

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Proses Pendistribusian Energi Listrik

Alur distribusi energi listrik sampai ke rumah kita melalui proses cukup panjang, yaitu dari pembangkit - transmisi - distribusi hingga ke konsumen industri dan rumah tangga. Energi listrik dihasilkan dari sebuah pembangkit listrik yang memanfaatkan berbagai macam sumber energi seperti Matahari (PLTS), air (PLTA), uap (PLTU), dan yang lainnya. Pembangkit listrik dengan kapasitas besar biasanya menghasilkan daya listrik dengan tegangan 6-24 kiloVolt, kemudian dinaikan tegangannya di Gardu Induk oleh trafo *step-up* di GITET menjadi 70 kV dan 150 kV untuk tegangan tinggi (TT) dan 500 kV untuk tegangan ekstra tinggi (TET).[1] Dari gardu pembangkit listrik akan didistribusikan ke jaringan transmisi dengan tegangan yang sudah dinaikan. Alasan menaikkan tegangan adalah untuk menurunkan arus agar meminimalisir losses. Tegangan 150 kV ini akan masuk ke industri skala besar. Selain langsung ke pelanggan industri, tegangan ini masuk ke Gardu Induk untuk diturunkan menjadi 20 kV dan bisa langsung digunakan oleh industri skala menengah. [4]

Alur berikutnya adalah daya listrik dengan tegangan menengah (TM) 20 kV dialirkan ke trafo distribusi (*step-down*) pada Gardu Distribusi untuk diturunkan lagi menjadi tegangan rendah (TR) 380 volt atau 220 volt. Tegangan 380/220 volt inilah yang masuk ke pelanggan 3/1 fasa sehingga dapat meyalakan alat-alat elektronik yang biasa digunakan di rumah. Sistem Distribusi memiliki peran penting dalam sistem tenaga listrik. Hal itu karena sistem ini langsung berhubungan dengan konsumen energi listrik pelanggan di saluran tegangan menengah dan tegangan rendah. Sistem Distribusi sendiri memiliki fungsi diantaranya yaitu menerima daya listrik dari sumber daya, juga mendistribusikan daya tersebut ke konsumen.

Single Line Diagram (SLD) Jaringan Tegangan Menengah 20 kV PT PLN (Persero) UP3 Kotamobagu merupakan representasi sistem distribusi tenaga listrik tiga fasa yang digambarkan dalam bentuk satu garis untuk menyederhanakan pembacaan konfigurasi jaringan. Diagram ini menggambarkan secara menyeluruh hubungan antara sumber tenaga listrik dari gardu induk, penyulang (*feeder*), peralatan proteksi, titik *manuver*, hingga gardu distribusi yang melayani pelanggan di wilayah kerja PLN UP3 Kotamobagu. Melalui SLD ini, alur penyaluran energi listrik dapat dipahami secara sistematis mulai dari pembangkitan yang ditransformasikan di gardu induk hingga didistribusikan ke konsumen pada level tegangan rendah.

Sumber utama tegangan 20 kV pada sistem ini berasal dari beberapa gardu induk yang saling terintegrasi dalam sistem kelistrikan regional, antara lain GI Lolak, GI Buroko, GI Isimu, dan GI Molobog. Pada masing-masing gardu induk, tegangan dari sisi sekunder transformator tenaga (150/20 kV atau 70/20 kV) disalurkan melalui busbar 20 kV yang dilengkapi dengan peralatan proteksi utama seperti PMT (Pemutus Tenaga), *Current Transformer* (CT), *Potential Transformer* (PT), serta relay proteksi *Over Current Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR). Peralatan ini berfungsi sebagai sistem pengamanan terhadap gangguan hubung singkat maupun gangguan satu fasa ke tanah.

Dari busbar 20 kV, energi listrik disalurkan melalui beberapa penyulang distribusi yang masing-masing melayani area beban tertentu di Kota Kotamobagu dan wilayah sekitarnya. Konfigurasi jaringan pada umumnya menggunakan sistem radial, di mana aliran daya mengalir dari satu sumber menuju beban di ujung jaringan. Namun demikian, pada titik-titik tertentu terdapat interkoneksi antar penyulang melalui sistem tie line atau Normal Open Point (NOP). Keberadaan titik manuver ini memungkinkan pengalihan beban saat terjadi gangguan atau saat dilakukan pekerjaan pemeliharaan, sehingga luas daerah padam dapat diminimalkan dan kontinuitas pelayanan tetap terjaga.

Sepanjang jalur penyulang 20 kV, dipasang berbagai peralatan pengamanan dan pengatur sistem seperti recloser, Load Break Switch (LBS), sectionalizer, Fuse Cut Out (FCO), dan Lightning Arrester (LA). Recloser berfungsi untuk mengamankan gangguan sementara dengan sistem buka-tutup otomatis, sedangkan LBS dan sectionalizer digunakan untuk membagi wilayah jaringan sehingga gangguan dapat diisolasi secara

selektif. FCO berperan sebagai pengaman pada sisi gardu distribusi, sementara LA melindungi peralatan dari tegangan lebih akibat sambaran petir atau switching. Seluruh peralatan tersebut digambarkan dengan simbol standar kelistrikan sehingga memudahkan identifikasi posisi dan fungsinya dalam sistem.

