

**ANALISIS GANGGUAN HUBUNG SINGKAT TERHADAP KINERJA CIRCUIT
BREAKER PADA CUBICLE SUTM 20KV GI KENTEN**



SKRIPSI

Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Kurikulum Pada Tingkat Sarjana

Strata-1 Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik

Universitas Tridinanti

Oleh :

SANDI ARDIANSYAH

2102230003

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS TRIDINANTI

2026

**ANALISIS GANGGUAN HUBUNG SINGKAT TERHADAP KINERJA CIRCUIT
BREAKER PADA CUBICLE SUTM 20KV GI KENTEN**



SKRIPSI

Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Kurikulum Pada Tingtak Sarjana

Strata-1 Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik

Universitas Tridinanti

Oleh :



SANDI ARDIANSYAH

2102230003

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS TRIDINANTI

2026

LEMBAR PENGESAHAN

Nama Mahasiswa : Sandi Ardiansyah

Nomor Pokok : 2102230003

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang Pendidikan : Starta 1 (S1)

Judul Skripsi : “ Analisis Gangguan Hgubung Singkat Terhadap Kinerja
Circuit Breaker Pada Cubicle SUTM 20kV GI Kenten”

Disetujui oleh :

Pembimbing I,



Mukminatun Ardaisi, ST.,MT

Pembimbing II



Ir. Letifa Shintawaty, MM.

Mengetahui :



Dr. Ani Firda. ST. MT

Program Studi Teknik Elektro

Ketua,



Moh Wahyu Aminullah, ST.MT

LEMBAR PERNYATAAN

Saya bertanda tangan dibawah ini :

Nama Mahasiswa : Sandi Ardiansyah

Nomor Pokok : 210223003

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang Pendidikan : Starta 1 (S1)

Judul Skripsi : “ Analisis Gangguan Hgubung Singkat Terhadap Kinerja
Circuit Breaker Pada Cubicle SUTM 20kV GI Kenten”

Dengan ini menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

1. Skripsi dengan judul yang tersebut diatas adalah murni karya saya sendiri. Bukan hasil plagiat, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah skripsi dan disebutkan sebagai bahan referensi serta dimasukkan dalam daftar pustaka.
2. Apabila dikemudian hari penulisan skripsi ini terbukti merupakan hasil plagiat atau jiplakan dari skripsi karya orang lain, maka saya bersedia mempertanggung jawabkan serta bersedia menerima sanksi hukum berdasarkan Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 20 Tahun 2003 tentang “Sistem Pendidikan Nasional” pasal 70 berbunyi : Lulusan yang karyailmiah yang digunakannya untuk mendapatkan gelar akademik, profesi atau vokasi sebagaimana dimaksud dalam pasal 25 ayat (2) terbukti merupakan jiplakan dipidana dengan pidana penjara paling lama dua tahun /atau pidana denda paling banyak Rp 200.000.000,- (dua ratus juta rupiah).

Demikian pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tidak dipaksakan.



Palembang, Januari 2026


Sandi Ardiansyah

MOTTO

*"Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi,
serta pergantian malam dan siang
terdapat tanda-tanda bagi orang yang memiliki akal."*

(QS Ali Imron Ayat 190)

MOTIVASI

*"Berani melawan musuh-musuhmu itu biasa.
Namun, berani menghadapi dirimu yang lemah dan malas,
itulah yang luar biasa."*

*"Karya yang dihasilkan dari jerih payah,
akan terasa jauh lebih nikmat ketika dievaluasi."*

ABSTRAK

Sistem distribusi tenaga listrik 20 kV memiliki peran penting dalam menjamin kontinuitas pasokan listrik, namun rentan terhadap gangguan arus hubung singkat yang dapat merusak peralatan dan mengganggu pelayanan. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung nilai gangguan hubung singkat dan mengevaluasi kinerja circuit breaker (CB) pada penyulang Kawasaki di PT PLN (Persero) ULP Sukarami Palembang. Metode penelitian yang digunakan adalah deskriptif kuantitatif, dengan langkah-langkah meliputi pengumpulan data sistem, perhitungan impedansi sumber, transformator, dan penyulang, serta analisis arus gangguan untuk jenis gangguan 3 fasa, 2 fasa, dan 1 fasa pada berbagai lokasi (0% hingga 100% panjang penyulang). Hasil penelitian menunjukkan bahwa arus gangguan maksimum terjadi pada 0% panjang penyulang, yaitu 13769,4 A untuk gangguan 3 fasa, 11924,82 A untuk gangguan 2 fasa, dan 287,512 A untuk gangguan 1 fasa. Nilai ini menurun seiring bertambahnya panjang penyulang, dengan nilai minimum pada 100% panjang penyulang sebesar 298,69 A (3 fasa), 258,47 A (2 fasa), dan 116,28 A (1 fasa). CB yang digunakan memiliki kapasitas pemutusan ≥ 16 kA, yang lebih besar dari arus gangguan maksimum (13,8 kA), sehingga secara teknis mampu menangani kondisi gangguan dan melindungi sistem dengan efektif.

Kata kunci : Circuit Breaker, Gangguan Hubung Singkat, Cubicle, Saluran Udara Tegangan Menengah.

ABSTRAK

The 20 kV electricity distribution system plays a crucial role in ensuring continuity of power supply, yet it is vulnerable to short-circuit faults that can damage equipment and disrupt services. This study aims to calculate short-circuit fault values and evaluate the performance of circuit breakers (CB) on the Kawasaki feeder at PT PLN (Persero) ULP Sukarami Palembang. The research method used is descriptive quantitative, with steps including collecting system data, calculating impedance of the source, transformer, and feeder, as well as analyzing fault currents for three-phase, two-phase, and single-phase fault types at various locations (0% to 100% of feeder length). The results show that the maximum fault current occurs at 0% feeder length, with values of 13769,4 A for three-phase faults, 11924,82 A for two-phase faults, and 287,512 A for single-phase faults. These values decrease as the feeder length increases, with minimum values at 100% feeder length of 298.69 A (three-phase), 258.47 A (two-phase), and 116.28 A (single-phase). The CB used has a breaking capacity of ≥ 16 kA, which is higher than the maximum fault current (13,8 kA), so it is technically capable of handling fault conditions and protecting the system effectively.

Keywords: Circuit Breaker, Short Circuit Fault Current, Cubicle, Medium Voltage Air Line

KATA PENGHANTAR

Bismillhirrohmanirohim,

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, Karena atas rahmat dan Karunia-Nya jualah penulis dapat menyelesaikan skripsi ini denga judul “**Analisis Gangguan Hgubung Singkat Terhadap Kinerja Circuit Breaker Pada Cubicle SUTM 20kV GI Kenten**” yang disusun guna memenuhi syarat mendapatkan gelar sarjana pada program studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Tridinanti Palembang.

Dalam penulisan skripsi ini, penulis banyak menerima bantuan dari berbagai pihak. Oleh karenanya pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Ibu Mukminatun Ardaisi, ST.,MT Selaku dosen Pembimbing I, yang bersedia memberikan arahan dan bimbingan kepada penulis dalam penulisan skripsi.
2. Ibu Ir. Letifa Shintawaty, MM.selaku pembimbing II, yang bersedia memberikan arahan dan bimbingan kepada penulis dalam penulisan skripsi
3. Bapak dan ibu Dosen Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Tridinanti Palembang.
4. Segenap staf karyawan di PT. PLN (Persero) ULP Sukarami yang telah memberikan bantuan kepada penulis.
5. Kedua Orang Tua ku, adik-adik ku, isrtriku, serta keluarga yang memberikan motivasi, dan memberikan dukungan serta doa.

6. Rekan-rekan mahasiswa Fakultas Teknik elektro khususnya teman-teman seperjuanganku yang memberikan masukan serta doa dan dukugan.
7. Terakhir namun tak kalah penting, saya ingin berterima kasih pada diri sendiri, karena telah percaya pada diri sendiri, saya ingin berterima kasih pada diri sendiri karena telah melakukan semua kerja keras ini, saya ingin berterima kasih pada diri sendiri karena memiliki hari libur, saya ingin berterima kasih pada diri sendiri karena tidak pernah menyerah, karena selalu menjadi diri sendiri setiap saat.

Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu Penulis juga menyampaikan rasa terima kepada semua pihak yang terlihat dalam menyelesaikan skripsi ini, akhir kata penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna, sehingga tidak menutup kemungkinan adanya pengembangan lebih lanjut. Oleh karena itu saran, kritik serta pendapat yang sifatnya membangun selalu penulis harapkan. Akhir penulis berharap semoga laporan akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang memerlukan

Palembang, Januari 2026

Penulis,

Sandi Ardiansyah

DAFTAR ISI

BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Sistematika Penulisan	3
BAB II LANDASAN TEORI.....	5
2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik	5
2.2 Cubicle 20kV	6
2.3 Circuit Breaker (Pemutus Tenaga).....	9
2.4 Proses Terjadinya Busur Api pada circuit breaker	17
2.5 Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)	18
2.6 Sistem Per Unit (p.u)	19
2.7 Impedansi Sumber	20
2.8 Reaktansi Transformator.....	21
2.9 Impedansi Penyulang.....	22
2.10 Z1 ekivalen dan Z2 ekivalen.....	23
2.11 Z0 ekivalen	23
2.12 Gangguan Arus Hubung Singkat	24
2.13 Pemilihan Circuit Breaker	26
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	27
3.1 Jenis Penelitian	27
3.2 Waktu Dan Tempat Penelitian.....	27
3.3 Diagram Blok Penelitian.....	28
3.4 Data Data teknis	29
BAB IV PERHITUNGAN DAN ANALISIS.....	30
4.1 Menghitung Impedansi Sumber.....	30
4.2 Perhitungan Reaktansi Transformator	32

4.3 Perhitungan Impedansi Penyulang.....	33
4.4 Perhitungan Impedansi Ekuivalen	36
4.5 Perhitungan Gangguan Arus Hubung Singkat.....	37
4.6 Pemilihan Circuit Breaker.....	42
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	43
5.1 Kesimpulan.....	43
5.2 Saran.....	44
DAFTAR PUSTAKA	45
LAMPIRAN.....	

