

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi merupakan salah satu bagian penting dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari sumber tenaga listrik berkapasitas besar (bulk power source) hingga sampai ke konsumen akhir[2]. Dengan demikian, sistem distribusi memiliki dua fungsi utama, yaitu:

1. Membagi dan menyalurkan tenaga listrik ke berbagai lokasi atau pelanggan sesuai kebutuhan, dan
2. Menjadi subsistem tenaga listrik yang berhubungan langsung dengan konsumen, karena suplai energi pada pusat-pusat beban dilayani secara langsung melalui jaringan distribusi.

Secara umum, alur penyaluran tenaga listrik dimulai dari pembangkit, di mana energi listrik dihasilkan pada tegangan menengah sekitar 11 kV hingga 24 kV. Tegangan ini kemudian dinaikkan di gardu induk melalui transformator penaik menjadi tegangan transmisi, misalnya 70 kV, 150 kV, 220 kV, hingga 500 kV. Proses peningkatan tegangan bertujuan untuk mengurangi rugi-rugi daya pada saluran transmisi, karena besarnya rugi-rugi daya sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir ($I^2 \cdot R$) [4].

Setelah melalui jaringan transmisi, tegangan diturunkan kembali menjadi 20 kV menggunakan transformator penurun di gardu induk distribusi. Tegangan 20 kV ini disalurkan melalui saluran distribusi primer hingga ke lokasi beban. Dari saluran distribusi primer, gardu distribusi mengambil energi listrik untuk diturunkan tegangannya menjadi tegangan rendah 220/380 V dengan transformator distribusi. Selanjutnya, energi listrik tersebut disalurkan ke

konsumen melalui saluran distribusi sekunder. Dengan mekanisme ini, sistem distribusi berperan sebagai penghubung terakhir antara sistem tenaga listrik dengan konsumen. Oleh karena itu, kualitas dan keandalan sistem distribusi sangat menentukan mutu pelayanan energi listrik secara keseluruhan.

2.1.2 Jaringan Sistem Distribusi

Secara umum, jaringan distribusi tenaga listrik terbagi menjadi dua bagian utama yang saling berkaitan dalam menyalurkan energi dari sumber hingga sampai ke konsumen. Kedua bagian tersebut adalah:

1. Jaringan Distribusi Primer

Jaringan distribusi primer merupakan sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan daya dari gardu induk atau gardu transmisi menuju gardu distribusi. Tegangan standar yang digunakan pada jaringan ini, sesuai ketentuan PLN, biasanya berada pada level 6 kV, 10 kV, atau 20 kV, dan umumnya menggunakan sistem tiga fasa. Peran jaringan distribusi primer tidak hanya sekedar mengalirkan energi listrik, tetapi juga menjangkau daerah-daerah asuhan yang cukup luas hingga menuju gardu distribusi atau transformator distribusi. Jaringan ini dapat dilayani langsung oleh gardu induk, gardu hubung, maupun pusat pembangkit. Dengan kata lain, distribusi primer merupakan penghubung utama antara sistem transmisi dengan sistem distribusi sekunder.

2. Jaringan Distribusi Sekunder

Jaringan distribusi sekunder dimulai dari keluaran gardu distribusi hingga sampai ke pemakai akhir atau konsumen. Bagian ini memiliki peran yang sangat vital karena langsung berhubungan dengan pelanggan. Fungsi utamanya adalah menerima daya listrik dari transformator distribusi, kemudian menyalurkan serta membagikannya ke rumah tangga, perkantoran, fasilitas umum, maupun industri kecil. Mengingat jaringan sekunder merupakan jalur terakhir sebelum energi listrik digunakan konsumen, maka kualitas tegangan, kontinuitas suplai, dan keandalan harus benar-benar diperhatikan. Hal ini penting agar pelanggan dapat

menerima energi listrik dengan mutu yang sesuai standar, baik dari sisi tegangan, frekuensi, maupun kontinuitas pasokan.

Untuk mempermudah pemahaman alur penyaluran tenaga listrik dari sumber hingga ke konsumen, sistem tenaga listrik biasanya dibagi ke dalam beberapa daerah atau tahapan. Pembagian ini juga sekaligus menjadi batasan agar setiap bagian sistem dapat lebih mudah dianalisis sesuai fungsi dan karakteristiknya. Adapun pembagian tersebut adalah sebagai berikut :

1. Daerah I – Bagian Pembangkitan (Generation).

Merupakan tahap awal di mana energi listrik dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik, baik dari sumber energi fosil, air, panas bumi, maupun energi terbarukan lainnya.

2. Daerah II – Bagian Penyaluran (Transmission).

Energi listrik yang dihasilkan pembangkit kemudian disalurkan melalui jaringan transmisi dengan tegangan tinggi, misalnya 70 kV, 150 kV, 220 kV, hingga 500 kV. Tujuan utama penggunaan tegangan tinggi pada transmisi adalah untuk mengurangi rugi-rugi daya sepanjang saluran dan meningkatkan efisiensi penyaluran energi jarak jauh.

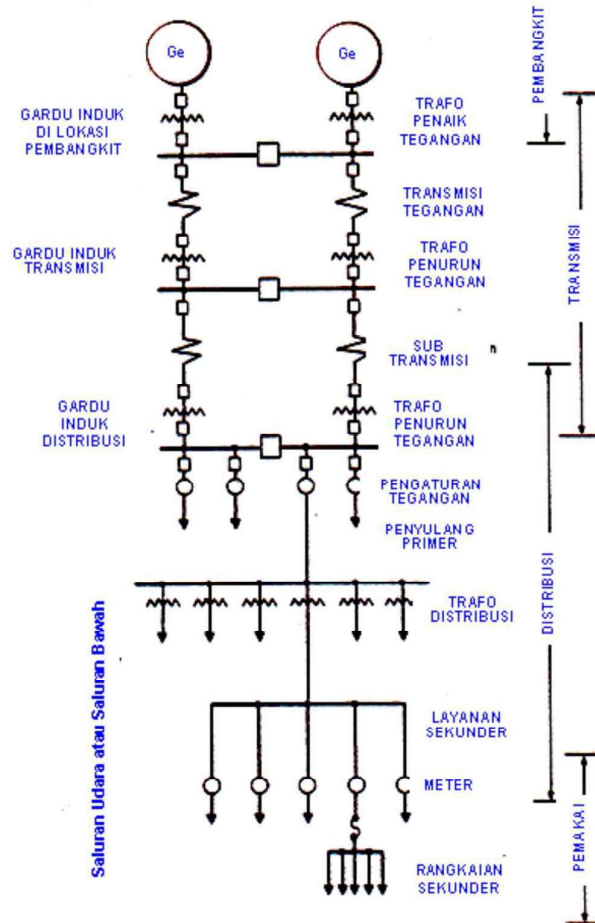
3. Daerah III – Bagian Distribusi Primer.

Pada tahap ini, energi listrik diturunkan tegangannya menjadi tegangan menengah di gardu induk distribusi. Tegangan ini digunakan untuk menyalurkan daya ke gardu-gardu distribusi. Distribusi primer menjadi penghubung antara sistem transmisi dengan sistem distribusi sekunder.

