

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.2 Gardu Induk

Gardu Induk merupakan salah satu fasilitas utama dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai titik penghubung, pengaturan, dan penyaluran energi listrik dari sistem transmisi ke sistem distribusi atau antar level tegangan. Keandalan Gardu Induk sangat bergantung pada kondisi peralatan yang terpasang, sehingga kegiatan pemeliharaan menjadi faktor penting dalam menjaga kontinuitas penyaluran tenaga listrik di PT PLN (Persero).

Pemeliharaan Gardu Induk dilaksanakan untuk memastikan seluruh peralatan beroperasi sesuai dengan fungsi dan karakteristik desainnya, serta untuk mencegah terjadinya gangguan yang dapat mengakibatkan pemadaman atau kerusakan peralatan. Kegiatan pemeliharaan dilakukan secara terencana dan berkelanjutan melalui beberapa metode, antara lain inspeksi visual saat peralatan beroperasi, pengukuran parameter kelistrikan, serta pemeliharaan dalam kondisi tidak bertegangan (*shutdown maintenance*).

Peralatan utama yang dipelihara di Gardu Induk meliputi pemutus tenaga (PMT), pemisah (PMS), sistem gas pada peralatan GIS, lightning arrester, serandang dan sistem pentanahan, serta sistem suplai AC dan DC. Pemeliharaan PMT dan PMS difokuskan pada pemeriksaan kondisi mekanik, sistem penggerak, kontak, serta fungsi interlock untuk menjamin keandalan operasi dan keselamatan kerja. Pada lightning arrester, pemeliharaan dilakukan untuk memastikan kemampuan perlindungan terhadap surja petir dan surja hubung tetap optimal.

Pada Gardu Induk berbasis Gas Insulated Substation (GIS), pemeliharaan sistem gas menjadi aspek yang sangat penting. Sistem gas rentan mengalami penurunan kualitas dan tekanan akibat kebocoran, degradasi gas, serta pengaruh lingkungan dan umur peralatan. Oleh karena itu, dilakukan kegiatan pengecekan rutin, top up gas untuk menjaga tekanan operasional, serta reklamasi gas guna memulihkan kualitas gas agar memenuhi standar teknis yang ditetapkan.

2.1.2.1 Klasifikasi gardu induk

Gardu induk dapat di klasifikasikan menurut tegangan dan penempatan peraalatannya. Dibawah ini dijelaskan klasifikasi gardu induk tersebut :

1) Klasifikasi Gardu induk menurut tegangannya

a. Gardu Induk transmisi

Gardu induk transmisi yaitu gardu listrik yang mendapatkan daya dari satuan tranmisi atau sub-transmisi suatu sistem tenaga listrik untuk kemudian menyalurkannya ke daerah beban (*industry*, kota dan sebagainya) melalui saluran distribusi primer. Gardu induk yang ada pada PLN adalah tegangan ekstra tinggi 500kV, tegangan tinggi 150kV, 70kV, dan 30kV.



Gambar 2. 1 Gardu Induk GI Bekasi

Sumber : Dokumentasi Magang

b. Gardu induk Distribusi

Menerima tenaga dari gardu induk transmisi dengan menggunakan tegangannya melalui trafo tenaga menjadi tegangan menengah untuk kemudian tegangan tersebut diturunkan kembali menjadi tegangan rendah atau sesuai dengan kebutuhan gardu induk ini digunakan untuk mengubah transmisi menjadi tegangan distribusi.



Gambar 2. 2 Gardu Distribusi

Sumber : *internet*

2) Klasifikasi Gardu Induk menurut penempatan peralatannya :

a. Gardu induk pemasangan dalam (*indoor substation*)

Gardu induk pemasangan dalam adalah gardu induk dimana ruangan control, peralatan Gardu Induk seperti Rel Busbar, Pemisah, Pemutus Tenaga, Trafo Tenaga, CT, PT, Isolator dan sebagainya di pasang di dalam suatu ruangan atau bangunan yang tertutup.

b. Gardu Induk pemasangan luar

Gardu induk pemasangan luar adalah semua peralatan seperti Rel Busbar, Pemisah, Pemutus Tenaga, dan sebagainya dipasang di luar (lapangan terbuka) kecuali ruangan control, alat pengukur dan alat-alat bantu seperti biasanya di dalam gedung.

2.1.2.2 Spesifikasi dan Fungsi Peralatan Gardu Induk

1. Busbar/Rel



Gambar 2. 3 Busbar gardu Induk Transmisi

Sumber : *Internet*

Busbar/rel merupakan tempat titik temu saluran-saluran tenaga (sumber keluaran) antara trafo tenaga, SUTT atau tempat menerima dan menyalurkan daya listrik. Bahan dari busbar umumnya terbuat dari bahan tembaga (*bar copper*, atau *hollow conductor*), ACSR : almalec atau alumunium. Pada umumnya sebuah gardu induk, didesain dengan dua busbar (*double busbar*), sehingga apabila terjadi gangguan pada salah satu busbar maka seluruh bay akan dipindah ke busbar yang lain. Pada busbar gardu induk dilengkapi dengan potensial transformer (PT bus), current tranformer (CT bus) dan juga kopel. PT dan CT berfungsi untuk mengukur tegangan dan arus pada bus tersebut. Kopel merupakan switch yang dipasang pada busbar yang berfungsi untuk menghubungkan bus satu dengan bus lainnya. Secara umum dan prinsip kerja kopel adalah sama dengan PMT, karena kopel juga dilengkapi dengan sistem pemadam busur api yang berfungsi untuk memadamkan busur api ketika proses pemutus dan penyambungan kopel.

2. *Lighting Arrester (LA)*



Gambar 2. 4 Lightning Arrester

Sumber : *internet*

Lightning arrester adalah peralatan yang berfungsi untuk melindungi peralatan listrik lain dari tegangan surja (baik surja hubung maupun surja petir). Surja mungkin merambat di dalam konduktor saat peristiwa sebagai berikut :

- a. Kegagalan sudut perlindungan petir, sehingga surja petir mengalir di dalam konduktor fasa.
- b. *Blackflashover* akibat nilai pentanahan yang tinggi, baik di gardu induk maupun di saluran transmisi.