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Spesifikasi Cicuit BreakerTabel.....	41
Tabel 4. 2 Data Trafo	41
Tabel 4. 3 Data Saluran.....	42
Tabel 3. 4 Nilai Tahanan Dan Reaktansi penghantar.....	29
Tabel 4. 4 Datra Gangguan Hubung Singkat	43
Tabel 4. 5 Perbandingan Arus Hubung Singkat Dan Circuit Breaker	40

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik.....	5
Gambar 2. 2 Cubicle 20kV	9
Gambar 2. 3 Circuit Breaker	10
Gambar 2. 4 Pemadaman Busur Api Circuit Breaker Minyak	11
Gambar 2. 5 Proses Terjadinya Busur Api Pada Circuit BreakerGambar	17
Gambar 2. 6 Arus Gangguan 3 Fasa	24
Gambar 2. 7 Arus Gangguan 2 Fasa	25
Gambar 2. 8 Arus Gangguan 1 Fasa	26

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jaringan distribusi 20 kV menghadapi risiko gangguan yang dapat mengganggu pasokan listrik, salah satunya adalah gangguan hubung singkat. Gangguan ini dapat menyebabkan arus berlebih yang berpotensi merusak peralatan kelistrikan dan mengganggu layanan. Oleh karena itu, sistem proteksi yang handal sangat diperlukan untuk menangani kondisi tersebut dengan cepat dan tepat.

Cubicle 20 kV berperan penting sebagai tempat penempatan perangkat kelistrikan seperti switchgear, panel kontrol, dan peralatan proteksi, termasuk Circuit Breaker (CB) yang berfungsi sebagai alat pemutus arus secara otomatis saat terjadi gangguan. Kinerja CB sangat menentukan efektivitas perlindungan sistem, sehingga diperlukan analisis yang komprehensif untuk memastikan kapasitasnya sesuai dengan kondisi sistem.

Penyulang Kawasaki di wilayah ULP Sukarami, merupakan salah satu jaringan distribusi 20 kV yang menjadi fokus perhatian. Berdasarkan data yang ada, terdapat potensi terjadinya gangguan hubung singkat dengan nilai arus yang bervariasi tergantung lokasi gangguan. Oleh karena itu, perlu dilakukan evaluasi terhadap sistem proteksi yang ada, terutama mengenai kapasitas CB yang terpasang, untuk memastikan kelayakan penggunaannya dan mencegah terjadinya kegagalan sistem.

Selain itu, pemahaman mengenai komponen sistem seperti transformator, impedansi sumber, dan impedansi penyulang juga menjadi dasar penting dalam

melakukan analisis arus gangguan. Tanpa evaluasi yang tepat, sistem kelistrikan berisiko mengalami kerusakan peralatan atau pemadaman yang berkepanjangan, yang pada akhirnya akan merugikan konsumen dan berdampak pada keandalan layanan PLN

Dari latar belakang tersebut maka di rencanakan judul skripsi ini adalah :

“ Analisis Gangguan Hgubung Singkat Terhadap Kinerja Circuit Breaker Pada Cubicle SUTM 20kV GI Kenten”

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik arus hubung singkat (besaran dan perubahan berdasarkan lokasi gangguan) yang terjadi pada penyulang Kawasaki di jaringan SUTM 20 kV?
2. Apakah kapasitas dan spesifikasi circuit breaker yang terpasang mampu menangani arus gangguan hubung singkat maksimum yang terjadi pada penyulang Kawasaki?

1.3 Batasan Masalah

1. Analisis difokuskan pada circuit breaker yang terpasang pada cubicle SUTM 20 kV, tidak mencakup peralatan proteksi lain seperti relay, CT, VT, maupun sistem secara keseluruhan.
2. Jenis gangguan yang dianalisis dibatasi pada gangguan arus hubung singkat, baik gangguan satu fasa ke tanah, dua fasa, maupun tiga fasa (simetris), tanpa membahas gangguan beban lebih, arus start motor, atau transient switching.

3. Perangkat proteksi yang dianalisis hanya circuit breaker (CB) yang terpasang pada penyulang kawasaki, termasuk performa pemutusannya dan waktu respon terhadap gangguan.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini ialah Menghitung Menghitung besaran arus hubung singkat untuk jenis gangguan 3 fasa, 2 fasa, dan 1 fasa ke tanah pada titik-titik lokasi yang berbeda (0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% panjang penyulang) di jaringan SUTM 20 kV Penyulang Kawasaki, serta menganalisis pola perubahannya seiring bertambahnya jarak dari sumber tegangan. Membandingkan nilai arus hubung singkat maksimum yang dihitung dengan kapasitas pemutusan dan spesifikasi teknis Circuit Breaker (CB) yang terpasang pada cubicle, untuk menentukan apakah kemampuan CB masih memadai dan sesuai standar kelayakan teknis dalam menangani kondisi gangguan terburuk yang mungkin terjadi.

1.5 Sistematika Penulisan

Dalam penyusunan Skripsi ini membahas 5 (lima) bab, dan di setiap bab membahas masalah masing - masing. Namun setiap bab memiliki hubungan satu dengan yang lainnya dan pembahasan pada setiap bab untuk menambah pengertian dan maksud yang dibahas. Sistematika penulisan sebagai berikut.

BAB I PENDAHULUAN

Berisi latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II LANDASAN TEORI

Pada bab ini dijelaskan tentang teori – teori yang mendukung topik mengenai penelitian diantaranya, Gangguan Hubung Singkat, Circuit Breaker, Cubicle dan Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini berisi tentang data yang dibuktikan untuk mengetahui kinerja circuit breaker yang terpasang pada cubicle 20kV.

BAB IV PERHITUNGAN DAN ANALISIS

Pada bab ini berisi tentang pengolahan data hasil lapangan serta menganalisis kinerja circuit breaker dari gangguan hubung singkat.

BAB V KEIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini merupakan kesimpulan secara keseluruhan yang merupakan jawaban atas persoalan yang dikemukakan dalam rumusan masalah.

Saran juga disampaikan sebagai bahan pertimbangan untuk mengetahui kinerja circuit breaker.

DAFTAR PUSTAKA

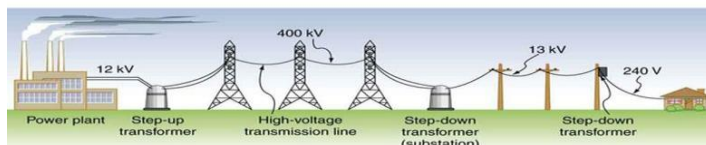
LAMPIRAN

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan bagian dari sistem tenaga yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari gardu induk ke konsumen akhir. Sistem ini dibagi menjadi distribusi primer (tegangan menengah, misalnya 20 kV) dan distribusi sekunder (tegangan rendah, misalnya 220/380 V). Dalam sistem distribusi primer, digunakan penyulang (feeder) untuk menyalurkan listrik dari gardu ke wilayah-wilayah tertentu, Penyulang kawasaki adalah salah satu jalur distribusi yang beroperasi pada tegangan menengah dan melayani beban penting di wilayah operasionalnya. Keandalan penyulang sangat dipengaruhi oleh kemampuan sistem proteksinya dalam menangani gangguan.



Gambar 2. 1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Koordinasi proteksi juga sangat penting dalam sistem 20kV karena memastikan bahwa hanya perangkat proteksi di dekat titik gangguan yang beroperasi, sehingga meminimalkan dampak gangguan dan menjaga kelangsungan pasokan daya ke bagian sistem yang tidak terpengaruh.

Berikut alasan utama pentingnya koordinasi ini:

1. Mencegah Pemutusan yang Tidak Perlu (Nuisance Tripping), Tanpa koordinasi, perangkat proteksi di tingkat yang lebih tinggi bisa beroperasi

lebih cepat dari yang berada di dekat titik gangguan, menyebabkan pemadaman daya pada area yang luas padahal hanya sebagian kecil sistem yang bermasalah.

2. Melindungi Peralatan Sistem, Koordinasi memastikan waktu operasi perangkat proteksi sesuai dengan kemampuan tahan arus gangguan peralatan (seperti trafo, kabel, atau sakelar). Hal ini mencegah kerusakan akibat pemanasan atau gaya mekanis yang berlebih akibat arus gangguan yang bertahan lama.
3. Menjaga Keandalan Pasokan Daya, Dengan hanya memutus bagian sistem yang bermasalah, pasokan daya ke pelanggan lain tetap terjaga. Ini sangat krusial untuk mendukung aktivitas ekonomi dan kebutuhan masyarakat di area yang dilayani sistem 20kV.
4. Memudahkan Identifikasi dan Perbaikan Gangguan, Lokasi gangguan bisa ditentukan dengan lebih akurat karena hanya perangkat proteksi di sekitar titik gangguan yang beroperasi, sehingga proses perbaikan dapat dilakukan lebih cepat.
5. Mencegah Kerusakan Berantai, Arus gangguan yang tidak segera dihentikan pada titik sumbernya bisa menyebabkan kerusakan pada perangkat lain di sepanjang sistem, sehingga meningkatkan biaya perbaikan dan waktu pemadaman.

2.2 Cubicle 20kV

Cubicle 20kV adalah seperangkat peralatan listrik tegangan menengah yang dipasang pada gardu hubung atau gardu distribusi, berfungsi sebagai pembagi,

pemutus, penghubung, pengontrol, dan proteksi sistem penyaluran tenaga listrik dengan tegangan 20kV, Secara umum, cubicle merupakan panel atau kabinet listrik yang berfungsi sebagai tempat penempatan berbagai perangkat kelistrikan seperti switchgear, panel kontrol, dan peralatan proteksi lainnya, sekaligus melindunginya dari debu, air, dan kerusakan fisik serta menjamin keamanan operator saat pengoperasian. Cubicle 20kV sendiri dirancang khusus untuk menangani tegangan menengah pada jaringan distribusi, memainkan peran penting dalam menjaga keandalan, keselamatan, dan efisiensi operasi sistem kelistrikan. Dibawah ini akan membahas lebih detail mengenai fungsinya, jenis-jenisnya, serta komponen utamanya.

a. Fungsi Utama Cubicle

1. Kontrol Aliran Listrik, Memungkinkan operator untuk menghubungkan atau memutus aliran listrik ke berbagai bagian sistem distribusi, baik pada operasi normal maupun saat pemeliharaan.
2. Perlindungan Sistem, Melindungi dari gangguan seperti arus lebih, hubung singkat, dan gangguan tanah melalui relay proteksi dan pemutus sirkuit yang bekerja secara otomatis.
3. Pengukuran dan Pemantauan, Dilengkapi dengan alat pengukur seperti Current Transformer (CT) dan Voltage Transformer (VT) untuk memantau arus, tegangan, dan daya listrik secara real-time.
4. Isolasi Sirkuit, Dapat mengisolasi bagian tertentu dari sistem untuk menjamin keamanan selama proses pemeliharaan.

5. Perlindungan Peralatan, Menyediakan tempat penempatan yang terlindungi bagi perangkat kelistrikan dari debu, air, dan kerusakan fisik.

