

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Gardu Distribusi

Pengertian umum Gardu Distribusi tenaga listrik yang paling dikenal adalah suatu bangunan gardu listrik berisi atau terdiri dari instalasi Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Menengah (PHB-TM), Transformator Distribusi (TD) dan Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR) untuk memasok kebutuhan tenaga listrik bagi para pelanggan baik dengan Tegangan Menengah (TM 20 kV) maupun Tegangan Rendah (TR 220/380V). Konstruksi Gardu distribusi dirancang berdasarkan optimalisasi biaya terhadap maksud dan tujuan penggunaannya yang kadang kala harus disesuaikan dengan peraturan pemda setempat.

Secara garis besar gardu distribusi dibedakan atas :

1. Pemasangannya :
 - a) Gardu pasangan luar : Gardu Portal, Gardu Cantol
 - b) Gardu pasangan dalam : Gardu Beton, Gardu Kios
2. Konstruksinya :
 - a) Gardu Beton (bangunan sipil : batu, beton
 - b) Gardu Tiang : Gardu Portal dan Gardu Cantol, Gardu Kios
3. Penggunaannya :
 - a) Gardu Pelanggan Umum.
 - b) Gardu Pelanggan Khusus.

2.1.2 Jenis - Jenis Gardu

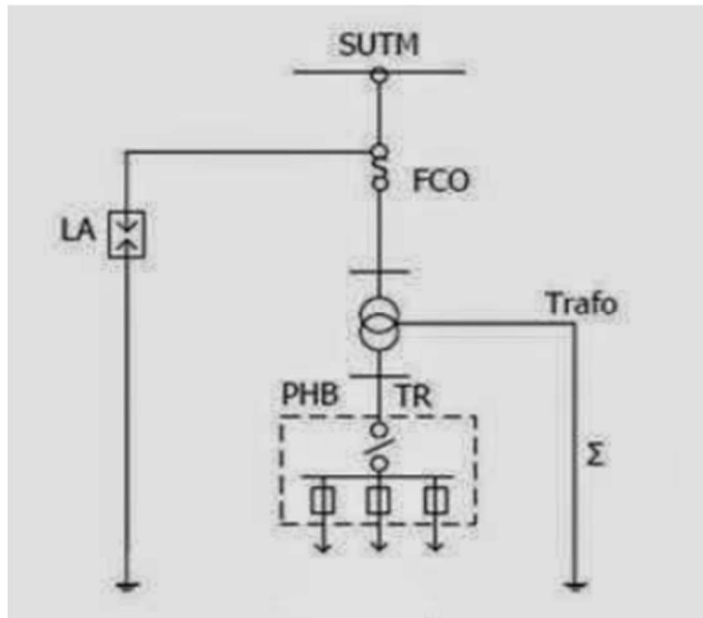
Gardu Distribusi dikategorikan sebagai berikut :

1. Gardu Portal

Gardu portal adalah jenis gardu distribusi tenaga listrik tipe terbuka (*outdoor*) yang berfungsi menurunkan tegangan menengah dari jaringan listrik menjadi tegangan rendah untuk konsumen. Konstruksinya menggunakan dua tiang atau lebih, dengan transformator (trafo) yang dipasang di atas platform, dan lemari panel/PHB-TR (Panel Hubung Bagi Tegangan Rendah) di bagian bawah, di ketinggian tertentu untuk kemudahan pemeliharaan.



Gambar 2. 1 Gardu Portal



Gambar 2. 2 Bagan satu garis gardu distribusi

2. Gardu Beton

Gardu beton adalah tipe gardu distribusi listrik di mana komponen utamanya, seperti transformator dan peralatan proteksi, terpasang di dalam sebuah bangunan tertutup yang konstruksinya terbuat dari material beton, pasir, batu, dan semen. Tujuannya adalah untuk melindungi peralatan tersebut dan mendistribusikan listrik ke pelanggan dengan aman, mengubah tegangan tinggi menjadi tegangan yang lebih rendah dan siap disalurkan ke rumah atau gedung.



Gambar 2. 3 Gardu Beton

3. Gardu Kompak

Gardu kompak (atau gardu trafo ringkas) adalah instalasi listrik yang mengombinasikan peralatan transformator daya, unit sakelar tegangan tinggi, dan unit distribusi tegangan rendah menjadi satu kesatuan terintegrasi dalam sebuah kabinet kecil atau box. Tujuan utamanya adalah untuk mengurangi ukuran fisik instalasi, mempermudah pemasangan dan pengoperasian, serta menyediakan suplai listrik yang andal di area padat penduduk seperti pusat komersial atau perumahan.



