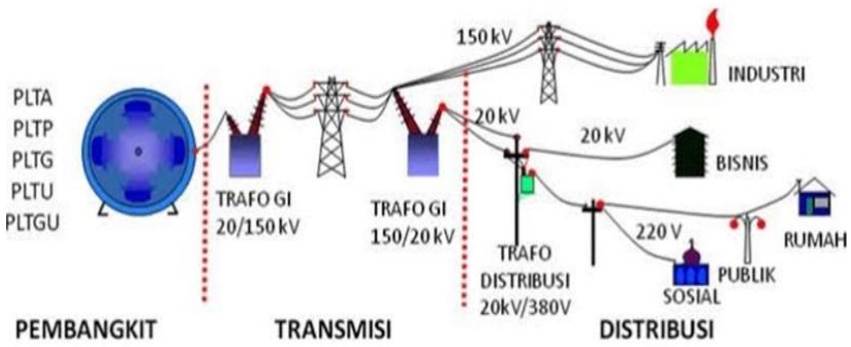
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu kesatuan terpadu yang berfungsi untuk membangkitkan, menyalurkan, dan mendistribusikan energi listrik dari pusat pembangkitan hingga ke konsumen akhir. Sistem ini terdiri atas tiga subsistem utama, yaitu pembangkitan, transmisi, dan distribusi, yang saling terintegrasi dan bekerja secara simultan untuk menjamin tersedianya energi listrik secara berkelanjutan. Dalam praktik operasional, sistem distribusi menempati posisi strategis karena menjadi tahap akhir penyaluran energi listrik sekaligus menjadi bagian yang paling dekat dengan pelanggan. Kedekatan ini menyebabkan sistem distribusi memiliki tingkat paparan gangguan paling tinggi, baik akibat variasi beban, kondisi lingkungan, maupun interaksi langsung dengan peralatan pelanggan. Oleh karena itu, keandalan sistem tenaga listrik sangat bergantung pada performa sistem distribusi dan perangkat proteksi yang menyertainya.



Gambar 2. 1 Sistem Distribusi Listrik (Gonen, 1996)
Sumber(https://share.google/images/qyqf9M4VCJ43DkFqa)

Menurut Arsyad dan Fauziah (2023), kajian empiris pada jaringan distribusi 20 kV menunjukkan bahwa mayoritas kejadian gangguan operasional (yang memengaruhi indikator keandalan seperti SAIDI, SAIFI, dan CAIDI) bersumber dari level distribusi bukan transmisi atau pembangkitan. Penelitian mereka menyoroti beberapa penyebab inti: ketidaksesuaian koordinasi proteksi (misal pemilihan fuse/TCC yang tidak sesuai), degradasi kondisi fisik peralatan (terminal terkorosi, sambungan longgar), serta keterbatasan pemantauan real-time pada level ULP.

2.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik 20 kV

Menurut Suganda, Marsa, dan Effendi (2022) jaringan distribusi tenaga listrik, termasuk pada level 20 kV, merupakan subsistem dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari gardu distribusi ke konsumen akhir secara andal dan berkesinambungan. Fungsi utamanya mencakup pemenuhan kebutuhan daya pelanggan, pembagian beban, penyediaan titik proteksi, serta menjaga kontinuitas pasokan di tengah variasi beban

Selain itu, menurut Azzam, Gusmedi, & Huda (2024), sistem distribusi 20 kV menyediakan infrastruktur yang menghubungkan gardu induk dengan gardu distribusi dan konsumen, serta menjadi kerangka bagi implementasi proteksi, pemeliharaan, dan manajemen beban. Keberadaan jaringan distribusi memungkinkan penyebaran listrik ke konsumen secara luas dan mendukung fleksibilitas dalam pengaturan beban dan proteksi distribusi.

Dengan demikian, distribusi 20 kV memegang peran strategis dalam menjamin suplai listrik kepada konsumen, sekaligus sebagai fondasi bagi sistem

proteksi, monitoring beban, dan manajemen keandalan. Kualitas distribusi, kapasitas beban, dan karakteristik jaringan ditentukan pada tingkat distribusi ini.

