

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Yang Relevan

Pada penelitian ini penulis melakukan tinjauan literatur pada beberapa penelitian yang relevan untuk dijadikan referensi. Referensi dapat berasal dari jurna, artikel, skripsi, atau buku yang relevan. Beberapa referensi yang penulis dapatkan sebagai berikut:

1. **Menurut Harahap et al. (2019)**, dalam penelitian berjudul "Analisa Penambahan Trafo Sisip Sisi Distribusi 20 Kv Mengurangi Beban *Overload* Dan Jatuh Tegangan Pada Trafo BL 11 Rayon Tanah Jawa Dengan Simulasi Etab 12.6.0" menyatakan bahwa pemasangan trafo sisip dapat berfungsi secara efektif dalam mengurangi beban *overload* dan menurunkan jatuh tegangan pada jaringan distribusi. Hasil studi menunjukkan bahwa dengan penambahan trafo sisip, daya beban utama berkurang dari 95,99% menjadi 64,54%, sehingga beban pada trafo utama dapat terkendali dan sistem menjadi lebih stabil. Selain itu, penurunan jumlah beban tersebut juga meningkatkan kualitas tegangan di ujung jaringan dari 190,5 Volt menjadi 206,8 Volt, yang menunjukkan bahwa penggunaan trafo sisipan mampu meningkatkan keandalan sistem distribusi listrik secara signifikan.
2. **Menurut Al-Farouq (2021)**, dalam jurnal berjudul "Analisis Rencana Pemasangan Transformator Distribusi Sisipan pada Jaringan Tegangan Menengah 20 kV di Penyulang Kijing" dijelaskan bahwa pemasangan transformator sisipan dilakukan sebagai solusi untuk mengatasi pembebanan berlebih yang melebihi kapasitas trafo utama. Melalui simulasi metode Newton-Raphson, ditemukan bahwa penambahan transformator sisipan meningkatkan kualitas tegangan dan menurunkan beban berlebih pada titik-titik kritis dalam jaringan distribusi. Hal ini menunjukkan bahwa aplikasi trafo sisipan dapat meningkatkan efisiensi operasional dan keandalan sistem tenaga listrik secara signifikan.

3. **Menurut Zefanya Cergio Halitopo et al. (2023)**, dalam artikel "Analisis Penambahan Transformator Sisipan Guna Mengatasi Beban Lebih (*Overload*) Pada Gardu Distribusi di PT. PLN (Persero) ULP Abepura" menyatakan bahwa transformator yang bekerja dalam kondisi *overload* lebih dari 80% kapasitasnya akan mengalami penurunan umur pakai dan potensi kerusakan. Penambahan trafo sisipan dilakukan dengan memecah beban menggunakan manuver jaringan trafo lama ke trafo sisipan sehingga beban menjadi terdistribusi lebih merata. Hasilnya, beban berlebih berhasil dikurangi dan efisiensi kerja transformator utama meningkat, memberikan manfaat bagi keandalan distribusi listrik.
4. **Menurut Yasa (2023)**, dalam penelitian "Mengatasi *Overload* Pada Transformator dengan Metode *Uprating*" menyatakan bahwa metode *uprating* dan pemasangan gardu sisip efektif untuk mengatasi permasalahan beban lebih pada transformator distribusi. Studi kasus pada gardu KRGK 0136 memperlihatkan bahwa setelah dilakukan intervensi tersebut, kenaikan beban berlebih berhasil ditekan di bawah batas 80% kapasitas trafo, sehingga meningkatkan efisiensi dan masa pakai trafo. Pendekatan ini menjadi solusi praktis mengatasi risiko kerusakan akibat *overload* pada jaringan distribusi 20 kV.
5. **Menurut penelitian dari IPM2KPE (2024)**, dengan judul "Analisis Penambahan Trafo Sisip Pada Jaringan 20 kV Dalam Meningkatkan Mutu Tegangan" menyatakan bahwa penambahan trafo sisipan pada jaringan distribusi dapat menurunkan jatuh tegangan secara signifikan, dari 32,8% menjadi sekitar 3,3%. Penurunan jatuh tegangan ini meningkatkan mutu tegangan listrik dan mengurangi potensi *overload* pada trafo utama. Dengan demikian, pemasangan trafo sisipan terbukti dapat meningkatkan keandalan dan stabilitas pasokan listrik pada jaringan distribusi tegangan menengah 20 kV.
6. **R. Prihanto (2017)**: "Analisis Dampak *Overload* pada Penyulang Distribusi Listrik dan Solusinya". Penelitian ini mengevaluasi penyebab utama *overload* pada penyulang di daerah perkotaan dan pedesaan serta mengidentifikasi solusi optimal, termasuk pemasangan trafo sisipan, untuk mengurangi risiko kelebihan beban.

Hasil Penelitian : Pemasangan trafo sisipan dapat mengurangi beban pada gardu utama dan menurunkan frekuensi pemadaman akibat *overload*.

Tabel 2. 1 Penelitian Yang Relevan

No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
1.	"Analisa Penambahan Trafo Sisip Sisi Distribusi 20 Kv Mengurangi Beban <i>Overload</i> Dan Jatuh Tegangan Pada Trafo BL 11 Rayon Tanah Jawa Dengan Simulasi Etab 12.6.0" (Harahap et al., 2019)	Beban <i>overload</i> dan jatuh tegangan pada trafo distribusi yang mengganggu stabilitas sistem.	Simulasi menggunakan perangkat lunak Etab 12.6.0 untuk analisa beban dan jatuh tegangan dengan dan tanpa trafo sisipan.	Penambahan trafo sisip mengurangi beban dari 95,99% ke 64,54% dan menaikkan tegangan di ujung jaringan dari 190,5 V jadi 206,8 V, meningkatkan keandalan jaringan.	Studi menggunakan simulasi tanpa membahas evaluasi real-time atau pengaruh jangka panjang pada keandalan sistem.
2.	"Analisis Rencana Pemasangan Transformator Distribusi Sisipan pada Jaringan Tegangan Menengah 20 kV di Penyulang Kijing" (Al-Farouq, 2021)	Beban berlebih pada trafo utama yang menurunkan kualitas tegangan dan keandalan.	Simulasi metode Newton-Raphson untuk menilai dampak trafo sisipan pada pembebanan dan tegangan.	Trafo sisipan meningkatkan kualitas tegangan dan mengurangi beban berlebih di titik kritis distribusi.	Fokus penelitian terbatas pada simulasi, belum ada implementasi lapangan dan analisa biaya.