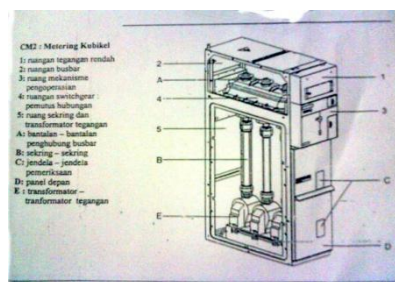
b. Jenis-Jenis Cubicle

1. Cubicle Incoming, Menerima tegangan 20kV dari sisi sekunder transformator daya dan menyalurkannya ke busbar utama.
2. Cubicle Outgoing, Menghubungkan busbar dengan beban atau trafo distribusi untuk mengalirkan daya ke konsumen atau jaringan lain.
3. Cubicle Pemakaian Sendiri (Trafo PS), Menyalurkan daya ke peralatan internal gardu induk seperti sistem penerangan dan kontrol.
4. Cubicle Kopel (Bus Coupler), Menghubungkan dua bagian busbar untuk menjamin fleksibilitas operasional sistem.
5. Cubicle PT/LA, Digunakan untuk mengukur tegangan dan melindungi sistem dari lonjakan tegangan akibat petir atau gangguan lainnya.
6. Cubicle PMS (Pemisah), Membuka atau menutup aliran listrik tanpa beban karena tidak dilengkapi alat peredam busur listrik.
7. Cubicle PMT (Pemutus Tenaga), Dapat membuka atau menutup aliran listrik dalam kondisi berbeban atau tidak, termasuk memutus gangguan hubung singkat.

c. Komponen Utama Cubicle

1. Vacuum Circuit Breaker (VCB), Memutus aliran listrik secara otomatis saat terjadi gangguan dengan memadamkan busur listrik di dalam ruang vakum.

2. Load Break Switch (LBS), Memutus atau menyambungkan aliran listrik pada kondisi berbeban atau tanpa beban.
3. Relay Proteksi, Mendeteksi gangguan listrik dan memberikan sinyal untuk memutus sirkuit melalui pemutus sirkuit.
4. Isolator, Mengisolasi bagian tertentu dari sistem untuk keamanan saat pemeliharaan.
5. Fuse: Melindungi peralatan dari arus berlebih dengan cara meleleh saat terjadi gangguan.
6. Instrument Transformer (CT dan VT): Mengubah arus atau tegangan tinggi menjadi nilai yang lebih rendah untuk keperluan pengukuran dan proteksi.
7. Busbar: Penghantar utama yang mengalirkan daya listrik dari cubicle incoming ke berbagai cubicle outgoing atau peralatan lainnya.
8. Earthing Switch: Menyediakan jalur pembumian untuk memastikan keselamatan operator selama pemeliharaan.



Gambar 2. 2 Cubicle 20kV

2.3 Circuit Breaker (Pemutus Tenaga)

Circuit breaker (CB) adalah alat pemutus dan penghubung arus listrik secara otomatis yang dirancang untuk bekerja baik dalam kondisi normal maupun saat

terjadi gangguan. CB bekerja bersama dengan sistem relay untuk mendeteksi gangguan dan memutuskan rangkaian listrik secara cepat.

Fungsi utama CB,

- a. Menghubungkan dan memutuskan arus normal
- b. Memutus arus gangguan dengan cepat sebelum menyebabkan kerusakan
- c. Melindungi sistem tenaga dan peralatan dari dampak gangguan



Gambar 2. 3 Circuit Breaker

Syarat syarat yang harus dipenuhi oleh suatu PMT agar dapat melakukan hal - hal diatas sebagai berikut:

- a. Mampu menyalurkan arus maksimum sistem secara terus - menerus
- b. Mampu memutuskan dan menutup jaringan dalam keadaan berbeban maupun terhubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus tenaga itu sendiri
- c. Dapat memutuskan arus hubung singkat dengan kecepatan tinggi agar arus hubung singkat tidak sampai merusak peralatan sistem, membuat sistem kehilangan kestabilan, dan merusak pemutus tenaga itu sendiri. Setiap PMT dirancang sesuai dengan tugas yang akan dipikulnya

1. Jenis - jenis *Circuit Breaker*

- a. Klasifikasi berdasarkan jumlah mekanik

Circuit breaker dapat diklasifikasikan berdasarkan jumlah kutub (pole) atau mekanik pemutus yang mereka miliki. Ini menentukan berapa banyak fasa (phase) atau jalur arus yang dapat diputus secara bersamaan.

1. *Circuit Breaker Single Pole*

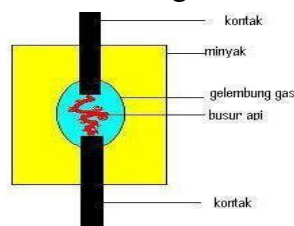
Satu pole CB adalah pemutus arus listrik yang hanya memutus satu jalur fasa dalam satu waktu. Biasanya digunakan pada sistem 1 fasa.

2. *Circuit Breaker Three Pole*

Tiga pole CB adalah pemutus tenaga yang memutus ketiga fasa (R, S, T) secara bersamaan. Digunakan dalam sistem 3 fasa, seperti di industri, gedung bertingkat, atau sistem distribusi tegangan menengah (termasuk 20 kV).

3. *Circuit breaker (CB) Media Minyak*

Oil Circuit Breaker (OCB) adalah jenis pemutus tenaga listrik yang menggunakan minyak isolasi (biasanya minyak transformator) sebagai media pemadam busur api (arc) dan isolator antar konduktor bertegangan di dalam rangkaian. Saat kontak pemutus terbuka dan terjadi busur api (arc), minyak akan menyerap panas, menguap, dan menghasilkan gelembung gas yang membantu memadamkan busur api secara cepat dan mencegah loncatan arus lebih lanjut.



Gambar 2. 4 Pemadaman Busur Api Circuit Breaker Minyak

b. Klasifikasi CB Berdasarkan Media Isolasi

1. Circuit Breaker dengan Isolasi Udara (Air Circuit Breaker - ACB / Vacuum Circuit Breaker - VCB)
2. Circuit Breaker dengan Isolasi Minyak (Oil Circuit Breaker - OCB)
3. Circuit Breaker dengan Isolasi Gas SF₆ (SF₆ Circuit Breaker - GCB)
4. Circuit Breaker dengan Isolasi Udara Bertekanan (Air Blast Circuit Breaker - ABCB)

2. Faktor-faktor memengaruhi kinerja Circuit Breaker

a. Arus gangguan dan tegangan sistem

1. Arus hubung singkat. Besaran arus saat terjadi gangguan menentukan apakah CB mampu memutuskan aliran dengan aman. Jika arus melebihi kapasitas pemutusan CB, perangkat bisa rusak atau gagal memutuskan.
2. Tegangan sistem. CB dirancang untuk rentang tegangan tertentu. Operasi di luar spesifikasi tegangan dapat menyebabkan kegagalan isolasi atau kesalahan pemutusan.

b. Karakteristik dan kondisi CB itu sendiri

1. Kualitas komponen internal. Kontak pemutus, pelumas, dan mekanisme bekerja memengaruhi kecepatan dan ketepatan pemutusan. Kerusakan atau keausan pada bagian ini akan menurunkan performa.

2. Kondisi fisik. Korosi, kotoran, atau koneksi longgar meningkatkan resistansi dan menyebabkan pemanasan berlebih yang mengganggu fungsi CB.
 3. Tipe CB. Berbagai jenis (misalnya termomagnetik, vakum, atau minyak) memiliki karakteristik berbeda dan cocok untuk aplikasi tertentu; pemilihan yang tidak tepat mengurangi efektivitas perlindungan.
- c. Konfigurasi dan beban sistem kelistrikan
1. Jenis dan distribusi beban. Beban yang sangat fluktuatif, beban induktif/kapasitif, atau beban dengan lonjakan arus besar dapat memengaruhi respons CB terhadap gangguan.
 2. Struktur jaringan. Tata letak saluran, transformator, dan perangkat lain menentukan besar dan bentuk arus gangguan yang diterima CB.
- d. Pengoperasian dan pemeliharaan
1. Pemeliharaan berkala. Pengujian rutin (misalnya uji resistansi kontak, uji mekanis, dan kalibrasi) menjaga CB dalam kondisi optimal. Kurangnya perawatan menyebabkan penurunan performa bertahap.
 2. Pengoperasian yang tidak benar. Penggunaan CB terus-menerus sebagai sakelar utama atau untuk tujuan selain perlindungan mempercepat keausan.

3. Prinsip kerja circuit breaker dalam memutus arus gangguan adalah mendeteksi adanya arus yang melebihi batas aman, kemudian secara cepat memisahkan kontak-kontaknya untuk menghentikan aliran arus dan melindungi peralatan serta sistem kelistrikan.

Berikut poin utama prosesnya:

1. Deteksi Arus Gangguan, Komponen seperti transformator arus atau pelindung termal/magnetik dalam circuit breaker memantau aliran arus. Jika arus melebihi nilai pengaturan (misalnya akibat korsleting atau beban berlebih), sistem deteksi akan memberikan sinyal.
2. Pengoperasian Mekanis, Sinyal dari sistem deteksi akan mengaktifkan mekanisme peluncur (trip mechanism), yang bisa berupa pegas atau aktuator elektromagnetik. Mekanisme ini bekerja dengan cepat untuk memisahkan kontak tetap dan kontak pindah.
3. Pemutusan Lintasan Arus, Setelah kontak terpisah, akan terbentuk busur api antara kontak. Circuit breaker dilengkapi dengan sistem pemadam busur (misalnya menggunakan udara terkompresi, minyak isolasi, atau vakum) untuk menghilangkan busur api dengan cepat dan mencegah terjadinya sambungan kembali arus.
4. Isolasi Sistem, Setelah arus terputus dan busur api padam, circuit breaker menjaga kontak dalam kondisi terpisah untuk memastikan bagian sistem yang bermasalah terisolasi dari sumber tegangan.