Gambar 2. 4 Gardu Kompak

2.1.3 Komponen Utama Gardu DIstribusi

Gardu Distribusi terdiri atas beberapa komponen utama :

a) Trafo Distribusi

Trafo distribusi adalah transformator jenis step-down (penurun tegangan) yang digunakan dalam sistem distribusi tenaga listrik untuk mengubah tegangan 20 kV dari menjadi tegangan rendah 220/380 V yang aman dan siap digunakan oleh pelanggan di rumah, kantor, atau bisnis. Trafo ini berfungsi sebagai titik akhir dalam sistem distribusi, menurunkan tegangan hingga tingkat yang bisa digunakan langsung oleh peralatan konsumen.

b) *Fuse Cut Out (FCO)*

Fuse Cut Out (FCO) adalah peralatan proteksi pada sistem distribusi listrik tegangan menengah yang berfungsi untuk melindungi jaringan dari gangguan arus berlebih (*overcurrent*) atau hubungan singkat (*short circuit*) dengan cara meleburkan elemen sekringnya, sehingga memutuskan aliran arus dan mencegah kerusakan peralatan lain yang lebih mahal. FCO juga dapat berfungsi sebagai pemutus sirkuit, memungkinkan petugas utilitas membukanya secara manual menggunakan tongkat isolasi untuk memisahkan transformator dari jaringan.

c) *Lightning Arrester*

Lightning arrester adalah perangkat perlindungan pada sistem tenaga listrik dan telekomunikasi yang berfungsi untuk melindungi isolasi dan konduktor dari kerusakan akibat tegangan lebih yang disebabkan oleh sambaran petir (*lightning surge*) atau surja hubung (*switching surge*). Cara kerjanya adalah dengan menyalurkan arus petir ke tanah sebagai jalur impedansi rendah ketika terjadi lonjakan tegangan, lalu kembali menjadi isolator saat kondisi normal.

d) Busbar dan PHB-TR

Busbar adalah strip atau batang logam (tembaga/aluminium) yang berfungsi mengumpulkan dan mendistribusikan arus listrik secara efisien. PHB-TR (Perangkat Hubung Bagi Tegangan Rendah) adalah panel atau kotak yang menggabungkan peralatan seperti saklar, busbar, fuse, alat ukur, dan pengaman untuk menghubungkan dan membagi daya listrik tegangan rendah dari transformator ke konsumen.

2.1.4 Beban Lebih Pada Trafo Distribusi

Salah satu permasalahan utama dalam gardu distribusi adalah beban berlebih (*overload*). Beban berlebih dapat terjadi karena:

1. Pertumbuhan jumlah pelanggan yang pesat tanpa diimbangi peningkatan kapasitas trafo.

2. Konsentrasi beban yang tidak merata.
3. Pemakaian daya yang berlebihan oleh konsumen.
4. Kurangnya pemeliharaan dan evaluasi beban pada gardu.

Dampak dari beban berlebih, antara lain :

1. Peningkatan rugi - rugi daya pada trafo

Peningkatan rugi-rugi daya pada trafo dan konduktor disebabkan oleh rugi tembaga (I^2R), yang merupakan disipasi energi dalam bentuk panas karena resistansi bahan konduktor (tembaga) yang semakin besar seiring dengan peningkatan arus dan resistansi itu sendiri. Pada trafo, rugi tembaga terjadi di belitan akibat adanya arus beban, sementara pada konduktor, rugi ini disebabkan oleh resistansi kabel akibat arus yang mengalir sepanjang jalur transmisi. Adapun rumus untuk mencari rugi - rugi pada trafo dengan cara :

Rugi Tembaga (*Copper Loss*)

$$P_{cu} = I^2 \times R \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana : P_{cu} : Rugi tembaga (Watt)

I : Arus beban pada trafo

R : Resistensi lilitan pada kumparan Trafo

Rugi total Trafo

$$P_{loss\ total} = P_{core} + P_{cu} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana : $P_{loss\ total}$: rugi total pada trafo (Watt)

P_{core} : rugi inti besi (Watt), biasanya konstan

P_{cu} : rugi tembaga (Watt)

Rugi tembaga pada kondisi *Overload*

$$P_{cu \text{ overload}} = \left(\frac{S_{nyata}}{S_{nominal}} \right) \times P_{cu \text{ nominal}} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana : $P_{cu \text{ overload}}$: Rugi tembaga saat kondisi *overload*

S_{nyata} : daya nyata (kVA) yang ditanggung trafo

$S_{nominal}$: Daya nominal trafo

$P_{cu \text{ nominal}}$: rugi tembaga pada kondisi beban nominal

2. Penurunan umur trafo akibat panas berlebih

Overload akan menyebabkan trafo 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 trafo. Adapun rumus untuk mencari arus nominal dan arus *overload* dapat dicari dengan cara :

$$I_{nominal} = P / (V \cdot \sqrt{3}) \dots\dots\dots (2.4)$$

$$I_{overload} = 80\% \cdot I_{nominal} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana : I : Arus (A)

P : Daya (Watt)

V : Tegangan (v)

Sedangkan Beban Tidak Seimbang berhubungan terhadap besarnya arus yang mengalir pada kawat netral trafo yang berujung pada rusaknya belitan trafo.