3.	"Analisis Penambahan Transformator Sisipan Guna Mengatasi Beban Lebih (<i>Overload</i>) Pada Gardu Distribusi di PT. PLN (Persero) ULP Abepura" (Zefanya Cergio Halitopo et al., 2023)	<i>Overload</i> >80% kapasitas menyebabkan penurunan umur pakai trafo utama.	Manuver dan redistribusi beban dengan penambahan trafo sisipan pada jaringan distribusi.	Beban berlebih berhasil dikurangi sehingga umur pakai trafo dan efisiensi kerja meningkat.	Penelitian belum memasukkan aspek ekonomis dan analisa dampak terhadap keselamatan sistem.
4.	"Mengatasi <i>Overload</i> Pada Transformator dengan Metode <i>Uprating</i> " (Yasa, 2023)	Beban lebih pada trafo distribusi yang menyebabkan risiko kerusakan.	Studi kasus <i>uprating</i> dan pemasangan gardu sisip pada gardu distribusi tertentu.	Beban <i>overload</i> ditekan di bawah 80% kapasitas dan efisiensi serta masa pakai trafo meningkat.	Studi terbatas pada satu gardu, belum mengkaji skalabilitas dan reliabilitas jangka panjang.
5.	"Analisis Penambahan Trafo Sisip Pada Jaringan 20 kV Dalam Meningkatkan Mutu Tegangan" (IPM2KPE, 2024)	Jatuh tegangan tinggi di ujung jaringan menyebabkan menurunnya	Analisa teknis pengaruh trafo sisip terhadap jatuh tegangan	Jatuh tegangan menurun drastis dari 32,8% menjadi 3,3%, mutu tegangan dan keandalan	Belum mengkaji dampak pemasangan trafo sisip pada operasional

mutu tegangan dan risiko <i>overload</i> .	jaringan distribusi 20 kV.	pasokan meningkat.	dan biaya pemeliharaan
---	----------------------------------	-----------------------	---------------------------

Sesuai dengan kerangka pemikiran penulis, sebelum dimulainya analisis pemasangan transformator distribusi 20 kV sisipan pada penyulang Trans, diperlukan pengumpulan data awal kondisi transformator GD 630 BO termasuk pengukuran beban dan kondisi operasional transformator utama. Selanjutnya, data ini akan dianalisis secara kuantitatif dengan menggunakan simulasi perangkat lunak ETAP 19.0.1.0 untuk melihat kondisi pembebanan dan jatuh tegangan sebelum dan sesudah pemasangan trafo sisipan.

Setelah tahap simulasi, penulis akan menentukan letak dan jarak pemasangan trafo sisipan yang efektif berdasarkan hasil perhitungan dan studi literatur agar distribusi beban lebih merata dan risiko *overload* dapat ditekan. Selanjutnya dilakukan pemasangan trafo sisipan sesuai rencana tersebut serta dilakukan monitoring pasca-pemasangan untuk mengukur perubahan beban dan performa jaringan distribusi.

Dalam proses pemasangan dan monitoring, penulis juga mengidentifikasi kendala teknis maupun non-teknis yang muncul guna mendapatkan pemahaman penyebab hambatan dan solusi mitigasi agar pemasangan trafo sisipan dapat berjalan lancar dan efektif.

Terakhir, data hasil monitoring dan analisis digunakan untuk mengevaluasi dampak pemasangan trafo sisipan terhadap penurunan *overload*, peningkatan mutu tegangan, dan keandalan jaringan distribusi listrik di wilayah kerja PLN ULP Malili. Dengan demikian, penulis dapat memberikan rekomendasi yang komprehensif untuk pengelolaan beban trafo distribusi 20 kV pada penyulang Trans.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

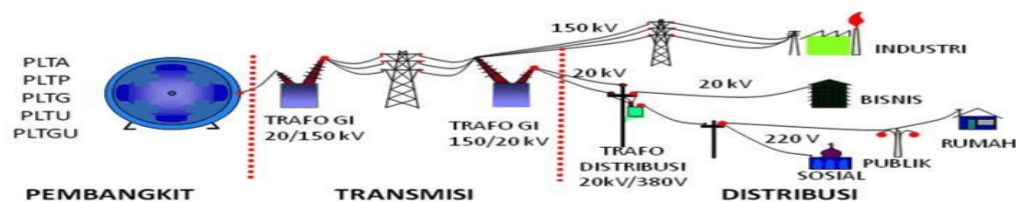
Sebagai tahap akhir dalam infrastruktur kelistrikan, sistem distribusi bertugas menyalurkan energi dari sumber daya besar (*Bulk Power Source*) hingga sampai ke tangan

konsumen. Adapun fungsi utamanya meliputi pendistribusian tenaga listrik ke berbagai lokasi pelanggan PLN dan merupakan *sub system* tenaga listrik yang langsung berhubungan secara langsung dengan pelanggan.

Gardu induk menggunakan transformator penaik tegangan untuk menaikkan tegangan listrik yang dihasilkan oleh pembangkit listrik, seperti pembangkit listrik tenaga air (PLTA), pembangkit listrik tenaga gas (PLTG), pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), pembangkit listrik tenaga angin (PLTB), pembangkit listrik tenaga gas (PLTGU), dan lainnya, dari 11 kV menjadi 24 kV, 70 kV, 154 kV, 220 kV, atau 500 kV. Listrik kemudian didistribusikan melalui saluran transmisi. Karena rugi daya berbanding lurus dengan kuadrat arus yang mengalir ($I^2 R$), tujuan menaikkan tegangan adalah untuk mengurangi rugi daya pada saluran transmisi. Peningkatan tegangan menghasilkan arus yang lebih sedikit untuk jumlah daya yang sama, yang mengurangi rugi daya.

Di gardu distribusi, transformator penurun tegangan lebih lanjut menurunkan tegangan dari saluran transmisi menjadi 20 kV. Saluran distribusi utama kemudian digunakan untuk mendistribusikan sistem tegangan ini. Gardu distribusi menurunkan tegangan dari saluran distribusi utama ke sistem tegangan rendah, khususnya 220/380 volt, menggunakan transformator distribusi. Setelah itu, konsumen (Pelanggan PLN) menerimanya melalui saluran distribusi sekunder.

Hal ini menunjukkan dengan jelas bahwa sistem distribusi merupakan bagian penting dari keseluruhan sistem tenaga listrik. Gambar 2.1 menunjukkan bagaimana jaringan distribusi tenaga listrik dikelompokkan, dibagi, dan dibatasi.

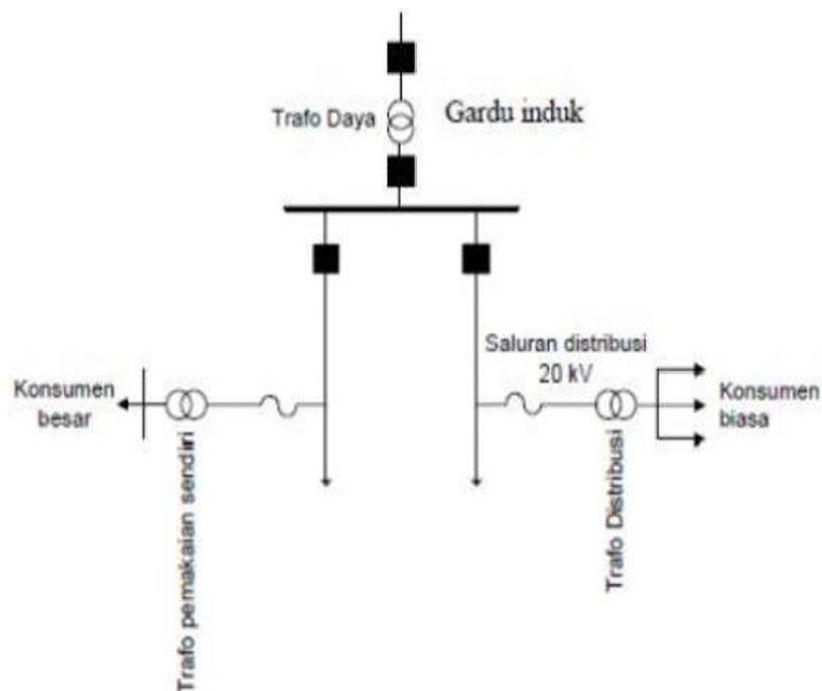


Gambar 2.1 Skema Proses Sistem Tenaga Listrik

(Sumber: <https://artema.co.id/saluran-distribusi-listrik/>)

2.2.2 Sistem Distribusi Primer

Sistem distribusi utama, yang sering disebut Sistem Jaringan Tegangan Menengah (MVSN), memiliki tegangan operasi nominal 20 kV atau 11,6 kV. Jaringan ini mendistribusikan energi listrik dari gardu induk utama ke gardu distribusi. Klasifikasi umum komponen distribusi dapat dilihat pada Gambar 2.2 yang mewakili komponen umum sistem distribusi utama.