- c. Proses *switching* CB/DS (surja hubung).
- d. Gangguan fasa-fasa, ataupun fasa-tanah baik di saluran transmisi maupun di gardu induk.

Lightning Arrester memiliki karakteristik sebagai berikut :

- 1) Pada tegangan operasi (rms) :
 - a. LA bersifat sebagai insulator.
 - b. Arus bocor ke tanah tetap ada, namun dalam orde mili-Ampere. Arus bocor ini mayoritas adalah arus kapasitif.
- 2) Pada saat terjadi surja petir/surja hubung :
 - a. LA bersifat konduktif, dengan nilai resistansi sangat rendah.
 - b. LA mengalirkan arus surja ke tanah dalam orde kilo-Ampere.
 - c. LA segera bersifat insulator setelah surja berhasil dilewatkan, sehingga menghilangkan pengaruh *follow current*.

3. Potensial Transformer (PT)



Gambar 2. 5 Potensial Transformator (PT)

Sumber : *internet*

Potensial Transformer atau trafo tegangan adalah suatu peralatan listrik yang dapat mentransformasi tegangan sistem yang lebih tinggi ke suatu tegangan sistem yang lebih rendah untuk keperluan alat-alat ukur (pengukuran) dan alat-alat pengamanan proteksi. Adapun fungsi potensial transformer adalah :

- a. Mentransformasikan besaran tegangan sistem dari yang tinggi ke besaran tegangan listrik yang lebih rendah sehingga dapat digunakan untuk peralatan proteksi dan pengukuran yang lebih aman, akurat, dan teliti.
- b. Mengisolasi bagian primer yang tegangannya sangat tinggi dengan bagian sekunder yang tegangannya rendah untuk digunakan sebagai sistem proteksi dan pengukuran peralatan dibagian primer.

Jenis-jenis potensial transformer dibagi menjadi dua jenis yaitu :

- a. Trafo tegangan magnetik

Trafo tegangan magnetik disebut juga trafo tegangan induktif. Terdiri dari belitan primer dan sekunder pada inti besi yang prinsip kerjanya belitan primer menginduksikan tegangan kebelitan sekundernya.

- b. Trafo tegangan kapasitif

Trafo tegangan kapasitif terdiri dari dua bagian yaitu *Capacitive Voltage Divider* (CVD) dan *inductive intermediate voltage transformer* (IVT). CVD merupakan rangkaian seri dua kapasitor atau lebih yang berfungsi sebagai pembagi tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan rendah pada primer, selanjutnya tegangan pada satu kapasitor ditransformasikan oleh IVT menjadi tegangan sekunder.

4. Pemisah (PMS)



Gambar 2. 6 Pemisah

Sumber : Dokumentasi Magang

Disconnecting Switch atau pemisah (PMS) merupakan suatu alat untuk memisahkan tegangan pada peralatan instalasi tegangan tinggi. PMS suatu peralatan sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai saklar pemisah rangkaian listrik dalam kondisi bertegangan atau tidak bertegangan tanpa arus beban.

Penempatan PMS terpasang di antara sumber tenaga listrik dan PMT (*PMSBus*) serta di antara PMT dan beban (*PMSLine/kabel*) dilengkapi dengan PMS Tanah (*Earthing Switch*). Ada dua macam fungsi PMS, yaitu :

- a. Pemisah peralatan, berfungsi untuk memisahkan peralatan listrik dari peralatan lain atau instalasi lain yang bertegangan. PMS ini boleh dibuka atau ditutup hanya pada rangkaian jaringan yang tidak berbeban.
- b. Pemisah Tanah (Pisau pentanahan/pembumian). Berfungsi sebagai pengaman dari arus tegangan yang timbul sesudah saluran tegangan tinggi dipustuskan atau induksi tegangan dari penghantar atau kabel lainnya.

5. *Current Transformer (CT)*



Gambar 2. 7 Current Transformer (CT)

Sumber : *Dokumentasi Magang*

Current Transformer (CT) yaitu peralatan yang digunakan untuk melakukan pengukuran besaran arus pada instalasi tenaga listrik disisi primer (TET, TT, dan TM) yang berskala besar dengan melakukan transformasi dari besaran arus yang besar menjadi besaran arus yang kecil secara akurat dan teliti untuk keperluan pengukuran dan proteksi. Adapun fungsi dari *current transformer* yaitu sebagai berikut :

- a. Mengkonversi besaran arus pada sistem tenaga listrik dari besaran primer menjadi besaran sekunder untuk keperluan pengukuran sistem metering dan proteksi
- b. Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer, sebagai pengamanan terhadap manusia atau operator yang melakukan pengukuran.

c. Standarisasi besaran sekunder, untuk arus nominal 1 Amp dan 5 Amp.

Secara fungsi trafo arus dibedakan menjadi dua yaitu :

a) Trafo arus pengukuran

- 1) Trafo arus pengukuran untuk metering memiliki ketelitian tinggi pada daerah kerja (daerah pengenalnya) 5%-120% arus nominalnya tergantung dari kelasnya dan tingkat kejenuhan yang relatif rendah dibandingkan trafo arus untuk proteksi.
- 2) Penggunaan trafo arus pengukuran untuk Amperemeter, Watt-meter, VARH-meter, dan cos meter.

b) Trafo arus proteksi

- 1) Trafo arus untuk proteksi, memiliki ketelitian tinggi pada saat terjadi gangguan dimana arus yang mengalir beberapa kali dari arus pengenalnya dan tingkat kejenuhan cukup tinggi.
- 2) Penggunaan trafo arus proteksi untuk relai arus lebih (OCR dan GFR), relai beban lebih, relai diferensial, relai daya dan relai jarak.
- 3) Perbedaan mendasar trafo arus pengukuran dan proteksi adalah pada titik saturasinya.
- 4) Trafo arus untuk pengukuran dirancang supaya lebih cepat jenuh dibandingkan trafo arus proteksi sehingga konstruksinya memiliki luas penampang inti yang lebih kecil.