4. Daerah IV – Bagian Distribusi Sekunder (Konsumen).

Pada bagian ini, energi listrik diturunkan lagi tegangannya menjadi tegangan rendah, yaitu 220/380 V, yang langsung digunakan oleh konsumen. Instalasi di dalam bangunan rumah tangga, perkantoran, fasilitas sosial, maupun industri termasuk dalam daerah ini, karena merupakan titik akhir pemanfaatan energi listrik. Dengan adanya pembagian daerah ini, dapat dipahami bahwa sistem tenaga listrik bekerja secara berjenjang dan terintegrasi. Setiap bagian memiliki peran penting dalam memastikan energi

listrik dapat sampai ke konsumen dengan kualitas yang baik, efisien, dan andal.



Gambar 2.1 Skema Pembagian/Pengelompokkan Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

2.1.3 Gardu Distribusi

Gardu distribusi merupakan salah satu komponen penting dalam sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi sebagai titik penghubung antara jaringan tegangan menengah (TM) dan jaringan tegangan rendah (TR). Di dalam gardu distribusi terdapat berbagai peralatan utama seperti Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Menengah (PHB-TM), Transformator Distribusi (TD), dan Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR). Seluruh peralatan tersebut bekerja secara terpadu untuk menyalurkan energi listrik dari jaringan

tegangan menengah 20 kV menjadi tegangan rendah 220/380 V yang dapat digunakan oleh pelanggan. Keberadaan gardu distribusi sangat vital karena berperan dalam menjamin keandalan penyaluran daya listrik, kualitas tegangan yang stabil, serta keamanan bagi petugas dan masyarakat. Dengan pengoperasian yang baik, gardu distribusi mampu memberikan kontinuitas pelayanan listrik tanpa gangguan berarti.

Dalam perancangannya, konstruksi gardu distribusi harus disesuaikan dengan kebutuhan lapangan serta mempertimbangkan efisiensi biaya, faktor keamanan, dan ketentuan dari pemerintah daerah setempat. Setiap jenis gardu memiliki karakteristik dan fungsi tertentu yang disesuaikan dengan kondisi lingkungan serta kapasitas beban yang dilayani. Secara umum, gardu distribusi dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kategori sebagai berikut:

a. Gardu Beton

Gardu distribusi jenis beton merupakan gardu dengan konstruksi permanen yang dibangun di lokasi tertentu sesuai kebutuhan sistem dan rencana tata ruang wilayah. Jenis gardu ini umumnya digunakan di kawasan perkotaan atau pada konsumen khusus yang membutuhkan kontinuitas suplai listrik dengan tingkat keandalan tinggi. Seluruh komponen utama seperti transformator distribusi, peralatan proteksi, dan perlengkapan hubung bagi (PHB) ditempatkan di dalam bangunan yang terbuat dari pasangan batu dan beton (masonry wall building). Konstruksi gardu beton dirancang untuk memberikan perlindungan maksimal terhadap peralatan listrik serta menjamin keselamatan petugas dan masyarakat di sekitarnya. Selain itu, desain permanennya memberikan ketahanan yang baik terhadap kondisi lingkungan, seperti perubahan cuaca, gangguan fisik, maupun risiko kebakaran, sehingga cocok untuk daerah padat penduduk yang memiliki keterbatasan ruang.



Gambar 2.2 Contoh Bangunan Gardu Beton

b. Gardu Kios

Gardu kios adalah jenis gardu distribusi yang dibuat dari bahan prefabrikasi, seperti baja, logam, fiberglass, atau kombinasi keduanya. Struktur ini dirancang agar mudah dirakit di lokasi instalasi sehingga lebih efisien dari sisi waktu pembangunan. Pada dasarnya, gardu kios berfungsi untuk melindungi seluruh peralatan listrik seperti transformator, pemutus beban, dan peralatan pengaman tegangan menengah (TM) maupun tegangan rendah (TR) yang ditempatkan di dalam ruang tertutup berbentuk kios logam karena itu, sering disebut juga gardu metal enclosed. Terdapat beberapa variasi desain gardu kios, antara lain kios kompak, kios modular, dan kios bertingkat, yang disesuaikan dengan kebutuhan dan kapasitas daya. Jenis gardu ini biasanya diterapkan di wilayah perkotaan yang tidak memungkinkan pembangunan gardu beton permanen, baik karena keterbatasan lahan maupun peraturan tata ruang. Kapasitas transformator pada gardu kios umumnya terbatas hingga 400 kVA dengan maksimal empat jurusan tegangan rendah, sehingga penggunaannya cocok untuk area pelayanan menengah dengan kepadatan beban yang sedang.



Gambar 2.3 Contoh Bangunan Gardu Kios

c. Gardu Portal

Gardu portal merupakan gardu distribusi tipe terbuka (outdoor type) yang menggunakan konstruksi dua tiang atau lebih sebagai penyangga utama. Transformator pada gardu ini dipasang di atas struktur tiang dengan ketinggian minimal tiga meter dari permukaan tanah, untuk menjamin keamanan dan mempermudah proses perawatan. Selain transformator, pada bagian bawah biasanya dipasang lemari panel atau PHB-TR (Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah) serta perlengkapan proteksi tambahan. Untuk kemudahan teknisi saat melakukan operasi dan pemeliharaan, gardu portal juga dilengkapi dengan platform kerja atau dek akses. Jenis gardu ini banyak digunakan di daerah dengan ruang terbuka yang cukup luas, seperti kawasan pedesaan atau pinggiran kota, karena memiliki konstruksi yang relatif sederhana dan biaya pembangunan yang lebih ekonomis dibandingkan gardu beton.



Gambar 2.4 Contoh Fisik Gardu Portal

d. Gardu Cantol

Gardu cantol termasuk dalam kategori gardu pemasangan luar (outdoor) dengan desain yang lebih ringkas, karena seluruh komponen utama seperti transformator distribusi dan PHB-TR dicantolkan pada satu tiang listrik yang sama. Transformator ditempatkan di bagian atas, sementara lemari panel dan perlengkapan tegangan rendah berada di bawahnya untuk mempermudah akses petugas. Jenis transformator yang digunakan pada gardu cantol biasanya memiliki kapasitas ≤ 100 kVA baik untuk sistem tiga fasa maupun satu fasa, dan sering kali menggunakan tipe Completely Self Protected (CSP), di mana seluruh peralatan proteksi dan pemutus beban telah terpasang di dalam tangki transformator. Untuk keamanan tambahan, dipasang juga Lightning Arrester (LA) dengan sistem pembumian terpisah yang dihubungkan langsung ke badan transformator. PHB-TR pada gardu ini umumnya hanya melayani maksimal dua jurusan tegangan rendah, sehingga cocok untuk daerah dengan beban kecil atau area yang membutuhkan suplai listrik sementara dengan waktu pemasangan cepat.