3. Meningkatnya angka gangguan (*Outage*) yang berdampak pada menurunnya keandalan sistem distribusi.
4. Potensi padam listrik massal apabila beban tidak segera ditangani.

Untuk mengatasi beban lebih, metode yang biasa digunakan adalah pecah beban, yaitu memindahkan sebagian pelanggan dari trafo yang mengalami *overload* ke trafo terdekat yang masih memiliki kapasitas cadangan.

Keandalan sistem distribusi sangat dipengaruhi oleh kinerja gardu distribusi. Indeks keandalan seperti **SAIFI** (*System Average Interruption Frequency Index*) dan **SAIDI** (*System Average Interruption Duration Index*) akan meningkat apabila gardu distribusi sering mengalami gangguan. Oleh karena itu, gardu distribusi tidak hanya berfungsi sebagai penyalur daya, tetapi juga sebagai titik pengendali keandalan jaringan listrik.

2.1.5 Pengaruh Pembebanan terhadap Umur Transformator Distribusi

Transformator distribusi merupakan peralatan utama dalam sistem distribusi tenaga listrik yang dirancang untuk beroperasi dalam batas pembebanan tertentu. Tingkat pembebanan transformator memiliki pengaruh yang signifikan terhadap umur pakai peralatan, khususnya pada bagian isolasi transformator. Pembebanan yang melebihi batas ideal dalam jangka waktu tertentu dapat mempercepat proses penuaan transformator dan menurunkan keandalannya.

Secara umum, transformator distribusi direkomendasikan untuk beroperasi pada tingkat pembebanan maksimal sekitar 80% dari kapasitas nominalnya sesuai rekomendasi praktisi lapangan karena dari standard SPLN.D3.002 lebih mengutamakan kemampuan trafo. Pengoperasian di atas batas tersebut akan menyebabkan peningkatan suhu kerja transformator. Kenaikan suhu ini terjadi akibat meningkatnya rugi-rugi tembaga dan rugi-rugi inti yang berbanding lurus dengan besarnya arus beban yang mengalir.

Peningkatan suhu kerja transformator berdampak langsung terhadap kondisi isolasi, baik isolasi kertas maupun minyak transformator. Isolasi yang mengalami suhu tinggi secara terus-menerus akan mengalami degradasi lebih cepat, sehingga kemampuan isolasi untuk menahan tegangan akan menurun. Dalam jangka panjang, kondisi ini dapat meningkatkan risiko terjadinya gangguan bahkan kerusakan permanen pada transformator.

Selain mempengaruhi isolasi, pembebanan berlebih juga dapat menyebabkan penurunan efisiensi transformator. Rugi-rugi daya yang meningkat tidak hanya berdampak pada kerugian energi listrik, tetapi juga memperbesar panas yang dihasilkan selama proses penyaluran energi. Hal ini semakin mempercepat penuaan transformator dan mengurangi umur ekonomis peralatan.

Oleh karena itu, pengendalian tingkat pembebanan transformator menjadi faktor penting dalam menjaga umur pakai dan keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi dampak pembebanan berlebih adalah dengan menerapkan metode pecah beban, sehingga transformator dapat kembali beroperasi pada kondisi pembebanan yang aman dan sesuai dengan standar yang ditetapkan.

2.1.6 Metode Penanganan Beban Lebih pada Transformator Distribusi

Beban berlebih (*overload*) pada transformator distribusi merupakan kondisi yang harus segera ditangani untuk mencegah terjadinya kerusakan peralatan serta penurunan keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Oleh karena itu, diperlukan metode penanganan yang tepat sesuai dengan kondisi lapangan dan karakteristik beban yang dilayani.

Secara umum, terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk menangani beban lebih pada transformator distribusi, antara lain:

1. **Penggantian Transformator dengan Kapasitas Lebih Besar (Uprating)**

Metode ini dilakukan dengan mengganti transformator yang mengalami overload dengan transformator baru yang memiliki kapasitas daya lebih besar. Cara ini cukup efektif untuk jangka panjang, namun membutuhkan biaya investasi yang relatif besar serta waktu pelaksanaan yang tidak singkat.

2. **Penambahan Transformator Sisip**

Penambahan transformator sisip dilakukan dengan memasang transformator baru di dekat lokasi beban yang mengalami peningkatan signifikan. Metode ini bertujuan untuk membagi beban dari transformator utama sehingga beban menjadi lebih merata.

Meskipun efektif, metode ini juga memerlukan perencanaan jaringan dan biaya pengadaan peralatan tambahan.

3. Rekonfigurasi Jaringan Distribusi

Rekonfigurasi jaringan dilakukan dengan mengubah konfigurasi jaringan tegangan menengah atau rendah, seperti pemindahan jalur sambungan pelanggan ke penyulang atau gardu lain yang masih memiliki kapasitas cadangan. Metode ini membutuhkan analisis teknis agar tidak menimbulkan permasalahan baru seperti drop tegangan atau ketidakseimbangan beban.