6. Pemutus Tenaga (PMT)



Gambar 2. 8 Pemutus Tenaga

Sumber : *Dokumentasi Magang*

PMT atau *Circuit Breaker* 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 kondisi abnormal/gangguan seperti kondisi hubung singkat (*short circuit*). Sedangkan definisi PMT berdasarkan IEEE C37.100.1992 (Standard definitions for power switchgear) adalah peralatan saklar/*switching* mekanis, yang mampu menutup, mengalirkan dan memutus arus beban dalam kondisi normal sesuai dengan ratingnya serta mampu menutup, mengalirkan (dalam periode waktu tertentu) dan memutus arus beban dalam spesifik kondisi abnormal/gangguan sesuai dengan ratingnya. Fungsi utama dari PMT 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 peralatan lain.

Klasifikasi PMT :

1. Berdasarkan Besar/Kelas Tegangan

PMT dapat dibedakan menjadi :

- a) PMT tegangan rendah (*Low Voltage*), dengan range tegangan 0.1 s/d 1kV (SPLN 1.1995-3.3)
- b) PMT tegangan menengah (*Medium Voltage*) dengan range tegangan 1 s/d 35kV (SPLN 1.1995-3.4)
- c) PMT tegangan tinggi (*High Voltage*) dengan range tegangan 35 s/d 245kV (SPLN 1.1995-3.5)
- d) PMT tegangan extra tinggi (*Extra High Voltage*) dengan range tegangan lebih besar dari 245 KVAC (SPLN 1.1995-3.6)

2. Berdasarkan jumlah mekanik penggerak/*tripping coil* dapat dibedakan menjadi :

a) PMT *Single Pole*

PMT type ini memiliki mekanik penggerak pada masing-masing *pole*, umumnya PMT jenis ini dipasang pada bay penghantar supaya PMT bisa *reclose* satu fasa.

b) PMT *Three Pole*

PMT jenis ini memiliki 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 kopel serta PMT 20kV untuk distribusi.

3. Berdasarkan media isolasi, jenis PMT dibedakan menjadi :
 - a) PMT Gas SF₆
 - b) PMT Minyak
 - c) PMT Udara Hembus (*Air Blast*)
 - d) PMT Hampa Udara (*Vacuum*)
4. Berdasarkan proses pemadaman busur api listrik diruang pemutus, PMT SF₆ dibagi dalam dua jenis, yaitu :
 - a) PMT jenis Tekanan Tunggal (*single pressure type*)

PMT terisi gas SF₆ dengan tekanan kira-kira 5kg/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.
 - b) PMT jenis tekanan ganda (*double pressure type*)

PMT terisi gas SF₆ dengan sistem tekanan tinggi kira-kira 12 Kg / cm² dan sistem tekanan rendah kira-kira 2 Kg / cm², pada waktu pemutusan busur api gas SF₆ dari sistem tekanan tinggi dialirkan melalui *nozzle* ke sistem tekanan rendah. Gas pada sistem tekanan rendah kemudian dipompakan kembali ke sistem tekanan tinggi, saat ini PMT SF₆ tipe ini sudah tidak diproduksi lagi.

2.1.3 Transformator Daya Gardu Induk

Gardu induk adalah instalasi listrik yang berfungsi untuk menerima, mengatur dan menyalurkan energi listrik yang terdiri dari beberapa komponen utama salah satunya adalah trafo daya. Trafo daya pada gardu induk berfungsi mentransformasikan energi listrik dari pusat pembangkit listrik melalui jaringan transmisi kemudian disalurkan menuju jaringan distribusi.

Berdasarkan pasangan instalasinya, Trafo daya diklasifikasikan menjadi Trafo daya dengan busbar LV terbuka (*open type*) dan Trafo daya dengan busbar LV tertutup (*close type*). Trafo dengan busbar LV terbuka merupakan jenis trafo yang bagian konduktor atau busbar pada sisi tegangan rendahnya dibiarkan terbuka dan terlihat langsung. Jenis ini banyak digunakan pada gardu Induk karena lebih mudah dalam pemasangan dan perawatan. Namun, karena kondisi busbar terbuka, tingkat keamanannya lebih rendah serta rentan terhadap gangguan dari luar seperti debu, hewan, maupun kelembapan.

Sementara itu, trafo daya dengan busbar LV tertutup memiliki sisi tegangan rendah yang dilindungi oleh panel atau cubicle tertutup. Desain ini memberikan tingkat keamanan yang lebih baik karena komponen tidak mudah tersentuh langsung serta terlindung dari gangguan eksternal. Selain itu, tampilannya lebih rapi dan lebih sesuai untuk dipasang di daerah perkotaan, gedung, atau gardu modern. Meskipun demikian, biaya instalasi dan perawatannya relatif lebih tinggi dibandingkan trafo tipe terbuka. Dengan demikian, pemilihan antara open type dan close type biasanya mempertimbangkan faktor keamanan, lokasi pemasangan, serta biaya.

2.1.4 Trafo Daya Dengan Desain Busbar LV Terbuka (*Open Type*)

Pada trafo daya dengan desain busbar LV terbuka (*open type*), tidak terdapat penutup/ *cover* yang melindungi *bushing* LV dan busbar LV dari ancaman eksternal. Desain seperti ini umumnya ditemukan pada Trafo daya di Gardu Induk Konvensional.



Gambar 2. 9 Trafo daya dengan desain busbar LV terbuka

Kelebihan Trafo daya dengan desain busbar LV terbuka:

- 1) Mudah dalam pelaksanaan Inspeksi..
- 2) Lebih ekonomis.

Kekurangan Trafo daya dengan desain busbar LV terbuka:

- 1) Rawan terhadap gangguan yang diakibatkan oleh aktivitas binatang.

2.1.5 Trafo Daya Dengan Desain Busbar LV Tertutup (*Close Type*)

Pada trafo daya dengan desain busbar LV tertutup (*close type*), terdapat *cover* pelindung pada bushing LV dan busbar LV. Umumnya ditemui pada Trafo daya di GIS dan sebaiknya *cover* dilengkapi dengan *IR Window* untuk media thermovisi sisi LV.