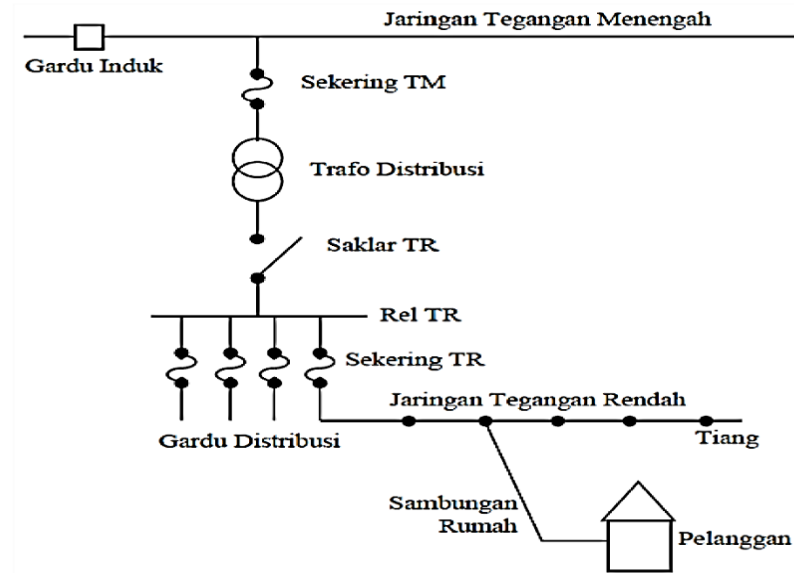
Gambar 2.2 Bagian Distribusi Primer

(Sumber: Suhadi, 2008)

2.2.3 Sistem Distribusi Sekunder

Tegangan operasi nominal sistem distribusi sekunder, yang juga dikenal sebagai Sistem Jaringan Tegangan Rendah (LVNS) adalah 220/380 volt. Pelanggan menerima energi

listrik mereka dari gardu distribusi melalui jaringan ini. Salah satu bagian dari sistem distribusi adalah sistem distribusi sekunder, seperti yang terlihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Hubungan Tegangan Menengah ke Tegangan Rendah dan Konsumen (Sumber: Suhadi, 2008)

Sistem distribusi ini merupakan komponen yang terhubung langsung dengan pelanggan karena lokasinya. Akibatnya, sistem ini berfungsi untuk mengirimkan dan mendistribusikan daya listrik kepada pelanggan setelah menerimanya dari sumber daya (transformator distribusi). Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR) adalah salah satu dari dua jenis sistem distribusi daya yang ditemukan dalam jaringan tegangan rendah. Kabel AAAC dan ACSR adalah contoh konduktor kawat telanjang (tanpa isolasi).

SKUTR adalah singkatan dari saluran udara tegangan rendah. Kabel berisolasi, seperti LVTC (*Low Voltage Twisted Cable*), adalah jenis konduktor yang digunakan. "Sambungan rumah (SR) dari kabel bawah tanah atau di atas tanah, termasuk peralatan, dari titik sambungan tiang JTR ke perangkat pembatas dan pengukur (APP)" adalah definisi sambungan JTR menurut SPLN No. 74 tahun 1987. Tegangan rendah digunakan dalam jaringan ini. Mirip dengan distribusi primer, pengaturan tegangan dan kondisi layanan harus

diperhatikan (Abdul Kadir, 2006). Sistem radial adalah bentuk saluran yang paling banyak digunakan dalam sistem distribusi sekunder.

Baik konduktor berisolasi maupun tidak berisolasi dapat digunakan dengan pengaturan ini. Sistem ini, yang terhubung langsung ke pelanggan, biasanya disebut sebagai sistem tegangan rendah.

2.2.4 Gardu Distribusi

Salah satu bagian dari sistem distribusi yang berfungsi untuk menghubungkan jaringan ke konsumen atau berbagi/mendistribusikan listrik ke beban/konsumen, termasuk konsumen tegangan menengah dan rendah, adalah gardu distribusi. Dalam pembangunan gardu distribusi, transformator distribusi digunakan untuk menaikkan tegangan listrik (*Transformer Step Up*) dan menurunkan tegangan listrik dari jaringan distribusi tegangan tinggi ke tegangan yang digunakan dalam jaringan distribusi tegangan rendah (*Transformer Step Down*). Misalnya, transformator 20 kV dapat menurunkan tegangan listrik menjadi 380 atau 220 volt. Hanya digunakan di pusat pembangkit listrik untuk mencegah penurunan tegangan pada daya yang disalurkan melalui jaringan panjang (*Long Line*), yang berarti tetap berada dalam ketentuan penurunan tegangan yang diizinkan sebesar 5% dari tegangan awal.

Fungsi gardu distribusi adalah sebagai berikut:

1. Distribusikan energi listrik dari tegangan menengah kepada konsumen tegangan rendah;
2. Menurunkan dan distribusikan energi listrik dari tegangan menengah menjadi tegangan rendah;
3. Menyalurkan dan distribusikan energi listrik tegangan menengah ke gardu distribusi lainnya atau gardu hubung.

Desain gardu distribusi didasarkan pada optimasi biaya untuk penggunaan yang dimaksudkan, yang terkadang perlu dimodifikasi untuk mematuhi pembatasan pemerintah setempat. Komponen gardu distribusi meliputi:

1. PHB (Panel Hubung Bagi) sisi tegangan rendah;
2. PHB (Panel Hubung Bagi) pemisah saklar daya;
3. PHB (Panel Hubung Bagi) pengaman transformator;
4. PHB (Panel Hubung Bagi) sisi tegangan rendah;
5. Sistem pengaman tegangan rendah;
6. Sistem pembumian / pentanahan;
7. Alat-alat indikator.

Instalasi peralatan panel hubung bagitegangan rendah berupa PHB TR atau rak TR terdiri atas 3 bagian, yaitu:

1. Sirkit Masuk dan Saklar;
2. Rel Pembagi;
3. Sirkit Keluar dan Sistem Pengaman Lebur Maksimal 8 Sirkit.

Kapasitas transformator distribusi yang digunakan menentukan spesifikasi. Pemasangan kabel daya dan kontrol mensyaratkan bahwa KHA (*Karakteristic Happensity*) kabel daya antara transformator dan kubikel minimal 125% dari arus beban nominal transformator.

