

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Penelitian mengenai evaluasi dan kelayakan Pemutus Tenaga (PMT) telah banyak dilakukan sebagai upaya menjaga keandalan sistem tenaga listrik di gardu induk. Parameter yang umum digunakan dalam menilai kondisi PMT meliputi pengujian tahanan kontak, tahanan isolasi, keserempakan kontak, sistem pentanahan, serta aspek mekanik dan kelistrikan lainnya.

Penelitian yang dilakukan oleh Novi Gusti Pahiyanti, Sigit Sukmajati, Abdul Malik berjudul "*Nilai Tahanan Kontak Pada Pms Bay Cengkareng Terhadap Rugi Daya Di Gardu Induk Duri Kosambi*" mengkaji secara mendalam pengaruh nilai resistansi kontak terhadap efisiensi operasional peralatan pemisah (PMS) di gardu induk. Studi tersebut menekankan bahwa kegiatan pemeliharaan pada pemisah tidak hanya mencakup aspek pembersihan mekanis, tetapi juga harus diiringi dengan serangkaian pengujian elektris, khususnya pengujian tahanan kontak. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk memverifikasi apakah nilai resistansi kontak pada pemisah masih berada dalam batas toleransi yang ditetapkan oleh standar yang berlaku.

Lebih lanjut, hasil penelitian tersebut mengungkapkan adanya korelasi langsung antara besarnya nilai tahanan kontak dengan rugi daya yang ditimbulkan. Pahiyanti et al. (2021) menyimpulkan bahwa setiap peningkatan nilai resistansi pada titik kontak akan berbanding lurus dengan bertambahnya rugi daya (*losses*) yang terdisipasi menjadi panas. Fenomena ini tidak hanya berpotensi menurunkan efisiensi sistem secara keseluruhan, tetapi juga dapat memicu kerusakan lebih lanjut pada komponen akibat pemanasan berlebih (*overheating*) jika dibiarkan dalam jangka panjang.

Penelitian oleh Ma'ruf Fauzi (2018) mengevaluasi PMT 150 kV di GI Angke Bay Ketapang 1 dengan mempertimbangkan arus hubung singkat, keserempakan kontak, tahanan isolasi, dan tahanan kontak. Hasil menunjukkan kapasitas PMT masih mencukupi terhadap arus gangguan dan keserempakan kontak memenuhi standar, namun nilai tahanan kontak melebihi batas yang ditetapkan sehingga diperlukan evaluasi lanjutan berupa pembersihan atau penggantian PMT.

Selanjutnya, Raihan Errahman (2020) mengkaji pengaruh gangguan tahanan kontak dan tahanan pentanahan terhadap kinerja PMT 150 kV di GI Jatirangon. Ditemukan bahwa nilai tahanan kontak dan pentanahan sempat melebihi standar akibat gangguan mekanik dan kondisi tanah. Setelah dilakukan perbaikan dan pemeliharaan, seluruh parameter kembali memenuhi standar dan PMT dinyatakan aman dioperasikan.

Penelitian oleh Nurul Arfa Tasya (2019) mengevaluasi kinerja PMT 150 kV di GI Tembilahan Bay Rengat 2 berdasarkan pengujian tahanan isolasi, tahanan kontak, dan keserempakan kontak. Hasil menunjukkan tahanan isolasi dan keserempakan kontak berada dalam batas standar, namun tahanan kontak relatif tinggi sehingga direkomendasikan dilakukan pemeliharaan preventif meskipun PMT masih dinilai andal.

Berbeda dari penelitian lainnya, Raja Ali Farhan Yuda (2019) mengevaluasi PMT 20 kV di GI Air Raja Tanjungpinang dengan menambahkan parameter tegangan minimum coil. Hasil penelitian menunjukkan bahwa secara umum PMT masih dalam kondisi baik, meskipun ditemukan kenaikan nilai tahanan kontak pada salah satu fasa akibat sambungan mekanis yang kurang baik. Perbaikan yang disarankan berupa perawatan rutin tanpa perlu penggantian peralatan.

Kajian terhadap literatur menunjukkan adanya kesamaan metodologi dalam mengevaluasi PMT, yaitu dengan berfokus pada pengukuran tahanan kontak, tahanan isolasi, dan keserempakan kontak. Fakta bahwa hasil evaluasi seringkali berbeda antar objek penelitian membuktikan bahwa kondisi kesehatan PMT sangat kontekstual, tergantung pada lama pemakaian, tingkat keausan mekanis, dan riwayat perawatannya. Konsekuensinya,

pengujian rutin mutlak diperlukan sebagai basis data yang akurat untuk memutuskan langkah perbaikan atau justru merekomendasikan penggantian PMT sebelum berdampak pada keandalan sistem.

2.2 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu kesatuan yang terdiri dari beberapa komponen utama yang saling terhubung dan bekerja sama untuk menghasilkan, mengalirkan, serta mendistribusikan energi listrik kepada pengguna. Secara umum, sistem tenaga listrik terbagi menjadi tiga komponen utama, yaitu pembangkit (*generator*), transmisi (*transmission*), dan distribusi (*distribution*). Ketiga komponen tersebut saling bekerja sama untuk mengantarkan energi listrik dari sumber pembangkit ke konsumen dengan tingkat keandalan dan efisiensi yang optimal.

Menurut Stevenson dan Grainger (1994), sistem tenaga listrik modern dirancang dengan tujuan utama untuk menyediakan energi listrik yang andal, ekonomis, dan berkualitas kepada pelanggan. Ketiga unsur tersebut hanya dapat dicapai apabila seluruh komponen sistem tenaga bekerja dengan baik dan terkoordinasi.

2.2.1 Gardu Induk (*Substation*)

Dalam hierarki sistem tenaga listrik, Gardu Induk (GI) menempati posisi yang sangat krusial sebagai simpul penghubung antara jaringan transmisi dan distribusi. Secara teknis, gardu induk dapat didefinisikan sebagai suatu kompleks peralatan yang terdiri dari saluran transmisi dan distribusi, perlengkapan hubung (*switchgear*), transformator daya, peralatan pengaman (proteksi), serta perangkat kontrol dan monitoring. Keberadaan gardu induk menjadi fondasi utama dalam proses penyaluran energi listrik, karena berfungsi sebagai pusat kendali yang menerima suplai daya dari pembangkit, kemudian menyalurkannya ke pusat-pusat beban (konsumen) melalui jaringan tegangan menengah. Dengan demikian, keandalan

operasional gardu induk secara langsung akan menentukan kontinuitas dan kualitas pasokan listrik yang diterima oleh konsumen akhir.