Gambar 2. 10 Trafo daya dengan desain busbar LV

Kelebihan trafo daya dengan desain busbar LV tertutup:

- 1) Lebih aman terhadap ancaman binatang yang naik ke trafo melalui kabel *power* LV 20kV maupun *support* kabel *power*.
- 2) Dari segi Estetik bisa menambah keindahan

Kekurangan trafo daya dengan desain busbar LV tertutup:

- 1) Sulit dalam melaksanakan Inspeksi jika *cover* tidak dilengkapi dengan *IR Window*.

2.2 Penelitian yang Relevan

2.2.1 Dielektrik (Minyak isolasi Trafo dan Isolasi Kertas)

Sistem isolasi adalah bagian terpenting pada suatu trafo daya untuk dijaga kualitasnya. Isolasi adalah komponen terlemah pada trafo daya. Umur dari isolasi trafo selaras dengan umur dari Trafo itu sendiri, sehingga memerlukan perhatian lebih dalam penanganannya. Sistem isolasi pada trafo terdiri dari isolasi cair (minyak) dan isolasi padat (kertas).

2.2.1.1 Minyak Isolasi Trafo

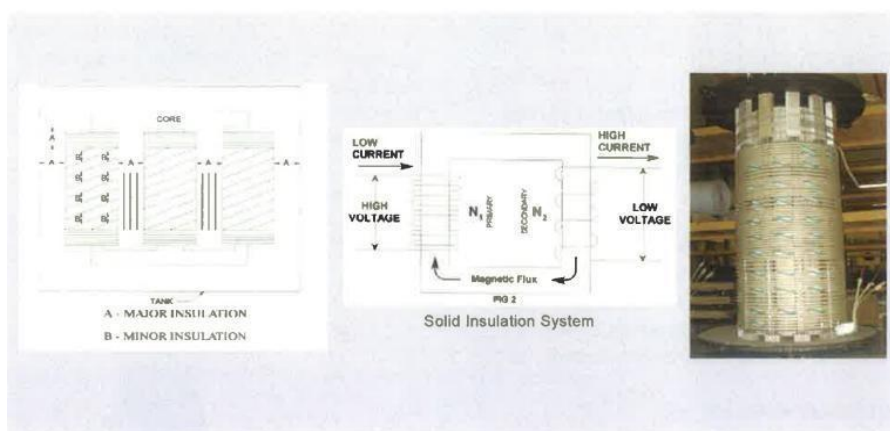
Minyak isolasi pada trafo berfungsi sebagai media isolasi (gabungan minyak dan kertas), media pendingin (kumparan dan inti besi), peredam busur api, dan pelarut gas-gas (*media diagnose*). Minyak isolasi trafo merupakan minyak mineral yang terdiri dari susunan senyawa hidrokarbon, yaitu *paraffin* (40%-60%), *naphtene* (30%- 50%) dan *aromatic* (5%-20%) dan *olefin* (sekitar 1%).

Kegagalan isolasi disebabkan beberapa sebab, antara lain isolasi tersebut sudah lama terpakai, berkurangnya kekuatan dielektrik dan karena isolasi tersebut dikenakan tegangan lebih, dan juga karena oksidasi pada minyak trafo. Produk oksidasi memiliki rantai yang mengandung oksigen dan dapat larut Sebagian pada minyak dan air. Senyawa ini kemudian saling bereaksi dengan molekul minyak lain dan membentuk *sludge* pada minyak dan kertas isolasi. Semua produk ini bersifat agresif terhadap isolasi kertas pada trafo. Oksidasi pada minyak isolasi terjadi karena adanya oksigen, temperatur yang tinggi (*heat*), dan produk dari oksidasi minyak itu sendiri. Kondisi operasional dari trafo dapat di deteksi secara dini (normal atau abnormal) melalui pengujian minyak isolasi. Pengujian minyak isolasi yang dilakukan secara rutin antara lain pengujian DGA (*dissolve gas analysis*), pengujian karakteristik minyak isolasi, dan pengujian furan. Namun untuk pengujian furan lebih bersifat kondisional (usia, kadar asam tinggi, hasil pengujian DGA menunjukkan rasio $\text{CO}_2/\text{CO} > 3$).

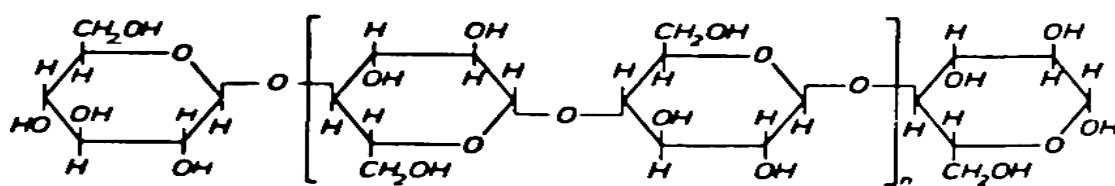
2.2.1.2 Isolasi Kertas Trafo

Isolasi padat (*solid insulation*) merupakan bagian dari sistem isolasi trafo yang terbuat dari Kraft Paper. Isolasi padat merupakan bagian penting dan rentan pada trafo. Umur dari isolasi padat pada trafo berbanding lurus dengan

lifetime dari trafo itu sendiri. Isolasi padat berfungsi sebagai *dielectric spacing*, *dielectric strength* dan *mechanical strength* bagi trafo daya. Kekuatan dari kertas isolasi akan menurun seiring dengan waktu dikarenakan berbagai factor antara lain usia, panas (*heat*), oksigen, air (*moisture*), dan produk/senyawa yang diakibatkan dari oksidasi minyak isolasi. Proses penurunan kualitas isolasi kertas merupakan proses depolimerisasi. Proses depolimerisasi akan selalu diiringi oleh terbentuknya gugus furan. Nilai furan yang terbentuk akan sebanding dengan tingkat DP (*degree of polymerization*).



Gambar 2. 11 Isolasi kertas trafo



Gambar 2. 12 Struktur Kimia Selulosa (Cellulose)

Penggunaan isolasi padat dan isolasi cair merupakan kombinasi yang baik dan efektif. Hal ini dikarenakan fungsi dielektrik dari minyak isolasi dan kertas isolasi dapat meningkat apabila digunakan secara bersamaan.