Adapun Parameter Penilaian Kinerja Circuit Breaker, Berikut parameter utama yang digunakan

1. Tegangan Nominal, Tegangan kerja sistem yang dapat ditahan secara terus-menerus.
 2. Arus Nominal, Besar arus yang dapat dialirkan secara terus-menerus tanpa menyebabkan kerusakan atau pemanasan berlebih.
 3. Arus Gangguan Maksimum, Besar arus puncak yang dapat ditahan dan diputuskan oleh circuit breaker tanpa kerusakan.
 4. Waktu Pemutusan, Waktu yang dibutuhkan dari saat terdeteksi gangguan hingga arus benar-benar terputus (termasuk waktu deteksi dan waktu pemadam busur).
 5. Kemampuan Memadam Busur Api, Kemampuan untuk menghilangkan busur api yang terbentuk antara kontak saat pemutusan arus, sesuai dengan jenis media pemadam yang digunakan (udara, minyak, vakum, dll.).
 6. Arus Hubung Kembali, Besar arus yang dapat dialirkan kembali oleh circuit breaker setelah pemutusan gangguan, tanpa mengganggu fungsinya.
 7. Ketahanan Mekanis, Kemampuan menahan gaya mekanis yang timbul akibat arus gangguan dan operasi berulang.
 8. Isolasi Listrik, Kemampuan menjaga isolasi antar bagian konduktor saat dalam kondisi terbuka, untuk mencegah kebocoran arus atau korsleting.
4. Kapasitas pemutusan (breaking capacity) circuit breaker ditentukan dengan menghitung besar arus gangguan maksimum yang mungkin terjadi di titik

pemasangan, kemudian memilih circuit breaker dengan kapasitas pemutusan yang sama atau lebih besar dari nilai tersebut.

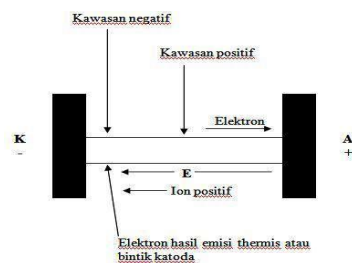
Berikut langkah utama dalam penentuan:

- 1 Hitung Arus Gangguan Maksimum, Hitung arus hubung pendek (short-circuit current) di titik pemasangan circuit breaker, mencakup komponen arus sesaat puncak dan arus rms simetris. Perhitungan ini berdasarkan data sistem seperti tegangan nominal, impedansi sumber daya, impedansi peralatan (trafo, kabel, sakelar), dan konfigurasi sistem (misalnya sistem terhubung atau terisolasi). Gunakan metode perhitungan seperti metode impedansi atau metode titik daya, serta pertimbangkan kondisi terburuk (misalnya saat sistem dalam konfigurasi yang memberikan impedansi terkecil, sehingga arus gangguan maksimum).
- 2 Tentukan Tipe dan Standar Circuit Breaker, Sesuaikan dengan standar internasional atau nasional yang berlaku, yang mengatur klasifikasi kapasitas pemutusan (misalnya kapasitas pemutusan pada tegangan tertentu dan waktu tertentu). Pilih jenis circuit breaker sesuai media pemadam busur (udara, minyak, vakum) yang sesuai dengan karakteristik arus gangguan sistem 20kV.
- 3 Sesuaikan dengan Koordinasi Proteksi, Pastikan kapasitas pemutusan tidak hanya memenuhi besar arus gangguan, tetapi juga sesuai dengan waktu operasi yang telah dikordinasikan dengan relay proteksi dan perangkat lain di sistem, agar tidak menyebabkan kerusakan pada circuit breaker atau peralatan lain.

2.4 Proses Terjadinya Busur Api pada circuit breaker

Pada saat terjadi pemutusan suatu rangkaian sistem tenaga listrik, maka pada *circuit breaker* akan terjadi busur api, Busur api (*electric arc*) adalah fenomena loncatan arus listrik yang terjadi saat dua konduktor (kontak) dalam pemutus tenaga (*circuit breaker*) mulai terpisah, tetapi masih mengalirkan arus. Busur api ini terbentuk akibat ionisasi medium isolasi (udara, minyak, vakum, atau gas) di antara kontak saat pemutusan berlangsung.

Busur api memiliki suhu yang sangat tinggi, bisa mencapai lebih dari 5.000°C , dan jika tidak dipadamkan dengan cepat, dapat menyebabkan kerusakan peralatan, kebakaran, bahkan ledakan pada sistem tenaga listrik.



Gambar 2.5 Proses Terjadinya Busur Api Pada Circuit Breaker

Busur api merupakan fenomena penting dalam proses kerja *circuit breaker*. Meskipun kontak telah terpisah, arus masih bisa mengalir melalui jalur ionisasi hingga arc berhasil dipadamkan. Oleh karena itu, desain *circuit breaker* harus memperhitungkan kecepatan pemutusan, jenis media isolasi, dan kapasitas pemadaman arc agar sistem tenaga tetap aman dan andal. Untuk memadamkan busur api tersebut perlu dilakukan usaha-usaha yang dapat menimbulkan proses deionisasi

- a. Meniupkan udara ke sela kontak, sehingga partikel - partikel hasil ionisasi di jauhkan dari sela kontak.
- b. Menyemburkan minyak isolasi kebusur api untuk memberi peluang yang lebih besar bagi proses rekombinasi
- c. Memotong busur api dengan tabir isolasi atau tabir logam, sehingga memberi peluang yang lebih besar bagi proses rekombinasi.

2.5 Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)

Sistem jaringan distribusi listrik yang menggunakan konduktor (kabel) terbuka yang dipasang di atas tiang-tiang listrik untuk menyalurkan energi listrik pada tegangan menengah, umumnya antara 1 kV hingga 35 kV, dengan tegangan paling umum di Indonesia adalah 20 kV. Konstruksi jaringan SUTM memerlukan perencanaan dan pelaksanaan yang matang agar aman, efisien, serta andal dalam jangka panjang. Beberapa aspek penting yang harus diperhatikan meliputi:

- a. jarak aman antara konduktor (kabel listrik) dengan objek lain seperti tanah, bangunan, pepohonan, dan fasilitas umum.
- b. Konduktor (kabel penghantar) berperan penting dalam menyalurkan arus listrik dari sumber ke konsumen. Pemilihan jenis konduktor harus mempertimbangkan lingkungan, kapasitas daya, dan karakteristik.
- c. Isolator adalah komponen penting yang memisahkan konduktor dari tiang, serta menahan gaya tarik kabel. Isolator harus memiliki ketahanan mekanis dan listrik yang memadai.

- d. Tiang adalah penopang utama dalam jaringan SUTM. Pemilihan jenis, tinggi, dan posisi tiang sangat penting untuk stabilitas, estetika, dan keselamatan jaringan.
- e. Kabel tidak boleh terlalu tegang (karena bisa putus) atau terlalu kendur (karena bisa menyentuh benda lain). Jarak antar tiang mempengaruhi gaya tarik kabel dan bentuk kelengkungan.
- f. Sistem pentanahan (grounding) sangat penting untuk keselamatan manusia, peralatan, dan mencegah kerusakan akibat arus gangguan.
- g. Konstruksi jaringan tidak boleh merugikan lingkungan atau memicu konflik sosial.
- h. Setiap konstruksi SUTM wajib mengikuti peraturan teknis agar sesuai dengan standar keselamatan dan mutu nasional.

2.6 Sistem Per Unit (p.u)

Sistem Per Unit (disingkat p.u) adalah metode normalisasi (penyederhanaan) dalam analisis sistem tenaga listrik dengan menyatakan semua besaran listrik seperti tegangan, arus, daya, impedansi, dan lain-lain dalam bentuk relatif terhadap nilai dasarnya (nilai basis). Nilai per unit adalah bilangan tanpa satuan yang menyatakan perbandingan antara nilai aktual terhadap nilai basis.

$$\text{Satuan per unit (pu)} = \frac{\text{Nilai Sebenarnya}}{\text{Nilai Dasar}}$$

Impedansi per unit untuk suatu komponen pada sistem dinyatakan menurut dasar yang berbeda dengan dasar yang dipilih untuk bagian dari sistem komponen tersebut berada. Karena semua impedansi dalam sistem harus dinyatakan dalam dasar

impedansi yang sama, pada perhitungan perlu cara untuk dapat mengubah impedansi per unit dari suatu dasar ke dasar lain.

2.7 Impedansi Sumber

Impedansi sumber (atau *source impedance*) adalah impedansi internal dari sistem pembangkitan listrik (misalnya gardu induk, generator, atau sistem transmisi) yang membatasi arus gangguan (seperti arus hubung singkat). Sering kali, impedansi sumber tidak diberikan dalam bentuk ohm (Ω), tetapi dalam bentuk, Nilai per unit (p.u), % Impedance (Z%), Short Circuit MVA (SCMVA). Untuk menghitung impedansi sumber.

$$Z_{base} = \frac{kV^2}{MVA} \dots \dots \dots (1)$$

Untuk arus dasar,

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} \dots \dots \dots (2)$$

Untuk menghitung MVA short circuit dapat mempergunakan rumus sebagai berikut persamaan,

$$MVA_{sc} = \sqrt{3} \times I_{sc\phi} \times kV_{primer} \dots \dots \dots (3)$$

Harga resistansi sumber diabaikan karena harganya jauh lebih kecil harga reaktansi, maka harga reaktansinya dapat dirumuskan,

$$X_{s1} = X_{s2} = j \frac{kV_{base}^2}{MVA_{sc\phi}} \dots \dots \dots (4)$$

Keterangan :

X_s = impedansi sumber (dalam hal ini pada sisi sumber 150 kV)

kV = Tegangan dasar (kV)

$MVASC = \text{Daya hubung singkat (MVA)}$

2.8 Reaktansi Transformator

Nilai reaktansi transformator dapat diketahui jika nilai reaktansi urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol telah didapat. Untuk mengetahui nilai reaktansi urutan positif, reaktansi urutan negatif, dan reaktansi urutan nol dalam ohm maka hitung dahulu besar ohm pada 100 % nya. Besar nilai ohm pada 100 % adalah

$$X_t(100\%) = \frac{kV^2}{MVA_{trafo}}$$

Dengan rumus tersebut maka dapat menentukan reaktansi urutan positif dan urutan negatif dengan persamaan berikut

$$X_{t1} = X_{t2} = X_t \frac{MVA_2}{MVA_1} \times \frac{kV_2^2}{kV_1^2} \dots \dots \dots (5)$$

Dimana :

X_{t1} = Reaktansi Transformator baru (pu)

X_{t2} = Reaktansi Transformator lama (pu)

MVA_2 = Daya dasar baru (MVA)

MVA_1 = Daya dasar lama (MVA)

kV_2^2 = Tegangan dasar lama (KV)

kV_1^2 = Tegangan dasar baru (KV)

Nilai reaktansi trafo tenaga :

a. Reaktansi urutan positif dan negatif

Reaktansi urutan positif dan negatif ($X_{t1} = X_{t2}$) dapat dihitung dengan persamaan

$$X_t = Z_{trafo}(\%) \times X_{trafo} \dots \dots \dots (6)$$

$$X_t = \% \text{yang diketahui} \times X_t (\text{pada } 100\%)$$

b. Reaktansi urutan nol

Reaktansi urutan nol ini didapat dengan memperhatikan data trafo tenaga itu sendiri yaitu dengan melihat kapasitas belitan delta yang ada dalam trafo itu;

Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan delta/Y dimana kapasitas belitan delta sama besar dengan kapasitas belitan Y, maka $X_{t0} = X_{t1}$, Untuk trafo tenaga dengan belitan Yyd dimana kapasitas belitan delta (d) biasanya sepertiga dari kapasitas belitan Y (belitan yang dipakai untuk menyalurkan daya, sedangkan belitan delta tetap ada di dalam tetapi tidak dikeluarkan kecuali satu terminal delta untuk ditanahkan), maka;

$$X_{t0} = 3X_{t1} \dots \dots \dots (7)$$

Untuk trafo tenaga dengan hubungan YY dan tidak mempunyai belitan delta di dalamnya, maka besarnya X_{t0} berkisar antara 9 s/d 14 X_{t1} .