Gardu induk memiliki spektrum fungsi yang luas, tidak hanya terbatas pada aspek kelistrikan murni, tetapi juga mencakup aspek pengendalian dan proteksi sistem. Fungsi utamanya adalah mentransformasikan tegangan listrik secara bertahap, baik dari tegangan ekstra tinggi ke tegangan tinggi, dari tegangan tinggi ke tegangan menengah, atau sebaliknya, guna menyesuaikan dengan kebutuhan saluran transmisi maupun standar distribusi ke pelanggan. Di luar fungsi transformasi tersebut, gardu induk juga dilengkapi dengan peralatan pengukuran dan pengawasan yang memungkinkan operator untuk memantau kinerja sistem secara *real-time*, mendeteksi potensi gangguan, serta melakukan tindakan pengamanan secara cepat dan tepat. Lebih lanjut, gardu induk berperan sebagai titik pengaturan beban, di mana aliran daya dapat dikendalikan dan dialihkan ke gardu induk lain melalui jaringan tegangan tinggi atau langsung didistribusikan ke gardu distribusi. Peran multifungsi ini menjadikan gardu induk sebagai komponen vital yang menjamin stabilitas, keandalan, dan efisiensi operasional sistem tenaga listrik secara keseluruhan. (Ma'aruf Fauzi, 2018).

Berdasarkan segi pemasangan peralatan gardu induk dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis :

1. Gardu Induk tipe pemasangan luar (*outdoor substation*) didefinisikan sebagai suatu instalasi di mana sebagian besar peralatan tegangan tinggi, seperti transformator daya utama dan perlengkapan pensaklaran (*switchgear*), ditempatkan di area terbuka. Meskipun demikian, untuk menjamin keandalan operasi dan perlindungan dari kondisi lingkungan, komponen pendukung seperti panel kontrol (*switchboard*) dan sistem baterai biasanya ditempatkan di dalam ruangan. Dari segi teknis dan ekonomis, konfigurasi ini menawarkan beberapa keunggulan, antara lain biaya konstruksi yang relatif lebih rendah serta sistem

pendinginan alami yang lebih sederhana dan efisien karena memanfaatkan sirkulasi udara bebas di lingkungan sekitar.

Di sisi lain, tipe gardu induk ini memiliki konsekuensi utama berupa kebutuhan lahan yang cukup luas. Keterbatasan tersebut secara langsung mempengaruhi strategi penempatannya, di mana gardu induk pasangan luar umumnya dibangun di wilayah pinggiran kota atau area dengan ketersediaan lahan yang memadai dan nilai tanah yang lebih ekonomis. Dengan demikian, pemilihan tipe gardu induk ini selalu mempertimbangkan keseimbangan antara aspek efisiensi biaya konstruksi, kemudahan operasi, serta ketersediaan dan harga lahan di lokasi yang direncanakan.



Gambar 2. 1 Gardu Induk Pasangan Luar

(Sumber : PT. PLN Persero)

2. Gardu Induk tipe pasangan dalam (*indoor substation*) mengkonsentrasikan seluruh peralatan tegangan tinggi utamanya seperti transformator daya, peralatan *switching* (*switchgear*), serta komponen proteksi dan kontrol di dalam sebuah bangunan atau ruangan tertutup. Meskipun mayoritas peralatan diletakkan di dalam ruangan, terdapat beberapa komponen penunjang, seperti terminal kabel atau peralatan bantu tertentu, yang tetap memungkinkan untuk dipasang di area luar bangunan. Desain ini dipilih secara khusus untuk mengatasi keterbatasan lahan, mengingat gardu induk tipe ini tidak memerlukan area yang seluas tipe pasangan luar.

Keunggulan utama dari konfigurasi pasangan dalam adalah kemampuannya untuk diintegrasikan ke lingkungan padat penduduk, seperti di pusat-pusat kota, di mana ketersediaan lahan sangat terbatas dan nilai tanah sangat tinggi. Lebih dari sekadar efisiensi lahan, penerapan gardu tipe dalam juga mempertimbangkan aspek keselarasan dengan lingkungan sekitar, estetika, serta mitigasi risiko. Dengan menempatkan peralatan di dalam bangunan, potensi bahaya kebakaran dapat ditekan dan dampaknya dapat dilokalisasi, sementara gangguan suara (kebisingan) yang ditimbulkan oleh operasi peralatan juga dapat diminimalisir, sehingga tidak mengganggu kenyamanan masyarakat di sekitarnya.



Gambar 2. 2 Gardu Induk Pasangan Dalam

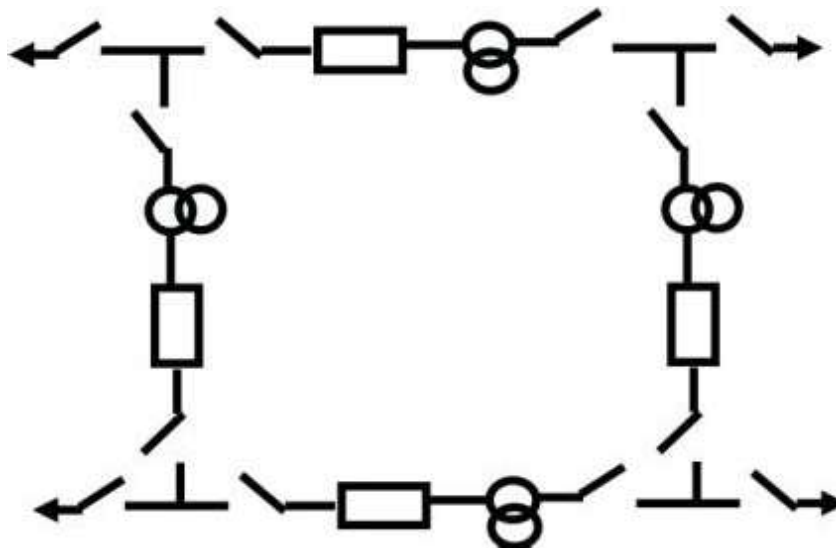
(Sumber : PT. PLN Persero)

3. Gardu induk tipe setengah pasang (*semi-outdoor*) didefinisikan sebagai gardu dengan konfigurasi campuran, yaitu sebagian peralatan tegangan tingginya dipasang di dalam gedung dan sebagian lainnya dipasang di luar ruangan.
4. Gardu induk tipe pemasangan bawah tanah (*underground substation*) merupakan solusi infrastruktur kelistrikan yang dirancang dengan mengintegrasikan sebagian besar atau hampir seluruh peralatan utamanya di dalam bangunan bawah tanah. Meskipun demikian, untuk mengoptimalkan fungsi dan kemudahan operasi, beberapa komponen pendukung seperti sistem pendingin (*cooling system*) serta ruang kontrol biasanya tetap ditempatkan di atas permukaan tanah. Konfigurasi ini dipilih secara khusus untuk menjawab tantangan keterbatasan lahan sekaligus mempertahankan estetika lingkungan.

Penerapan gardu induk tipe bawah tanah umumnya ditemukan di kawasan pusat kota yang sangat padat dan ramai (urban area dengan kepadatan tinggi), di mana lahan permukaan sangat terbatas dan bernilai ekonomi tinggi. Dengan menempatkan peralatan di bawah tanah, gangguan visual dapat diminimalisir, kebisingan operasional dapat diredam, serta ruang permukaan tetap dapat dimanfaatkan untuk fungsi lain seperti area hijau, jalan, atau fasilitas umum.