Kekuatan Dielektrik:

- *Cellulose* : 1000 volts/mil
- *Oil* : 300 volts/mil
- *Combined total* : 1600 volts/mil

2.2.2 Kabel *Power* 20kV pada Trafo Daya

Pada umumnya kabel yang terpasang pada instalasi tegangan menengah adalah jenis kabel XLPE. Kabel XLPE memiliki sifat listrik dan mekanik yang baik dan tidak meleleh pada saat terbakar, hanya terurai. Dalam operasi normal, kabel XLPE merupakan kabel yang tahan panas (hingga 90 °C secara kontinyu). Pada kondisi gangguan/*short circuit*, kabel XLPE dapat bertahan pada suhu maksimum 250 °C selama 1 detik.

Konstruksi Kabel *Power* 20kV Yang Dipasang Pada Trafo Daya :



Gambar 2. 13 Konstruksi kabel power LV Trafo

Tabel 2. 1 Spesifikasi kabel power LV Trafo

Spesifikasi : Standar SPLN 43-5-3 : 1995	
Construction	
<i>Conductor</i>	<i>: Copper or Alluminium (Compact Circular Stranded)</i>
<i>Conductor Screen</i>	<i>: Extruded Semiconductive Compound</i>
<i>Insulation</i>	<i>: Extruded Crosslink Polyethylene (XLPE)</i>
<i>Insulation Screen</i>	<i>: Extruded Strippable Semiconductive Compound</i>
<i>Water Blocking</i>	<i>: Helicaly Overlapped Semiconductive Water blocking tape</i>
<i>Metalic Screen</i>	<i>: Helicaly Overlapped Copper Wire</i>
<i>Water Blocking</i>	<i>: Helicaly Overlapped Non-conductive Water blocking tape</i>
<i>Sheath</i>	<i>: Extruded PVC 90° C grade</i>
Symbol	
<i>Applicable Standard</i>	<i>: Other Specification are available on request</i>
<i>Application</i>	<i>: Suitable for Distribution Indoor and Outdoor Installation, in conduit, troughs on Trays</i>

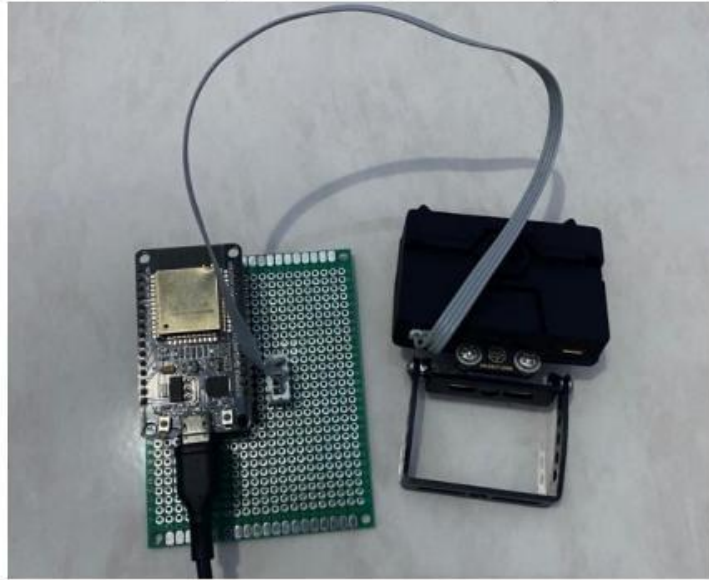
2.2.3 Sistem Monitoring Proteksi Gangguan Hewan Pada Transformator

Transformator daya adalah perangkat penting dalam sistem listrik yang berperan dalam meningkatkan atau menurunkan tegangan AC. Gangguan pada gardu transformator dapat menyebabkan pemadaman yang meluas, oleh karena itu, keandalan transformator perlu dipertahankan. Burung menjadi salah satu penyebab utama gangguan pada gardu transformator, dan hal ini dapat mengakibatkan pemadaman listrik, kerugian biaya, dan dampak negatif terhadap keberlanjutan lingkungan.

Namun, sampai saat ini, solusi yang benar-benar efektif dan efisien untuk mengatasi masalah ini secara optimal masih belum banyak ditemukan. Metode yang umum digunakan, seperti pagar atau kawat penghalang, sering kali belum cukup efektif karena hewan masih mampu melewati atau mengatasi penghalang tersebut. Oleh karena itu, dibutuhkan pengembangan sistem monitoring proteksi yang lebih canggih dan akurat, yang mampu mendeteksi gangguan hewan pada gardu transformator secara cepat. Sistem monitoring yang baik akan memberikan peringatan dini kepada operator listrik sehingga tindakan pencegahan dapat segera diambil untuk mengurangi risiko gangguan akibat hewan.

Hasil Perancangan Alat Hasil perancangan alat merupakan gabungan dari komponen mikrokontroler dan sensor kamera huskylens yang sudah dirangkai sesuai rencana perancangan alat pada Gambar 2.14. Komponen yang telah dirangkai dan dirakit diletakkan didalam case box untuk melindungi komponen dari gangguan luar dan menambah nilai estetika alat. Hasil perancangan alat dapat dilihat pada Gambar Gambar 2.14 Hasil Perancangan Alat Pada Sistem Monitoring Proteksi Gangguan Hewan pada Gardu Transformator terdapat dua perangkat utama yakni kamera huskylens dan mikrokontroler ESP32. ESP32 berfungsi sebagai penerima data dari modul huskylens melalui protokol komunikasi UART. Data yang diterima akan diproses dan dieksekusi sesuai algoritma yang telah ditetapkan. Jika data yang dikirim oleh huskylens

mendeteksi suatu jenis objek maka ESP32 akan mengirimkan notifikasi melalui platform Telegram menggunakan jaringan internet WiFi.