2.2.1 Jaringan Tegangan Menengah (JTM)

Menurut Hidayat (2023), jaringan distribusi 20 kV biasanya terdiri dari penyulang primer (feeder) yang dapat berbentuk radial, loop, atau kombinasi, menghubungkan gardu induk ke gardu distribusi atau trafo distribusi. Struktur ini meliputi saluran udara atau kabel bawah tanah, konduktor, insulator, tiang atau tower, dan transformator distribusi pada ujung feeder.

Sementara itu, penelitian oleh Dede Fauzul Iman et al. (2024) menyebut bahwa distribusi tegangan menengah 20 kV mendominasi sebagai tegangan primer dalam distribusi, sebelum diturunkan ke tegangan rendah (< 1 kV). Struktur ini memungkinkan fleksibilitas dalam konfigurasi jaringan radial atau open-loop bergantung pada kondisi topologi dan beban.

Secara umum, struktur JTM 20 kV membentuk tulang punggung distribusi listrik, dengan konfigurasi dan komponen fisik yang menentukan keandalan, fleksibilitas pemeliharaan, serta kemampuan sistem untuk menghadapi gangguan dan beban fluktuatif.

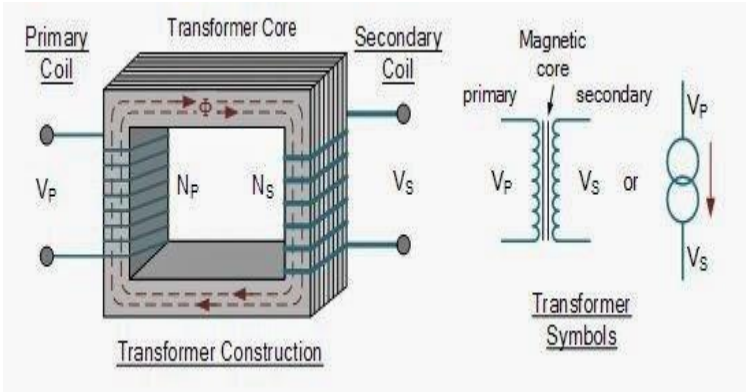
2.2.2 Jenis dan Karakteristik Gangguan pada Sistem 20 kV

Dalam studi keandalan 20 kV penyulang BP1, Prasetia et al (2024) mengklasifikasikan gangguan sebagai penyebab pemadaman dan hilangnya daya; frekuensi dan durasi gangguan dijadikan basis indeks SAIFI dan SAIDI untuk mengevaluasi keandalan distribusi. Kondisi saluran, panjang feeder, dan proteksi menentukan karakteristik gangguan dan dampaknya.

Karakteristik gangguan jenis fault, lokasi, durasi sangat menentukan strategi proteksi dan tindakan mitigasi: apakah fuse, recloser, atau proteksi lain harus dipasang, serta bagaimana koordinasi proteksi dilakukan agar gangguan dapat diisolasi dengan cepat dan selektif.

2.3 Transformator Distribusi

Menurut Sukadana (2024) dan Prasetia (2021) , transformator distribusi bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik di mana perubahan fluks magnetik pada inti menyebabkan gaya gerak listrik (g.g.l.) di lilitan sekunder sehingga tegangan diubah dari tegangan menengah (20 kV) menjadi tegangan rendah (380/220 V) untuk disalurkan ke konsumen. Kedua sumber menjelaskan aspek inti fisik transformator (inti besi, lilitan primer dan sekunder, serta kemampuan transfer daya) dan menekankan bahwa efek saturasi inti serta hubungan impedansi seri menentukan perilaku transien seperti inrush saat energisasi. Pengetahuan tentang prinsip kerja ini penting untuk memahami bagaimana gangguan di sisi sekunder (arus lebih, hubung singkat, ketidakseimbangan) berefek pada temperatur, arus, dan umur trafo.