Berdasarkan *busbar* Gardu Induk dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis antara lain :

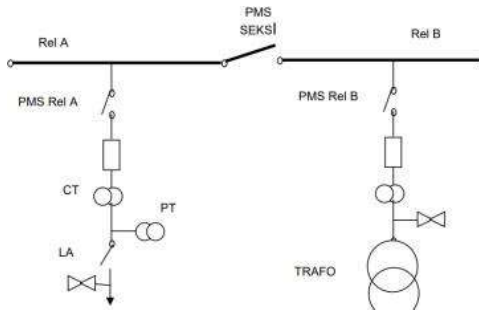
1. Gardu Induk dengan sistem *ring busbar* adalah gardu induk dimana semua busbar atau rel saling terhubung satu sama lain sehingga membentuk seperti ring atau cincin yang diperlihatkan pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Sistem Ring Busbar
(Sumber: Buku Teknik Transmisi Tenaga Listrik)

2. Sistem *single busbar* pada gardu induk didefinisikan sebagai suatu konfigurasi sederhana yang hanya menggunakan satu buah *busbar* sebagai rel utama. Gardu induk dengan tipe

ini umumnya dibangun dan dioperasikan pada lokasi yang berada di ujung saluran transmisi. Representasi skematis dari konfigurasi ini dapat dilihat pada Gambar 2.4.

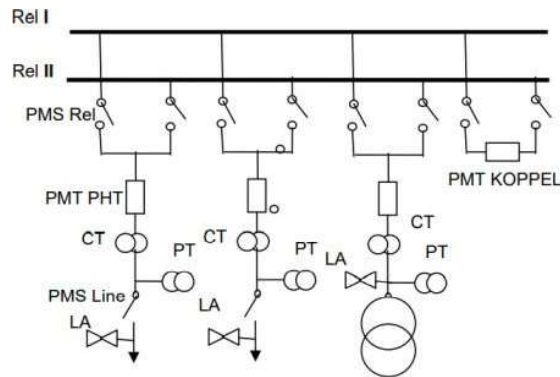


Gambar 2. 4 Sistem Single Busbar

(Sumber: Buku Teknik Transmisi Tenaga Listrik)

3. Gardu induk tipe double busbar merupakan konfigurasi gardu yang dilengkapi dengan dua buah rel (busbar) utama, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.5. Sistem ini menjadi pilihan yang paling umum diterapkan pada sebagian besar gardu induk karena menawarkan fleksibilitas operasional yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi busbar tunggal.

Keunggulan utama dari sistem double busbar terletak pada kemampuannya untuk meningkatkan kontinuitas pelayanan. Ketika terjadi perubahan konfigurasi sistem atau manuver operasional (switching), risiko pemadaman dapat diminimalisir secara signifikan. Hal ini dimungkinkan karena beban yang terganggu masih dapat disuplai melalui busbar lainnya, sehingga keandalan sistem penyaluran tenaga listrik secara keseluruhan dapat lebih terjaga.

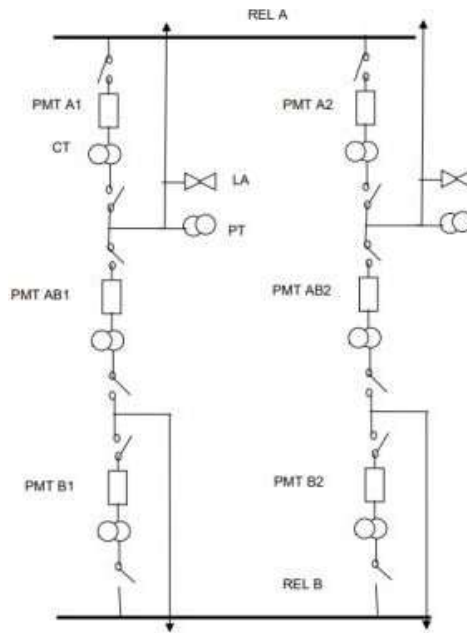


Gambar 2. 5 Double Busbar

(Sumber: Buku Teknik Transmisi Tenaga Listrik)

4. Gardu induk tipe *one half busbar* (atau sering disebut juga sebagai konfigurasi *breaker-and-a-half*) pada dasarnya menggunakan dua buah busbar utama seperti halnya sistem double busbar. Namun, perbedaan mendasar terletak pada konfigurasi rangkaiannya, di mana pada setiap sirkit penghantar dipasang tiga unit Pemutus Tenaga (PMT) yang terhubung secara seri, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.6. Konfigurasi khusus ini menjadikannya pilihan utama pada gardu induk berskala sangat besar, termasuk pada gardu induk pembangkitan.

Keunggulan utama dari sistem *one half busbar* adalah fleksibilitas dan keandalannya yang sangat tinggi. Dengan adanya tiga PMT dalam satu diagonal, setiap kali dilakukan perubahan sistem atau manuver operasional (*switching*), risiko pemadaman beban dapat ditekan hingga seminimal mungkin. Bahkan jika salah satu busbar mengalami gangguan atau harus dipadamkan untuk pemeliharaan, suplai daya melalui diagonal tersebut tetap dapat dipertahankan melalui *busbar* lainnya. Efektivitas inilah yang membuat sistem *one half busbar* menjadi konfigurasi andalan untuk menjamin kontinuitas pasokan pada sistem tenaga listrik berskala besar dan kritis.



Gambar 2. 6 Sistem *One Half Busbar*

(Sumber: Buku Teknik Transmisi Tenaga Listrik)

2.2.2 Pemutus Tenaga

2.2.2.1 Pengertian

Pemutus tenaga (*circuit breaker*) merupakan peralatan switching yang memiliki peran vital dalam sistem tenaga listrik. Perangkat ini berfungsi untuk memutuskan dan menghubungkan aliran arus listrik, baik dalam kondisi operasi normal maupun ketika terjadi gangguan pada sistem. Dalam kondisi normal, pemutus tenaga digunakan untuk mengendalikan aliran daya dengan melakukan pensaklaran (*switching*) sesuai kebutuhan operasional. Namun, fungsi terpentingnya justru tampak saat terjadi gangguan, di mana perangkat ini dituntut untuk bekerja secara cepat dan tepat guna mengisolasi bagian sistem yang terganggu, sehingga mencegah meluasnya dampak gangguan ke bagian jaringan lainnya.

Mengacu pada standar internasional IEC 62271-100 (2017), pemutus tenaga didefinisikan secara lebih spesifik sebagai suatu sakelar mekanis yang memiliki

kemampuan ganda. Pertama, perangkat ini mampu mengoperasikan pembukaan dan penutupan rangkaian listrik pada kondisi beban normal sesuai dengan perintah yang diberikan. Kedua, dan yang lebih krusial, pemutus tenaga dirancang khusus untuk memiliki kemampuan memutus arus hubung singkat (*short circuit current*) dalam waktu yang sangat singkat, umumnya dalam hitungan milidetik. Kemampuan memutus arus gangguan ini harus dilakukan tanpa menimbulkan kerusakan berarti pada sistem kelistrikan maupun pada perangkat itu sendiri, sehingga kontinuitas dan keandalan sistem secara keseluruhan tetap dapat dipertahankan.