4. Metode Pecah Beban

Metode pecah beban merupakan salah satu solusi yang paling sering diterapkan karena relatif cepat, ekonomis, dan tidak memerlukan pengadaan peralatan baru dalam jumlah besar. Metode ini dilakukan dengan memindahkan sebagian beban dari transformator yang mengalami overload ke transformator lain yang masih memiliki kapasitas cadangan.

Berdasarkan beberapa metode tersebut, pemilihan metode penanganan beban lebih harus disesuaikan dengan kondisi lapangan, ketersediaan peralatan, serta pertimbangan teknis dan ekonomis.

2.1.7 Jaringan Tegangan Rendah (JTR)

Jaringan Tegangan Rendah merupakan perangkat yang tersusun atas kumparan dan inti besi. Pada sistem ini, kumparan sekunder mampu menghasilkan energi listrik karena adanya induksi dari medan magnet yang ditimbulkan oleh inti. Biasanya, inti terbuat dari besi berlapis, sedangkan kumparannya menggunakan kawat tembaga berlapis email sebagai penghantar arus listrik.

Dalam konstruksinya, Jaringan Tegangan Rendah memiliki dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Perubahan tegangan ditentukan oleh perbandingan jumlah lilitan di kedua kumparan tersebut. Tegangan yang masuk ke kumparan primer

disebut tegangan primer, sedangkan tegangan yang keluar dari kumparan sekunder disebut tegangan sekunder. Secara prinsip, rasio tegangan primer terhadap sekunder sebanding dengan jumlah lilitan pada kumparan primer dan sekunder. Kedua kumparan ini saling terhubung secara magnetis melalui inti, namun tidak terhubung secara langsung secara listrik.

Arus bolak-balik (AC) dapat diubah tegangannya melalui prinsip tersebut karena fluks magnetik pada AC selalu berubah-ubah. Sebaliknya, pada arus searah (DC) metode ini tidak dapat digunakan, sebab fluks magnetiknya konstan, sehingga tidak mampu menimbulkan gaya gerak listrik (GGL). Untuk mengubah tegangan DC biasanya diperlukan pemotongan arus searah agar memiliki frekuensi tertentu atau menggunakan inverter, namun dalam pembahasan ini hanya difokuskan pada jaringan tegangan rendah untuk arus bolak-balik.

Secara umum, konstruksi Jaringan Tegangan Rendah dibagi menjadi dua tipe, yaitu:

- a) Tipe inti (*core type*): kumparan primer dan sekunder ditempatkan pada sisi luar inti.
- b) Tipe cangkang (*shell type*): kumparan diletakkan di tengah, sehingga seluruh kumparan dikelilingi oleh inti besi.

Jenis-jenis Jaringan Tegangan Rendah dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa faktor, di antaranya:

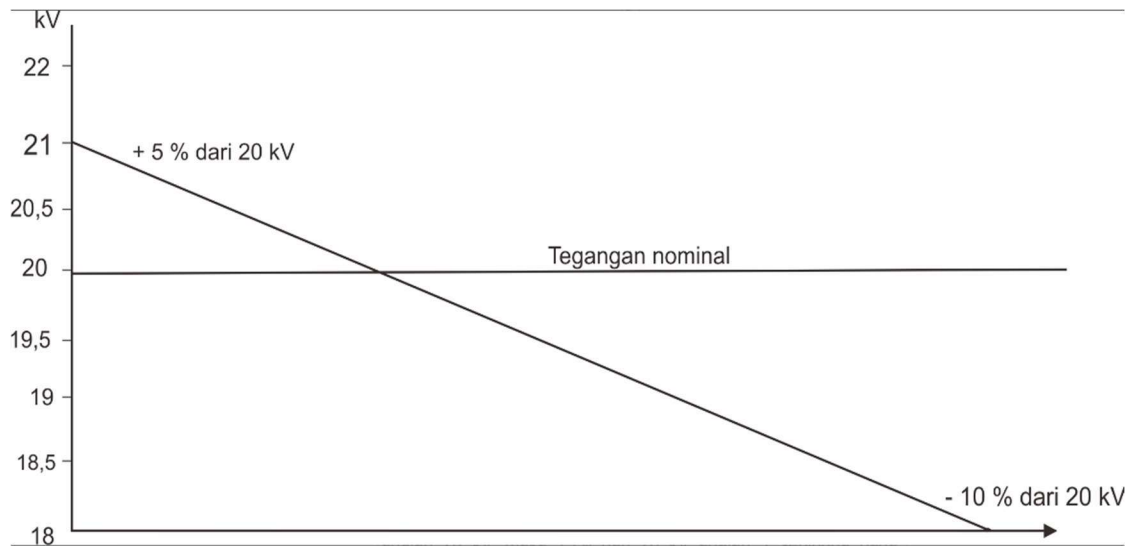
- a) Jenis fasa tegangan yang digunakan.
- b) Perbandingan lilitan pada jaringan.
- c) Sistem pendinginan.
- d) Bentuk atau konstruksi inti.