Secara garis besar gardu distribusi dibedakan menjadi:

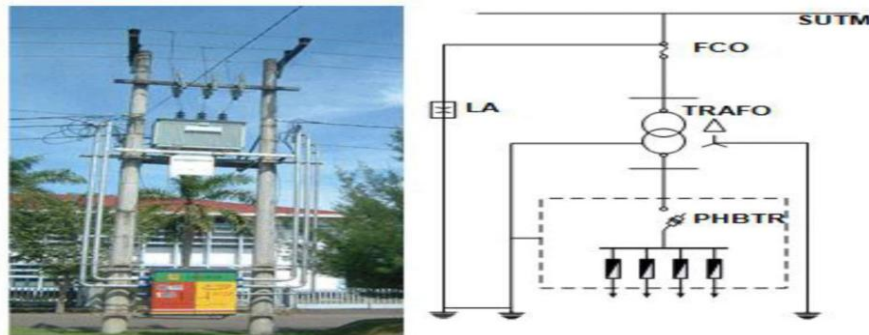
- a) Jenis Pemasangannya:
 - i. Gardu pasangan luar: (Gardu Portal, Gardu Cantol)
 - ii. Gardu pasangan dalam: (Gardu Beton, Gardu Kios)
- b) Jenis Konstruksinya:
 - i. Gardu Beton (bangunan sipil: batu, beton)
 - ii. Gardu Tiang: (Gardu Portal dan Gardu Cantol)
 - iii. Gardu kios.
- c) Jenis Penggunaanya:

- i. Gardu Pelanggan Umum
- ii. Gardu Pelanggan Khusus.

Gardu distribusi yang mungkin memiliki atau tidak memiliki RTU (*Remote Terminal Unit*), secara khusus didefinisikan sebagai gardu yang dirancang untuk memudahkan perpindahan beban dari satu saluran ke saluran lainnya. Pasokan DC dari transformator distribusi untuk penggunaan pribadi atau transformator distribusi untuk penggunaan umum yang ditempatkan dalam satu unit biasanya dipasang di fasilitas ini. Terdapat dua kategori jenis konstruksi gardu tiang, yaitu:

2.2.4.1 Gardu Portal

Gardu dsitribusi portal adalah gardu distribusi tipe terbuka yang menggunakan struktur dua kutub atau lebih. Transformator ditempatkan setidaknya tiga meter di atas tanah. Panel distribusi tegangan rendah yang juga dikenal sebagai PHB (Panel Hubung Bagi) -TR terletak di bawah transformator distribusi yang dipasang di atasnya.



Gambar 2.4 Gardu Tiang dan Bagan Satu Garis
Sumber: A. Rizal Oky Bachtiar (2010:2)

Ilustrasi gardu induk portal dua kutub ditunjukkan pada Gambar 2.4 di atas. Konfigurasi pensaklaran atau proteksi yang sudah terintegrasi secara kompak sebagai RMU (*Ring Main Unit*) digunakan untuk mengatasi faktor ukuran pembatas Gardu Distribusi Portal. Peralatan pensaklaran masuk dan keluar adalah sakelar pemutus beban juga dikenal sebagai pemutus beban otomatis (PBO), sakelar pemutus beban (LBS) atau pemutus sirkuit

(CB) yang dioperasikan secara manual atau dengan bantuan kendali jarak jauh. Untuk mempercepat pensinyalan jaringan yang tidak mengalami interferensi indikator Gangguan dalam contoh ini yaitu detektor gangguan yang dipasang di tiang, atau PMFD harus dipasang pada jaringan dan bagian cabang.

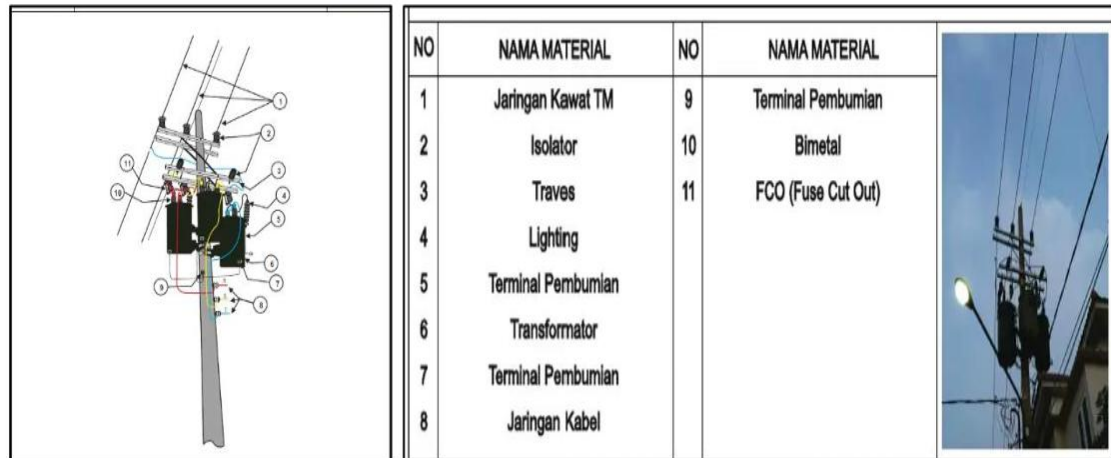
Berikut merupakan bagian dari gardu portal yaitu:

1. Peralatan hubung:
 - *Fuse Cut Out* 20 kV
 - Saklar pada rak TR
2. Peralatan proteksi:
 - *Fuse Cut Out* 20 kV
 - *Lightning Arrester* - NH Fuse
3. Kabel / penghantar:
 - Kawat penghubung dari jaring ke *Fuse Cut Out*
 - Kawat penghubung dari *Fuse Cut Out* ke transformator
 - Kabel penghubung dari transformator ke rak TR
 - Kabel keluar
4. Pentanahan:
 - Pentanahan Kerangka / Body Peralatan
 - Pentanahan netral sisi tegangan rendah transformator
 - Pentanahan *arrester*

2.2.4.2 Gardu Cantol

Transformator yang terpasang di gardu distribusi tipe cantol adalah transformator Fase 3 atau Fase 1 dengan daya kurang dari atau sama dengan 100 kVA. Transformator yang terpasang adalah tipe CSP (*Completely Self Protected Transformer*), artinya tangki transformator menampung semua komponen proteksi dan sakelar. Badan transformator langsung terhubung ke konduktor pentanahan peralatan tambahan apa pun, seperti penangkal petir (LA) yang ditempatkan secara terpisah. Dengan sakelar pemutus di sisi masuk dan

sekring (NH, NT Fuse) sebagai jalur pengaman peralatan koneksi tegangan rendah hanya dapat masuk melalui dua jalur.



Gambar 2.5 Gardu Cantol 3 Fasa 1 Tiang

Sumber: <https://www.scribd.com/document/395591510/Kelompok-2-Gardu-Cantol-3-Phasa-1-Tiang>

Ilustrasi konstruksi gardu distribusi tiga fasa satu kutub dapat dilihat pada Gambar 2.5 di atas. Setiap panel distribusi (PHB-TR) dan transformator distribusi dipasang pada tiang yang sama. Kabinet panel/PHB-TR ditempatkan di bagian bawah sedangkan transformator distribusi ditempatkan di bagian atas.