2.2.2.2 Fungsi Pemutus Tenaga

Fungsi pemutus tenaga antara lain :

- a. Fungsi pemutus tenaga adalah secara otomatis dan cepat (dalam hitungan siklus, <100ms) memutus arus gangguan yang sangat besar, seperti arus hubung singkat (*short circuit*) ataupun beban lebih (*overload*) pada jaringan.
- b. Fungsi PMT berikutnya adalah melindungi peralatan seperti transformator daya, saluran transmisi ataupun sistem di Gardu Induk tersebut dari arus gangguan yang meluas, dengan memisahkan bagian yang aman dan bagian yang terganggu
- c. PMT juga dilengkapi dengan fitur *reclosing* otomatis (*auto reclose*) fitur ini berfungsi ketika suatu penghantar *trip* karena mengalami gangguan tidak permanen seperti tersambar petir pemutus tenaga akan menutup kembali secara otomatis setelah jeda waktu. Sehingga sistem kelistrikan beroperasi secara normal kembali.

2.2.2.3 Klasifikasi Pemutus Tenaga

Terdapat beberapa pendekatan dalam mengklasifikasikan Pemutus Tenaga (PMT), di antaranya adalah berdasarkan rating tegangan kerjanya, konfigurasi mekanisme penggerakannya, serta jenis media isolasi yang berfungsi sebagai pemadam busur api.

1. Berdasarkan Media Pemadam Busur Api :

- a. *Oil Circuit Breaker* (OCB) adalah pemutus daya yang menggunakan minyak sebagai media untuk memadamkan busur listrik.



Gambar 2. 7 PMT Jenis Minyak

(Sumber: Buku Pedoman Pemeliharaan Pemutus Tenaga)

- b. *Air Blast Circuit Breaker* (ABCB) adalah pemutus daya yang menggunakan udara bertekanan tinggi untuk memadamkan busur listrik.
- c. *Vacuum Circuit Breaker* (VCB) adalah pemutus daya yang menggunakan ruang hampa udara untuk memadamkan busur listrik. *Gas Circuit Breaker* (GCB) adalah pemutus sirkuit yang memanfaatkan gas sulfur *heksafluorida* (SF_6) sebagai media isolasi sekaligus untuk memadamkan busur listrik.

2. Berdasarkan Besar/Kelas Tegangan :

- a. PMT Tegangan Rendah (*Low Voltage*)

Pemutus tenaga tegangan rendah merupakan perangkat proteksi yang dioperasikan pada sistem tenaga listrik dengan rentang tegangan 0,1 kV hingga 1 kV. Perangkat ini umumnya diaplikasikan pada instalasi listrik skala kecil hingga menengah, seperti pada

sektor rumah tangga, bangunan komersial, serta industri kecil. Fungsi utamanya adalah untuk melindungi peralatan listrik dan kabel dari berbagai gangguan elektrik, termasuk lonjakan arus (*surge*) dan hubung singkat (*short circuit*), sehingga keandalan dan keselamatan sistem dapat terjaga.

b. PMT Tegangan Menengah (*Medium Voltage*)

Pemutus tenaga tegangan menengah merupakan perangkat proteksi yang dioperasikan pada sistem tenaga listrik dengan rentang tegangan antara 1 kV hingga 35 kV. Perangkat ini banyak diaplikasikan pada jaringan distribusi sekunder, khususnya pada penyulang (*feeder*) yang melayani kawasan perkotaan maupun kawasan industri. Fungsi utamanya adalah untuk memutus aliran listrik pada tingkat tegangan yang lebih tinggi serta melindungi jaringan dari berbagai gangguan elektrik, seperti hubung singkat, kelebihan arus (*overcurrent*), dan lonjakan tegangan (*voltage surge*).

c. PMT Tegangan Tinggi (*High Voltage*)

Pemutus tenaga tegangan tinggi merupakan perangkat proteksi yang dioperasikan pada sistem tenaga listrik dengan rentang tegangan antara 35 kV hingga 245 kV. Perangkat ini diaplikasikan secara luas pada jaringan transmisi listrik, khususnya sebagai penghubung antara gardu induk dengan gardu distribusi maupun konsumen industri berskala besar. Kemampuan teknis PMT tegangan tinggi mencakup pemutusan aliran listrik pada level tegangan ekstrem, serta dilengkapi dengan fitur perlindungan canggih yang dirancang untuk mengamankan sistem dari gangguan serius, seperti hubung singkat, kondisi kelebihan arus (*overcurrent*), dan gangguan busur api (*arc flash*).

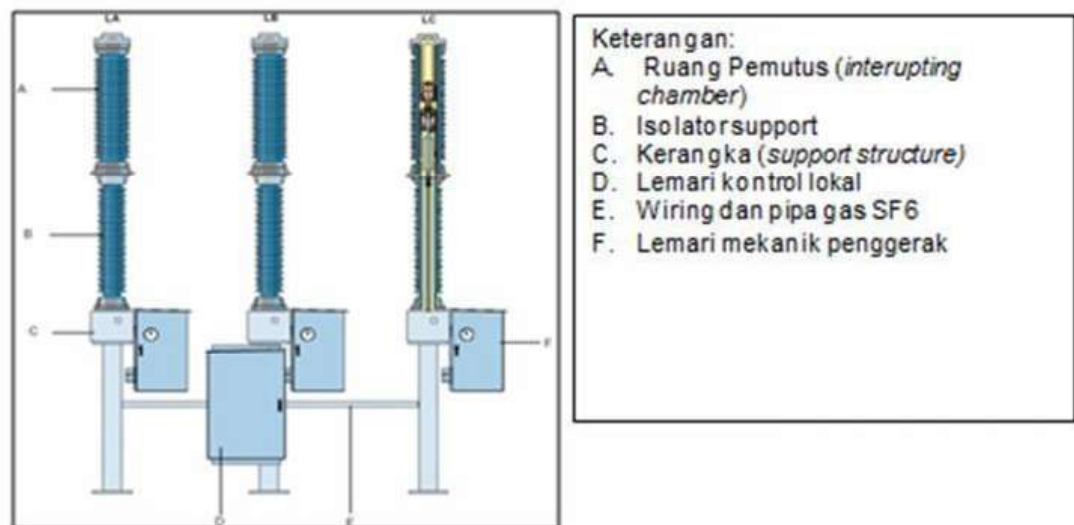
d. PMT Tegangan Ekstra Tinggi (*Extra High Voltage*)

Pemutus tenaga tegangan ekstra tinggi merupakan perangkat proteksi yang dioperasikan pada sistem tenaga listrik dengan lebih besar dari 245 kV.