Gambar 2.5 Contoh Fisik Gardu Cantol

2.1.4 Transformator Distribusi

Transformator distribusi merupakan salah satu komponen vital dalam sistem distribusi tenaga listrik, yang berfungsi menurunkan tegangan dari jaringan menengah ke tegangan rendah agar dapat digunakan oleh konsumen. Dengan kata lain, transformator distribusi berperan sebagai penghubung antara sistem tegangan menengah (20 kV) dan tegangan rendah (220/380 V) yang langsung disalurkan ke pelanggan. Jenis transformator yang paling umum digunakan di sistem distribusi PLN adalah transformator step-down dengan rasio tegangan 20 kV / 400 V. Tegangan antar fasa pada sistem tegangan rendah adalah 380 volt, sementara tegangan fasa terhadap netral adalah 220 volt. Namun, dalam praktiknya, tegangan keluaran pada sisi sekunder transformator biasanya diset sedikit lebih tinggi dari 380 volt untuk mengkompensasi jatuh tegangan (voltage drop) yang terjadi sepanjang jaringan distribusi hingga ke titik beban paling jauh. Dengan cara ini, pelanggan di ujung jaringan tetap dapat menerima tegangan sesuai standar pelayanan yang ditetapkan.

Selain fungsi utamanya dalam penurunan tegangan, transformator distribusi juga menghasilkan panas (losses) akibat arus beban dan rugi-rugi inti (core losses). Untuk menjaga kinerja dan keandalannya, setiap transformator harus dilengkapi dengan sistem pendingin yang berfungsi mengendalikan suhu agar tetap dalam batas aman. Pendinginan yang baik akan memperpanjang umur

transformator dan mencegah kerusakan isolasi akibat suhu berlebih. Berdasarkan jenis sistem pendingin dan kelengkapan pengamannya, transformator distribusi secara umum dapat dibedakan menjadi tiga jenis utama, yaitu:

- a. Transformator Konvensional (Standard Distribution Transformer), Jenis transformator ini merupakan tipe yang paling umum digunakan di lapangan. Transformator konvensional biasanya menggunakan pendinginan minyak (Oil Immersed Cooling) atau pendinginan udara (Dry Type Cooling). Pada tipe ini, perlengkapan proteksi seperti fuse, arrester, atau pemutus beban dipasang secara terpisah di luar tangki transformator.
- b. Transformator Lengkap dengan Pengaman Sendiri (Completely Self Protected / CSP Transformer), Tipe ini merupakan pengembangan dari transformator konvensional yang sudah dilengkapi dengan perangkat proteksi internal, seperti fuse sisi primer, pemutus beban otomatis (circuit breaker), serta arrester yang terpasang langsung di dalam tangki transformator. Keunggulan utama transformator CSP adalah tingkat keamanannya yang tinggi serta kemudahan dalam operasi dan pemeliharaan, karena seluruh sistem proteksi sudah menjadi satu kesatuan dengan transformator itu sendiri.
- c. Transformator dengan Pengaman pada Sisi Sekunder, Pada tipe ini, perlengkapan proteksi seperti MCB (Miniature Circuit Breaker) atau recloser sekunder dipasang di sisi tegangan rendah. Sistem ini memungkinkan pengamanan lebih spesifik terhadap beban konsumen, karena mampu mendeteksi dan memutus arus gangguan pada sisi keluaran. Biasanya tipe transformator ini digunakan di jaringan yang memiliki konfigurasi beban tidak seimbang atau pada sistem yang membutuhkan kontrol pengamanan lebih detail di sisi pelanggan.

Dengan beragam tipe dan sistem pendinginan yang digunakan, transformator distribusi dapat diadaptasikan sesuai dengan kebutuhan lokasi, kapasitas beban, dan kondisi lingkungan. Pemilihan jenis transformator yang

tepat sangat berpengaruh terhadap efisiensi, keandalan, serta keselamatan dalam sistem distribusi tenaga listrik secara keseluruhan.



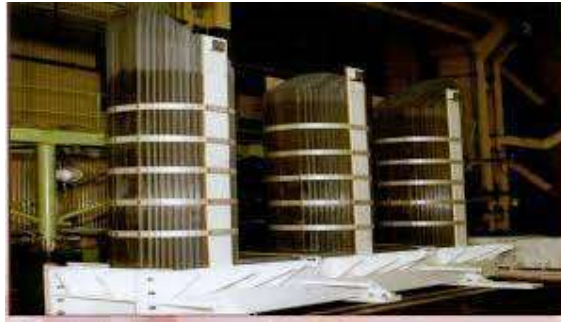
Gambar 2.6 Contoh Fisik Transformator Distribusi

2.1.4.1 Bagian Transformator

Transformator merupakan salah satu komponen vital dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk mentransfer energi listrik melalui proses induksi elektromagnetik antara dua atau lebih rangkaian listrik. Di dalamnya terdapat beberapa bagian penting yang memiliki fungsi dan peran masing-masing agar proses transformasi energi berlangsung dengan efisien dan aman.

a) Inti Besi Transformator

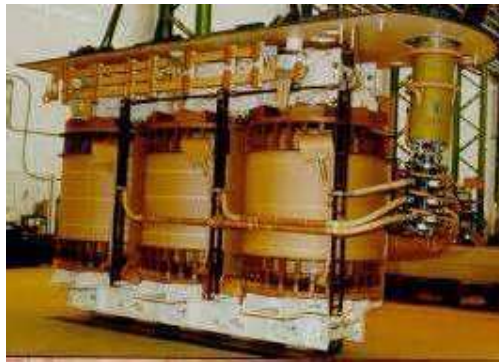
Inti besi berfungsi sebagai media untuk menyalurkan fluksi magnetik yang dihasilkan oleh arus listrik pada kumparan atau belitan transformator. Inti ini biasanya dibuat dari lempengan baja silikon tipis yang disusun secara berlapis dan terisolasi satu sama lain. Tujuan dari penyusunan berlapis ini adalah untuk mengurangi panas akibat arus eddy (eddy current) yang timbul saat terjadi perubahan medan magnet. Dengan demikian, kerugian daya (losses) pada transformator dapat ditekan seminimal mungkin. Inti besi juga dirancang sedemikian rupa agar memiliki permeabilitas magnet tinggi dan rugi histeresis yang rendah sehingga efisiensi transformator tetap terjaga.



Gambar 2.7 Contoh Fisik Inti Besi Transformator

b) Belitan atau Kumparan

Belitan merupakan penghantar tembaga atau aluminium berisolasi yang dililitkan mengelilingi inti besi. Belitan ini terbagi menjadi dua bagian, yaitu belitan primer dan belitan sekunder. Ketika arus bolak-balik mengalir pada belitan primer, medan magnet yang berubah-ubah akan menginduksi tegangan pada belitan sekunder sesuai dengan hukum Faraday. Rasio jumlah lilitan antara kedua belitan menentukan besar perubahan tegangan yang dihasilkan. Kualitas isolasi pada kumparan sangat penting karena berpengaruh terhadap kemampuan transformator menahan tegangan lebih dan mencegah terjadinya arus bocor.