Setiap jaringan memiliki jumlah lilitan tertentu untuk menghasilkan tegangan sesuai kebutuhan. Jumlah lilitan per volt sangat dipengaruhi oleh luas penampang inti besi. Sementara itu, istilah perbandingan jaringan merujuk pada rasio jumlah lilitan kumparan primer dengan kumparan sekunder.

2.1.8 Susut Tegangan

Susut tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang pada suatu penghantar. Susu tegangan pada saluran tenaga listrik secara umum berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban serta berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar. Besarnya susut tegangan dinyatakan baik dalam persen atau dalam besaran Volt. Besarnya batas atas dan bawah ditentukan oleh kebijaksanaan perusahaan kelistrikan.

Perhitungan susut tegangan praktis pada batas-batas tertentu dengan hanya menghitung besarnya tahanan masih dapat dipertimbangkan, namun pada sistem jaringan khususnya pada sistem tegangan menengah masalah induktansi dan kapasitansinya diperhitungkan karena nilainya cukup berarti. Tegangan jatuh secara umum adalah tegangan yang digunakan pada beban. Tegangan jatuh ditimbulkan oleh arus yang mengalir melalui tahanan kawat. Tegangan jatuh V pada penghantar 16 semakin besar jika arus I di dalam penghantar semakin besar dan jika tahanan penghantar R_l semakin besar pula. Tegangan jatuh merupakan penanggung jawab terjadinya kerugian pada penghantar karena dapat menurunkan tegangan pada beban. Akibatnya hingga berada di bawah tegangan nominal yang dibutuhkan. Atas



Gambar 2. 5 Toleransi tegangan pelayanan yang diperbolehkan

dasar hal tersebut maka tegangan jatuh yang diijinkan untuk instalasi arus kuat hingga 1.000 V yang ditetapkan dalam persen dari tegangan kerjanya (*Daryanto,2010: hal 18 & 42*)

Sesuai dengan standar tegangan yang ditentukan oleh PLN SPLN No. 72 tahun 1987, perancangan jaringan dibuat agar jatuh tegangan di ujung diterima +5% dan -10%. Pada gambar 2.1.5 dijelaskan bahwa tegangan nominal pada tegangan menengah adalah 20 kV, maka +5% dari 20 kV adalah 1 sehingga pada toleransi yang didapat yaitu 21 kV dan pada batas untuk ambang bawah sebesar -10% dari 20 kV dimana hasil yang didapat adalah 2 sehingga pada toleransi yang didapat yaitu 18 kV. Tegangan jatuh 1718 pada jaringan disebabkan adanya rugi tegangan akibat hambatan listrik (R) dan reaktansi (X). Jatuh tegangan *phasor* V_d pada suatu penghantar yang mempunyai impedansi (Z) dan membawa arus (I) dapat dijabarkan dengan rumus :

$$V_d = I \cdot Z \dots\dots\dots (2.6)$$

Dalam pembahasan ini yang dimaksudkan dengan jatuh tegangan (ΔV) adalah selisih antara tegangan kirim (V_k) dengan tegangan terima (V_T), maka jatuh tegangan dapat didefinisikan adalah :

$$\Delta V = (V_k) - (V_r) \dots\dots\dots (2.7)$$

Karena adanya resistansi pada penghantar maka tegangan yang diterima konsumen (V_r) akan lebih kecil dari tegangan kirim (V_s), sehingga tegangan jatuh (V_{drop}) merupakan selisih antara tegangan pada pangkal pengiriman (*sending end*) dan tegangan pada ujung penerimaan (*receiving end*) tenaga listrik. Tegangan jatuh relatif dinamakan regulasi tegangan VR (*voltage regulation*) dan dinyatakan oleh rumus :

$$VR = \frac{V_s - V_r}{V_r} \times 100\% \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana :

V_s = tegangan pada pangkal pengiriman

V_r = tegangan pada ujung penerimaan

Untuk menghitung jatuh tegangan, diperhitungkan reaktansinya, maupun faktor dayanya yang tidak sama dengan satu, maka berikut ini akan diuraikan cara perhitungannya. Dalam penyederhanaan perhitungan, diasumsikan beban-bebannya merupakan beban fasa tiga yang seimbang dan faktor dayanya ($\cos \phi$) antara 0,6 s/d 0,85. tegangan dapat dihitung berdasarkan rumus pendekatan hubungan sebagai berikut :

$$(\Delta V) = I (R \cdot \cos \phi + X \cdot \sin \phi) L \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana :

I = Arus beban (Ampere)

R = Tahanan rangkaian (Ohm)

X = Reaktansi rangkaian (Ohm)

2.1.9 Keandalan Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Keandalan sistem distribusi tenaga listrik merupakan kemampuan sistem dalam menyalurkan energi listrik secara kontinu dengan tingkat gangguan yang minimal.