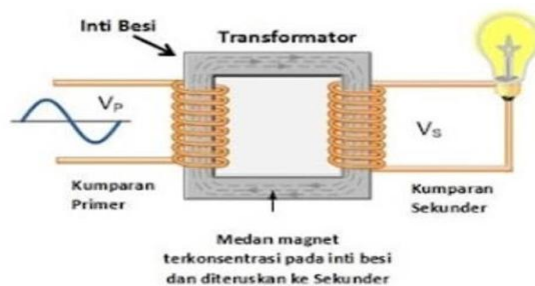
2.1.5 Transformator

Dalam sistem kelistrikan, transformer atau yang lazim dikenal dengan sebutan trafo merupakan komponen vital yang beroperasi mengandalkan prinsip induksi elektromagnetik. Fungsi pokok dari peralatan ini adalah untuk mentransformasikan nilai tegangan arus bolak-balik (AC) dari satu level ke level lainnya, baik untuk menaikkan (*step-up*) maupun menurunkan (*step-down*) tegangan, dengan tetap mempertahankan nilai frekuensi awalnya. Selain fungsi utama tersebut, trafo juga dimanfaatkan untuk keperluan sampling tegangan maupun arus, serta transformasi impedansi.

Secara fisik, trafo tersusun atas dua kumparan atau lebih yang meliliti inti berbahan besi feromagnetik. Secara elektris, kumparan-kumparan ini terisolasi satu sama lain dan tidak memiliki hubungan kontak langsung. Kumparan yang terhubung langsung ke sumber tegangan AC dinamakan lilitan primer, sedangkan kumparan yang menyuplai daya ke beban disebut lilitan sekunder. Apabila terdapat kumparan tambahan di luar kedua lilitan tersebut, maka disebut sebagai lilitan tersier atau kuarter.

Mekanisme kerja trafo dimulai ketika lilitan primer dialiri arus AC, yang kemudian menghasilkan perubahan medan magnet di sekitarnya. Perubahan ini diperkuat oleh inti besi yang berfungsi sebagai jalur fluks magnetik menuju lilitan sekunder, sehingga membangkitkan Gaya Gerak Listrik (GGL) induksi pada ujung-ujung kumparan sekunder. Fenomena keterkaitan medan magnet antar kumparan ini dikenal sebagai induktansi timbal-balik (*mutual inductance*). Jika rangkaian sekunder ditutup (menghubungkan beban), maka arus akan mengalir pada kumparan sekunder. Pada kondisi efisiensi ideal (100%), seluruh daya yang masuk ke lilitan primer akan diteruskan sepenuhnya ke lilitan sekunder.

Jika ditinjau dari struktur utamanya, trafo memiliki tiga elemen penyusun dasar, yakni lilitan primer, lilitan sekunder, dan inti besi. Lilitan primer berperan sebagai sisi masuk yang terhubung dengan sumber daya (catu daya), sementara lilitan sekunder berfungsi sebagai sisi keluar yang terhubung ke rangkaian beban. Adapun inti besi bertugas memandu fluks magnet yang dihasilkan primer agar dapat menginduksi lilitan sekunder secara efektif, sebagaimana ilustrasi pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Lilitan Primer dan Sekunder Transformator

Sumber: <https://www.elektronikahendry.com/2021/06/transformator.html>

Merujuk pada Gambar 2.6, konstruksi dasar transformator dibangun dari dua gulungan kawat terisolasi yang disebut sebagai lilitan primer dan sekunder. Umumnya, kedua lilitan tersebut ditempatkan mengelilingi bahan feromagnetik yang dikenal sebagai Inti Besi atau *Core*. Prinsip kerjanya dimulai saat lilitan primer dialiri arus bolak-balik (AC), yang kemudian membangkitkan medan magnet atau fluks magnetik di sekelilingnya. Besarnya densitas fluks magnet ini berbanding lurus dengan nilai arus yang mengalir; artinya, arus yang lebih tinggi akan menghasilkan medan magnet yang lebih kuat. Perubahan fluks magnet yang terjadi pada lilitan primer tersebut akan menginduksi Gaya Gerak Listrik (GGL) pada lilitan sekunder, sehingga memungkinkan terjadinya transfer daya dari sisi primer ke sisi sekunder. Akibat proses induksi ini, transformator mampu mengubah level tegangan listrik, baik untuk menaikkan tegangan (*step-up*) maupun menurunkannya (*step-down*)

Berikut ini bagian utama transformator:

1. **Inti Besi (Core)**

Inti besi berfungsi sebagai sirkuit elektromagnetik yang menjadi jalur utama bagi fluks magnetik. Fluks ini timbul akibat induksi dari arus bolak-balik yang mengalir pada belitan yang melingkupi inti tersebut, yang kemudian menginduksi tegangan pada belitan lainnya. Secara konstruksi, inti ini dibuat dari susunan laminasi baja silikon tipis yang saling terisolasi satu sama lain untuk meminimalkan arus.

2. **Belitan Transformator (Windings)**

Belitan transformator merupakan kumpulan gulungan kawat berisolasi yang membentuk sirkuit listrik. Sistem ini terbagi menjadi belitan primer dan sekunder, dimana keduanya memiliki isolasi yang kuat baik terhadap inti besi maupun antar belitan itu sendiri menggunakan bahan isolasi padat seperti kertas karton atau pertinax. Komponen ini berperan utama dalam proses transformasi nilai tegangan dan arus listrik.

3. **Minyak Transformator (Transformer Oil)**

Pada operasional transformator, energi panas dihasilkan secara aktif oleh dua komponen utama, yakni rugi-rugi pada inti besi dan rugi-rugi tembaga pada kumparan. Apabila panas ini tidak didispersikan melalui sistem pendingin yang memadai, suhu komponen akan meningkat drastis dan berpotensi merusak material isolasi. Oleh karena itu, inti dan kumparan direndam dalam minyak khusus yang disebut minyak transformator. Fluida ini memiliki fungsi ganda sebagai media isolasi elektrik dan pendingin. Sifat isolasinya memungkinkan desain transformator menjadi lebih kompak. Kualitas minyak harus senantiasa terjaga kebersihannya. Kenaikan suhu operasi akibat panas dari inti dan kumparan akan menyebabkan perubahan karakteristik pada minyak isolasi tersebut.

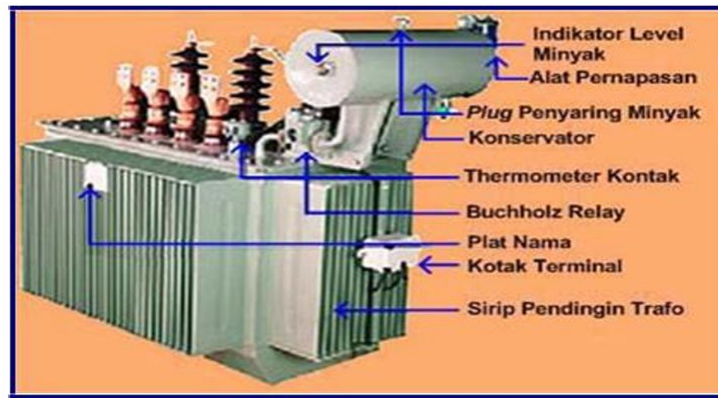
4. **Bushing**

Bushing adalah komponen terminal yang terletak pada bagian eksternal tangki transformator. Fungsi utamanya adalah sebagai titik hubung antara belitan di dalam tangki dengan jaringan listrik di luar. Secara fisik, bushing tersusun atas konduktor yang terhubung ke belitan internal, yang kemudian dibalut oleh material isolator. Material isolator ini bertugas mencegah kontak listrik antara konduktor bushing dengan dinding tangki utama. Secara umum, konstruksi bushing mencakup empat elemen pokok, yaitu konduktor, bahan isolator, klem penghubung, serta aksesoris pendukung.