Gambar 2.8 Contoh Fisik Belitan atau Kumparan Transformator

c) Isolator atau Bushing Transformator

Bushing berfungsi sebagai penghubung antara konduktor di dalam transformator dengan sistem jaringan di luar tanpa menimbulkan kebocoran

arus listrik. Bushing terdiri dari konduktor yang dilapisi bahan isolator berkualitas tinggi untuk menahan tegangan tinggi. Secara umum, terdapat dua jenis bahan isolasi pada bushing, yaitu oil impregnated paper (OIP) yang menggunakan kertas isolasi berimpregnasi minyak, dan resin impregnated paper (RIP) yang menggunakan resin sebagai bahan pengikat. Bagian utama bushing meliputi konduktor, isolasi, klem koneksi, serta aksesoris seperti indikator level minyak dan gasket penyekat. Desain bushing yang baik menjamin keamanan operasi serta mencegah terjadinya pelepasan muatan parsial (partial discharge).



Gambar 2.9 Contoh Fisik Bushing Pada Transformator

d) Tangki dan Konservator

Tangki berfungsi sebagai wadah minyak transformator dan pelindung komponen internal seperti inti besi dan kumparan dari pengaruh lingkungan luar. Umumnya, tangki terbuat dari baja dan dilengkapi dengan sirip-sirip pendingin untuk memperluas permukaan pembuangan panas. Sirip-sirip ini membantu proses pertukaran panas antara minyak di dalam tangki dan udara luar, sehingga suhu operasi transformator tetap stabil. Pada transformator berpendingin minyak, bagian atas tangki sering dilengkapi konservator, yaitu tangki tambahan yang berfungsi menampung pemuaian minyak akibat kenaikan suhu. Konservator ini juga membantu menjaga tekanan internal agar tidak berlebihan.



Gambar 2.10 Contoh Fisik Tangki dan Konservator Pada Transformator

e) Minyak Transformator

Minyak transformator memiliki dua fungsi utama, yaitu sebagai media isolasi listrik dan media pendingin. Dalam perannya sebagai isolator, minyak mencegah terjadinya loncatan listrik antar komponen bertegangan tinggi. Sebagai pendingin, minyak menyerap panas yang dihasilkan oleh rugi-rugi tembaga dan rugi-rugi besi, kemudian mengalirkannya menuju permukaan tangki untuk dilepaskan ke udara. Beberapa keunggulan minyak sebagai isolasi antara lain:

- ✓ Memiliki kerapatan tinggi dibandingkan isolasi gas, sehingga mampu menahan tegangan tinggi dengan lebih baik.
- ✓ Dapat mengisi celah sempit di antara kumparan dan inti, sehingga mencegah terbentuknya rongga udara yang dapat memicu loncatan listrik.
- ✓ Bersifat self-healing, artinya minyak dapat menetralkan kembali daerah sekitar titik pelepasan muatan kecil sehingga tidak terjadi kerusakan permanen.
- ✓ Kualitas minyak transformator harus selalu dijaga, karena penurunan kekuatan dielektriknya akan berpengaruh langsung terhadap keandalan transformator. Oleh sebab itu, dilakukan pengujian berkala

seperti pengukuran breakdown voltage (BDV) untuk memastikan minyak masih layak digunakan.

2.1.4.2 Prinsip Kerja Transformator Distribusi

Transformator terdiri atas dua buah kumparan (primer dan sekunder) yang bersifat induktif. Kedua kumparan ini terpisah secara elektris namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang memiliki reluktansi rendah. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik maka fluks bolak-balik akan muncul di dalam inti yang dilaminasi, karena kumparan tersebut membentuk jaringan tertutup maka mengalirlah arus primer. Akibat adanya fluks di kumparan primer maka di kumparan primer terjadi induksi (*self induction*) dan terjadi pula induksi di kumparan sekunder karena pengaruh induksi dari kumparan primer atau disebut sebagai induksi bersama (*mutual induction*) yang menyebabkan timbulnya fluks magnet di kumparan sekunder, maka mengalirlah arus sekunder jika rangkaian sekunder dibebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara magnetisasi). Tujuan utama menggunakan inti pada transformator adalah untuk mengurangi reluktansi (tahanan magnetis) dari rangkaian magnetis (*common magnetic circuit*).

2.1.4.3 Perhitungan Arus Transformator

Daya transformator jika dilihat dari sisi tegangan tinggi (primer) dapat dinyatakan dengan rumus sebagai berikut :

$$S = \sqrt{3} \times V_{L-L} \times I_{L-L} \quad (2.1)$$

di mana:

- S = daya transformator (KVA)
- V_{L-L} = tegangan antar fasa (line-to-line voltage) (KV)
- I_{L-L} = arus saluran (line current) (A)

Jadi untuk menghitung arus beban penuh (full load) dapat menggunakan rumus:

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_{L-L}} \quad (2.2)$$

dengan keterangan:

I_{FL} = Arus beban penuh (A)

S = Daya semu transformator (VA atau kVA $\times$ 1000)

V_{L-L} = Tegangan sisi sekunder transformator (Volt)

$\sqrt{3}$ = Konstanta untuk sistem tiga fasa

2.1.4.4 Pembebanan Transformator

Perencanaan pemasangan kapasitas transformator distribusi yang sesuai dengan beban konsumen akan mendapatkan efisiensi yang baik. Persentase pembebanan transformator distribusi dapat dicari dengan perbandingan antara daya terpasang dengan kapasitas transformator distribusi, yang dapat dinyatakan dalam persen (%) atau dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Persentase Pembebanan (\%)} = \frac{LT}{S} \times 100\% \quad (2.3)$$

dengan keterangan:

- %Pembebanan = Persentase pembebanan transformator (%)
- LT = Beban transformator (kVA)
- S = Kapasitas transformator distribusi (kVA)

Untuk menentukan kapasitas transformator yang akan digunakan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$S = \frac{LT}{0,8} \quad (2.4)$$

Keterangan :

S : Kapasitas transformator distribusi (kVA)

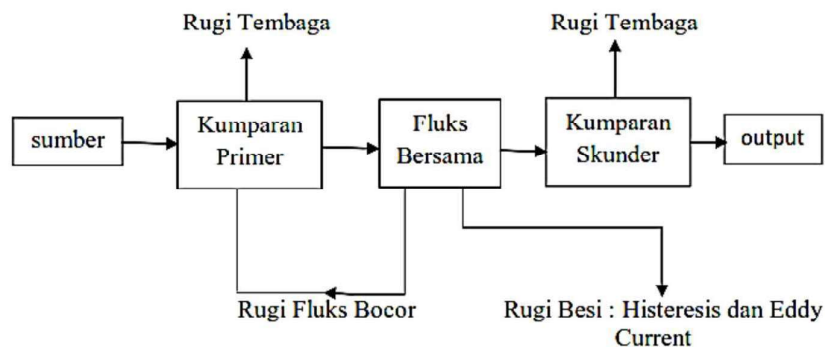
LT : Beban transformator (kVA)

0,8 : Batas pembebanan transformator

Mengacu pada SPLN 50:1997[5], tingkat pembebanan transformator distribusi direkomendasikan berada pada rentang 40% hingga 80% dari kapasitas nominal transformator. Apabila pembebanan melampaui batas maksimum atau berada di bawah batas minimum tersebut, maka transformator dapat dikategorikan mengalami kondisi overload maupun underload. Apabila terjadi pembebanan berlebih pada transformator, maka dapat dilakukan langkah penanganan seperti uprating, penggantian transformator, atau penambahan transformator sisipan untuk mengurangi beban kerja transformator eksisting.