3. Berdasarkan Jumlah Penggerak Mekanis :

a. PMT *Single Pole*

Sistem ini menggunakan Pemutus Tenaga (PMT) dengan arsitektur penggerak mekanik terpisah per fasa (*per-pole mechanism*). Desain konfigurasi ini diadopsi khususnya pada penghantar listrik (*feeder bay*) untuk mengakomodasi kebutuhan sistem proteksi yang adaptif, yaitu skema *auto-reclose* satu fasa. Dengan demikian, ketika terjadi gangguan temporer yang hanya melibatkan satu fasa, PMT dapat membuka dan menutup kembali hanya pada fasa tersebut, meminimalisir dampak gangguan pada sistem dan mempertahankan stabilitas penyaluran daya.



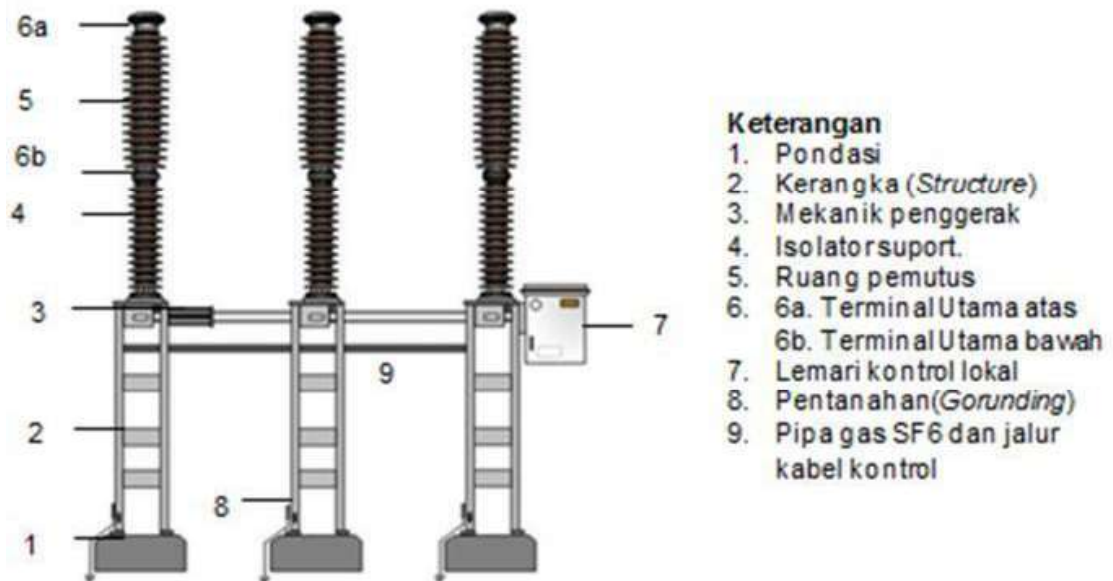
Gambar 2. 8 PMT Single Pole

(Sumber: Buku Pedoman Pemeliharaan Pemutus Tenaga)

b. PMT *Three Pole*

Dari segi desain mekanis, PMT ini dirancang dengan satu unit penggerak (*single driving mechanism*) yang secara bersamaan menggerakkan ketiga kontak fasa. Integrasi gerak ini dimungkinkan oleh adanya kopel mekanik yang menghubungkan mekanisme penggerak dengan setiap fasa. Konfigurasi *three-phase operated* ini umum diimplementasikan pada peralatan utama seperti bay trafo dan bay kopel, serta pada

tingkat tegangan menengah 20 kV untuk keperluan distribusi, di mana skema pemutusan tiga fasa serempak sudah memadai untuk kondisi gangguan yang ada.



Gambar 2. 9 PMT Three Pole

(Sumber: Buku Pedoman Pemeliharaan Pemutus Tenaga)

4. Berdasarkan Mekanik Penggerak (*Driving Mechanism*)

Secara fungsional, perangkat ini berperan sebagai media penyimpan energi temporer. Energi yang tersimpan tersebut kemudian ditransformasikan menjadi energi gerak untuk mengoperasikan kontak bergerak PMT sesuai dengan kebutuhan sistem.

Macam-macam Mekanik Penggerak PMT antara lain :

a. Penggerak Pegas (*Spring Drive*)

PMT tipe ini menggunakan pegas untuk menggerakkan kontak utamanya. Ada beberapa jenis pegas yang digunakan pada PMT jenis ini, ada pegas pilin, pegas gulung

b. Penggerak Hidrolik

Secara konstruksi, penggerak hidrolik PMT dibangun dari rakitan komponen hidrolik-mekanis, perangkat elektrik, dan media oli yang dirancang sebagai satu kesatuan fungsional. Rakitan ini bekerja secara kolektif untuk mengonversi energi hidrolik menjadi energi mekanik yang menggerakkan kontak PMT saat proses memutus dan menyambung rangkaian.

c. Penggerak Pneumatik

Pemutus Tenaga dengan aktuasi pneumatik dilengkapi dengan sistem penggerak yang memanfaatkan fluida kerja berupa udara bertekanan tinggi. Sistem ini merupakan hasil integrasi antara perangkat mekanik dan elektrik yang dikonfigurasi secara presisi, sehingga mampu menghasilkan gaya aktuasi yang diperlukan untuk mengoperasikan kontak bergerak (*moving contact*) PMT baik pada kondisi membuka maupun menutup.

2.2.3 Prinsip Kerja Pemutus Tenaga

Dalam kondisi operasi normal, Pemutus Tenaga (PMT) dapat dioperasikan secara lokal oleh petugas untuk keperluan *switching* dan pemeliharaan. Namun, mekanisme kerja utama PMT adalah merespon kondisi abnormal. Sebagai contoh, apabila *Current Transformer* (CT) mendeteksi arus gangguan yang melebihi batas setting yang ditentukan, relay proteksi akan aktif dan menutup rangkaian trip (*trip circuit*). Akibatnya, *trip coil* mendapat suplai energi dan memberikan instruksi kepada mekanisme penggerak PMT. Instruksi ini kemudian direalisasikan dalam bentuk gerakan mekanis untuk membuka kontak-kontak PMT, sehingga gangguan pada sistem dapat diisolasi dan dihilangkan.

Pada Gardu Induk 150 kV Lumajang, mekanisme penggerak yang diimplementasikan adalah tipe pegas (*spring mechanism*). Mekanisme ini berfungsi sebagai aktuator dengan memanfaatkan energi yang tersimpan pada pegas yang ditegangkan, baik untuk proses pembukaan maupun penutupan.