Keandalan menjadi salah satu indikator utama dalam menilai kualitas pelayanan tenaga listrik kepada pelanggan.

Indeks keandalan yang umum digunakan oleh PT PLN (Persero) antara lain SAIDI (System Average Interruption Duration Index) dan SAIFI (System Average Interruption Frequency Index). SAIDI menunjukkan rata-rata durasi gangguan listrik yang dialami pelanggan dalam satu periode tertentu, sedangkan SAIFI menunjukkan rata-rata frekuensi terjadinya gangguan.

Kondisi beban berlebih pada transformator distribusi dapat berdampak langsung terhadap menurunnya keandalan sistem. Overload menyebabkan peningkatan suhu transformator, mempercepat degradasi isolasi, serta meningkatkan risiko terjadinya gangguan atau pemadaman. Dengan demikian, pengendalian pembebanan transformator menjadi salah satu faktor penting dalam menjaga keandalan sistem distribusi.

Penerapan metode pecah beban merupakan salah satu upaya untuk meningkatkan keandalan sistem distribusi. Dengan menurunkan pembebanan transformator ke level yang aman, potensi gangguan dapat diminimalkan, sehingga kontinuitas penyaluran energi listrik kepada pelanggan dapat terjaga.

2.2. Penelitian yang Relevan

Untuk mendukung penelitian ini, penulis menelaah berbagai penelitian yang memiliki hubungan dengan topik. Referensi yang digunakan mencakup jurnal, artikel, skripsi, maupun literatur buku yang relevan. Berikut adalah beberapa penelitian yang dijadikan dasar dalam penelitian ini:

1. **Albert Gifson Hutajulu dan Muchammad Agum Wicaksono (2023)** berjudul *“Analisa Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Susut Daya pada Transformator Distribusi di PT PLN UP3 Semarang”* menjadi salah satu referensi yang sangat relevan. Dalam penelitian tersebut dilakukan analisis terhadap kondisi ketidakseimbangan beban pada beberapa gardu distribusi di wilayah kerja PT PLN UP3 Semarang. Melalui metode redistribusi beban dengan penyeimbangan fasa dan

pemindahan sambungan rumah (SR), hasil penelitian menunjukkan bahwa arus netral dapat dikurangi hingga 63,63%, rugi-rugi daya menurun sebesar 22,92%, dan efisiensi transformator meningkat secara signifikan. Penelitian ini memiliki relevansi kuat dengan topik yang diangkat, karena secara prinsip metode yang digunakan sejalan dengan metode pecah beban yang bertujuan untuk mengurangi pembebanan berlebih pada salah satu sisi trafo distribusi.

2. **Almas, Syukri, dan Muliadi (2024)** dalam penelitian berjudul “*Analisis Pengaruh Pembebanan Lebih Pada Trafo Distribusi GH Krueng Cut Banda Aceh*” meneliti pengaruh beban berlebih terhadap efisiensi dan performa trafo distribusi. Berdasarkan hasil pengukuran, trafo TKP 03-01 mengalami pembebanan hingga 123,31% dari kapasitas nominal. Penelitian ini merekomendasikan langkah teknis seperti peningkatan kapasitas daya (uprating) dan redistribusi beban untuk mengurangi pembebanan berlebih. Hasil penelitian ini memiliki relevansi yang sangat kuat terhadap topik penelitian ini karena membahas langsung dampak dan penanganan beban berlebih pada gardu distribusi.
3. **Sobri Miftahus Sururi, Sergio Xavier Paskal W., Sujito, Rizal Dwi Saputra, Muhammad Satrio Naufal, dan Mita Elifisia (2022)** berjudul “*Analisis Pembebanan Transformator Terhadap Susut Daya (Losses) pada Jaringan Distribusi Penyulang Pujon PT PLN ULP Batu*” menjelaskan bahwa semakin tinggi tingkat pembebanan trafo, semakin besar rugi-rugi daya yang terjadi. Penelitian ini menggarisbawahi pentingnya pengaturan beban agar tidak melebihi kapasitas nominal trafo untuk menjaga efisiensi sistem distribusi.
4. **Muhammad, Selamat Meliala, dan Damayanti (2022)** yang berjudul “*Mengatasi Beban Lebih Transformator Gardu Distribusi dengan Menggunakan Trafo Sisip di PT PLN (Persero) ULP Langsa Kota*” juga meneliti solusi serupa. Dalam penelitian ini,

gardu distribusi TC-7 mengalami pembebanan berlebih hingga 84,85% dari kapasitas trafo. Setelah dilakukan pemasangan trafo sisip, pembebanan turun menjadi 49,65%. Selain itu, hasil simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP 12.6.0 menunjukkan penurunan signifikan pada drop tegangan dari 17% menjadi di bawah 10%, serta peningkatan kualitas pelayanan pelanggan. Penelitian ini memperkuat bukti bahwa metode pecah beban melalui trafo sisip bukan hanya mengurangi beban berlebih, tetapi juga meningkatkan stabilitas tegangan pada jaringan distribusi.