2.1.4.5 Rugi – Rugi Transformator

Rugi - rugi pada transformator ada dua macam, yaitu rugi tembaga (P_{cu}) dan rugi besi (P_i). Berikut ini merupakan diagram blok rugi - rugi pada transformator pada Gambar 2.11



Gambar 2.11 Diagram Blok Rugi – Rugi Pada Transformator

a. Rugi Tembaga (P_{cu})

Rugi tembaga (Copper Loss) adalah kerugian daya yang terjadi akibat adanya tahanan listrik (resistansi) pada kumparan transformator, baik pada sisi primer maupun sekunder. Ketika arus listrik mengalir melalui kumparan yang terbuat dari tembaga, sebagian energi listrik akan berubah menjadi panas karena efek resistansi konduktor tersebut.

Secara matematis, rugi tembaga dapat dinyatakan dengan rumus:

$$P_{cu} = I^2 \times R \quad (2.5)$$

dengan keterangan:

- P_{cu} = rugi tembaga (watt)
- I = arus yang mengalir pada kumparan (ampere)
- R = tahanan kumparan (ohm)

Rugi tembaga akan bervariasi sesuai dengan besar arus beban - semakin besar arus yang mengalir, semakin besar pula panas dan rugi daya yang timbul. Karena itu, rugi tembaga disebut juga rugi berbeban (load loss), karena hanya muncul ketika transformator sedang beroperasi dengan beban. Untuk efisiensi yang baik, nilai rugi tembaga ini harus dijaga agar sekecil mungkin, antara lain dengan menggunakan konduktor tembaga berpenampang besar, atau bahan dengan resistivitas rendah.

b. Rugi Besi (P_i)

Rugi inti (Core Loss) atau disebut juga rugi besi (Iron Loss) adalah kerugian daya yang terjadi di dalam inti besi transformator akibat pengaruh fluks magnet bolak-balik yang mengalir melalui inti saat transformator bekerja.

Rugi inti ini terjadi terus-menerus selama transformator bertegangan, baik dalam kondisi berbeban maupun tanpa beban, sehingga sering disebut juga rugi tanpa beban (no-load loss).

Secara umum, rugi inti terdiri dari dua komponen utama, yaitu:

1. Rugi Histerisis/Hysteresis Loss (P_h), Terjadi karena pembalikan arah magnetisasi secara berulang-ulang di dalam inti besi setiap kali arus bolak-balik berubah arah. Akibatnya, sebagian energi listrik hilang dalam bentuk panas. Besarnya rugi histerisis dapat dirumuskan secara sederhana dengan:

$$P_h = k_h \times f B_{max}^{1.6} \text{ (watt)} \quad (2.6)$$

di mana:

- P_h = rugi histerisis (Watt)
- k_h = konstanta histerisis
- f = frekuensi (Hz)
- B_{max} = fluks maksimum (Wb)

2. Rugi Arus Eddy (Eddy Current Loss), Disebabkan oleh arus pusar (eddy current) yang timbul di dalam inti besi akibat perubahan fluks magnet. Arus ini mengalir dalam arah melingkar di dalam inti dan menghasilkan panas. Untuk mengurangi rugi eddy, inti transformator dibuat dari lembaran baja tipis (laminated core) yang diisolasi satu sama lain agar memperkecil jalur arus pusar. Rumus sederhana rugi eddy:

$$P_e = K_e \times f^2 \times B_{max}^2 \quad (2.7)$$

di mana:

- P_e = rugi Eddy Current (Watt)
- K_e = konstanta Eddy Current
- f = frekuensi (Hz)
- B_{max} = densitas fluks maksimum (Wb)

Jadi, total rugi inti (P_i) merupakan penjumlahan dari kedua rugi tersebut:

$$P_i = P_h + P_e \quad (2.8)$$

Rugi inti ini perlu diminimalkan karena akan menurunkan efisiensi transformator. Cara umum untuk menguranginya adalah dengan menggunakan bahan inti berkualitas tinggi, seperti baja silikon (silicon steel) atau material amorphous, yang memiliki kerugian magnetis rendah.

2.1.4.6 Efisiensi Transformator

Efisiensi transformator adalah perbandingan antara daya keluaran (output) dengan daya masukan (input), yang menunjukkan seberapa besar kemampuan

transformator dalam mengubah energi listrik dari sisi primer ke sisi sekunder tanpa mengalami banyak rugi daya.

Secara umum, efisiensi transformator dinyatakan dalam persen (%), dengan rumus sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.9)$$

Karena pada transformator berlaku bahwa:

$$P_{in} = P_{out} + P_{loss} \quad (2.10)$$

Atau efisiensi transformator dapat dihitung dengan rumus formula jogja (rumus yang diterapkan di PT. PLN) sebagai berikut:

$$\eta = \frac{S \times \cos\phi \times LF \times 1000}{((S \times \cos\phi \times LF \times 1000) + P_i + (LF^2 \times P_{cu} \times LLF))} \times 100\% \quad (2.11)$$

dengan:

- η = efisiensi transformator (%)
- P_{out} = daya keluaran transformator (Watt)
- P_{in} = daya masukan transformator (Watt atau kVA)
- P_{cu} = rugi tembaga (Watt)
- P_i = rugi besi (Watt)
- S = Kapasitas transformator (kVA)
- LF = Faktor beban berdasarkan asumsi
- LLF = Faktor rugi beban
- $\cos\phi$ = Faktor daya

Rugi daya total pada transformator terdiri atas:

1. Rugi Tembaga (Copper Loss / P_{cu}), Terjadi karena tahanan pada lilitan kumparan ketika arus mengalir, nilainya tergantung pada beban.
2. Rugi Inti (Core Loss / P_{core}), Disebabkan oleh histerisis dan arus eddy pada inti besi, terjadi terus-menerus selama transformator diberi tegangan, baik berbeban maupun tidak.

Sehingga, efisiensi transformator dapat ditulis dalam bentuk:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{cu} + P_{core}} \times 100\% \quad (2.12)$$

Efisiensi transformator biasanya sangat tinggi, umumnya mencapai 95%–99%, karena tidak ada bagian mekanis yang bergerak. Efisiensi akan maksimum ketika rugi tembaga sama dengan rugi inti, yaitu:

$$P_{cu} = P_{core}$$

Kondisi ini sering dijadikan acuan dalam perancangan transformator untuk memastikan kinerja optimal dan kehilangan daya yang minimal.

