal Image thermovision*) yang dilakukan oleh petugas pemeliharaan.

3. *Shutdown measurement / shutdown function check*

Merupakan pengukuran yang dilakukan pada periode tertentu dalam keadaan peralatan tidak bertegangan (*Off Line*). Pengukuran dilakukan bertujuan untuk mengetahui kondisi peralatan dengan menggunakan alat ukur sederhana serta *advanced* yang dilakukan oleh petugas pemeliharaan.

a. Macam – macam pengukuran/pengujian :

1. Pengujian/pengukuran pada *interrupter* :

- a. Pengukuran Tahanan isolasi
- b. Pengukuran Tahanan kontak
- c. Keserempakan kontak (*breaker analyzer*)
- d. Pengukuran nilai R pada Resistor (bila ada)
- e. Pengukuran nilai C pada *Capasitor* (bila ada)

2. Pengujian pada media pemadam busur api :

- a. Kualitas gas *SF6*
- b. Karakteristik minyak
- c. Pengujian ke-*Vacuum*-an
- d. Pengujian kerapatan gas (*density gas*)

3. Pengujian pada sistem mekanik penggerak :

- a. Sistem pegas / *spring*
- b. Pengujian fungsi *start & stop* motor penggerak
- c. Pengukuran arus beban motor penggerak
- d. Tahanan isolasi belitan motor penggerak
- e. Pengukuran tegangan AC dan DC
- f. Sistem pneumatik
- g. Pengujian fungsi *start & stop* motor kompresor
- h. Pengujian fungsi system block
- i. Pengujian kebocoran udara
- j. Pengukuran konsumsi udara saat *Open-Close-Open*
- k. Pengujian fungsi *safety valve*
- l. Kalibrasi manometer
- m. Pengukuran tegangan dan arus AC dan DC
- n. Pengukuran waktu kerja kompresor

4. Sistem hidrolik

- a. Pengujian fungsi *start & stop* motor hidrolik
- b. Pengujian fungsi *system* hidrolik
- c. Pengujian kebocoran hidrolik
- d. Pengukuran konsumsi hidrolik saat *Open-Close-Open*
- e. Pengujian fungsi *safety valve*
- f. Kalibrasi manometer
- g. Pemeriksaan *oil pressure* switch
- h. Pengukuran tegangan AC dan DC
- i. Pengujian tekanan akumulator

- j. Pengujian waktu *reinflation*
- k. Pengukuran *Grounding*/ pentanahan
- 5. Pemeriksaan fungsi lemari mekanik :
 - a. Pengujian fungsi *close* dan *open* (*local/remote* dan *scada*)
 - b. Pengujian tegangan AC dan DC
 - c. Pengujian *emergency trip*
 - d. Pengujian fungsi alarm
 - e. Pengujian fungsi interlock mekanik dan elektrik

5. Pengujian Keserempakan

Pengujian keserempakan PMT untuk mengetahui waktu kerja PMT secara individu serta untuk mengetahui keserempakan PMT pada saat menutup ataupun membuka. Berdasarkan cara kerja penggerak, maka PMT dapat dibedakan atas jenis *three pole* dan *single pole*. Untuk Bay penghantar biasanya PMT menggunakan jenis *singlepole* dengan maksud PMT tersebut dapat *trip* satu fasa apabila terjadi gangguan satu fasa ke tanah dan dapat *reclose* satu fasa yang biasa disebut *SPAR* (*Single Pole Auto Reclose*).

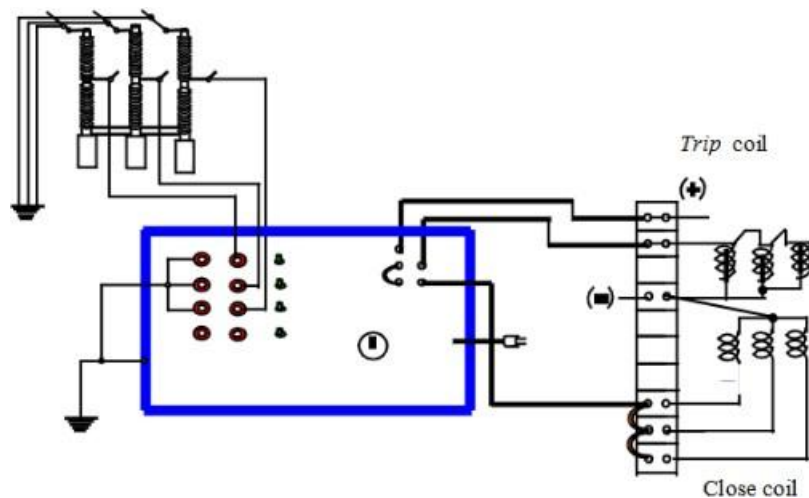
Namun apabila gangguan pada penghantar fasa–fasa maupun tiga fasa maka PMT tersebut harus trip 3 fasa secara serempak. Apabila PMT tidak trip secara serempak akan menyebabkan gangguan yang lebih fatal. Hal yang sama juga untuk proses menutup PMT maka yang tipe *singlepole* ataupun *threepole* harus menutup secara serentak pada fasa R,S,T, kalau tidak maka dapat menjadi suatu gangguan didalam sistem tenaga listrik dan menyebabkan system proteksi bekerja. Pada waktu PMT *trip* akibat terjadi suatu gangguan pada sistem tenaga listrik diharapkan PMT bekerja dengan cepat sehingga *clearingtime* yang diharapkan sesuai standard SPLN No 52-1 1983 untuk sistem 70 KV = 150 milli detik dan SPLN No 52-1 1984 untuk system 150 kV = 120 milli detik, dan *final draft Grid Code* 2002 untuk sistem 500 kV = 90 milli detik dapat terpenuhi.