Gambar 2. 2 Prinsip Kerja Transformator
Sumber:*(https://share.google/images/5jKmFWepcjg4KwcB6)*

2.3.1 Parameter Teknis Trafo (Rating,Impedansi)

Menurut Sukadana (2024) dan Sofyan,S.(2018), parameter teknis utama transformator distribusi meliputi:

Rating / kapasitas (kVA) menentukan beban maksimal kontinu yang dapat ditangani; pemilihan rating harus selaras dengan profil beban di lapangan. (Sukadana, 2024b)

Impedansi trafo (Zt) impedansi series trafo (dinyatakan dalam %Z) menentukan pembagian tegangan dan besaran arus hubung singkat yang masuk ke trafo; nilai impedansi mempengaruhi arus gangguan yang terlihat di sisi sekunder dan kemampuan sistem untuk menahan fault. (H et al., 2018)

2.4 Sistem Proteksi Jaringan Distribusi 20 kV

Menurut Ibrahmusa (2023) dan Sucita et al.(2025), sistem proteksi pada jaringan distribusi 20 kV merupakan rangkaian perangkat keras dan prosedural yang dirancang untuk mendeteksi kondisi abnormal (seperti arus lebih, gangguan fasa, ground fault) dan mengambil tindakan pemutusan/isolasi secara otomatis untuk mencegah kerusakan pada peralatan serta menjaga kontinuitas pelayanan. Sistem proteksi bertujuan mengidentifikasi lokasi gangguan, memutus bagian yang rusak secara selektif, serta meminimalkan dampak terhadap pelanggan dan aset jaringan

3.4.1 Prinsip Dasar Proteksi

Menurut sunaya (2020) dan agustian,et al (2025), keempat prinsip dasar proteksi adalah landasan teknis penentuan perangkat dan set-setting proteksi:

A. Kecepatan

Proteksi harus cukup cepat untuk membatasi durasi gangguan sehingga energi termal (I^2t) yang dilewatkan ke peralatan tidak merusak isolasi atau struktur mekanik.

B. Kepekaan

Proteksi harus mampu mendeteksi gangguan kecil yang berpotensi merusak; namun tetap tidak terlalu sensitif sehingga memicu pemutusan palsu.

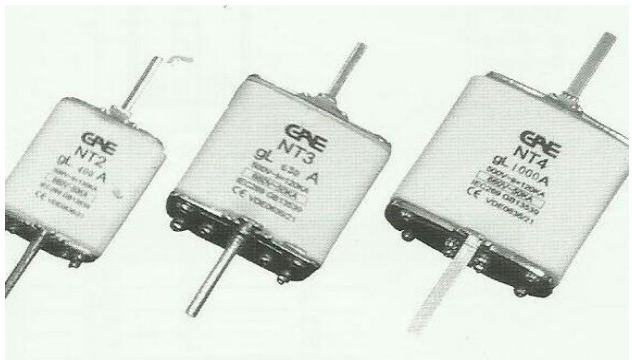
C. Selektivitas

Proteksi harus bekerja secara lokal (downstream) sehingga gangguan tidak memicu operasi proteksi upstream yang memutus area lebih luas Keandalan

Proteksi harus bekerja konsisten saat kondisi fault muncul, dengan tingkat kegagalan operasi yang sangat rendah

2.5 NT Fuse sebagai Peralatan Proteksi Sisi Sekunder

NT Fuse merupakan jenis fuse tegangan rendah berkapasitas tinggi (high rupturing capacity/HRC) yang digunakan sebagai proteksi sisi sekunder transformator distribusi untuk mengamankan trafo dari arus lebih dan hubung singkat. Pada sistem distribusi, NT Fuse ditempatkan di panel PHB-TR atau rumah trafo sebagai lapisan proteksi terakhir sebelum gangguan langsung merusak kumparan transformator



Gambar 2. 3 NT Fuse
Sumber :*https://share.google/g9e0wy8zHwctBZOZh*

Prinsip kerja NT Fuse didasarkan pada mekanisme pemanasan Joule (I^2R), yaitu panas yang timbul akibat aliran arus melebihi batas karakteristik fuse akan menyebabkan elemen fuse melebur dan memutus rangkaian.