2.1.4.7 Transformator Distribusi Sisipan (Garsip)

Transformator sisipan merupakan transformator tambahan yang dipasang oleh PT PLN (Persero) sebagai solusi untuk mengatasi berbagai permasalahan teknis yang muncul akibat transformator distribusi eksisting yang sudah tidak bekerja secara optimal. Pemasangan transformator ini bertujuan untuk mengurangi beban berlebih (overload) dan memperbaiki kualitas tegangan pada jaringan distribusi tegangan rendah. Secara prinsip, transformator sisipan berbeda dengan transformator pasang baru. Transformator sisipan hanya berfungsi untuk mengambil sebagian beban dari transformator yang sudah ada, tanpa adanya penambahan pelanggan baru. Sedangkan transformator pasang baru dipasang karena adanya permintaan daya listrik baru dari konsumen atau pengembangan jaringan ke wilayah baru. Beberapa faktor yang menjadi pertimbangan PLN dalam melakukan pemasangan transformator sisipan antara lain:

1. Transformator utama mengalami beban berlebih (overload) — yaitu kondisi di mana pembebanan melebihi kapasitas aman transformator.
2. Adanya penurunan tegangan (voltage drop) yang signifikan pada jaringan tegangan rendah (JTR).

Menurut Standar PLN (SPLN) No. 72 Tahun 1987 Pasal 4 Ayat 19 yaitu jatuh tegangan tidak boleh lebih dari 5% dari tegangan kerja.

Penentuan penempatan jarak ideal transformator distribusi sisipan dari transformator utama dapat dihitung dengan persamaan:

$$L_{ideal} = \frac{10\% \times V_{L-L}}{I_{rata-rata} \times R_{saluran}} \quad (2.13)$$

Keterangan :

L_{ideal} : Jarak ideal penempatan transformator sisipan dari transformator utama (m)

V_{L-L} : Tegangan antar fasa (V)

$I_{rata-rata}$: Arus total rata-rata (A)

$R_{saluran}$: Resistansi saluran JTR (Ω/km)

2.1.5 Daya Listrik

Daya listrik dapat diartikan sebagai laju perpindahan atau hantaran energi listrik dalam suatu rangkaian listrik. Pada sistem arus bolak-balik (AC), daya tidak hanya terdiri dari satu jenis, melainkan terbagi menjadi tiga komponen utama, yaitu:

- a. Daya Aktif (P) — merupakan daya nyata yang benar-benar digunakan untuk melakukan kerja, seperti menyalakan lampu atau menggerakkan motor. Dinyatakan dalam satuan watt (W). Daya aktif ini merupakan pembentukan dari besar tegangan yang kemudian dikalikan dengan besaran arus dan faktor dayanya.

$$\text{Untuk 1 fasa : } P = V \times I \times \cos \Phi \quad (2.14)$$

$$\text{Untuk 3 fasa : } P = \sqrt{3} \times V_{L-L} \times I_L \times \cos \Phi \quad (2.15)$$

Keterangan :

P : daya nyata (W)

V : tegangan antar saluran (V)

I : arus saluran (A)

$\cos \Phi$: faktor daya (standard PLN 0,85)

- b. Daya Reaktif (Q) — adalah daya yang digunakan untuk membentuk medan magnet pada peralatan induktif, seperti motor atau transformator. Dinyatakan dalam volt-ampere reaktif (VAR).

Daya reaktif ini adalah hasil kali antara besarnya arus dan tegangan yang dipenuhi oleh faktor daya.

$$\text{Untuk 1 fasa : } Q = V \times I \times \sin \Phi \quad (2.16)$$

$$\text{Untuk 3 fasa : } Q = \sqrt{3} \times V_{L-L} \times I_{L-L} \times \sin \Phi \quad (2.17)$$

Keterangan :

Q : daya reaktif (VAr)

V : tegangan antar saluran (Volt)

I : arus saluran (Ampere)

$\sin \Phi$: faktor daya (tergantung nilai Φ)

- c. Daya Semu (S) — merupakan kombinasi dari daya aktif dan daya reaktif, yang menunjukkan total daya yang disalurkan oleh sumber listrik. Dinyatakan dalam volt-ampere (VA). Daya ini merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus yang melalui penghantar.

$$\text{Untuk 1 fasa : } S = V \times I \quad (2.18)$$

$$\text{Untuk 3 fasa : } S = \sqrt{3} \times V_{L-L} \times I_L \quad (2.19)$$

Keterangan :

S : daya semu (VA)

V_{L-L} : tegangan antar saluran (V)

I_L : arus saluran (A)

2.1.6 Susut Distribusi

Susut distribusi merupakan salah satu indikator penting yang mencerminkan tingkat efisiensi penyaluran energi listrik dari pembangkit hingga sampai ke pelanggan. Dalam proses penyaluran energi listrik, kehilangan daya atau *losses* tidak dapat dihindari, sehingga selalu terdapat selisih antara energi listrik yang dibangkitkan dan energi listrik yang berhasil disalurkan serta dijual kepada konsumen.

Secara umum, susut distribusi didefinisikan sebagai selisih antara jumlah energi listrik yang diproduksi dengan energi listrik yang terjual, yang menunjukkan besarnya energi yang hilang selama proses distribusi. Susut distribusi dibagi menjadi dua jenis utama, yaitu:

1. Susut Teknis, yaitu kehilangan energi listrik yang terjadi secara alami akibat proses penyaluran daya. Energi ini hilang karena sebagian berubah menjadi panas pada konduktor, transformator, dan peralatan lainnya. Faktor yang mempengaruhi susut teknis antara lain panjang jaringan, luas penampang penghantar, serta rugi-rugi pada transformator.
2. Susut Non Teknis, yaitu kehilangan energi listrik yang tidak berkaitan langsung dengan proses teknis penyaluran daya. Kehilangan ini biasanya disebabkan oleh kesalahan administrasi atau tindakan tidak sah, seperti kerusakan alat ukur pelanggan (APP), kesalahan pencatatan meter oleh petugas, maupun pencurian listrik.

Permasalahan susut distribusi memberikan dampak negatif baik bagi PLN sebagai penyedia energi listrik maupun konsumen sebagai pengguna, karena berpengaruh terhadap keandalan pasokan dan biaya operasional. Oleh karena itu, pemetaan susut menjadi teknis dan non teknis sangat penting dilakukan untuk mempermudah penentuan langkah-langkah strategis dalam menekan tingkat susut dan meningkatkan efisiensi sistem distribusi.

2.1.7 Susut Pada Jaringan Tegangan Menengah

Susut pada Jaringan Tegangan Menengah (JTM) adalah kehilangan energi listrik yang terjadi pada sistem distribusi bertegangan menengah, biasanya pada jaringan dengan tegangan nominal 20 kV, saat energi listrik disalurkan dari gardu induk menuju gardu distribusi. Kehilangan ini terjadi karena sebagian energi listrik berubah menjadi panas akibat adanya tahanan (resistansi) pada konduktor atau komponen jaringan lainnya. Secara teknis, susut pada JTM termasuk dalam kategori susut teknis, karena penyebab utamanya berasal dari sifat fisik dan karakteristik peralatan listrik yang digunakan. Besarnya susut pada JTM dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

1. Panjang saluran, semakin panjang jaringan, semakin besar resistansi total penghantar sehingga rugi daya juga meningkat.
2. Luas penampang konduktor, semakin kecil ukuran penampang konduktor, semakin besar hambatan listrik yang menyebabkan meningkatnya rugi daya.
3. Beban Listrik, arus yang mengalir pada jaringan sebanding dengan beban yang disuplai. Semakin besar beban, maka rugi daya akibat arus (I^2R losses) akan semakin tinggi.
4. Kualitas sambungan dan isolasi, sambungan yang longgar atau isolasi yang menurun dapat meningkatkan resistansi dan menyebabkan tambahan rugi-rugi energi.