6. Cara Pengujian Keserempakan Dan Waktu Kerja PMT

Pengujian keserempakan PMT dilakukan dalam keadaan tidak bertegangan antara lain:

A. Pentanahan langsung [*solid grounding*]

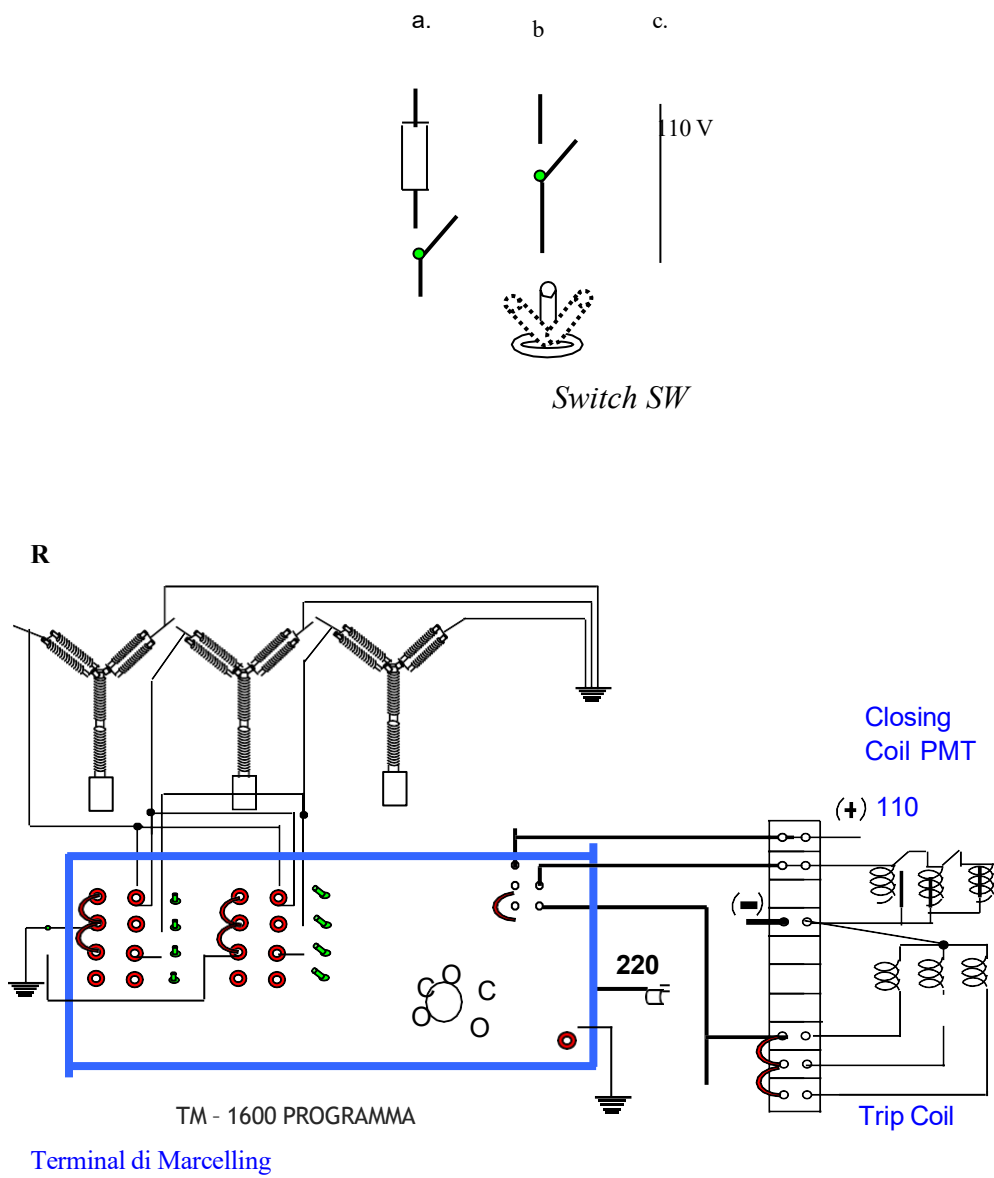
1. Masukkan (*ON*) PMT yang akan diuji.
2. Pasang pentanahan (*Grounding*) pada sisi atas kontak hal ini untuk mengurangi resiko arus induksi yang mengalir melalui alat uji.
3. Pasang pentanahan (*grounding*) untuk alat uji keserempakan.
4. Buat rangkaian seperti gambar dibawah :