2.9 Impedansi Penyulang

Menghitung impedansi penyulang, impedansi penyulang ini dihitung tergantung dari besarnya impedansi per meter penyulang yang bersangkutan, dimana besar nilainya ditentukan dari konfigurasi tiang yang digunakan untuk jaringan SUTM atau dari jenis kabel tanah untuk jaringan SKTM. Dalam perhitungan disini diambil dengan impedansi

$$Z = \frac{(R + jX) \text{ Ohm}}{\text{Km}} \dots \dots \dots (8)$$

Dengan demikian nilai impedansi penyulang untuk lokasi gangguan yang didalam perhitungan ini disimulasikan terjadi pada lokasi dengan jarak, 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% panjang penyulang. Impedansi penyulang dalam satuan per unit adalah

$$Z_{penyulang} = \frac{Z_{penyulang}}{Z_{base}} (pu) \dots \dots \dots (9)$$

2.10 Z1 ekivalen dan Z2 ekivalen

Z1 ekivalen dan Z2 ekivalen dapat langsung dihitung sesuai dengan lokasi gangguan dengan menjumlahkan $Z_S + Z_T + \% Z_L$

$$Z_{1eq} = Z_{2eq} = Z_S + Z_T + Z_{penyulang} \dots \dots \dots (10)$$

Keterangan:

Z_{1eq} = Nilai impedansi ekivalen urutan positif (Ohm)

Z_{2eq} = Nilai impedansi ekivalen urutan negatif (Ohm)

Z_S = Nilai impedansi sumber sisi 20kV (Ohm)

Z_T = Nilai impedansi trafo urutan positif dan negatif (Ohm)

2.11 Z0 ekivalen

Sedangkan perhitungan untuk urutan nol dimulai dari trafo tenaga yang dinetralkan ke tanah, tahanan netral nilai $3RN$ dan impedansi penyulang. Sehingga persamaannya:

$$Z_{0eq} = Z_{t0} + 3RN + Z_{0penyulang} \dots \dots \dots (11)$$

Dimana:

Z_{0eq} = Nilai impedansi ekuivalen urutan nol (Ohm)

Z_{t0} = Nilai impedansi trafo tenaga urutan nol (Ohm)

RN = Nilai tahanan tanah trafo tenaga (Ohm)

$Z_{0penyulang}$ = Impedansi urutan nol (Ohm)

2.12 Gangguan Arus Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat adalah kondisi abnormal pada sistem tenaga listrik yang terjadi akibat hubungan langsung atau melalui impedansi rendah antara dua titik yang memiliki potensial berbeda, seperti antara fasa ke fasa, fasa ke tanah, atau ketiga fasa sekaligus. Gangguan ini menyebabkan arus yang jauh lebih besar dari arus normal mengalir dalam sistem.

Nilai arus hubung singkat dapat diketahui dengan dilakukan analisis perhitungan hubung singkat. Analisis hubung singkat merupakan sarana penting dalam menentukan nilai arus hubung singkat yang nantinya untuk melindungi peralatan dan sistem distribusi tenaga listrik. Rumus dasar yang digunakan untuk menghitung arus gangguan adalah hukum ohm;

$$I_{sc} = \frac{E}{Z_{eq}} \dots \dots \dots (12)$$

Keterangan :

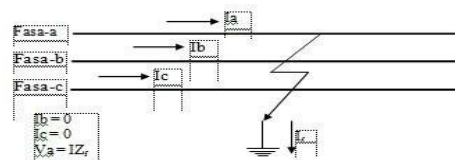
I_{sc} = Arus gangguan hubung singkat

E = Tegangan Sumber (Volt)

Z_{eq} = Impedansi dari sumber ke titik gangguan (impedansi ekivalen) Ω/km

a. Perhitungan Arus Gangguan 3 Fasa

Pada arus hubung singkat 3 fasa, arus gangguan tiap fasa bernilai sama.



Gambar 2. 6 Arus Gangguan 3 Fasa

Sehingga arus gangguan hubung singkat tiga fasa dapat ditulis dengan persamaan.

$$I_{sc} = \frac{E_a}{Z_{1eq}} \dots\dots\dots(13)$$

Keterangan:

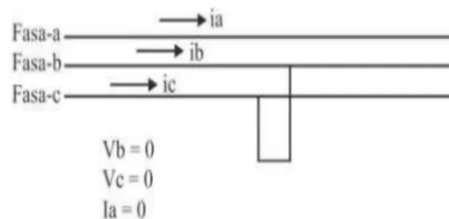
I_{sc} = Arus gangguan hubung singkat (A)

E_a = Tegangan sistem (V)

Z_{1eq} = Nilai impedansi ekivalen urutan positif (Ohm)

b. Perhitungan Arus Gangguan 2 Fasa

Pada gangguan ini dapat terjadi akibat putusnya kawat fasa tengah distribusi ataupun kerusakan isolasi.



Gambar 2. 7 Arus Gangguan 2 Fasa

Arus yang mengalir dapat ditentukan dengan persamaan

$$I_{sc} = \frac{3 \times E_a}{Z_{1eq} + Z_{2eq} + Z_0} \dots\dots\dots(14)$$

Keterangan:

I_{sc} = Arus gangguan hubung singkat (A)

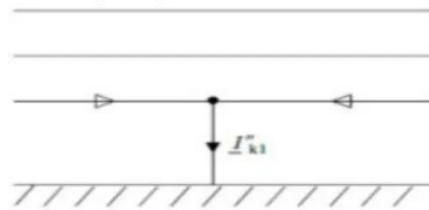
E_a = Tegangan sistem (V)

Z_{1eq} = Nilai impedansi ekivalen urutan positif (Ohm)

Z_{2eq} = Nilai impedansi ekivalen urutan negatif (Ohm)

c. Perhitungan Arus Gangguan 1 Fasa

Hubung singkat dapat terjadi akibat arus tambahan yang mengalir ke tanah.



Gambar 2. 8 Arus Gangguan 1 Fasa

Nilai arus hubung singkat 1 fasa dapat dihitung menggunakan rumus

$$I_{sc} = \frac{3 \times E_{ph}}{Z_{1eq} + Z_{2eq} + Z_{0eq}} \dots \dots \dots (15)$$

Keterangan:

I_{sc} = Arus gangguan hubung singkat (A)

E_{ph} = Tegangan sistem (V)

Z_{1eq} = Nilai impedansi ekivalen urutan positif (Ohm)

Z_{2eq} = Nilai impedansi ekivalen urutan negatif (Ohm)

Z_{0eq} = Nilai impedansi ekuivalen urutan nol (Ohm)

2.13 Pemilihan Circuit Breaker

Rata - rata pemilihan CB menurut perhitungan.

$$I_{sc \max} = \frac{I_{nomHVtrafo}}{\% Z} \dots \dots \dots (16)$$

$I_{nomHVtrafo}$ = arus nominal high voltage

$\%Z_{sc}$ = Impedansi *short circuit*

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Studi ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif yang bertujuan untuk menganalisis peran dan efektivitas sistem proteksi guna menghasilkan penilaian yang komprehensif dan akurat terhadap kinerja pemutus sirkit dalam kondisi gangguan hubung singkat pada saluran distribusi Kawasaki. Temuan ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi untuk meningkatkan sistem proteksi guna meningkatkan keandalan distribusi listrik di PT PLN (Persero) ULP Sukarami.

3.2 Waktu Dan Tempat Penelitian

1. Waktu Penelitian dilakukan selama periode waktu tertentu (Pada tahun 2025) sesuai dengan izin dan data yang tersedia dari pihak PLN.

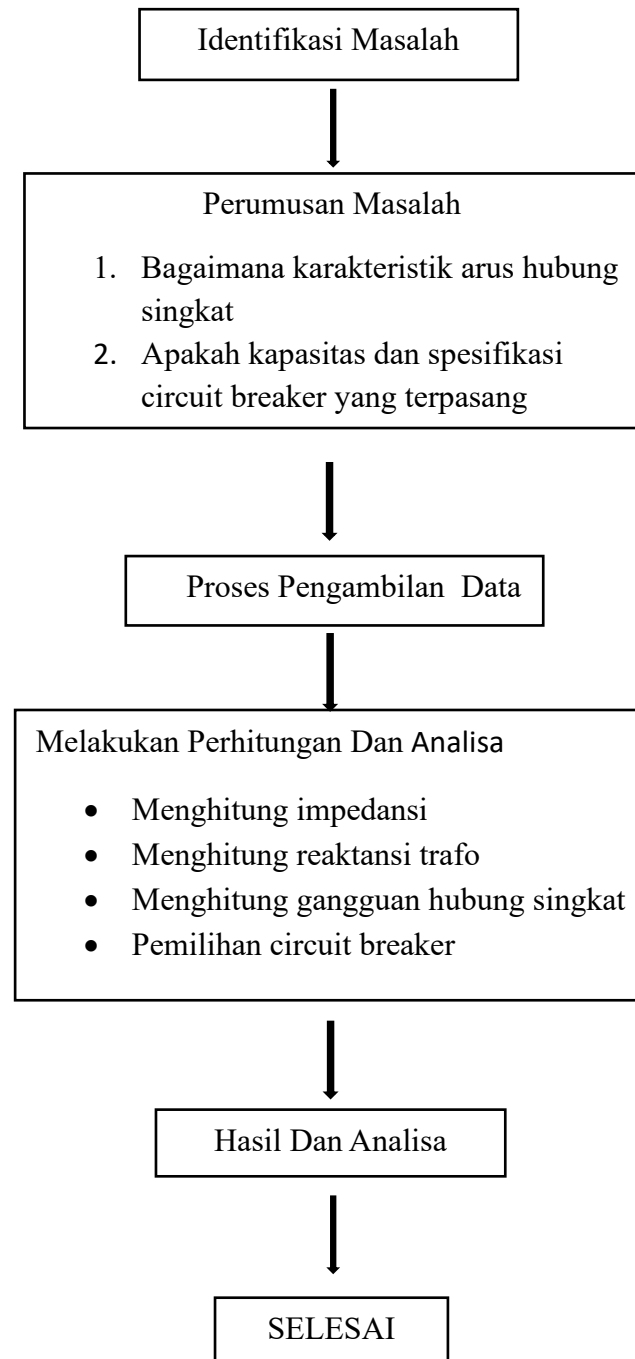
2. Tempat Penelitian dilakukan di PT PLN (Persero) ULP Sukarami, terutama pada jaringan distribusi menengah 20 kV yang menggunakan circuit breaker sebagai proteksi dari arus gangguan.

a) Lokasi : ULP SUKARAMI

b) Tempat : Jl. Kelapa Gading Km 9 RT 01, Karya Baru, Alang-Alang Lebar Kec. Alang-Alang lebar Kota Palembang Sumatra Selatan 30961.