Proses pemutusan dan penyambungan rangkaian listrik oleh PMT selalu diiringi dengan timbulnya busur api (*arc*) di antara kontak-kontak pada ruang pemutus. Busur api ini merupakan fenomena yang harus dipadamkan untuk mencegah kerusakan kontak dan memastikan proses pemutusan arus berhasil. Untuk tujuan pemadaman busur api tersebut, berbagai media peredam dapat digunakan, antara lain minyak, udara, atau gas. Dalam sistem yang dianalisis, material peredam yang digunakan adalah gas SF₆ (*Sulfur Hexafluoride*), yang dikenal memiliki sifat dielektrik tinggi dan kemampuan memadamkan busur api yang sangat baik.

2.2.4 Menentukan Parameter Kelayakan Pemutus Tenaga

Dalam kegiatan pemeliharaan dan pengujian, pemutus tenaga perlu diuji secara berkala agar dapat dipastikan kondisi dan kelayakan operasinya. Parameter utama yang digunakan dalam pengujian tersebut antara lain :

1. Tahanan Kontak

Rangkaian listrik pada dasarnya tersusun atas sejumlah besar sambungan. Setiap sambungan merupakan pertemuan fisik antara dua atau lebih permukaan konduktor untuk memungkinkan aliran energi listrik dengan hambatan minimal. Namun, pada pemutus tenaga titik sambungan berada di dalam *chamber* utama. Nilai sambungan pada *chamber* utama diketahui dengan cara dilakukan pengujian tahanan kontak. Nilai resistansi yang tinggi menyebabkan perubahan daya dalam bentuk panas.

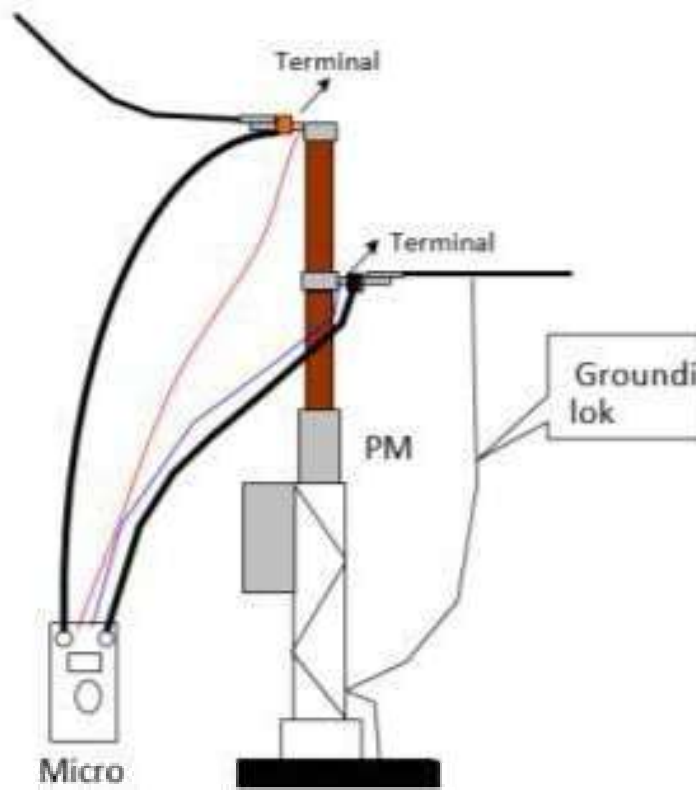
Sambungan antara konduktor dengan PMT atau peralatan lain merupakan tahanan kontak yang syarat tahananannya memenuhi kaidah Hukum Ohm sebagai berikut :

$$E = I \cdot R \quad (2.1)$$

Jika didapat kondisi tahanan kontak sebesar 1 Ohm dan arus yang mengalir adalah 100 Amp maka ruginya adalah :

$$= I^2 \cdot R \quad (2.2)$$

Prinsip kerja alat ukur tahanan kontak didasarkan pada metode elektrik yang mengkombinasikan sumber arus dan pengukur tegangan (*voltmeter*) untuk mendeteksi besar jatuh tegangan (*drop voltage*) pada peralatan yang diuji. Dengan penerapan sistem elektronik digital, hasil pengukuran dapat ditampilkan secara akurat dengan tingkat presisi yang memadai. Penggunaan arus sebesar 100 Ampere dipilih karena faktor pembagi 100 memudahkan konversi langsung hasil pengukuran menjadi nilai tahanan kontak, sekaligus mempercepat proses perhitungan.



Gambar 2. 10 Pengujian Tahanan Kontak

(Sumber: SKDIR N0: 0520 K/DIR.2014)

Tahanan kontak sendiri dapat menunjukkan beberapa parameter antara lain :

- a. Menunjukkan tingkat keausan atau oksidasi pada permukaan kontak.
- b. Nilai yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kenaikan suhu dan rugi daya.
- c. Maksimal nilai tahanan kontak utama pada pemutus tenaga 150 kV umumnya $\leq 50 \mu\Omega$.

2. Keserempakan Kontak (*Breaker Analyzer*)

Pengujian keserempakan kontak bertujuan untuk melihat waktu yang diperlukan PMT untuk melakukan operasi buka ataupun tutup. Keserempakan operasi PMT merupakan parameter kritis. Kegagalan kontak pada ketiga fasa untuk membuka atau menutup dalam rentang waktu yang sangat sempit dapat menimbulkan kondisi tidak seimbang yang berbahaya, yang dapat memicu gangguan lebih lanjut. Untuk mengantisipasi kegagalan keserempakan pembukaan (*pole discrepancy*), sistem dilengkapi dengan relai pengawas ketidakserempakan (*pole discrepancy relay*). Relai ini akan mendeteksi jika salah satu fasa gagal trip dan kemudian memberi perintah untuk memutus ketiga fasa secara keseluruhan. Prinsip yang sama berlaku untuk operasi penutupan, baik PMT tipe *single-pole* maupun *three-pole* harus menutup ketiga kontakannya secara serentak.

Pengujian keserempakan dilakukan untuk memverifikasi performa ini. Prosedur pengujian mengacu pada instruksi kerja alat uji keserempakan PMT yang terkoneksi dengan terminal kontrol PMT dan terminal pembumian. Pengukuran ini biasanya digabungkan dengan pengukuran waktu buka-tutup (*opening/closing time*) PMT. Hasil utamanya adalah nilai Δt .

$$\Delta t = t_{max} - t_{min} \quad (2.3)$$

Δt yaitu selisih waktu antara fasa yang paling cepat dan paling lambat beroperasi (baik saat membuka maupun menutup) pada fasa R, S, dan T. Nilai Δt ini menjadi indikator kuantitatif dari tingkat keserempakan PMT. Kecepatan operasi PMT sangat menentukan performa sistem. Waktu pemadaman gangguan (*clearing time*) harus memenuhi standar yang ditetapkan, yaitu : < 10 mili detik.

Pada saat terjadi gangguan pada sistem tenaga listrik, diharapkan PMT bekerja dengan cepat. *Clearing Time* sesuai dengan standart (SPLN No 52-1 1983 2010) untuk sistem dengan tegangan :

- 500 kV < 90 mili detik.
- 150 kV < 100 mili detik.
- 70 kV < 150 mili detik.