Gambar 2. 6 Rangkaian Pengujiaan PMT

Perhatikan *Switch (SW)* pada alat uji ada 3 posisi :

- a. *Closing Resistor*
- b. *Main Contac*
- c. *Source DC*



Gambar 2. 7 Rangkaian uji untuk PMT 2 pole dengan *closing resistor*

- Langkah Pengujian :
- 1. *Closing Time* (Kondisi PMT Off / Open)
 - (a) Posisikan *switch Sequence* pada (*C / Close*)
 - (b) Nyalakan *switch power*
 - (c) Tekan tombol *ready* hingga lampu LED *ready* menyala
 - (d) Putar *switch start*
 - (e) Tunggu beberapa saat hingga printer mencetak
- 2. *Opening Time* (Kondisi PMT On / Close)
 - (a) Posisikan *switch sequence* pada (*O / Open*)
 - (b) Nyalakan *switch power*
 - (c) Tekan tombol *ready* hingga lampu LED *ready* menyala
 - (d) Putar *switch start*
 - (e) Tunggu beberapa saat hingga printer mencetak
- 3. *Close – Open Time* (Kondisi PMT Off / Open)
 - (a) Posisikan *switch sequence* pada (*CO / Close Open*)
 - (b) Nyalakan *switch power*
 - (c) Tekan tombol *ready* hingga lampu LED *ready* menyala
 - (d) Putar *switch start*
 - (e) Tunggu beberapa saat hingga printer mencetak

4. *Open – Close Time (Kondisi PMT On / Close)*
 - (a) Posisikan *switch sequence* pada (*OC / Open Close*)
 - (b) Nyalakan *switch power*
 - (c) Tekan tombol *ready* hingga lampu LED *ready* menyala
 - (d) Putar *switch start*
 - (e) Tunggu beberapa saat hingga printer mencetak

5. *Open – Close – Open Time (Kondisi PMT On / Close)*
 - (a) Posisikan *switch sequence* pada (*OCO / Open Close Open*)
 - (b) Nyalakan *switch power*
 - (c) Tekan tombol *ready* hingga lampu LED *ready* menyala
 - (d) Putar *switch start*
 - (e) Tunggu beberapa saat hingga printer mencetak



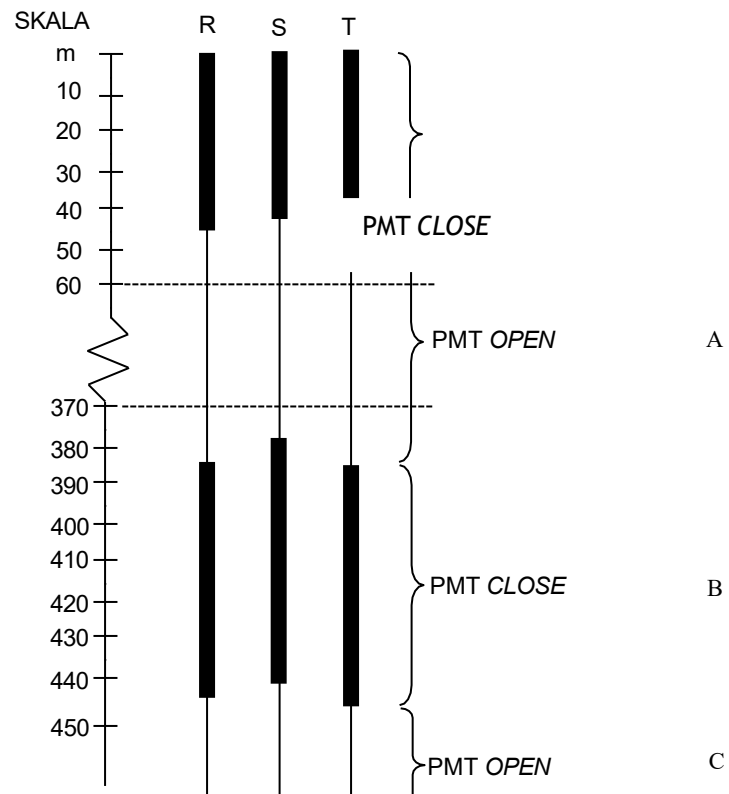
Gambar 2. 8 Alat Uji Keserempakan PMT

A. Closing Time Dan Opening Time

Closing Time : Waktu yang dibutuhkan oleh PMT untuk menutup kontak.

Opening Time : Waktu yang dibutuhkan oleh PMT untuk membuka kontak.