3.3 Diagram Blok Penelitian

Berikut adalah diagram blok yang akan digunakan dalam skripsi.



3.4 Data Data teknis

Tabel 3. 1 Nilai Tahanan Dan Reaktansi penghantar

TAHANAN (R) DAN REAKTANSI (XL) PENGHANTAR AAAC					
TEGANGAN 20 kV (dikutip dari SPLN 64:1985)					
Luas Penampang (mm ²)		Impedansi Urutan Positif		Impedansi Urutan nol	
1	16	2,0161	0,4036	2,1641	1,6911
2	25	1,2903	0,3895	1,4384	1,6770
3	35	0,9217	0,3790	1,0697	1,6665
4	50	0,6452	0,3678	0,7932	1,6553
5	70	0,4608	0,3572	0,6088	1,6447
6	95	0,3396	0,3449	0,4876	1,6324
7	120	0,2688	0,3376	0,4168	1,6251
8	150	0,2162	0,3305	0,3631	1,6180
9	185	0,1744	0,3239	0,3224	1,6114
10	240	0,1344	0,3158	0,2824	1,6033

BAB IV

PERHITUNGAN DAN ANALISIS

4.1 Menghitung Impedansi Sumber

Tabel 4.1 Data Spesifikasi Circuit Breaker

NO	Deskripsi <i>Circuit Breaker</i>	Spesifikasi
1	Tegangan pengenalan	20 kV
2	Arus pengenalan	630 A
3	Tingkat insulasi	50/125kV
4	Frekuensi	50 Hz
5	Arus pemasukan hubung singkat	≥ 16 kA
6	Arus short circuit	≥ 40 kA
7	Durasi hubung-singkat	≥ 1 s
8	Kecepatan pemutusan	$\leq 0,5$ ms
9	SF6	0,14 Kg
10	Arus Kapasitas (Ic)	31,5 A
11	<i>Operating sequence</i>	O-3mn-CO-3mn-CO
12	<i>Isc</i>	16 kA

Perhitungan impedansi sumber pada sisi 20 kV pada penyulang Kawasaki, untuk sisi 20 kV dengan kapasitas 60 MVA. Berdasarkan SPLN64:1985 maka nilai yang di dapat dari persamaan (1)

$$MVAbase = 60 \text{ MVA} = 60 \times 10^6 = 60.000.000 \text{ Volt-Amper}$$

$$kVbase = 20 \text{ kV} = 20 \times 10^3 = 20.000 \text{ Volt}$$

$$Z_{base} = \frac{kV^2}{MVA}$$

$$Z_{base} = \frac{20.000^2 \text{ V}}{60.000.000 \text{ VA}} = \frac{400.000.000}{60.000.000}$$

$$Z_{base} = 6.6 \Omega$$

Untuk arus dasar dengan persamaan (2)

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V}$$

$$I = \frac{60}{\sqrt{3} \times 20}$$

$$I = 1.732 \text{ Amper}$$

MVA hubung singkat dengan sisi 150 kV sebesar 16 kA berdasarkan Spesifikasi *Circuit Breaker* pada tabel 3.1, dengan menggunakan persamaan (3) maka nilai yang di dapat

$$MVAsc = \sqrt{3} \times I_{sc\emptyset} \times kVprimer$$

$$MVAsc = \sqrt{3} \times 16kA \times 150kV$$

$$MVAsc = 4156 \text{ MVA}$$

Setelah diperoleh nilai ($MVAsc$) maka nilai impedansi sumber sisi 20 kV

dapat dihitung menggunakan persamaan (4) dibawah ini:

$$Xs1 = Xs2 = j \frac{kVbase^2}{MVA(sc\emptyset)}$$

$$Xs1 = Xs2 = j \frac{20base^2}{4156(sc\emptyset)}$$

$$X_{s1} = X_{s2} = j0,096 \Omega$$

$$X_{s1} = X_{s2} = \frac{j0,096}{6,6} \Omega$$

$$X_{s1} = X_{s2} = j0,014 \text{ pu}$$

4.2 Perhitungan Reaktansi Transformator

Tabel 4.2 Data Trafo

Kapasitas	60 MVA
Tegangan Primer	150 kV
Tegangan Sekunder	20 kV
Arus Nominal Primer	138.6/230.9 A
Arus Nominal Sekunder	944.8/1574.6 A
Vector	YNyn0+d
Tahun	2018
Impedansi Transformator	12,5 %

1. Reaktansi Transformator Urutan Positif dan Negatif

Besarnya reaktansi urutan positif dan negatif transformator daya adalah j 0,0298 pu pada daya 60 MVA di GH BKB nilai reaktansi urutan positif dan negatif transformator daya dengan menggunakan persamaan (5)

$$X_{t1} = X_{t2} = X_t \frac{MVA_2}{MVA_1} \times \frac{kV_2^2}{kV_1^1}$$

$$X_{t1} = X_{t2} = 12,5\% \frac{60}{60} \times \frac{20^2}{20^2}$$

$$X_{t1} = X_{t2} = 0,125 \text{ pu}$$

Karena $X_{T1} = X_{T2}$, di dapat dari persamaan (6)

$$X_t = Z_{trafo}(\%) \times X_{trafo}$$

$$X_t = 12,5\% \times 6.6 \Omega \quad X_t = 0,825\text{pu}$$

2. Reaktansi transformator urutan nol

Karena transformator daya 60 MVA dengan belitan YNyn0+d tidak mempunyai belitan delta di dalamnya, maka di dapat nilai dengan persamaan (7)

$$X_{t0} = 3X_{t1}$$

$$= 3 \times 0,825$$

$$= j 2,475\text{pu}$$

4.3 Perhitungan Impedansi Penyulang

Tabel 4.3 Data Saluran

Penyulang	Panjang Saluran (km)	Jenis Penghantar (mm ²)	Z1 = Z2	Z0	Ratio CT (A)
Kawasaki	0,18	AAAC 16	2,0161+j0,4036	2,1641+j1,6911	300/5
Kawasaki	0,59	AAAC 50	0,6452+j0,3678	0,7932+j1,6553	300/5
Kawasaki	1,67	AAAC 150	0,2162+j0,3305	0,3631+j1,6180	300/5
Kawasaki	4,14	XLPE 240	0,125+j0,097	0,275+j0,029	300/5
Kawasaki	0,27	XLPE 150	0,206+j0,104	0,356+j0,312	300/5
Kawasaki	2,55	AAACS 150	0,2162+j0,3305	0,3631+j1,6180	300/5

Impedansi penyulang yang akan di hitung tergantung dari besarnya impedansi per km (ohm/km) dari penyulang Kawasaki yang dihitung, dimana nilainya di tentukan

dari jenis penghantar dengan panjang saluran yang berbeda. Untuk mencari impedansi penghantar (pada tabel 3.2) dengan menggunakan persamaan (8)

1. Impedansi urutan positif dan negative, AAAC 16 mm², panjang = 0,18 km

$$Z1 = Z2 = (R+jX) \times \text{Panjang Saluran}$$

$$= (2,0161+j0,4036) \times 0,18$$

$$= 0,362 + j0,072 \Omega/\text{km}$$

2. Impedansi urutan positif dan negative, AAAC 50 mm², panjang = 0,59 km

$$Z1 = Z2 = (R+jX) \times \text{Panjang Saluran}$$

$$= (0,6452 + j0,3678) \times 0,59$$

$$= 0,380 + j0,217 \Omega/\text{km}$$

3. Impedansi urutan positif dan negative, AAAC 150 mm², panjang = 1,67 km

$$Z1 = Z2 = (R+jX) \times \text{Panjang Saluran}$$

$$= (0,2162+j0,3305) \times 1,67$$

$$= 0,361 + j0,551 \Omega/\text{km}$$

4. Impedansi urutan positif dan negative, XPLE 240 mm², panjang = 4,14 km

$$Z1 = Z2 = (R+jX) \times \text{Panjang Saluran}$$

$$= (0,125 + j0,097) \times 4,14$$

$$= 0,517 + j0,401 \Omega/\text{km}$$

5. Impedansi urutan positif dan negative, XLPE 150 mm², panjang = 0,27 km

$$Z1 = Z2 = (R+jX) \times \text{Panjang Saluran}$$

$$= (0,206 + j0,104) \times 0,27$$

$$= 0,055 + j0,028 \Omega/\text{km}$$

6. Impedansi urutan positif dan negative, AAACS150 mm², panjang = 2,55 km

$$\begin{aligned} Z1 = Z2 &= (R+jX) \times \text{Panjang Saluran} \\ &= (0,2162+j0,3305) \times 2,55 \\ &= 0,551 + j 0,842 \Omega/\text{km} \end{aligned}$$

Maka impedansi urutan nol pada penyulang Kawasaki adalah sebagai berikut :

1. Impedansi urutan nol, AAAC 16 mm², panjang = 0,18 km

$$\begin{aligned} Z1 = Z2 &= (R+jX) \times \text{Panjang Saluran} \\ &= (2,1641 + j1,6911) \times 0,18 \\ &= 0,389 + j0,304 \Omega/\text{km} \end{aligned}$$

2. Impedansi urutan nol, AAAC 50 mm², panjang = 0,59 km

$$\begin{aligned} Z1 = Z2 &= (R+jX) \times \text{Panjang Saluran} \\ &= (0,7932 + j1,6553) \times 0,59 \\ &= 0,467 + j0,976 \Omega/\text{km} \end{aligned}$$

3. Impedansi urutan nol, AAAC 150 mm², panjang = 1,67 km

$$\begin{aligned} Z1 = Z2 &= (R+jX) \times \text{Panjang Saluran} \\ &= (0,3631 + j1,6180) \times 1,67 \\ &= 0,606 + j2,702 \Omega/\text{km} \end{aligned}$$