2.5.1 Komponen NT Fuse

A. Fusible Link

Berfungsi sebagai elemen penghantar yang akan meleleh ketika arus melebihi batas kemampuan fuse; materialnya berupa paduan logam bertitik leleh tertentu seperti silver-alloy atau copper-alloy yang dirancang untuk memiliki karakteristik melting curve sesuai standar TCC sehingga memastikan fuse mampu merespons gangguan secara cepat dan proporsional



Gambar 2. 4 Fusible link
Sumber :*https://share.google/fotMzzywC2CnQMwgI*

B. Fuse Holder atau Fuse Base

Yaitu bagian yang terpasang pada panel PHB-TR dan menjadi titik koneksi utama antara fuse dengan penghantar jaringan. Kondisi mekanik dan elektrik pada holder seperti kekencangan baut, kebersihan terminal, serta tingkat oksidasi permukaan kontak sangat berpengaruh terhadap nilai resistansi sambungan. Resistansi yang meningkat karena korosi atau kotoran dapat menyebabkan pemanasan berlebih,

penurunan efisiensi pelelehan, dan bahkan kegagalan fuse memutus arus gangguan pada nilai rendah.



Gambar 2. 5 Fuse Holder
Sumber : *https://share.google/BJvtLFTz05zYFmbFc*

2.6 Arus Beban

arus beban aktual merupakan parameter utama yang menunjukkan kondisi operasi nyata transformator distribusi, karena merepresentasikan besarnya energi listrik yang disalurkan kepada pelanggan pada waktu tertentu.

(Fadli et al., n.d.)Secara teoritis, arus beban sekunder transformator tiga fasa dihitung dari daya aktif terukur menggunakan persamaan:

$$I_{aktual} = \frac{P}{\sqrt{3}\, V_{LL} \cos \varphi} \quad (1)$$

Keterangan :

I_{aktual}: arus beban aktual (A)

P : daya aktif (W)

V_{LL}: tegangan antar fasa (V)

$\cos \varphi$: faktor daya

2.7 Arus Hubung Singkat

arus gangguan atau arus hubung singkat merupakan arus maksimum yang timbul akibat kegagalan isolasi atau hubungan langsung antar konduktor, dan menjadi parameter penting dalam menentukan kemampuan pemutusan perangkat proteksi. Besarnya arus gangguan sangat dipengaruhi oleh impedansi transformator.

Arus hubung singkat sisi sekunder dihitung berdasarkan impedansi transformator:

$$\text{Isc} = \text{FLA} / \text{Z} \quad (2)$$

Keterangan :

I_{sc}: Nilai Arus Gangguan Pada Transformator (KA)

FLA : Nilai Full Load Ampere (KV)

Z: Nilai impedansi Transformator (%)

Sebelum melakukan analisis terhadap besarnya arus gangguan yang mungkin terjadi pada suatu sistem tenaga listrik, terlebih dahulu perlu diketahui nilai Full Load Ampere (FLA) dari transformator, Adapun nilai Full Load Ampere (FLA) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{FLA} = \text{KVA x } 1000 / \text{V x } \sqrt{3} \quad (3)$$

Keterangan :

FLA : Nilai Full Load Ampere

KVA : Daya Transformator

V : Tegangan Sisi Sekunder transformator (VA)