Contoh :



Tabel 2. 1 Tabel waktu keserempakan PMT

NO	FASA R	FASA S	FASA T
A.	47,5 ms <i>OPEN</i>	43,3 ms <i>OPEN</i>	42,7 ms <i>OPEN</i>
B.	383,8 ms <i>CLOSE</i>	381,5 ms <i>CLOSE</i>	383,6 ms <i>CLOSE</i>
C.	446,1 ms <i>OPEN</i>	443,5 ms <i>OPEN</i>	447,8 ms <i>OPEN</i>

Pengujian keserempakan PMT dilakukan dalam keadaan tidak bertegangan (*offline*). Pentanahan (*Grounding*) lokal dipasang untuk mengurangi resiko induksi yang masih mengalir melalui alat uji dan menghindari bahaya bagi para pekerja. Selanjutnya juga harus dipasang pentanahan (*grounding*) untuk alat uji keserempakan sebagai pengaman apabila ada gangguan. Rangkaian alat uji keserempakan Gambar 2.7 Rangkaian pengujian keserempakan PMT Pengujian Keserempakan pada PMT terdiri dari beberapa kondisi,

A. ClosingTime

B. Opening Time

C. Close–OpenTime

D. Open–CloseTime

E. Open–Close–OpenTime

Closing Time merupakan waktu yang dibutuhkan oleh PMT untuk menutup kontak. Sedangkan *Opening Time* adalah waktu yang dibutuhkan oleh PMT untuk membuka kontak.

2.1.2. Teknik Analisis Data

Teknik analisis data dalam penelitian ini dilakukan untuk mengolah hasil pengujian keserempakan Pemutus Tenaga (PMT) yang diperoleh dari kegiatan eksperimen lapangan di wilayah PT PLN (Persero) Unit Layanan Transmisi dan Gardu (ULTG) Tangerang Selatan.

Analisis dilakukan secara *kuantitatif* dan *kualitatif*, dengan tujuan untuk mengetahui tingkat keserempakan antar kutub fasa (R, S, T), efisiensi waktu pelaksanaan, serta faktor-faktor penyebab keterlambatan atau perbedaan waktu kerja PMT.

1. Analisis Kuantitatif

Analisis kuantitatif dilakukan terhadap data hasil pengukuran yang diperoleh dari alat *Circuit Breaker Analyzer* (Omicron CIBANO 500 atau Megger EGIL). Data yang diukur meliputi:

1. Waktu *trip (opening time)* pada masing-masing fasa (R, S, T),
2. Waktu *close (closing time)* pada masing-masing fasa,
3. Selisih waktu keserempakan antar fasa (Δt), serta
4. Durasi waktu total pengujian dan jumlah teknisi yang terlibat.

Hasil pengujian direkam dalam bentuk grafik waktu operasi dan tabel data oleh perangkat lunak bawaan alat uji. Nilai waktu kerja antar fasa kemudian dianalisis menggunakan rumus keserempakan waktu (*Synchronism Time Difference*) sebagai berikut:

$$\Delta t = | t_{max} - t_{min} | \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

Δt = selisih waktu keserempakan antar fasa (ms)

t_{max} = waktu operasi fasa dengan respon paling lambat (ms)

t_{min} = waktu operasi fasa dengan respon paling cepat (ms)

Menurut standar *IEC 62271-100:2021* dan *SPLN 52-1:1983*, batas maksimum perbedaan waktu antar fasa untuk PMT 150 kV hingga 500 kV adalah ± 2 milidetik (*ms*). Apabila nilai $\Delta t \leq 2$ *ms*, maka PMT dikatakan serempak (*synchronized*), sedangkan apabila $\Delta t > 2$ *ms* maka PMT dikategorikan tidak serempak (*unsynchronized*).

Data hasil pengujian dari masing-masing PMT kemudian dibandingkan untuk menilai tingkat keserempakan dan stabilitas waktu kerja antar fasa.

3 Analisis Kualitatif

Analisis kualitatif dilakukan untuk menilai faktor-faktor *non-numerik* yang berpengaruh terhadap hasil pengujian, seperti:

1. Kondisi koneksi terminal pengujian (*open/close coil*),
2. Jumlah personel yang terlibat dan tingkat koordinasi teknisi,
3. Risiko keselamatan kerja selama pengujian,
4. Kestabilan koneksi *tapping manual* selama pengujian berlangsung, serta
5. Kendala teknis seperti *noise*, kontak longgar, atau percikan listrik (*arc*).

Analisis ini dilakukan melalui observasi lapangan, wawancara teknisi, dan dokumentasi kegiatan pengujian. Hasil analisis kualitatif digunakan untuk mengidentifikasi kelemahan utama metode *tapping manual*, seperti potensi kesalahan koneksi, waktu pelaksanaan yang lama, dan risiko terhadap keselamatan kerja. Temuan ini menjadi dasar untuk perancangan dan pengembangan inovasi alat *FASTER* (Fasilitas Adapter) pada tahap penelitian berikutnya.