3. Tahanan Isolasi

Pengujian tahanan isolasi adalah pengukuran nilai resistansi listrik dari material isolasi (seperti porselen, SF6 gas, atau minyak transformator) yang digunakan pada peralatan Pemutus Tenaga (PMT) 150 kV. Tujuan utamanya adalah memastikan integritas dan kemampuan isolasi untuk menahan tegangan kerja tanpa adanya kebocoran arus yang berbahaya ke tanah atau antar bagian yang bertegangan berbeda.

- Mendeskripsikan kemampuan sistem isolasi terhadap tegangan tinggi.
- Nilai minimum tahanan isolasi pada suhu operasi dihitung dengan aturan bahwa 1 kilo Volt setara dengan 1 Mega Ohm ($M\Omega$).
- Mengetahui kebocoran arus pada setiap fasa pada pemutus tenaga.

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.4)$$

I = Arus Bocor

V = Tegangan injek 5kV (tegangan pada saat pengukuran)

R = Tahanan Isolasi tiap fasa

2.2.5 Metode Shutdown Measurement

Metode *shutdown testing* adalah jenis pengujian yang dilakukan secara *off-line*, yaitu saat peralatan dalam keadaan mati atau tidak ada tegangan listrik. Tujuannya adalah untuk mengetahui kondisi sebenarnya dari peralatan tanpa mengganggu sistem yang sedang beroperasi.

Menurut dokumen internal PLN tahun (2024), pengujian *shutdown* mencakup beberapa tes seperti pengukuran resistansi kontak, kecepatan kontak, dan resistansi isolasi. Tes ini bertujuan untuk mengevaluasi kondisi mekanis dan listrik peralatan, khususnya pada pemutus tenaga.

2.2.6 Condition Based Maintenance (CBM)

Menurut Willermark dan Islind (2018), *Condition Based Maintenance (CBM)* adalah cara memelihara peralatan yang didasarkan pada hasil pengukuran kondisi nyata peralatan tersebut. Tujuan dari *CBM* adalah mendeteksi tanda-tanda awal kerusakan agar perawatan bisa dilakukan sebelum peralatan rusak dan tidak bisa beroperasi lagi.

Konsep *CBM* dianggap lebih efisien dibandingkan dengan pemeliharaan rutin karena bisa mengurangi biaya perawatan serta memperpanjang masa pakai peralatan (Pabla, 2012). Dalam penelitian ini, *Condition Based Maintenance* diterapkan berdasarkan hasil pengukuran saat *shutdown* untuk meningkatkan tingkat keandalan operasi peralatan Listrik 150 kV di Gardu Induk Lumajang.

2.3 Kerangka Pemikiran

Dalam infrastruktur penyaluran listrik, pemutus tenaga (*circuit breaker*) menempati posisi sebagai peralatan *switching* utama. Fungsinya bersifat kritis dan dinamis, yaitu melakukan penyambungan dan pemutusan rangkaian listrik baik pada kondisi beban normal maupun pada saat terjadinya gangguan (seperti hubung singkat atau arus lebih).

Kemampuannya untuk beroperasi secara andal dalam hitungan milidetik saat gangguan terjadi berfungsi sebagai garis pertahanan pertama yang mengisolasi bagian jaringan yang bermasalah, sehingga mencegah perluasan gangguan dan melindungi peralatan lainnya. Pada jaringan Transmisi 150 kV milik PLN, kinerja PMT tidak hanya menjadi penentu keandalan (*reliability*) sistem, tetapi juga merupakan pondasi utama bagi kelangsungan (*continuity*) dan stabilitas penyaluran energi listrik dalam skala luas. Kegagalan sebuah PMT untuk beroperasi sesuai fungsinya berpotensi memicu pemadaman berganda (*cascading failure*) dan mengakibatkan gangguan pasokan listrik yang luas serta kerugian ekonomi yang signifikan.

Seiring berjalannya waktu dalam pengoperasian, komponen-komponen kritis di dalam pemutus tenaga termasuk kontak utama, sistem mekanis penggerak, dan media isolasi secara bertahap mengalami degradasi performa. Hal ini disebabkan oleh berbagai faktor seperti

gesekan dan keausan mekanis, proses oksidasi pada material konduktor, penurunan kualitas material akibat penuaan, serta potensi kebocoran pada gas isolasi seperti SF₆.

Degradasi kinerja internal peralatan seringkali bersifat terselubung, di mana tidak muncul gejala yang kasat mata atau dapat terpantau langsung selama operasi normal sehari-hari. Oleh karena itu, untuk mendapatkan gambaran yang akurat tentang kondisi riil peralatan, mutlak diperlukan kegiatan *Shutdown Measurement* atau pengujian terpadu yang dilaksanakan pada periode pemadaman terencana (*planned outage*).

Kegiatan ini dirancang secara sistematis untuk mengumpulkan, merekam, dan menganalisis data dari sejumlah parameter teknis kunci seperti waktu operasi mekanis, resistansi kontak, kualitas media isolasi, dan integritas sistem penggerak. Data yang diperoleh bukan sekadar angka atau catatan, melainkan cerminan langsung dari "kesehatan" (*health index*) pemutus tenaga dan berfungsi sebagai basis data objektif untuk menilai tingkat keausan, mendeteksi anomali dini, dan memprediksi sisa umur pakai komponen.

Dengan demikian, *shutdown measurement* merupakan pondasi diagnostik yang memungkinkan peralihan dari model pemeliharaan reaktif atau terjadwal menuju pendekatan yang berbasis kondisi (*Condition-Based Maintenance*), sehingga memastikan bahwa setiap tindakan perawatan dilakukan tepat pada waktunya dan tepat sasaran. Kegiatan *shutdown measurement* dilakukan untuk mendapatkan data parameter utama yang menggambarkan kondisi kesehatan *Circuit Breaker*.

Kegiatan *shutdown measurement* ini dilakukan untuk mendapatkan data parameter utama yang menggambarkan kondisi kesehatan pemutus tenaga antara lain :

1. Tahanan kontak

Menunjukkan kondisi permukaan kontak, nilai tinggi menandakan oksidasi atau keausan.

2. Keserempakan Kontak

Menggambarkan kecepatan buka/tutup kontak, nilai yang terlalu lambat atau tidak serempak antar fasa dapat menandakan gangguan pada mekanisme penggerak.

3. Tahanan isolasi

Mencerminkan kemampuan sistem isolasi terhadap tegangan tinggi, nilai rendah dapat mengindikasikan kelembaban atau degradasi isolator.

Data hasil pengukuran yang diperoleh selanjutnya harus melalui proses evaluasi kritis dengan melakukan perbandingan terhadap dua acuan utama antara lain standar teknis internal PLN (SPLN) dan spesifikasi atau rekomendasi pabrikan. Proses perbandingan yang komprehensif ini bertujuan untuk menetapkan status kondisi objektif dari pemutus tenaga, yakni menentukan apakah peralatan tersebut masih berada dalam batas toleransi operasi yang aman dan layak pakai, atau justru telah menunjukkan penyimpangan yang mengharuskan dilakukannya tindakan perawatan korektif, penyesuaian, hingga penggantian komponen.