4. Impedansi urutan nol, XPLE 240 mm², panjang = 4,14 km

$$\begin{aligned} Z1 = Z2 &= (R+jX) \times \text{Panjang Saluran} \\ &= (0,275 + j0,029) \times 4,14 \\ &= 1,138 + j0,120 \Omega/\text{km} \end{aligned}$$

5. Impedansi urutan nol, XLPE150 mm², panjang = 0,27 km

$$Z1 = Z2 = (R+jX) \times \text{Panjang Saluran}$$

$$= (0,356 + j0,312) \times 0,27$$

$$= 0,096 + j0,084 \Omega/\text{km}$$

6. Impedansi urutan nol, AAACS150 mm², panjang = 2,55 km

$$Z1 = Z2 = (R+jX) \times \text{Panjang Saluran}$$

$$= (0,3631 + j1,6180) \times 2,55$$

$$= 0,925 + j4,125 \Omega/\text{km}$$

Jadi impedansi total dari urutan positif negative dan nol penyulang Dayung adalah

$$Z1 = Z2 = (0,362 + j0,072) + (0,380 + j0,217) + (0,361 + j0,551) + (0,517 + j0,401) + (0,055 + j0,028) + (0,551 + j0,842) \Omega/\text{km}$$

$$= 2,226 + j2,111 \Omega/\text{km}$$

$$Z0 = (0,389 + j0,304) + (0,467 + j0,976) + (0,606 + j2,702) + (1,138 + j0,120) + (0,096 + j0,084) + (0,925 + j4,125) \Omega/\text{km}$$

$$= 3,621 + j8,311$$

Maka diperoleh impedansi total penyulang pada trafo dengan menggunakan persamaan(9)

$$Z_{\text{penyulang}} = \frac{Z_{\text{penyulang}}}{Z_{\text{base}}} (pu)$$

$$Z1 = Z2 = \frac{2,226 + j2,111}{6,67} = 0,333 + j0,316pu$$

$$Z0 = \frac{3,621 + j8,311}{6,67} = 0,542 + j1,246pu$$

4.4 Perhitungan Impedansi Ekuivalen

Menghitung impedansi ekuivalen sebagai berikut dari persamaan (10)

$$Z1eq = Z2eq = ZS + ZT + Z_{\text{penyulang}}$$

$$Z_{eq1}=Z_{eq2} = j0,096 + 0,834 + Z_p$$

$Z_{eq1}=Z_{eq2}$ Dalam pu :

$$Z_{eq1} = Z_{eq2} = \frac{j0,096+0,834}{6,67}$$

$$Z_{eq1} = Z_{eq2} = j0,014 + 0,125 + Z_p$$

Dengan menggunakan metode perhitungan diatas, maka diperoleh impedansi ekivalen penyulang dengan lokasi gangguan diasumsikan terjadi 25%, 50%, 75%, 100% panjang penyulang, maka ($Z_{eq1} = Z_{eq2}$) dapat dihitung dari persamaan (11)

Impedansi urutan nol pada penyulang Kawasaki sebagai berikut :

$$Z_{0eq} = Z_{t0} + 3RN + Z_{0penyulang}$$

$$Z_{0eq} = 0,00592 + (3 \times 40) + Z_{0p}$$

$$Z_{0eq} = \frac{j0,00592 + 120}{6.67}$$

$$Z_{0eq} = j0,000887 + 17,991 + Z_{0p}$$

4. 5 Perhitungan Gangguan Arus Hubung Singkat

Setelah memperoleh impedansi ekivalen sesuai lokasi gangguan, dan diasumsikan tegangan sumber (E_a) sebesar 1,0 pu, sehingga arus gangguan hubung singkat fasa ke tanah dapat dihitung dalam satuan per unit (pu) dengan uraian, Perhitungan arus gangguan 3 fasa dengan nilai arus gangguan pada lokasi yang berbeda.

Tabel 4.4 Data Gangguan Hubung Singkat

Panjang Jaringan	Panjang jaringan	If 3 Fasa	If 2 Fasa	If 1 Fasa
(km)	(%)	(amp)	(amp)	(amp)
0	0%	12156,82	10527,41	301,25
1	1%	8945,37	7738,62	297,83
5	5%	4221,68	3658,92	288,71
10	10%	2498,75	2156,39	275,42
15	15%	1782,39	1541,66	262,18
20	20%	1385,46	1198,23	249,53
25	25%	1127,54	976,85	236,91
30	30%	953,87	825,19	224,28
35	35%	824,19	712,38	211,65
40	40%	728,64	630,92	200,37
45	45%	651,29	564,78	190,12
50	50%	589,37	509,12	182,65
55	55%	538,74	464,89	173,28
60	60%	495,18	428,35	165,41
65	65%	458,26	396,72	157,93
70	70%	426,53	369,18	150,85
75	75%	398,47	344,92	144,17
80	80%	373,62	323,45	137,89
85	85%	351,59	304,37	131,98
90	90%	332,01	287,35	126,42

95	95%	314,48	272,13	121,19
100	100%	298,69	258,47	116,28

Untuk menghitung arus hubung singkat pada sistem 20 kV, dapat ditentukan dengan menggunakan rumus dasar, impedansi ekivalen, dimana yang dimasukkan ke dalam rumus dasar tersebut adalah jenis gangguan hubung singkat 3 fasa, 2 fasa dan 1 fasa.

1. Perhitungan Arus Gangguan 3 Fasa Menggunakan Persamaan (13)

$$I_{sc} = \frac{E_a}{Z_{eq}}$$

$$I_{sc} = \frac{1}{(j0,014 + 0,125) + (0,33 + j0,315) \times (0\%)}$$

$$I_{sc} = \frac{1}{\sqrt{0,014^2 + 0,125^2}}$$

$$I_{sc} = 7,950 \text{ pu}$$

$$I_{sc} = I \times I_{3fasa}$$

$$I_{sc} = 1732 \times 7,950$$

$$= 13769,4 \text{ A}$$

2. Perhitungan Arus Gangguan 2 Fasa Menggunakan Persamaan (14)

$$I_{sc} = \frac{3 \times E_a}{Z_{1eq} + Z_{2eq} + Z_{eq0}}$$

$$I_{sc} = \frac{\sqrt{3} \times 1}{2 \times (j0,014 + 0,125)}$$

$$I_{sc} = \frac{\sqrt{3}}{2 \times \sqrt{0,014^2 + 0,125^2}}$$

$$I_{sc} = 6,885 \text{ pu}$$

$$I_{sc} = I \times I_{3fasa}$$

$$\begin{aligned} I_{sc} &= 1732 \times 6,885 \\ &= 11924,82 \text{ A} \end{aligned}$$

3. Perhitungan Arus Gangguan 1 Fasa Menggunakan Persamaan (15)

$$I_{sc} = \frac{3 \times E_{ph}}{(Z1eq + Z2eq + Z0eq)}$$

$$I_{sc} = \frac{3 \times (1 + j0)}{(j17,99 + 0,00088) + (0,0624 + j3,838) \times (0\%)}$$

$$I_{sc} = \frac{3}{\sqrt{17,99^2 + 0,00088^2}}$$

$$I_{sc} = 0,166 \text{ pu}$$

$$I_{sc} = I \times I_{3fasa}$$

$$\begin{aligned} I_{sc} &= 1732 \times 0,166 \\ &= 287,512 \text{ A} \end{aligned}$$

Tabel 4. 5 Perbandingan Arus Hubung Singkat Dan Circuit Breaker

Jenis Gngguan	Nilai Maksimum Arus Hubung Singkat	Kapasitas Circuit Breaker Yang terpasang
3 Fasa	13769,4A	16000 A
2 Fasa	11924,82 A	16000 A
1 Fasa	287,512 A	16000 A

Berdasarkan tabel diatas Circuit Breaker (CB) atau pemutus sirkuit berfungsi sebagai perlindungan sistem kelistrikan dengan cara memutus aliran arus

ketika terjadi gangguan berbahaya seperti hubung singkat. Kapasitas CB harus lebih besar dari arus gangguan maksimum yang mungkin terjadi agar dapat bekerja dengan baik dan tidak rusak saat harus memutus arus.

Analisa dari perhitungan arus hubung singkat

1. Gangguan 3 Fasa, Arus gangguan maksimum yang dihitung: 13769,4 A atau sekitar 13,8 kA. Ini adalah kondisi paling berat arus gangguan yang terjadi karena arus mengalir melalui ketiga fasa sekaligus. Kapasitas CB terpasang 16 kA yaitu kemampuan CB untuk menerima dan menangani arus saat awal terjadinya gangguan. Nilai 16 kA lebih besar dari 13,8 kA, jadi CB tidak akan rusak saat gangguan terjadi. Jadi kapasitas CB cukup untuk menangani arus hubung singkat ini.
2. Gangguan 2 Fasa, Arus gangguan maksimum yang dihitung: 11924,82 A atau sekitar 11,9 kA. Kondisi ini terjadi ketika dua buah fasa bersentuhan langsung. Kapasitas CB terpasang sama dengan gangguan 3 fasa yaitu 16 kA. Jadi nilai arus gangguan lebih kecil dari kapasitas CB, sehingga CB dapat berfungsi dengan baik dan memenuhi standar keamanan.
3. Gangguan 1 Fasa, Arus gangguan maksimum yang dihitung: 287,512 A. Kondisi ini terjadi ketika satu fasa bersentuhan dengan tanah atau bagian netral yang tidak tepat. Kapasitas CB terpasang sama seperti gangguan 3 fasa dan 2 fasa. Jadi nilai arus gangguan jauh lebih kecil dari kapasitas CB, sehingga circuit breaker terbut sangat mampu memutus arus gangguan tersaebut.

Jadi CB (*Circuit Breaker*) yang dipasang masih layak digunakan dengan alasan, kapasitas lebih besar dari arus gangguan maksimum, masih memenuhi standar keamanan dan spesifikasi sistem, tidak ada tanda kerusakan dan penurunan performa.

4.6 Pemilihan Circuit Breaker

Pada gircuit breaker yang memiliki arus dasar 1732 *A* dengan beban 630 *A*, Jenis pemutus tenaga adalah pasangan tetap (*fixed type*) dengan media pemutusan SF6 atau *vacuum*.