4 Analisis Efisiensi Waktu dan Keselamatan Kerja

Selain menganalisis hasil pengujian teknis, penelitian ini juga menilai efisiensi waktu pelaksanaan dan aspek keselamatan kerja. Perbandingan dilakukan antara durasi pengujian, jumlah personel yang digunakan, dan potensi risiko kerja selama metode *tapping manual* dilakukan.

Parameter efisiensi waktu dianalisis menggunakan persamaan berikut:

$$Efisiensi Waktu(\%) = \frac{Waktu_{awal} - Waktu_{pengujian}}{Waktu_{awal}} \times 100\% \dots\dots\dots(2)$$

↳ Keterangan:

1. $Waktu_{awal}$ = waktu pelaksanaan metode *tapping manual* sebelumnya,
2. $Waktu_{pengujian}$ = waktu rata-rata pengujian PMT aktual di lapangan.

Sementara itu, aspek keselamatan kerja dianalisis berdasarkan hasil observasi dan wawancara dengan teknisi lapangan, meliputi:

- a. Potensi kontak langsung terhadap terminal bertegangan,
- b. Risiko terkena loncatan busur (*arc flash*),
- c. Kemungkinan kegagalan koneksi saat pengujian, dan
- d. Kebutuhan jumlah personel untuk menjaga kestabilan sambungan.

Dari hasil analisis ini, diperoleh kesimpulan bahwa metode pengujian manual memiliki risiko keselamatan yang tinggi dan kurang efisien dalam pelaksanaannya.

2.2 Penelitian yang Relevan

Dalam studi ini, penulis melakukan tinjauan literatur terhadap berbagai penelitian terdahulu yang relevan, termasuk pengujian keserempakan Pemutus Tenaga (PMT), standarisasi koneksi alat uji, serta inovasi dalam sistem proteksi dan efisiensi waktu kerja. Penelitian-penelitian tersebut menjadi dasar dan referensi utama dalam pengembangan proyek inovasi *FASTER* (Fasilitas Adapter). Beberapa penelitian penting yang dijadikan acuan meliputi:

1. Menurut Koerniawan, T., Hasanah, A. W., Nursita, E. D., Wahono, R., Sari, I. R., & Yudho, S. (2024). Dalam jurnal yang berjudul “*Overcurrent Relay (OCR) berbasis GOOSE Message sebagai Pengaman Busbar 70 kV*”, dijelaskan bahwa sistem komunikasi digital berbasis IEC 61850 GOOSE Message mampu meningkatkan kecepatan respon sistem proteksi pada jaringan tegangan tinggi. Melalui penelitian ini, diketahui bahwa penggunaan GOOSE Message dapat mengurangi waktu kerja relay hingga 30% dibanding sistem analog konvensional. Implementasi teknologi tersebut tidak hanya mempercepat waktu operasi pemutusan gangguan, tetapi juga meningkatkan keandalan sistem koordinasi antar relay pada busbar 70 kV. Relevansinya terhadap penelitian ini adalah pada aspek efisiensi waktu dan keandalan sistem proteksi, di mana konsep komunikasi cepat dalam penelitian Koerniawan menjadi dasar logika pengembangan alat *FASTER* yang bertujuan mempercepat dan menstandarkan proses pengujian keserempakan PMT di lapangan [1].
2. Menurut Pasra, N. (2015). Dalam jurnal yang berjudul “Pemadaman Jaringan Distribusi 20 kV Gardu Induk Simpang Haru Penyulang Polamas”, dijelaskan bahwa salah satu penyebab utama terjadinya pemadaman pada jaringan distribusi adalah keterlambatan kerja Pemutus Tenaga (PMT) dalam merespons gangguan, terutama akibat ketidakseimbangan waktu operasi antar fasa (pole discrepancy). Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbedaan waktu kerja antar fasa lebih dari 3 milidetik dapat menyebabkan arus tak seimbang, memicu tegangan lebih sesaat, dan bahkan mengakibatkan kerusakan isolasi pada peralatan jaringan.

Penelitian ini menegaskan pentingnya pengujian keserempakan PMT secara berkala dan akurat untuk memastikan waktu kerja antar kutub tetap dalam batas standar SPLN 52-1 dan IEC 62271-100. Temuan ini menjadi dasar bagi pengembangan alat FASTER, yang dirancang untuk mengatasi masalah keterlambatan dan ketidakseimbangan pengujian akibat metode tapping manual [2].

3. Menurut Mulyana, A., & Toasin, T. (2021). Dalam jurnal yang berjudul “Perancangan dan Implementasi Komunikasi RS-485 Menggunakan Protokol Modbus RTU dan Modbus TCP pada Sistem Pick-by-Light”, dijelaskan tentang pengembangan sistem komunikasi antar perangkat berbasis RS-485 dan Modbus RTU/TCP untuk mengoptimalkan proses industri secara otomatis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan sistem komunikasi modular dan koneksi plug- and-play mampu mengurangi kesalahan transmisi data hingga 95% dan mempercepat pengambilan keputusan pada sistem industri. Relevansi penelitian ini dengan proyek inovasi FASTER terletak pada konsep interface modular dan konektor standar, di mana prinsip desain komunikasi cepat dan aman diterapkan ke dalam sistem konektor pengujian keserempakan PMT menggunakan soket industri 6-pin dan 16-pin [3].