Gambar 2. 14 Perancangan Alat Monitoring Proteksi Gangguan Hewan

Sistem monitoring proteksi gangguan hewan pada gardu transformator ini dirancang dengan dua perangkat utama, yaitu kamera Huskylens dan mikrokontroler ESP32. Peran ESP32 adalah sebagai pusat kendali yang menerima dan memproses data dari Huskylens melalui protokol komunikasi UART. Ketika Huskylens mendeteksi suatu objek yang teridentifikasi sebagai hewan, data tersebut akan diproses oleh ESP32 sesuai algoritma yang telah ditetapkan. Selanjutnya, ESP32 akan mengirimkan notifikasi melalui platform Telegram menggunakan koneksi internet WiFi untuk memberi peringatan dini kepada operator. Komponen utama yang digunakan dalam sistem ini meliputi ESP32 sebagai otak sistem, Huskylens sebagai kamera AI yang mampu mengenali berbagai objek secara real-time, dan case box untuk melindungi komponen dari gangguan eksternal sekaligus menambah nilai estetika alat. Pengujian sistem dilakukan dalam tiga tahap utama, yaitu pengujian deteksi objek, pengujian notifikasi Telegram, dan pengujian keseluruhan sistem. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa Huskylens dapat merespons berbagai jenis hewan di lokasi yang berbeda serta memastikan hasil deteksi dapat dikirimkan ke Telegram dengan akurat.



Gambar 2. 15 Pemasangan Alat Monitoring Pada Trafo 20KV -380V

2.3 Studi Literatur

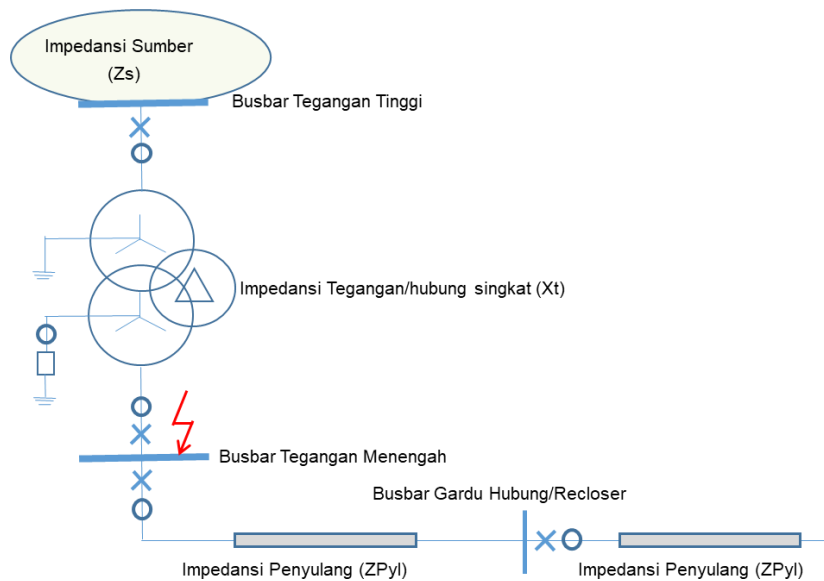
2.3.1 Aktivitas Binatang yang Dapat Menimbulkan Gangguan Trafo

Gangguan Trafo daya dapat disebabkan oleh beberapa faktor, yaitu kesalahan manusia, dari dalam/alat itu sendiri maupun dari luar (Alam, Binatang). Aktivitas binatang yang marak terjadi disebabkan oleh tikus, musang, ular, dan reptil lainnya. Aktivitas binatang ini dipicu akibat insting binatang untuk mencari suhu yang lebih hangat (pada trafo dan MK) dan juga aktivitas binatang mencari makanan. Maka dari itu, terdapat potensi binatang untuk naik ke atas trafo melalui kabel *power* 20kV dan *support* kabel *power* 20kV. Untuk mencegah binatang naik ke atas trafo maka perlu dilakukan langkah-langkah *preventif* seperti pemasangan anti panjat binatang pada trafo dengan desain busbar LV terbuka, dan melakukan penutupan seluruh potensi lubang/celah yang terdapat di sekitar trafo. Hal ini juga didukung dengan melakukan *pest control* secara rutin dan membersihkan lingkungan Gardu Induk (GI).



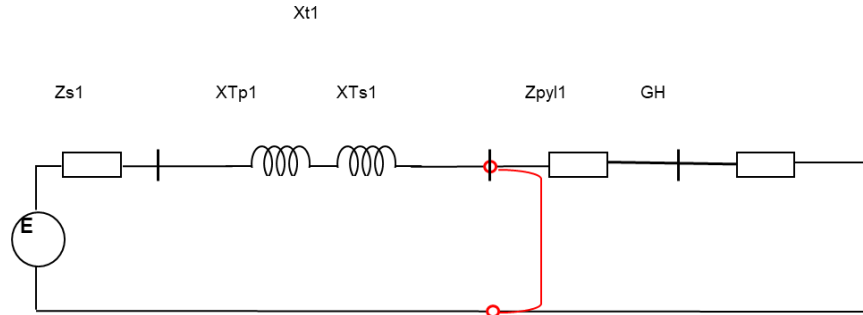
Gambar 2. 16 Desain cable duct kabel power 20kV yang terbuka

Gangguan yang disebabkan oleh aktivitas binatang ini pada umumnya terjadi pada busbar 20kV Trafo sehingga menimbulkan gangguan fasa-fasa ataupun fasa-netral.



Gambar 2. 17 Gangguan Trafo daya akibat aktivitas binatang

2.3.2 Rangkaian Pengganti dan Perhitungan Arus Hubung Singkat 3 Fasa pada Busbar 20kV Trafo

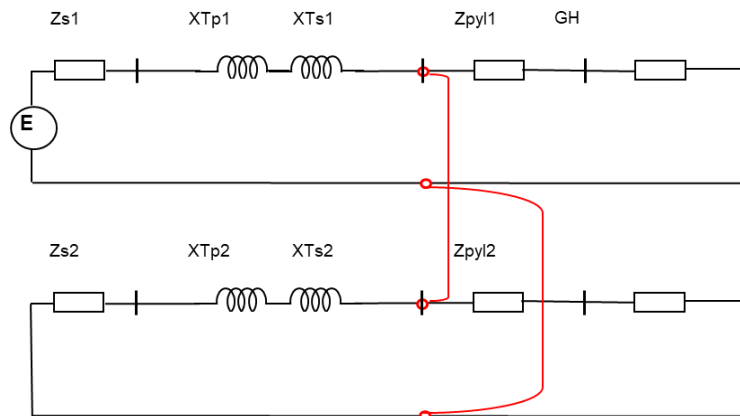


Gambar 2. 18 Rangkaian pengganti arus hubung singkat 3 fasa di busbar 20kV

Gangguan Hubung Singkat Fasa – Fasa simetris dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$I_{hs3\phi} = \frac{E}{(Z_{S1} + X_{TP1} + X_{TS1})} \times I_{base20kV}$$