2.1.8 Susut Pada Transformator

Susut pada Transformator merupakan kehilangan energi listrik yang terjadi di dalam transformator selama proses penyaluran daya listrik dari sisi primer ke sisi sekunder. Susut ini terjadi karena adanya rugi-rugi energi yang muncul akibat sifat fisik material penyusun transformator, baik pada bagian kumparan maupun inti besinya. Susut pada transformator dapat dihitung dengan rumus formula jogja (rumus yang diterapkan di PT. PLN) pada persamaan berikut:

$$P_{trafo} = \left(\frac{\%P_{trafo}}{100} \times S \times \frac{\%P_{trafo}}{100} \right) \quad (2.20)$$

$$\%P_{trafo} = 100\% - \eta \quad (2.21)$$

Dengan :

P_{trafo} : susut pada transformator distribusi (W)

P_{trafo} : persentase susut trafo (%)

S : kapasitas transformator (VA)

Strafo : persentase pembebanan trafo (%)

η : efisiensi transformator (%)

2.1.9 Susut Pada Jaringan Tegangan Rendah

Susut pada Jaringan Tegangan Rendah (JTR) merupakan kehilangan energi listrik yang terjadi pada saat penyaluran daya dari transformator distribusi menuju ke konsumen melalui jaringan tegangan rendah, biasanya pada sistem dengan tegangan 220/380 Volt. Kehilangan energi ini tidak dapat dihindari sepenuhnya karena dipengaruhi oleh sifat kelistrikan penghantar dan kondisi jaringan. Secara umum, susut pada jaringan tegangan rendah termasuk dalam kategori susut teknis, dan penyebab utamanya adalah rugi-rugi daya akibat tahanan konduktor. Arus listrik yang mengalir melalui penghantar mengalami hambatan (resistansi), sehingga sebagian energi listrik berubah menjadi panas. Besarnya rugi daya pada penghantar dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$\Delta P = \frac{1}{3} (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2) \times R \times L \quad (2.22)$$

dengan Keterangan :

ΔP : rugi daya pada saluran JTR (W)

I_R : arus fasa R (A)

I_S : arus fasa S (A)

IT : arus fasa T (A)

IN : arus netral (A)

R : resistansi saluran (Ω/km)

2.1.10 ETAP (Electric Transient and Analysis Program)

Perangkat Lunak ETAP (Electric Transient and Analysis Program) merupakan salah satu software teknik yang banyak digunakan dalam bidang sistem tenaga listrik. Program ini berfungsi untuk melakukan berbagai jenis analisis, simulasi, serta pemodelan sistem kelistrikan baik pada level pembangkitan, transmisi, maupun distribusi. ETAP mampu beroperasi secara offline untuk keperluan simulasi dan perencanaan sistem, serta secara online untuk pemantauan dan pengendalian sistem tenaga listrik secara real-time. ETAP dilengkapi dengan beragam fitur analisis yang sangat membantu dalam studi sistem tenaga listrik, di antaranya:

- ✓ Analisis aliran daya (Load Flow Analysis) – digunakan untuk mengetahui distribusi daya aktif dan reaktif di seluruh jaringan.
- ✓ Analisis hubung singkat (Short Circuit Analysis) – berfungsi untuk menentukan besar arus gangguan yang terjadi pada titik tertentu dalam sistem.
- ✓ Analisis Arc Flash – digunakan untuk mengevaluasi tingkat bahaya akibat loncatan busur api pada sistem tenaga listrik.
- ✓ Analisis kestabilan transien (Transient Stability Analysis) – digunakan untuk mempelajari respon sistem terhadap gangguan yang terjadi dalam waktu singkat.

Selain itu, ETAP juga menyediakan berbagai modul tambahan seperti analisis harmonisa, keandalan sistem, proteksi koordinasi, dan lain sebagainya.

Dalam melakukan analisis, ETAP menggunakan diagram satu garis (single line diagram) sebagai representasi dari sistem tenaga listrik tiga fasa. Diagram ini merupakan penyederhanaan dari sistem yang sesungguhnya, di mana tiga konduktor fasa digantikan oleh satu garis tunggal agar lebih mudah dibaca dan dianalisis. Elemen-elemen listrik seperti pemutus sirkuit, transformator, kapasitor, busbar, generator, dan penghantar ditampilkan dengan simbol-simbol standar yang telah diakui secara internasional. Walaupun diagram ini tidak menunjukkan ukuran fisik atau posisi aktual peralatan di lapangan, penyusunan diagram mengikuti konvensi umum dari kiri ke kanan dan dari atas ke bawah agar mudah dipahami. ETAP mendukung dua standar internasional dalam melakukan analisis sistem tenaga, yaitu ANSI (American National Standards Institute) dan IEC (International Electrotechnical Commission) [6]. Perbedaan utama dari kedua standar ini terletak pada frekuensi sistem—standar ANSI umumnya menggunakan frekuensi 60 Hz seperti di Amerika, sedangkan standar IEC menggunakan 50 Hz yang juga digunakan di Indonesia. Selain perbedaan frekuensi, simbol-simbol dan parameter peralatan yang digunakan dalam analisis juga menyesuaikan dengan standar yang dipilih.

2.2 Penelitian Terkait

Beberapa penelitian yang berkaitan dengan perencanaan pemasangan gardu sisipan dan penanganan overload transformator distribusi telah dilakukan sebelumnya. Penelitian-penelitian tersebut menjadi dasar referensi dalam kajian perencanaan pemasangan gardu sisipan pada Gardu SD 0206 Penyulang Penanjung. Penelitian ini disusun dengan mengacu pada berbagai sumber pustaka yang relevan dengan topik pembahasan. Sumber tersebut meliputi jurnal ilmiah, artikel penelitian, skripsi, serta buku pendukung lainnya. Berikut merupakan beberapa referensi yang digunakan dalam penelitian ini:

Penelitian oleh Hengki dkk. membahas penambahan gardu distribusi sisipan untuk meningkatkan kemampuan hantar arus jaringan distribusi primer 20 kV. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pembebanan transformator dikatakan overload ketika

melebihi 80% kapasitasnya, dan penambahan gardu sisipan dapat meningkatkan keandalan sistem distribusi serta menjaga tegangan tetap berada pada batas standar SPLN.

Penelitian lain yang dilakukan oleh Damayanti membahas penanganan beban lebih transformator distribusi dengan pemasangan trafo sisip di PT PLN. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pembebanan transformator yang semula mencapai 84,85% dapat diturunkan menjadi 49,65% setelah pemasangan trafo sisip. Hal ini menunjukkan bahwa pemasangan gardu atau trafo sisipan efektif dalam menurunkan beban transformator, memperpanjang umur transformator, dan meningkatkan kualitas pelayanan listrik.

Penelitian mengenai optimasi penempatan transformator distribusi berdasarkan keseimbangan beban menunjukkan bahwa penempatan transformator yang tidak optimal dapat menyebabkan peningkatan rugi daya dan penurunan kualitas tegangan. Oleh karena itu, perencanaan lokasi transformator distribusi menjadi faktor penting dalam menjaga performa sistem distribusi tenaga listrik.

Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa pemasangan gardu sisipan merupakan salah satu metode efektif dalam mengatasi pembebanan lebih pada gardu distribusi, meningkatkan kualitas tegangan, serta menjaga keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada kajian perencanaan pemasangan gardu sisipan pada Gardu SD 0206 Penyulang Penanjung untuk mengurangi beban overload yang terjadi.

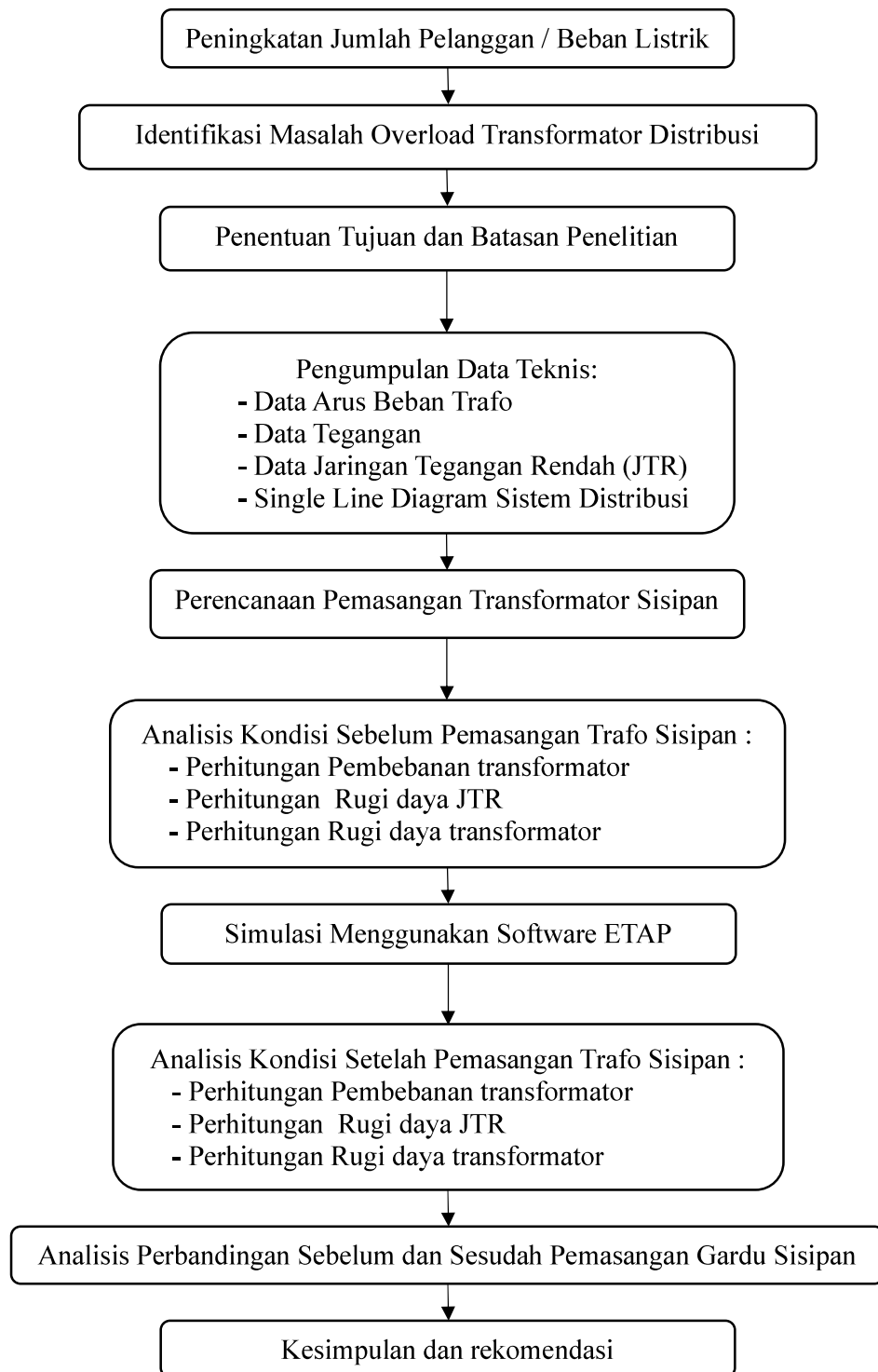
2.3 Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran penelitian ini disusun berdasarkan kondisi sistem distribusi tenaga listrik yang mengalami peningkatan beban akibat pertumbuhan jumlah pelanggan dan peningkatan kebutuhan energi listrik. Peningkatan beban tersebut berdampak langsung terhadap kinerja transformator distribusi, khususnya apabila pembebanan telah mendekati atau bahkan melampaui batas standar operasional yang ditetapkan. Transformator distribusi yang mengalami pembebanan berlebih dapat

menyebabkan kenaikan temperatur operasi, peningkatan rugi-rugi daya, serta mempercepat penurunan umur isolasi transformator.

Pada Gardu SD 0206 Penyulang Penanjung, berdasarkan data pengukuran lapangan diketahui bahwa transformator bekerja mendekati bahkan melebihi batas pembebanan yang direkomendasikan. Kondisi ini berpotensi menurunkan kualitas pelayanan energi listrik serta meningkatkan risiko gangguan sistem distribusi. Oleh karena itu diperlukan suatu solusi teknis untuk mengurangi tingkat pembebanan transformator agar kembali berada dalam kondisi operasi yang aman dan andal. Salah satu solusi yang dapat diterapkan adalah pemasangan transformator sisipan atau gardu sisipan. Transformator sisipan berfungsi untuk memindahkan sebagian beban dari gardu eksisting sehingga beban dapat terdistribusi lebih merata. Selain itu, pemasangan gardu sisipan juga dapat memperpendek radius pelayanan jaringan, sehingga diharapkan dapat menurunkan rugi-rugi daya pada jaringan tegangan rendah serta meningkatkan kualitas tegangan pada sisi pelanggan.

Dalam penelitian ini dilakukan analisis perbandingan kondisi sebelum dan sesudah pemasangan transformator sisipan pada Gardu SD 0206. Analisis meliputi perhitungan pembebanan transformator, perhitungan rugi-rugi daya pada jaringan tegangan rendah, serta rugi-rugi daya pada transformator distribusi. Selain perhitungan teoritis, dilakukan juga simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP untuk memperoleh hasil analisis yang lebih akurat dan dapat divalidasi. Hasil analisis tersebut kemudian digunakan untuk mengevaluasi efektivitas pemasangan transformator sisipan dalam mengurangi beban overload, menurunkan rugi-rugi daya, serta meningkatkan keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Dengan demikian, kerangka pemikiran penelitian ini menghubungkan antara peningkatan beban listrik, kondisi overload transformator distribusi, penerapan solusi pemasangan gardu sisipan, serta analisis perubahan parameter teknis sistem distribusi sebelum dan sesudah penerapan solusi tersebut.



Gambar 2. 12 Kerangka Pemikiran