4. Menurut Pusat Kajian Tegangan Tinggi ITPLN (2022). Dalam buku teknis berjudul “Pengembangan Rancang Bangun Pendeteksi Gejala Korona (*Corona Discharge*)”, dijelaskan bahwa alat pendeteksi korona dibuat untuk memantau adanya gangguan isolasi akibat emisi medan listrik pada sistem tegangan tinggi. Penelitian ini menggunakan pendekatan rancang bangun perangkat keras (*hardware development*) dengan fokus pada keselamatan dan efektivitas pemeliharaan di gardu induk. Alat ini mampu mendeteksi anomali medan listrik secara dini, sehingga potensi kerusakan isolator dapat dicegah sebelum menyebabkan gangguan sistem. Relevansinya terhadap penelitian ini adalah pada aspek inovasi peralatan kelistrikan berbasis keselamatan kerja dan efisiensi lapangan. Sama halnya dengan alat pendeteksi korona, FASTER juga merupakan inovasi teknis yang dikembangkan untuk meningkatkan keamanan dan efisiensi pada sistem pemeliharaan peralatan tegangan tinggi di lingkungan PT PLN (Persero) [4].

5. Menurut Surahman, D., & Widodo, A. (2023). Dalam Tugas Akhir berjudul “Analisis Waktu Operasi dan Keserempakan Pemutus Tenaga 150 kV di Gardu Induk Lengkong Menggunakan Omicron CIBANO 500”, dijelaskan bahwa pengujian keserempakan PMT dilakukan untuk memastikan waktu operasi antar fasa berada dalam batas toleransi standar IEC 62271-100. Penelitian ini menggunakan alat Omicron CIBANO 500 untuk mengukur waktu kerja trip dan close PMT. Dari hasil pengujian ditemukan bahwa beberapa PMT memiliki selisih waktu operasi antar fasa melebihi 3 milidetik akibat metode penyambungan manual (tapping) yang tidak seragam. Kesalahan koneksi tersebut menyebabkan hasil pengujian tidak konsisten dan berpotensi menimbulkan *pole discrepancy*. Berdasarkan hasil ini, disimpulkan perlunya alat bantu pengujian dengan sistem konektor tetap dan aman seperti *FASTER*, yang dapat memastikan pengujian dilakukan secara cepat, presisi, dan terstandarisasi [5].