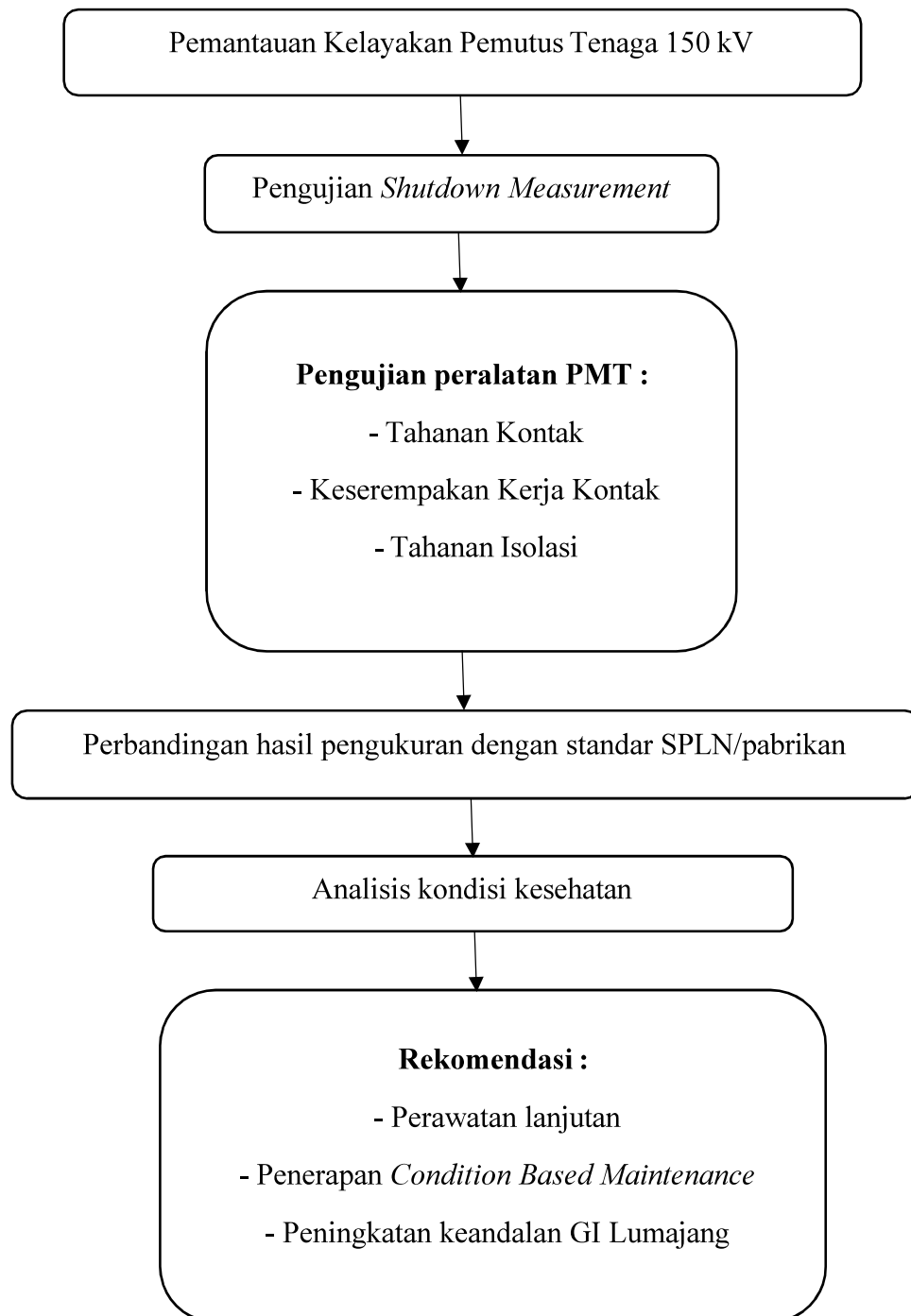
Secara strategis, hasil analisis ini tidak hanya berfungsi sebagai *tools* untuk keputusan perawatan sesaat, tetapi lebih jauh diharapkan mampu mengungkap indikator dini (*early warning signs*) potensi kegagalan yang mungkin terjadi di masa depan. Dengan demikian, data tersebut akan menjadi landasan data (*data-driven foundation*) yang kokoh untuk menerapkan dan mengembangkan sistem *Condition-Based Maintenance (CBM)* secara berkelanjutan di Gardu Induk Lumajang. Penerapan *CBM* yang berbasis bukti ini pada akhirnya bertujuan untuk mentransformasi paradigma pemeliharaan dari yang bersifat terjadwal dan reaktif, menjadi proaktif, prediktif, dan tepat sasaran, guna meningkatkan keandalan aset dan kontinuitas penyaluran listrik.

Oleh karena itu, kerangka berpikir atau logika dasar yang membangun penelitian ini dibentuk oleh sebuah alur pikir kausal dan sistematis. Alur ini berawal dari identifikasi kebutuhan mendasar untuk menjamin dan mempertahankan tingkat keandalan (*reliability*) sistem transmisi listrik yang optimal. Kebutuhan ini kemudian diterjemahkan ke dalam tindakan operasional konkret, yaitu pelaksanaan pengukuran menyeluruh terhadap berbagai parameter fisik dan elektrik peralatan khususnya Pemutus Tenaga yang hanya dapat dilakukan dalam kondisi peralatan dimatikan secara terencana (*planned de-energized*).

Data mentah yang diperoleh kemudian menjalani proses analisis diagnostik, di mana setiap hasil pengukuran dibandingkan secara kuantitatif dengan batas ambang standar teknis yang berlaku (seperti SPLN) serta rekomendasi pabrikan. Tahap analisis ini berfungsi sebagai jembatan antara data teknis dan penilaian engineering. Proses berpikir ini kemudian mencapai tahap sintesis, yaitu penarikan kesimpulan definitif mengenai "kesehatan" (*health index*) peralatan yang diuji, apakah masih dalam kategori prima, memerlukan pemantauan ketat, atau mendekati kondisi kritis.

Akhirnya, kerangka ini mencapai tujuan akhirnya yang bersifat aplikatif, yaitu merumuskan rekomendasi perawatan yang spesifik, berbasis bukti, dan dapat ditindaklanjuti. Rekomendasi ini dirancang untuk mengatasi temuan ketidaksesuaian yang teridentifikasi, sehingga secara langsung berkontribusi pada peningkatan keandalan aset dan keberlanjutan sistem secara keseluruhan. Dengan demikian, kerangka berpikir penelitian ini merepresentasikan suatu siklus lengkap dari identifikasi masalah, akuisisi data, analisis ilmiah, hingga solusi *engineering*.

Gambaran Alur Kerangka Pemikiran



Gambar 2. 11 Alur Kerangka Pemikiran