5. **Tangki Konservator (Conservator Tank)**

Komponen ini berfungsi sebagai ruang cadangan untuk mengakomodasi perubahan volume minyak isolasi akibat siklus suhu operasi. Ketika suhu transformator naik, minyak akan memuai dan volumenya bertambah, sebaliknya saat suhu turun, minyak akan menyusut. Konservator menampung kelebihan volume minyak saat pemuai terjadi. Perubahan volume minyak ini juga mempengaruhi volume udara di dalam tangki konservator. Agar udara yang masuk dan keluar tidak membawa kelembaban atau oksigen yang dapat mendegradasi kualitas minyak, udara tersebut disaring menggunakan *silica gel*. Pada desain modern, digunakan membran karet (*breather*

bag) di dalam konservator untuk mencegah kontak langsung antara minyak isolasi dengan udara atmosfer luar.



Gambar 2.7 Transformator 3 Fasa

Sumber: <https://www.bloganton.web.id/2013/10/transformator-tiga-fasa-dan-bagian.html>

Gambar 2.7 diatas merupakan contoh transformator 3 fasa dan bagian-bagian nya. Transformator 3 fasa merupakan perangkat kelistrikan yang beroperasi untuk mengubah nilai tegangan pada sistem arus tiga fasa. Peralatan ini umumnya diaplikasikan dalam proses pembangkitan hingga distribusi tenaga listrik agar sesuai dengan kebutuhan beban daya. Ditinjau dari konstruksinya, transformator ini memiliki tiga set belitan yang menyatukan kumparan sisi primer dan sekunder menjadi satu kesatuan unit, yang dapat dirangkai menggunakan konfigurasi hubungan bintang (*star*) maupun *delta*.

Hubungan langsung antara jumlah belitan dan tegangan antara sisi primer terhadap sekunder dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \alpha \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana:

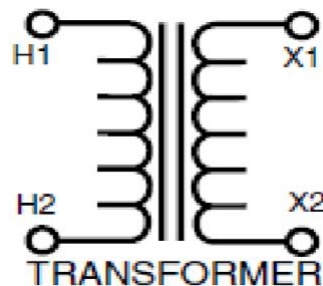
V_p = Tegangan Primer

V_s = Tegangan Sekunder

N_p = Jumlah Lilitan Primer

N_s = Jumlah Lilitan Sekunder

Pada step-up transformer nilai perbandingan $a < 1$, sebaliknya *step-down transformer* nilai perbandingan $a > 1$. Notasi standar untuk indikasi sisi belitan yang lebih tinggi adalah “H” dengan terminasi H1 dan H2. Belitan tegangan lebih rendah dinotasikan “X” dengan terminasi X1 dan X2. Sumber tegangan dapat dihubungkan ke dua sisi transformator, tergantung kebutuhan apakah digunakan sebagai *step-up transformer* atau *step-down transformer*.



Gambar 2.8 Notasi Terminasi pada Transformator

(jobsheet praktikum winding trafo laboratorium power system PNUP)

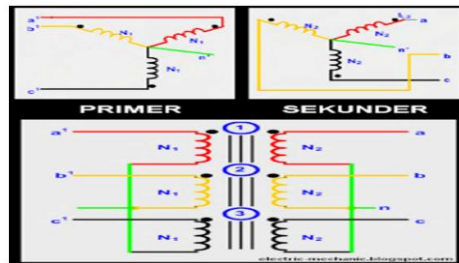
Untuk transformator fase tiga, merujuk pada SPLN, ada tiga tipe vektor grup yang digunakan oleh PLN yang terdapat pada Tabel 2.2, yaitu *Yzn5*, *Dyn5* dan *Ynyn0*. Titik netral dihubungkan dengan tanah. Untuk konstruksi, peralatan transformator distribusi sepenuhnya harus merujuk pada SPLN D3.002-1: 2007.

Tabel 2. 2 Vektor Group dan Daya Transformator

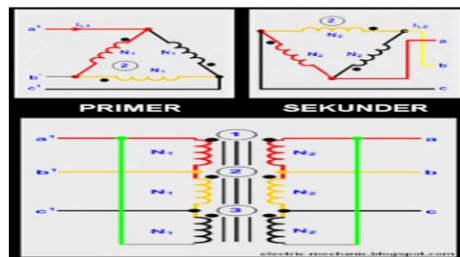
No	Vektor Grup	Daya (kVA)	Keterangan
1	Yzn5	50	Untuk sistem 3 kawat
		100	
		169	
2	Dyn5	200	Untuk sistem 3 kawat

		250	
		315	
		400	
		500	
		630	
		50	
		100	
		160	
		200	
3	Ynyn0	250	Untuk sistem 4 kawat
		315	
		400	
		500	
		630	

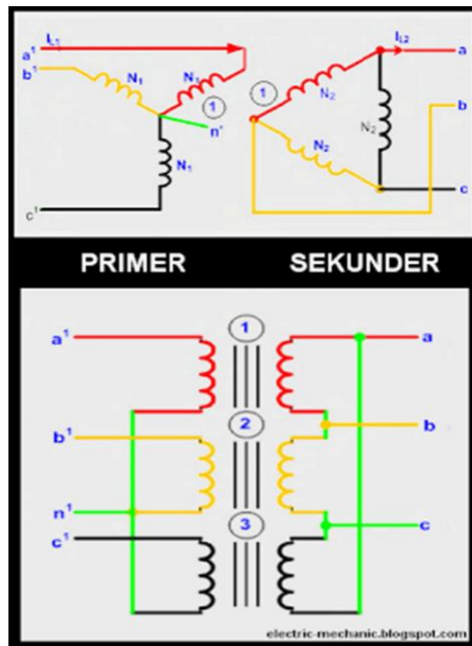
2.2.5.1 Hubungan Belitan Transformator 3 Fasa



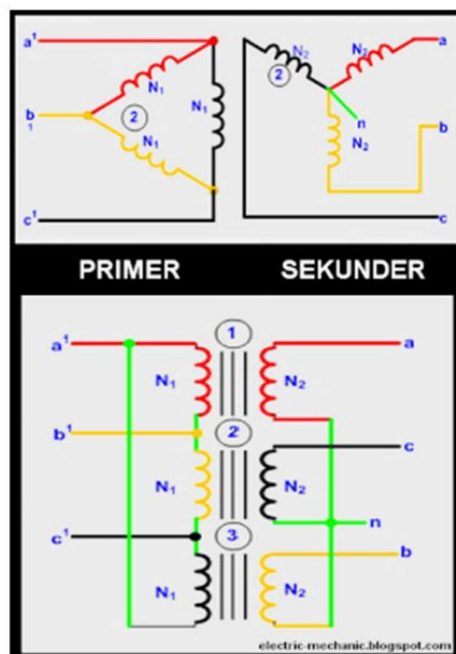
Gambar 2.9 Hubungan (Y - Y)



Gambar 2.10 Hubungan (Δ - Δ)



Gambar 2.11 Hubungan (Y - Δ)



Gambar 2.12 Hubungan (Δ - Y)

Sumber:

<https://ejournal.unsrat.ac.id/v3/index.php/elekdankom/article/view/24895/24600>

1. Hubungan Bintang – Bintang (Y – Y)

Pada konfigurasi ini, ujung terminal dari masing-masing fase dihubungkan membentuk titik bintang, dimana seluruh titik netral digabungkan menjadi satu titik umum. Skema hubungan Y-Y ini dinilai lebih efisien dari segi biaya konstruksi dan sangat sesuai untuk aplikasi transformator tegangan tinggi yang membutuhkan arus nominal relatif kecil. Ilustrasi rangkaian hubungan bintang-bintang dapat diamati pada Gambar 2.9.