Tabel 2. 2 Penelitian yang Relevan

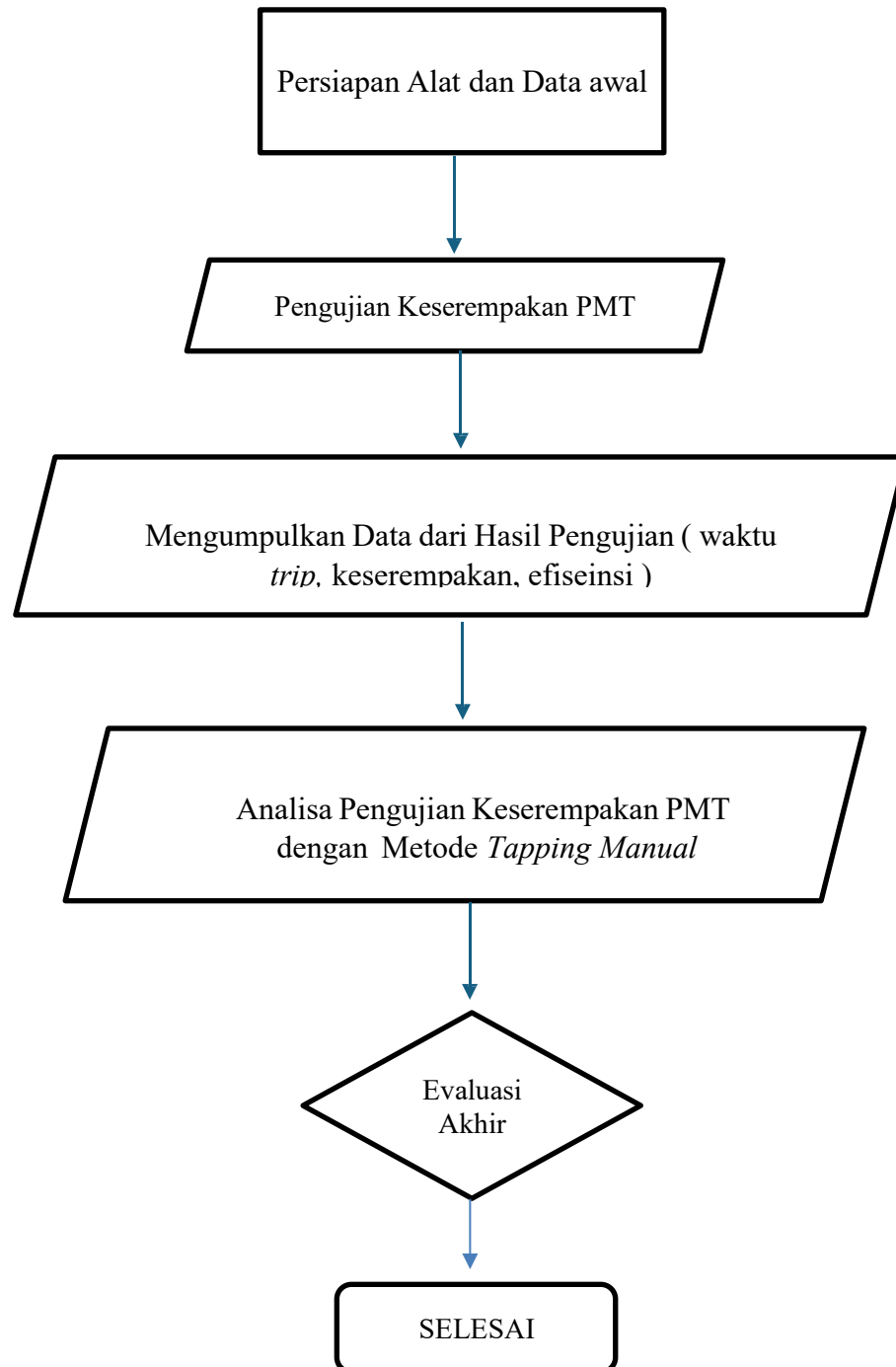
No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
1	<i>“Overcurrent Relay (OCR) berbasis GOOSE Message sebagai Pengaman Busbar 70 kV”</i> (Koerniawan, T. et al., 2024)	Sistem proteksi busbar pada jaringan 70 kV masih menggunakan sistem analog yang memiliki waktu respon lambat dan tidak efisien.	Menggunakan metode eksperimen simulasi berbasis komunikasi digital <i>IEC 61850 GOOSE</i> Message untuk menguji waktu respon sistem proteksi terhadap gangguan arus lebih.	Hasil menunjukkan peningkatan kecepatan respon relay hingga 30% lebih cepat dibandingkan sistem konvensional serta peningkatan keandalan koordinasi antar relay.	Penelitian fokus pada efisiensi proteksi sistem, belum membahas efisiensi pengujian keserempakan PMT di lapangan. Penelitian ini menjadi dasar logika kecepatan sistem bagi inovasi <i>FASTER</i>.

2	“Pemadaman Jaringan Distribusi 20 kV Gardu Induk Simpang Haru Penyulang Polamas” (Pasra, N., 2015)	Gangguan sistem distribusi 20 kV disebabkan oleh keterlambatan kerja PMT dan ketidakseimbangan waktu antar fasa yang memicu pole discrepancy.	Analisis kuantitatif terhadap data gangguan jaringan dan hasil pengujian PMT di lapangan menggunakan pendekatan observasi.	Ditemukan bahwa selisih waktu antar fasa $>3\ ms$ dapat memicu gangguan lanjut dan menurunkan keandalan jaringan.	Penelitian hanya membahas dampak pole discrepancy terhadap gangguan sistem, belum memberikan solusi teknis untuk pengujian keserempakan . <i>FASTER</i> hadir sebagai solusi langsung atas masalah tersebut.
---	---	--	---	--	---

3	“Perancangan dan Implementasi Komunikasi RS-485 Menggunakan Protokol Modbus RTU dan Modbus TCP pada Sistem <i>Pick-by-Light</i>” (Mulyana & Toasin, 2021)	Koneksi antar perangkat industri masih manual dan rawan kesalahan transmisi data.	Pendekatan perancangan sistem komunikasi modular berbasis RS- 485 dan Modbus RTU/TCP, dengan metode eksperimen perangkat keras (<i>hardware testing</i>).	Sistem komunikasi modular terbukti mengurangi kesalahan transmisi hingga 95% dan meningkatkan kecepatan komunikasi antar perangkat.	Penelitian ini menjadi dasar rancangan interface modular dan sistem <i>plug- and-play</i> yang diadopsi oleh <i>FASTER</i>, meski belum diterapkan pada sistem pengujian PMT.
4	“Pengembangan Rancang Bangun Pendeteksi Gejala Korona (<i>Corona Discharge</i>)” (Pusat Kajian Tegangan	Kesulitan mendeteksi dini gangguan isolasi pada peralatan tegangan tinggi sebelum terjadi kerusakan. Tinggi ITPLN, 2022)	Metode rancang bangun perangkat keras (<i>hardware design</i>) berbasis sensor medan listrik dan	Alat pendeteksi korona berhasil mengidentifikasi anomali isolasi secara dini, mendukung pemeliharaan sistem monitoring visual. prediktif di gardu induk.	Penelitian ini berfokus pada deteksi gangguan isolasi, sedangkan <i>FASTER</i> berfokus pada standarisasi koneksi pengujian PMT, namun keduanya memiliki kesamaan pada aspek inovasi alat berbasis kebutuhan lapangan.