2.3.3 Rangkaian Pengganti dan Perhitungan Arus Hubung Singkat 2 Fasa (Fasa- Fasa) pada Busbar 20kV Trafo

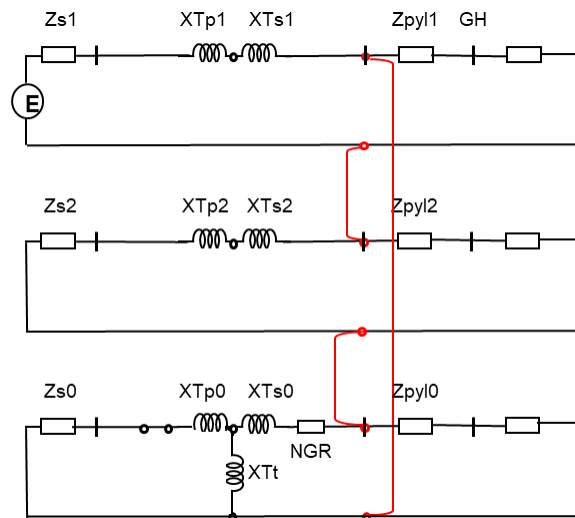


Gambar 2. 19 Rangkaian pengganti arus hubung singkat dua fasa di busbar 20kV

Gangguan Hubung Singkat Fasa – Fasa tidak simetris dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$I_{hs2\phi} \frac{\sqrt{3} \times E}{(ZS1 + X_{tP1} + X_{tS1}) + (ZS2 + X_{tP2} + X_{tS2})} \times I_{base20kV}$$

2.3.4 Rangkaian Pengganti dan Perhitungan Arus Hubung Singkat 1 Fasa (Fasa- Netral) pada Busbar 20kV Trafo



Gambar 2. 20 Rangkaian pengganti arus hubung singkat fasa - Netral di busbar 20kV

Gangguan Hubung Singkat Fasa - Netral dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$I_{hs1\phi} \frac{3 \times E}{(ZS1 + X_{tP1} + X_{tS1}) + (ZS2 + X_{tP2} + X_{tS2}) + \frac{(ZS0 + X_{tP0}) \times X_{tt}}{ZS0 + X_{tp0} + X_{tt}} + X_{tS0} + 3NGR} \times I_{base20kV}$$

2.4 Kerangka Pemikiran

2.4.1 Dampak Gangguan Akibat Aktivitas Binatang pada Trafo

Berdasarkan faktor penyebab nya, gangguan pada trafo dapat diklasifikasikan menjadi gangguan internal dan eksternal. Gangguan yang diakibatkan degradasi isolasi, *Partial Discharge* (PD), peningkatan kadar air, panas berlebih, resonansi belitan, dll. termasuk dalam kategori gangguan internal, sedangkan gangguan akibat sambaran petir tegangan lebih *switching*, gangguan sistem, kelebihan beban pada sistem, dan gangguan akibat aktivitas binatang. termasuk dalam kategori gangguan

eksternal.

Kegagalan pada transformator secara umum disebabkan oleh dampak dari *thermal, electrical, ambient and mechanical stresses* (TEAM).

1. *Thermal Stresses*

Thermal Stresses timbul akibat arus beban yang berlebih, panas berlebih/*hot spot, fluks* bocor, serta kegagalan pada sistem pendingin pada trafo. Temperatur yang tinggi mempercepat terjadinya dekomposisi pada dielektrik. Secara umum, temperatur dari isolasi kertas tidak boleh melebihi 105 °C karena isolasi kertas bersentuhan langsung dengan konduktor, untuk isolasi minyak sebaiknya berada pada temperatur yang lebih rendah.

2. *Electrical Stresses*.

Electrical Stresses disebabkan oleh tegangan lebih transient, resonansi belitan, dll. *Electrical Stresses* tidak berkontribusi secara signifikan pada dekomposisi dielektrik trafo.

3. *Ambient Stresses*.

Disebabkan oleh faktor lingkungan, seperti gas luar, kelembapan, *sludge*, produk dekomposisi isolasi kertas yang telarut pada minyak, produk oksidasi dari bahan metal pada trafo, dan kebocoran pada *seal* trafo.

4. *Mechanical Stresses*.

Mechanical Stresses terjadi pada *lead*, konduktor dan belitan trafo yang disebabkan oleh arus hubung singkat dan *inrush current*.

Peristiwa gangguan hubung singkat yang terjadi pada bay trafo menimbulkan arus yang besar mengalir pada belitan dan sambungan-sambungan di dalam trafo seperti koneksi antara belitan ke *bushing*. Arus gangguan yang besar ini mengakibatkan adanya pergeseran mekanik di dalam trafo. Pada kondisi normal, pergeseran mekanik ini dapat diredam. Pada saat gangguan sudah teratasi, trafo dapat Kembali beroperasi dengan normal. Namun, dalam beberapa kondisi tertentu (kesalahan perakitan / desain / arus gangguan melebihi rating, atau kertas telah mengalami degradasi termal, tembaga konduktor teroksidasi dan terdapat koneksi yang putus) gesekan yang dihasilkan dari pergeseran mekanis ini dapat menurunkan kemampuan isolasi trafo.