2. Hubungan Segitiga – Segitiga (Δ – Δ)

Jenis hubungan ini terbentuk ketika ujung fase dikoneksikan langsung dengan ujung netral kumparan lainnya, sehingga membentuk konfigurasi delta secara keseluruhan. Konfigurasi Δ - Δ umumnya diaplikasikan pada sistem distribusi yang menyalurkan arus besar dengan tingkat tegangan rendah. Keunggulan utama dari skema ini adalah keandalan kontinuitas layanan yang tetap terjaga meskipun terjadi gangguan atau kegagalan pada salah satu fasanya. Referensi gambar untuk hubungan segitiga-segitiga tersedia pada Gambar 2.10.

3. Hubungan Bintang – Segitiga (Y – Δ)

Pada skema ini, sisi primer transformator disusun menggunakan rangkaian bintang (wye), sedangkan sisi sekunder menggunakan rangkaian delta. Konfigurasi ini lazim digunakan pada transformator *step-down* di jaringan transmisi untuk menurunkan tingkat tegangan. Secara teknis, rasio tegangan saluran (jala-jala) memiliki faktor $\sqrt{3}$ terhadap perbandingan lilitan transformator, dengan karakteristik fasor tegangan sekunder yang tertinggal sebesar 30 derajat terhadap tegangan primer. Visualisasi rangkaian ini dapat dilihat pada Gambar 2.11.

4. Hubungan Segitiga – Bintang (Δ – Y)

Kebalikan dari konfigurasi sebelumnya, hubungan ini menerapkan rangkaian delta pada sisi primer dan rangkaian bintang pada sisi sekunder, yang memungkinkan tersedianya titik netral pada sisi keluaran. Tipe hubungan ini biasanya dimanfaatkan untuk transformator *step-up* pada awal sistem transmisi tegangan tinggi. Dalam skema Δ -Y, tegangan sekunder memiliki karakteristik mendahului tegangan primer

sebesar 30 derajat, dengan perbandingan tegangan yang dipengaruhi oleh faktor $\sqrt{3}$ terhadap perbandingan lilitan. Gambar ilustrasi untuk hubungan segitiga-bintang disajikan pada Gambar 2.12.

2.2.5.2 Perhitungan Arus Beban Penuh Transformator

Daya transformator bila ditinjau dari sisi tegangan tinggi (primer) dapat diketahui dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana:

S = Daya Transformator (kVA)

V= Tegangan Transformator (V)

I = Arus (A)

Sehingga untuk menghitung arus beban penuh (I_{FL}) dapat menggunakan persamaan:

$$I_{FL} = \frac{S}{V \times \sqrt{3}} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana:

I_{FL} = Arus Beban Penuh (A)

S = Daya Transformator (kVA)

V = Tegangan di sisi sekunder transformator (V)

Menurut **Frank D. Petruzella**, dalam menghitung persentase pembebanan suatu transformator dapat diketahui dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\% \text{Beban} = I_{Rata-rata} / I_{FL} \times 100\% \dots\dots\dots (2.4)$$

Rumus untuk menghitung rata-rata arus beban $I_{Rata-rata}$ yaitu:

$$I_{Rata-rata} = (I_R + I_S + I_T) / 3 \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana:

$I_{Rata-rata}$ = Rata – rata arus beban (A)

I_{FL} = Arus beban penuh (A)

I_R = Arus fasa R (A)

I_S = Arus fasa S (A)

I_T = Arus fasa T (A)

2.2.5.3 Overload Transformator

Berdasarkan standar operasional PT PLN (Persero), beban kerja pada transformator distribusi idealnya dijaga agar tidak melebihi 80% kapasitas untuk menghindari kategori *overload*, serta tidak kurang dari 40% untuk mencegah *underload*. Kondisi di luar rentang batas tersebut mengindikasikan adanya ketidaknormalan pembebanan. Dusahakan agar transformator tidak dibebani keluar dari *range* tersebut. Bila beban transformator terlalu besar maka dilakukan penggantian transformator yang lebih besar kapasitasnya (manajemen transformator) atau penyisipan transformator atau mutasi transformator. *Overload* akan menyebabkan transformator menjadi panas dan kawat tidak sanggup lagi menahan beban, sehingga timbul panas yang menyebabkan naiknya suhu lilitan tersebut. Kenaikan ini menyebabkan rusaknya isolasi lilitan pada kumparan transformator.

2.2.5.4 Pembebanan Transformator

Dalam sistem ketenagalistrikan, beban dapat diartikan sebagai rangkaian akhir yang mengonsumsi daya dari sumber listrik untuk dikonversi menjadi bentuk energi lain, misalnya energi cahaya, panas, gerak, maupun magnetik. Sehubungan dengan hal tersebut, kontinuitas pelayanan pada beban menjadi faktor kunci dalam menjaga reliabilitas sistem tenaga listrik. Untuk mewujudkan kondisi sistem yang andal, infrastruktur tenaga listrik wajib mampu

menanggulangi berbagai gangguan yang muncul tanpa menyebabkan terjadinya pemadaman atau interupsi pada sisi beban

2.1.6 Tahanan

Dalam sistem penyaluran tenaga listrik pada jaringan distribusi primer, kinerja saluran sangat ditentukan oleh tiga parameter utama, yaitu resistansi (R), induktansi (L), dan kapasitansi (C). Keberadaan ketiga parameter ini berkontribusi terhadap fenomena jatuh tegangan (*voltage drop*) serta rugi-rugi daya (*power loss*) sepanjang jalur distribusi. Namun, untuk analisis pada saluran dengan jarak pendek, pengaruh parameter kapasitansi umumnya dapat diabaikan karena nilainya yang relatif kecil terhadap parameter lainnya.

Nilai ρ merepresentasikan hambatan jenis (*resistivity*) dari material penghantar yang digunakan. Sebagai acuan, konduktor berbahan aluminium memiliki nilai resistivitas sebesar $28,25 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$. Besaran tahanan total suatu penghantar atau saluran dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$R = \rho \frac{l}{A} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana:

R = Tahanan (Ohm)

L = Panjang penghantar

ρ = Koefisien jenis penghantar

A = Luas penampang pengantar (mm^2)

2.2.7 Transformator Sisipan

Kebutuhan akan transformator sisipan muncul akibat banyaknya transformator distribusi yang beroperasi dalam kondisi ketidakseimbangan beban (*over phase*) maupun beban lebih (*overload*). Kondisi tersebut mengakibatkan umur pakai transformator menjadi tidak optimal sehingga sering terjadi interupsi pasokan listrik karena kerusakan peralatan sebelum mencapai usia teknis yang diharapkan. Langkah mitigasi yang dapat diterapkan adalah dengan menginstalasikan transformator sisipan pada gardu distribusi yang mengalami *overload*. Esensi dari metode ini adalah mengurangi beban pada transformator eksisting

dengan cara mendistribusikan ulang sebagian beban ke transformator sisipan. Di samping itu, penentuan lokasi penempatan transformator sisipan harus melalui perhitungan yang teliti untuk mendapatkan posisi yang ideal, sehingga dapat berfungsi efektif dalam memperbaiki kualitas tegangan di ujung jaringan distribusi.