5	“Analisis Waktu Operasi dan Keserempakan Pemutus Tenaga 150 kV di Gardu Induk Lengkong Menggunakan Omicron CIBANO 500” (Surahman & Widodo, 2023)	Proses pengujian keserempakan PMT masih dilakukan secara manual menggunakan metode <i>tapping</i>, yang berisiko salah koneksi dan membutuhkan banyak teknisi.	Metode eksperimen lapangan dengan alat Omicron CIBANO 500 untuk mengukur waktu kerja <i>trip</i> dan <i>close</i> antar fasa.	Hasil menunjukkan perbedaan waktu antar fasa melebihi 3 ms akibat kesalahan koneksi terminal manual.	Penelitian ini membuktikan perlunya alat bantu koneksi terstandar untuk pengujian PMT — menjadi dasar pengembangan alat <i>FASTER</i> (Fasilitas Adapter) yang mampu mempercepat dan mengefisienkan proses pengujian.
---	---	---	--	---	--

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2. 9 Kerangka Pemikiran

Sesuai kerangka pemikiran penulis, sebelum pengujian keserempakan Pemutus Tenaga (PMT), diperlukan tahap persiapan alat dan data awal terlebih dahulu. Pada tahap ini, seluruh alat uji yang diperlukan seperti *Circuit Breaker Analyzer* (misalnya Omicron CIBANO 500 atau Megger EGIL), kabel pengujian, serta dokumen pendukung seperti *wiring* diagram PMT dan data *nameplate* peralatan disiapkan. Selain itu, teknisi memastikan kondisi PMT dalam keadaan aman untuk diuji (*offline*) melalui prosedur *lock out tag out* dan pemasangan pentanahan lokal. Proses ini harus mengikuti *Standar Operasional Prosedur* (SOP) dan standar keselamatan PT PLN (Persero) agar pengujian berjalan aman dan hasilnya akurat.

Tahap berikutnya adalah melakukan pengujian keserempakan PMT menggunakan metode *tapping manual*. Dalam metode ini, teknisi secara langsung menyambungkan kabel uji ke terminal *open* dan *close* pada PMT. Setiap kabel dihubungkan ke alat uji dengan cara menempelkan kabel injeksi ke titik *negatif* murni, *negatif* koil, dan *positif* sumber. Selama pengujian, teknisi harus memegang kabel secara *manual* agar sinyal injeksi tetap stabil saat pengoperasian *open* dan *close* PMT. Metode ini memerlukan kerja sama antara beberapa teknisi, yaitu dua di panel PMT untuk menahan kabel dan satu di depan laptop untuk mengendalikan alat uji. Proses ini sangat bergantung pada ketelitian, karena kesalahan kecil dalam penyambungan bisa menyebabkan kegagalan pengujian atau bahkan kerusakan pada koil PMT.

Setelah pengujian selesai dilakukan, tahap selanjutnya adalah pengumpulan data hasil pengujian. Data yang diperoleh meliputi waktu *trip*, waktu *close*, serta selisih waktu keserempakan antar fasa (R, S, dan T). Data hasil pengujian ini kemudian dicatat dan dianalisis untuk menilai apakah PMT bekerja serempak sesuai dengan batas toleransi waktu yang ditetapkan oleh *IEC 62271-100* dan *SPLN 52-1*. Jika hasil pengujian menunjukkan perbedaan waktu antar fasa melebihi 2–3 milidetik, maka PMT dinyatakan tidak serempak (*un-synchronized*) dan perlu dilakukan penyetelan ulang pada sistem mekanik penggerakannya.

Tahapan terakhir adalah analisis hasil pengujian dan evaluasi keselamatan kerja. Analisis dilakukan untuk membandingkan waktu operasi antar fasa serta menilai kemungkinan penyebab terjadinya ketidakseimbangan, seperti kelonggaran mekanik, gaya pegas yang tidak seimbang, atau kesalahan koneksi selama proses *tapping*. Selain itu, dilakukan evaluasi terhadap risiko keselamatan kerja karena metode *manual* ini membuat teknisi berada dalam posisi dekat dengan terminal bertegangan, sehingga potensi bahaya arus bocor, percikan listrik, atau kesalahan sambungan sangat tinggi. Berdasarkan keseluruhan proses tersebut, dapat disimpulkan bahwa metode pengujian keserempakan secara *manual* memiliki kelemahan utama pada aspek keselamatan kerja, efisiensi waktu, dan potensi kesalahan koneksi terminal, yang kemudian menjadi dasar pemikiran munculnya kebutuhan akan alat bantu pengujian yang lebih aman, cepat, dan terstandarisasi di masa mendatang.