Pada belitan trafo khususnya, arus hubung singkat menimbulkan gaya aksial dan radial, yang harus ditahan oleh belitan. Klem cincin penjepit di bagian atas dan bawah belitan dan kertas isolasi secara signifikan berperan penting dalam meredam gaya mekanis yang timbul pada belitan trafo. Klem cincin berperan dalam meredam gaya radial, dan isolasi kertas berperan meredam gaya aksial yang timbul layaknya pegas. Secara desain trafo, apabila isolasi kertas dan klem dalam kondisi baik, resonansi yang terjadi seharusnya dapat dengan mudah meredam gaya mekanis yang ditimbulkan oleh arus hubung singkat. Namun, jika kertas dalam kondisi buruk, belitan menjadi longgar sehingga gaya aksial dan radial yang ditimbulkan oleh arus hubung singkat dapat mengakibatkan deformasi pada belitan trafo.

2.4.2 Analisis Keandalan Transformator Daya dalam Sistem Transmisi

Keandalan transformator daya merupakan salah satu parameter utama dalam menjaga kontinuitas penyaluran energi listrik pada sistem transmisi. Transformator daya 150 kV memiliki peran vital sebagai penghubung antara sistem transmisi dan sistem distribusi, sehingga setiap gangguan yang terjadi pada peralatan ini dapat memberikan dampak yang luas terhadap kestabilan sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

Dalam sistem tenaga listrik, keandalan (reliability) didefinisikan sebagai probabilitas suatu peralatan atau sistem dapat beroperasi sesuai dengan fungsi yang direncanakan dalam periode waktu tertentu tanpa mengalami kegagalan. Keandalan transformator daya dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain kondisi isolasi, sistem pendingin, sistem proteksi, kualitas instalasi, serta gangguan eksternal seperti aktivitas binatang.

Gangguan akibat binatang termasuk dalam kategori gangguan eksternal yang bersifat tidak terduga (random failure). Meskipun frekuensinya relatif lebih kecil dibandingkan gangguan internal akibat degradasi isolasi, dampak yang ditimbulkan dapat menyebabkan trip mendadak pada bus transformator, sehingga memicu pemadaman beban secara tiba-tiba. Dalam kondisi tertentu, gangguan tersebut juga dapat menyebabkan arus hubung singkat dengan magnitudo tinggi yang memberikan

tekanan mekanis dan termal pada belitan transformator.

Beberapa parameter yang umum digunakan dalam evaluasi keandalan transformator daya pada unit transmisi antara lain:

1. Transformer Outage Frequency (TROF)

TROF merupakan indikator yang menunjukkan jumlah kejadian gangguan transformator dalam periode tertentu. Nilai TROF yang tinggi mengindikasikan bahwa transformator memiliki tingkat kerentanan gangguan yang signifikan.

2. Transformer Outage Duration (TROD)

TROD menggambarkan total durasi waktu gangguan transformator dalam periode evaluasi. Semakin lama durasi gangguan, maka semakin besar dampak terhadap kontinuitas penyaluran daya.

3. Energy Not Supplied (ENS)

ENS merupakan besaran energi listrik yang tidak dapat disalurkan kepada pelanggan akibat gangguan. ENS dihitung berdasarkan besar beban yang terputus dikalikan dengan lama waktu gangguan. Nilai ENS yang tinggi menunjukkan kerugian operasional yang signifikan baik secara teknis maupun finansial.

Gangguan akibat aktivitas binatang secara langsung berkontribusi terhadap peningkatan nilai TROF, TROD, dan ENS. Oleh karena itu, upaya mitigasi gangguan eksternal memiliki pengaruh langsung terhadap peningkatan performa keandalan sistem.

Pada sistem transmisi 150 kV, gangguan yang terjadi pada satu bay transformator dapat memicu redistribusi beban ke transformator lain dalam satu gardu induk maupun gardu induk terdekat. Apabila sistem berada dalam kondisi pembebanan tinggi, redistribusi ini berpotensi menyebabkan overloading pada peralatan lain.

Selain itu, gangguan hubung singkat yang terjadi secara tiba-tiba dapat menyebabkan:

1. Fluktuasi tegangan (voltage dip)
2. Gangguan kestabilan sistem (transient stability disturbance)
3. Operasi proteksi berantai (cascade tripping) apabila koordinasi proteksi tidak optimal

Dalam konteks ini, pencegahan gangguan eksternal bukan hanya bertujuan melindungi satu peralatan, tetapi juga menjaga kestabilan sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

Strategi peningkatan keandalan dapat dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu:

1. Corrective Maintenance – tindakan perbaikan setelah terjadi gangguan.
2. Preventive Maintenance dan Mitigation – tindakan pencegahan sebelum gangguan terjadi.

Implementasi Anti Climbing Animal Device (ACAD) termasuk dalam kategori preventive mitigation, karena bertujuan menghilangkan sumber potensi gangguan sebelum terjadi kontak antara binatang dan konduktor bertegangan.

Pendekatan preventif memiliki beberapa keunggulan:

- Mengurangi frekuensi gangguan mendadak
- Menurunkan risiko kerusakan komponen akibat arus hubung singkat
- Menekan biaya perbaikan dan penggantian peralatan
- Meningkatkan indeks kinerja unit operasi

Secara konseptual, apabila probabilitas gangguan eksternal dapat diturunkan, maka nilai availability transformator akan meningkat. Availability dapat dinyatakan sebagai:

$$\text{Availability} = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})$$

di mana:

- MTBF (Mean Time Between Failure) adalah rata-rata waktu antar gangguan
- MTTR (Mean Time To Repair) adalah rata-rata waktu perbaikan

Dengan berkurangnya gangguan akibat binatang, nilai MTBF meningkat, sehingga availability transformator secara keseluruhan menjadi lebih baik.

Relevansi terhadap Transformator dengan desain busbar LV terbuka memiliki tingkat eksposur yang lebih tinggi terhadap lingkungan dibandingkan tipe tertutup. Kondisi ini menjadikan faktor eksternal sebagai variabel signifikan dalam analisis keandalan.

Penerapan ACAD pada titik akses utama binatang, yaitu kabel power 20 kV dan struktur support, secara langsung mengurangi probabilitas terjadinya gangguan hubung singkat eksternal. Dengan demikian, dari sudut pandang rekayasa sistem tenaga listrik, ACAD bukan hanya perangkat fisik, tetapi merupakan bagian dari strategi peningkatan reliability-centered maintenance pada gardu induk.