Kajian Pemilihan *circuit breaker*

MVA Trafo : 60 MVA

Nominal Voltage : HV(Sisi Tegangan Tinggi) = 150 kV

LV(Sisi Tegangan Rendah) = 20 kV

Pemilihan circuit breaker menggunakan persamaan (16)

$$I_{sc} = \frac{I_{nomHVtrafo}}{\%Z_s}$$

$$I_{sc} = \frac{230,9}{12,5\%}$$

$$I_{sc} = 1847,2 \text{ A}$$

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis yang telah dilakukan mengenai analisis gangguan hubung singkat terhadap kinerja Circuit Breaker pada Cubicle SUTM 20 kV Penyulang Kawasaki, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Besarnya arus gangguan hubung singkat dipengaruhi oleh jarak lokasi gangguan dari sumber tegangan. Semakin jauh titik gangguan dari Gardu Induk (semakin besar persentase panjang penyulang), nilai impedansi total semakin besar sehingga arus gangguan yang terjadi semakin kecil. Arus gangguan maksimum terjadi pada titik 0% (dekat sumber), yaitu sebesar 13.769,4 A untuk gangguan 3 fasa, 11.924,82 A untuk gangguan 2 fasa, dan 287,512 A untuk gangguan 1 fasa. Arus gangguan minimum terjadi pada titik 100% (ujung penyulang), yaitu sebesar 298,69 A untuk gangguan 3 fasa, 258,47 A untuk gangguan 2 fasa, dan 116,28 A untuk gangguan 1 fasa.
2. Circuit Breaker yang terpasang memiliki spesifikasi kapasitas pemutusan arus hubung singkat sebesar ≥ 16 kA (16.000 Ampere). Nilai ini lebih besar dibandingkan dengan nilai arus gangguan maksimum yang dihitung yaitu 13.769,4 A. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa spesifikasi teknis Circuit Breaker yang digunakan sudah sesuai dan layak, serta mampu menangani kondisi gangguan terburuk yang mungkin terjadi pada sistem dengan aman dan efektif, sehingga dapat melindungi peralatan dan menjaga keandalan sistem distribusi

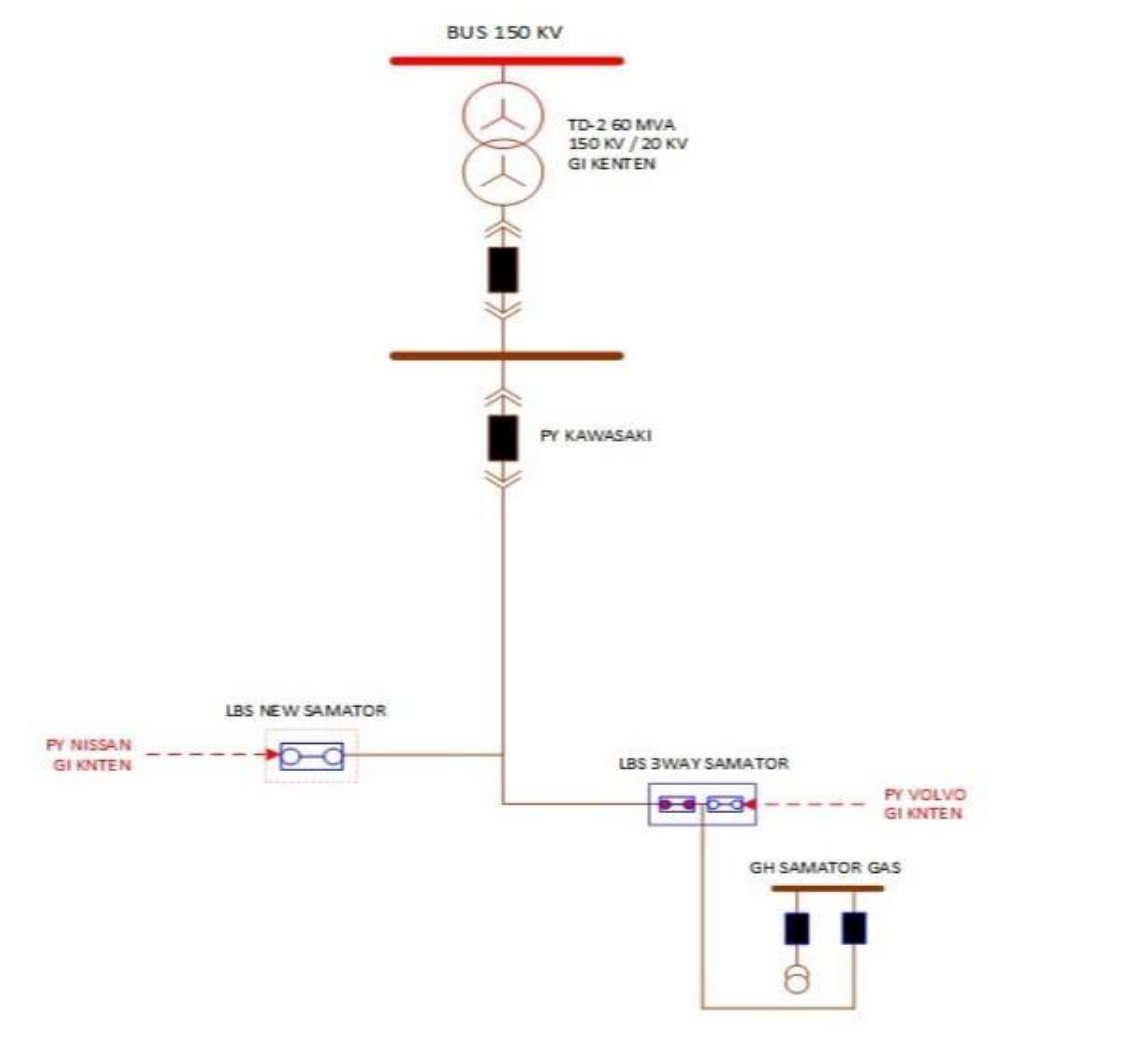
5.2 Saran

Untuk menentukan circuit breaker yang akan digunakan pada penyulang kawasaki agar tetap memperhatikan karakteristik dalam pemilihan dan penentuan circuit breaker yang akan digunakan, dengan menghitung arus hubung singkat 3 fasa agar kinerja circuit breaker sesuai dengan standar.

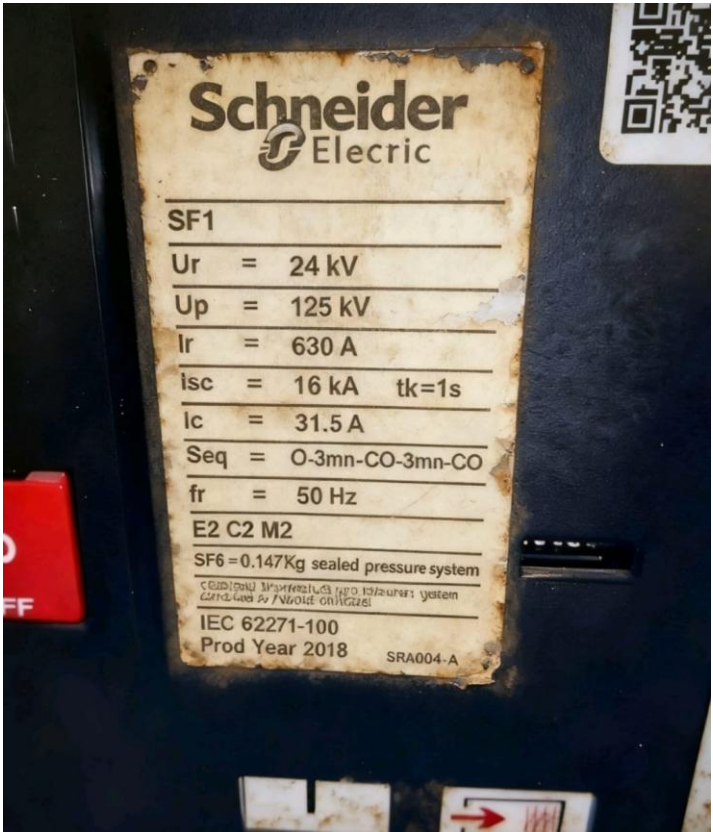
DAFTAR PUSTAKA

- [1] Stevenson, Jr, W.D. “Analisis Sistem Tenaga Listrik”, Edisi ke empat, Erlangga, Jakarta, 1983.
- [2] Markoni. (2018). Operasi Sistem dan Pemeliharaan Jaringan Distribusi Tenaga Listrik. Teknosa In, Yogyakarta.
- [3] Flurschein, C. H. (Ed.). (1982). *Power Circuit Breaker Theory and Design*.
- [4] Mukti, D. A. (2021). Analisis kegagalan sistem proteksi 20 kV *circuit breaker outgoing* gardu distribusi (Skripsi). Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Jakarta.
- [5] Yulianto, R. (2022). Analisis kinerja *circuit breaker* SF₆ pada gardu distribusi 20 kV di wilayah Jawa Tengah (Skripsi). Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang.
- [6] Anggara, B. (2023). Analisis arus hubung singkat pada jaringan distribusi tegangan menengah 20 kV. Jakarta: Penerbit Teknik Elektro Indonesia.
- [7] Perusahaan Umum Listrik Negara. SPLN No. 0520-2. K/DIR/2014 Buku Pedoman Pemutus Tenaga, Jakarta. PLN, 2014.
- [8] Sarimun, Wahyudi. *Proteksi Sistem Distribusi Tenaga listrik*. Garamond. Depok. 2004.
- [9] W. Sarimun N., MT., “Buku Saku Pelayanan Teknik (YANTEK). Jakarta: Garamond,” 2014.

Lampiran 1. Single line Diagram



Lampiran 2. Spesifikasi Circuit Breaker



Lampiran 3 Data Arus Hhung Singkat

Panjang Jaringan (km)	(%)	If 3 Fasa (amp)	If 2 Fasa (amp)	If 1 Fasa (amp)
0	0%	12156,82	10527,41	301,25
1	1%	8945,37	7738,62	297,83
5	5%	4221,68	3658,92	288,71
10	10%	2498,75	2156,39	275,42
15	15%	1782,39	1541,66	262,18
20	20%	1385,46	1198,23	249,53
25	25%	1127,54	976,85	236,91
30	30%	953,87	825,19	224,28
35	35%	824,19	712,38	211,65
40	40%	728,64	630,92	200,37
45	45%	651,29	564,78	190,12
50	50%	589,37	509,12	182,65
55	55%	538,74	464,89	173,28
60	60%	495,18	428,35	165,41
65	65%	458,26	396,72	157,93
70	70%	426,53	369,18	150,85
75	75%	398,47	344,92	144,17
80	80%	373,62	323,45	137,89
85	85%	351,59	304,37	131,98
90	90%	332,01	287,35	126,42
95	95%	314,48	272,13	121,19
100	100%	298,69	258,47	116,28

Lampiran 4. Spesifikasi Trafo

Kapasitas	60 MVA
Tegangan Primer	150 kV
Tegangan Sekunder	20 kV
Arus Nominal Primer	138.6/230.9 A
Arus Nominal Sekunder	944.8/1574.6 A
Vector	YNyn0+d
Tahun	2018
Impedansi Transformator	12,5 %