2.7.1 Rating NT Fuse

Rating fuse merupakan spesifikasi teknis yang menunjukkan batas kemampuan operasi fuse dalam kondisi kerja tertentu sesuai standar internasional seperti IEC 60269. Parameter utama dalam rating fuse meliputi arus nominal (In), yaitu arus maksimum yang dapat dialirkan secara kontinu tanpa menyebabkan pelelehan pada fuse. Dalam aplikasi distribusi tegangan rendah, khususnya pada NT/NH Fuse tipe gL, breaking capacity umumnya berada pada kisaran 80–120 kA pada 500 V, sehingga mampu menahan arus prospektif tinggi pada sistem distribusi sekunder. Ketepatan pemilihan rating ini sangat menentukan keberhasilan proteksi, karena rating yang terlalu kecil dapat menyebabkan nuisance trip, sedangkan rating yang terlalu besar berpotensi gagal melindungi transformator saat terjadi gangguan (Fahrezi,2021)

2.8 Bearing Capacity

Menurut IEC 60269, fuse merupakan perangkat proteksi yang bekerja dengan cara memutus rangkaian listrik ketika arus yang mengalir melebihi batas yang diizinkan sehingga dapat melindungi peralatan listrik dari kerusakan akibat arus lebih maupun hubung singkat. Dalam sistem distribusi tenaga listrik, kemampuan fuse untuk menahan arus selama kondisi operasi normal dikenal dengan istilah bearing capacity. Bearing capacity menggambarkan kemampuan sekering untuk membawa arus beban tertentu dalam jangka waktu operasi tanpa menyebabkan elemen fuse meleleh, namun tetap mampu bekerja ketika terjadi arus gangguan**.**

Bearing Capacity dapat dipengaruhi oleh beberapa hal, yaitu arus nominal fuse,dan arus beban yang mengalir pada beban transformator tersebut.

2.8.1 Arus Nominal Fuse (Rated Current)

Menurut Kristian (2022), arus nominal fuse merupakan arus maksimum yang dapat dialirkan secara kontinu pada sekering tanpa menyebabkan elemen fuse mengalami pelelehan. Nilai arus nominal ini telah ditentukan oleh pabrikan berdasarkan standar pengujian tertentu sehingga fuse dapat bekerja secara stabil pada kondisi operasi normal sistem tenaga listrik.

Selanjutnya Imanuel, Ambabunga, dan Lumembang (2022) menjelaskan bahwa arus nominal fuse menjadi parameter utama dalam menentukan kapasitas proteksi pada jaringan distribusi tenaga listrik. Pemilihan arus nominal yang tidak sesuai dapat menyebabkan fuse sering putus saat terjadi kenaikan arus beban sementara atau sebaliknya fuse tidak bekerja ketika terjadi gangguan arus lebih

Rumus Hubungan Arus Nominal dan Arus Beban dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\mathrm{I_n} = (\,K\,) \times \mathrm{I_b} \tag{4}$$

Keterangan:

$\mathrm{I_n} = \text{Arus nominal fuse (Ampere)}$

$\mathrm{I_b} = \text{Arus beban pada sistem (Ampere)}$

Selanjutnya, Tambara, Zulfahri, dan Arleny (2022) menjelaskan bahwa arus beban merupakan parameter penting dalam analisis sistem distribusi karena arus ini menentukan tingkat pembebanan pada peralatan listrik, termasuk fuse sebagai perangkat proteksi. Jika arus beban yang mengalir mendekati atau melebihi nilai arus nominal fuse, maka risiko pelelehan elemen fuse akan meningkat dan dapat menyebabkan gangguan pada sistem distribusi listrik. Oleh karena itu, dalam analisis bearing capacity NT Fuse, arus beban perlu dibandingkan dengan arus nominal fuse untuk memastikan bahwa sekering masih berada dalam batas kemampuan hantar arusnya. Kondisi operasi yang aman secara umum dapat dinyatakan dengan hubungan:

$$I_b < I_n$$

Dimana :

I_b : Arus Beban (A)

I_n : Arus Nominal Fuse (A)

Untuk menentukan penentukan ukuran NH Fuse yang terpasang digunakan persamaan rumus sebagai berikut (A Fahrezi & Liliana, 2021)

$$I_n = \left(\frac{S}{\sqrt{3} \times V}\right)$$

$$\text{I tiap jurusan} = \frac{I_n}{Jumlah\ Jurusan} \quad (5)$$

$$NH\ Fuse\ = k \times\ I\ tiap\ jurusan$$

dengan:

I = arus nominal fuse (Ampere)

Ib = arus beban aktual (Ampere)

S = kapasitas transformator (VA)

V = tegangan antar fasa (Volt)

k = faktor keamanan (0,9)

2.9 Penelitian Terkait Terdahulu

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

No	Peneliti / Tahun	Judul Penelitian	Fokus / Hasil Penelitian
1	Ferdyansyah, A. (2024)	Analisis Kinerja Fuse Cut Out pada Sistem Distribusi 20 kV di PT PLN ULP Karangpilang	Menemukan ketidaksesuaian rating fuse dengan arus beban di beberapa penyulang; fuse lambat bekerja pada gangguan arus rendah. Rekomendasi optimasi TCC dan rating fuse berdasarkan operasi aktual.
2	Dewa, R. S. (2024)	Tahanan Isolasi Uji Tegangan Kering FCO 24 kV/100 A/630 A	Kualitas isolasi dan kondisi fisik fuse base memengaruhi keandalan operasi; oksidasi material meningkatkan resistansi dan memperlambat pemutusan saat terjadi gangguan.

3	Kembau, M. C. (2023)	Analisis Kinerja Fuse Cut Out (FCO) di Jaringan Distribusi Primer 20 kV ULP Paniki	Kondisi fisik fuse base dan kualitas sambungan menentukan sensitivitas fuse; koneksi longgar menyebabkan fuse gagal bekerja sesuai TCC pabrikan.
4	Sidabutar, V. C. (2023)	Analisa Kerja Fuse Cut Out (FCO) Pada Transformator Distribusi ML-170 PP.01 PT PLN ULP Labuhan	Fuse mengalami pemutusan tidak selektif karena rating terlalu kecil untuk beban puncak; perlu penyesuaian rating fuse dan kurva TCC.
5	Maskun, M. F. dkk. (2022)	Analisis Kinerja Fuse Cut Out dan Lightning Arrester pada Jaringan Distribusi 20 kV	Banyak FCO meleleh akibat arus transient dan sambaran petir; koordinasi proteksi antara FCO dan LA belum optimal.
6	Fahrezi, I. A. (2021)	Studi Kelayakan Pengaman Input–Output Trafo Distribusi Fuse NH	Ketidaktepatan rating NH Fuse menyebabkan kegagalan pemutusan saat terjadi gangguan; studi memberi rekomendasi rating fuse berdasarkan arus inrush dan short-circuit.
7	Prasetia, W. A. N. (2021)	Simulasi Arus Inrush terhadap Pemilihan Fuse pada Transformator Distribusi	Arus inrush trafo mencapai 8–12 kali arus nominal; fuse dapat putus tanpa gangguan jika tidak mempertimbangkan karakteristik inrush. Direkomendasikan fuse time-delay.
8	Pratama, P. R., Yusmartato, & Akhiruddin (2019–2020)	Analisis Pengaman Transformator Distribusi 400 kVA dengan Fuse Cut Out	Rating fuse terlalu besar menyebabkan fuse tidak memutus gangguan level sedang; rekomendasi pemilihan fuse berbasis arus gangguan aktual dan koordinasi OCR.
9	Nasution, R. S. (2017–2020)	Analisis Penggunaan FCO sebagai Proteksi Arus Lebih pada Jaringan Distribusi 20 kV Feeder TI8	FCO tidak bekerja sesuai kurva TCC akibat penurunan kondisi fisik; diperlukan inspeksi dan penggantian fuse secara berkala.
10	Simanjuntak, B. J. (2024)	LKP Perawatan Transformator Distribusi 20 kV di PT PLN ULP Makale	Fuse sekunder belum mendapatkan pemeliharaan sistematis; pencatatan histori pemutusan fuse kurang lengkap sehingga evaluasi kinerja tidak akurat.