Berikut ini merupakan komponen utama gardu distribusi sisipan, yakni :

2.2.7.1 Komponen Utama Gardu Distribusi Sisipan

Komponen utama Gardu Distribusi Sisipan adalah sebagai berikut:

1. **Transformator Daya** Komponen ini berperan utama dalam melakukan konversi tegangan dari sisi menengah sebesar 20 kV menjadi tegangan rendah 380/400 Volt agar layak didistribusikan ke pelanggan.
2. **Fuse Cut Out (FCO)** Sebagai alat proteksi pada sisi tegangan menengah 20 kV, FCO bertugas mengisolasi gangguan yang terjadi pada area gardu atau transformator. Dengan demikian, kerusakan pada peralatan dapat dicegah dan gangguan tidak menyebar ke jaringan penyulang.
3. **Arrester** Proteksi terhadap risiko tegangan lebih transient diwujudkan melalui pemasangan Arrester. Komponen ini melindungi isolasi transformator dari dampak sambaran petir maupun operasi switching sesuai dengan standar SPLN se.002/PST/73.
4. **NH Fuse** Pada sisi tegangan rendah 220 Volt, pengamanan terhadap arus lebih diberikan oleh NH Fuse. Fungsinya adalah melindungi transformator dari kondisi tidak normal seperti hubung singkat pada jaringan tegangan rendah maupun akibat beban lebih.
5. **Grounding Arrester** Sistem pentanahan pada Arrester dirancang untuk menyalurkan arus gangguan ke tanah. Hal ini terjadi ketika terdapat tegangan lebih yang diakibatkan oleh induksi petir atau proses switching pada jaringan.

6. **Grounding Transformator** Pentanahan pada badan transformator bertujuan untuk menstabilkan tegangan sistem. Ini mencegah munculnya tegangan lebih pada fasa yang sehat saat terjadi gangguan satu fasa ke tanah atau kondisi pembebanan yang tidak seimbang.
7. **Grounding LV Panel** Terakhir, panel tegangan rendah (LV Panel) juga memerlukan sistem grounding yang memadai. Fungsinya sebagai proteksi keselamatan apabila terjadi arus bocor yang mengalir pada badan panel.

2.2.7.2 Perhitungan Letak Penempatan Transformator Sisipan

Apabila jarak antara transformator dengan titik beban yang disuplai terlalu panjang, hal ini akan berpotensi menimbulkan jatuh tegangan (*voltage drop*) yang cukup besar pada jaringan. Mengingat dampak tersebut, maka pada saat melakukan pendataan kapasitas kVA, parameter jarak maksimum dari transformator distribusi menuju konsumen harus menjadi pertimbangan utama. Berikut merupakan metode perhitungan untuk menentukan lokasi penempatan transformator sisipan berdasarkan jarak ideal dari transformator distribusi *existing* yaitu:

$$L = \frac{10\% \times vivc}{i \text{ beban puncak} \times R \text{ saluran}} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana:

L = Jarak Penempatan Ideal (KM)

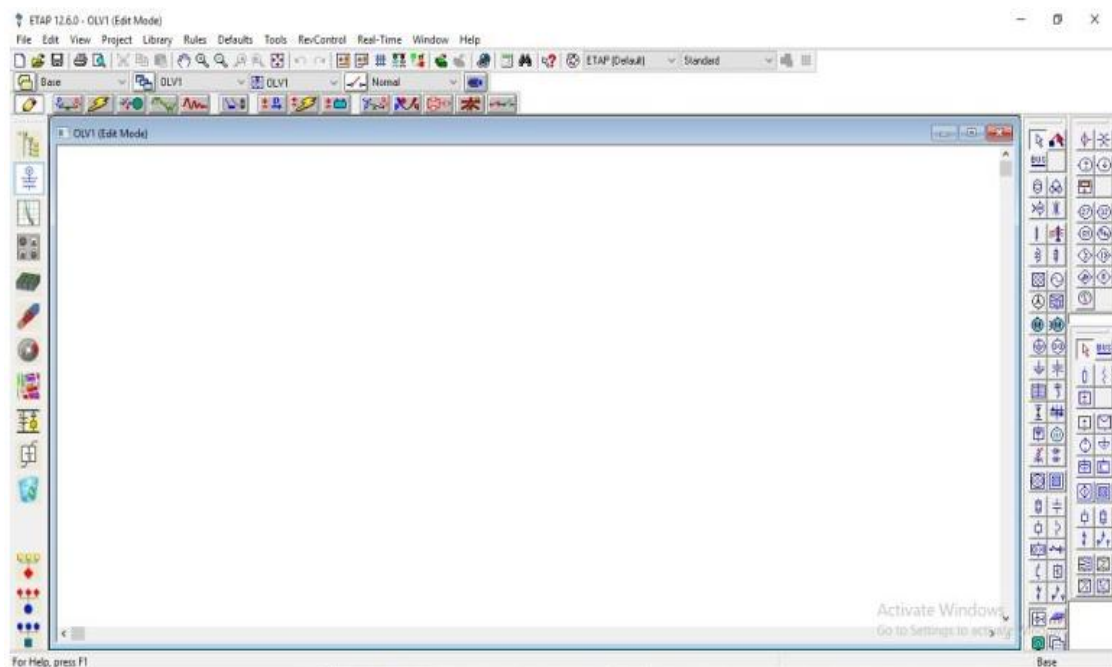
$vivc$ = Voltage *Inverse Voltage Control* (biasanya 10% dari tegangan nominal, nilai ini bisa bervariasi tergantung standar PLN setempat).

$i \text{ beban puncak}$ = Arus beban puncak yang terukur pada jaringan.

$R \text{ saluran}$ = Resistansi saluran (kabel atau kawat udara) per kilometer.

2.2.8 ETAP 19.0.1.0

ETAP Power Station adalah perangkat lunak yang cukup populer dimanfaatkan untuk keperluan simulasi sistem tenaga listrik. Secara fungsional, aplikasi ini mendukung proses perancangan serta analisis teknis jaringan ketenagalistrikan yang mencakup beberapa fitur utama, yaitu: pembuatan peta sebaran beban, manajemen data jaringan dan pembebanan, penyusunan diagram satu garis (*One Line Diagram*), studi aliran daya (*Load Flow Analysis*), perhitungan arus gangguan hubung singkat (*Short Circuit*), serta analisis pengasutan motor (*Motor Starting*) dan kondisi transien. Dalam lingkungan kerja (*worksheet*) program, setiap elemen sistem tenaga listrik direpresentasikan menggunakan simbol-simbol khusus. Parameter spesifikasi pada setiap komponen bersifat fleksibel, sehingga dapat disesuaikan dengan kondisi aktual di lapangan atau memilih spesifikasi berdasarkan data umum yang tersedia dalam pustaka (*library*) perangkat lunak. Tampilan antarmuka dari perangkat lunak ETAP Power Station dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 ETAP

Sumber: Dokumentasi Pribadi, Oktober 2025