5. **Zefanya Cergio Halitopo, Ekawati Margaretha Ohee, dan Dultudes Mangopo (2022)** berjudul “*Analisis Penambahan Transformator Sisipan Guna Mengatasi Beban Lebih (Overload) pada Gardu Distribusi di PT PLN (Persero) ULP Abepura*” merupakan salah satu penelitian yang sangat berkaitan dengan topik ini. Penelitian tersebut membahas secara detail penerapan metode trafo sisip untuk mengatasi kondisi beban berlebih pada gardu ABE 127 berkapasitas 200 kVA yang mengalami pembebanan hingga 95,18%. Melalui penambahan trafo sisip ABE 460 berkapasitas 100 kVA dan melakukan pecah beban dengan manuver JTR, pembebanan pada gardu ABE 127 berhasil diturunkan menjadi sekitar 50,56%. Hasil ini menunjukkan bahwa metode pecah beban menggunakan transformator sisipan sangat efektif dalam mengurangi *overload* dan memperpanjang umur operasi trafo.
6. **Saiful, Saiful, Nasrun, M., Suryani, S., & Zainuddin, Z. (2023).** Berjudul “*Analisis Dampak Overload dan Penambahan Trafo Sisipan pada Penyulang Unit Layanan Pelanggan (ULP) Takalar*” Penelitian ini menganalisis bagaimana pemasangan trafo sisipan dapat mengatasi kondisi overload pada trafo distribusi, dengan membandingkan persentase pembebanan sebelum dan setelah pemasangan. Hasilnya menunjukkan bahwa setelah pemasangan trafo sisipan, persentase pembebanan berkurang signifikan sehingga mengurangi beban berlebih dan meningkatkan kinerja sistem distribusi.

7. **Latumahina, A., & Launuru, A. P. (2025).** berjudul “*Analisis dampak pembebanan lebih transformator terhadap penyulang Sulamadaha gardu GT-SOLBA Ternate Maluku Utara*” Penelitian ini mempelajari kasus overload pada transformator distribusi GT-SOLBA di Sulamadaha (PT PLN ULP Ternate) dan membahas pemindahan (transfer) beban trafo sebagai solusi untuk mengatasi overload. Hasilnya menunjukkan adanya penurunan signifikan persentase pembebanan setelah beban dipindahkan ke trafo lain sehingga trafo tidak lagi mengalami overload.

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu yang telah diuraikan, dapat disimpulkan bahwa permasalahan beban lebih pada transformator distribusi merupakan isu yang umum terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik, khususnya di wilayah dengan pertumbuhan beban yang tinggi. Berbagai metode telah diterapkan untuk mengatasi permasalahan tersebut, seperti penyeimbangan beban, pemasangan transformator sisip, dan redistribusi beban.

Perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya terletak pada fokus penerapan metode pecah beban secara langsung pada gardu distribusi eksisting tanpa penambahan transformator baru. Penelitian ini lebih menekankan pada analisis kondisi pembebanan sebelum dan sesudah pecah beban serta evaluasi efektivitasnya dalam meningkatkan keandalan sistem distribusi. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi praktis bagi PLN dalam pengambilan keputusan teknis di lapangan.

Tabel 2. 1 Penelitian yang relevan

No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
1.	“Analisa Ketidakseimbangan Beban	Terjadinya ketidakseimbangan beban yang menyebabkan	Analisis kuantitatif dan observasi lapangan	Arus netral menurun hingga 63,63%, rugi-rugi daya	Penelitian ini hanya membahas ketidakseimba

	Terhadap Arus Netral dan Susut Daya pada Transformator or Distribusi di PT PLN UP3 Semarang” (Albert Gifson Hutajulu & Muchammad Agum Wicaksono, 2023)	arus netral tinggi dan rugi-rugi daya meningkat pada beberapa gardu distribusi.	dengan metode redistribusi beban melalui penyeimbangan fasa dan pemindahan sambungan rumah (SR).	berkurang sebesar 22,92%, dan efisiensi transformator meningkat.	ngan beban antar fasa, belum meneliti penerapan metode pecah beban pada kondisi <i>overload</i> trafo.
2.	“Analisis Pengaruh Pembebanan Lebih Pada Trafo Distribusi GH Krueng Cut Banda Aceh” (Almas, Syukri &	Beban trafo melebihi kapasitas nominal (<i>overload</i>) hingga 123,31% menyebabkan panas berlebih dan efisiensi menurun.	Analisis pembebanan dan evaluasi kapasitas trafo berdasarkan data pengukuran lapangan	<i>Overload</i> teridentifikasi pada trafo TKP 03-01, direkomendasikan redistribusi beban atau penambahan trafo.	Penelitian belum menerapkan langsung metode pecah beban secara teknis pada gardu distribusi

	Muliadi, 2024)				
3.	“Analisis Pembebana n Transformat or Terhadap Susut Daya (Losses) pada Jaringan Distribusi Penyulang Pujon PT PLN ULP Batu” (Sobri Miftahus Sururi, Sergio Xavier Paskal W., Sujito, Rizal Dwi Saputra, Muhammad Satrio Naufal, dan	Beban trafo melebihi kapasitas nominal sehingga menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya dan penurunan efisiensi.	Observasi lapangan dan pengukuran arus beban untuk menghitung losses.	Pembebanan berlebih meningkatkan losses dan menurunkan efisiensi jaringan distribusi.	Penelitian hanya mendeskripsik an kondisi <i>overload</i> tanpa memberikan metode teknis penanganan seperti pecah beban.

	Mita Elifisia., 2022)				
4.	“Mengatasi Beban Lebih Transformat or Gardu Distribusi dengan Menggunakan Trafo Sisip di PT PLN (Persero) ULP Langsa Kota” (Muhammad, Meliala & Damayanti, 2022)	Gardu TC-7 mengalami pembebanan berlebih hingga 84,85% yang menyebabkan drop tegangan mencapai 17%.	Simulasi menggunakan ETAP 12.6.0 untuk analisis penurunan beban setelah pemasangan trafo sisip.	Pembebanan turun menjadi 49,65% dan drop tegangan berkurang hingga di bawah 10%.	Penelitian membahas metode pecah beban dengan trafo sisip, namun belum difokuskan pada analisis efisiensi sistem pasca-redistribusi.
5.	“Analisis Penambahan Transformat or Sisipan Guna	Gardu ABE 127 mengalami beban berlebih mencapai 95,18% dari kapasitas trafo.	Penerapan trafo sisip (insertion transformer) dan manuver	Pembebanan berhasil turun menjadi 50,56% setelah penambahan trafo sisip.	Penelitian fokus pada penggunaan trafo sisip, sedangkan penelitian ini

	Mengatasi Beban Lebih (<i>Overload</i>) pada Gardu Distribusi di PT PLN (Persero) ULP Abepura” (Zefanya Cergio Halitopo, Ekawati Margaretha Ohee, dan Dultudes Mangopo, 2022)		jaringan untuk pecah beban.		menekankan pecah beban sebagai metode utama.
6.	<i>“Analisis Dampak Overload dan Penambahan Trafo Sisipan pada Penyulang</i>	Overload pada transformator distribusi akibat pertumbuhan beban pelanggan yang tidak diimbangi dengan kapasitas	Metode penelitian dilakukan dengan menganalisis kondisi pembebanan transformator sebelum dan	Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan trafo sisipan mampu menurunkan beban transformator	Penelitian ini belum mengkaji kombinasi penanganan overload antara trafo sisipan dan metode lain

	<i>Unit Layanan Pelanggan (ULP) Takalar”</i> (Saiful, Saiful, Nasrun, M., Suryani, S., & Zainuddin, Z., 2023)	transformator, sehingga menyebabkan penurunan kualitas pelayanan dan risiko gangguan sistem distribusi.	sesudah penambahan trafo sisipan. Data daya, arus, dan persentase pembebanan digunakan untuk mengevaluasi dampak pemasangan trafo sisipan terhadap penurunan beban transformator utama.	yang mengalami overload secara signifikan serta meningkatkan keandalan dan kinerja sistem distribusi listrik.	seperti pecah beban atau load transfer untuk memperoleh solusi yang lebih optimal.
7.	<i>“Analisis dampak pembebanan lebih transformator terhadap penyulang Sulamadaha gardu GT-SOLBA</i>	Terjadinya pembebanan lebih (overload) pada transformator distribusi yang menyebabkan menurunnya kinerja transformator	Penelitian ini menggunakan metode analisis data pembebanan transformator sebelum dan sesudah dilakukan pemindahan	Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemindahan beban dari transformator yang mengalami overload ke transformator lain yang masih	Penelitian ini belum membahas perbandingan efektivitas metode load transfer dengan metode penanganan overload

	<i>Ternate Maluku Utara</i>” (Latumahina, A., & Launuru, A. P., 2025)	serta berpotensi mempercepat kerusakan peralatan dan menurunkan keandalan sistem distribusi tenaga listrik.	beban (load transfer). Data arus, daya, dan persentase pembebanan dianalisis untuk mengetahui tingkat overload dan efektivitas pemindahan beban sebagai solusi penanganan.	memiliki kapasitas mampu menurunkan persentase pembebanan secara signifikan, sehingga transformator dapat kembali beroperasi dalam kondisi normal dan aman.	lainnya seperti pemasangan trafo sisip atau mutasi transformator dalam jangka panjang.
--	--	--	---	--	---