Pada ujung penyulang, terdapat gardu distribusi 20 kV/400 V yang berfungsi menurunkan tegangan menengah menjadi tegangan rendah sebelum disalurkan ke pelanggan rumah tangga, komersial, dan industri. Setiap gardu distribusi dilengkapi sistem proteksi serta sistem grounding untuk menjamin keselamatan dan keandalan operasi. Dengan konfigurasi yang tergambar pada SLD, dapat diketahui bahwa sistem distribusi 20 kV UP3 Kotamobagu telah dirancang dengan mempertimbangkan aspek keandalan, selektivitas proteksi, fleksibilitas operasi, serta kemudahan manuver jaringan.

Secara keseluruhan, Single Line Diagram ini tidak hanya berfungsi sebagai dokumen teknis, tetapi juga sebagai pedoman utama dalam pengoperasian sistem, analisis gangguan, koordinasi proteksi, serta perencanaan pengembangan jaringan di masa mendatang. Melalui pemahaman yang baik terhadap SLD, operator dapat melakukan tindakan cepat dan tepat saat terjadi gangguan, sehingga mutu pelayanan dan kontinuitas suplai tenaga listrik di wilayah kerja PLN UP3 Kotamobagu dapat tetap terjaga dengan optimal.

2.1.2 Gardu Distribusi

Gardu distribusi adalah salah satu komponen penting dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai titik penyaluran energi listrik dari jaringan tegangan menengah ke jaringan tegangan rendah sebelum disalurkan kepada konsumen. Gardu distribusi menerima suplai listrik dari jaringan distribusi primer (misalnya 20 kV), kemudian melalui transformator distribusi menurunkan tegangan tersebut menjadi tegangan rendah (misalnya 380/220 V) agar dapat digunakan oleh pelanggan rumah tangga, komersial, maupun industri kecil.

Selain sebagai penurun tegangan, gardu distribusi juga berperan sebagai pusat pengamanan dan pengendalian sistem distribusi. Di dalamnya terdapat peralatan proteksi seperti pemutus beban, fuse cut out, dan lightning arrester yang berfungsi melindungi transformator serta jaringan dari gangguan hubung singkat, beban lebih, maupun sambaran petir. Dengan adanya sistem proteksi ini, gangguan dapat segera diisolasi sehingga tidak meluas ke jaringan yang lebih luas dan keandalan penyaluran tenaga listrik tetap terjaga.

Gardu distribusi juga dilengkapi dengan sistem pentanahan (grounding) yang berfungsi menyalurkan arus gangguan ke tanah secara aman. Sistem pentanahan yang baik akan mengurangi risiko tegangan sentuh dan tegangan langkah yang dapat membahayakan manusia maupun merusak peralatan. Oleh karena itu, kondisi grounding, sambungan penghantar, serta nilai tahanan pentanahan harus selalu dipantau secara berkala untuk memastikan sistem bekerja secara optimal.

Secara umum, keberadaan gardu distribusi sangat menentukan kualitas dan kontinuitas pelayanan listrik kepada pelanggan. Kinerja yang baik dari gardu distribusi akan mendukung keandalan sistem, meminimalkan gangguan, serta menjamin keselamatan peralatan dan masyarakat di sekitarnya.

Gardu distribusi adalah salah satu Komponen dari sistem distribusi milik PLN berfungsi untuk menghubungkan jaringan atau aliran energi listrik ke konsumen atau pelanggan, baik itu pelanggan tegangan menengah maupun pelanggan tegangan rendah. Gardu Distribusi yang paling di kenal adalah suatu bangunan atau konstruksi Gardu Listrik yang berisi atau terdiri dari[3]

Perlengkapan Panel Hubung Bagi Tegangan Menengah (PHB-TM), Transformator Distribusi (TD), dan Panel Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHBTR) untuk mendistribusikan kebutuhan tenaga listrik untuk pelanggan baik dengan tegangan menengah (TM) 20 kV maupun Tegangan rendah (TR) 400/230 Volt.[1]

Dalam Gardu Distribusi pada umumnya menggunakan Transformator distribusi yang berfungsi menurunkan tegangan listrik dari jaringan tegangan tinggi menjadi tegangan menengah terpakai pada jaringan distribusi tegangan rendah (step down) dari tegangan TM 20 KV menjadi tegangan TR 400 Volt atau 230 Volt.



Gambar 2. 2 Gardu Distribusi K.169

2.1.3 Transformator Distribusi

Transformator distribusi atau Trafo distribusi adalah suatu alat listrik yang mengubah energi listrik bolak-balik dari satu level ke level tegangan yang lain. Nilai tegangan yang dibangkitkan oleh trafo ditentukan oleh kebutuhan energi listrik. Arus yang bervariasi di setiap belitan transformator menginduksi fluks magnet variabel dalam inti transformator, yang menghasilkan gaya gerak listrik yang bervariasi pada belitan lain yang dililitkan di sekitar inti yang sama. Energi listrik dapat ditransfer antara kumparan terpisah tanpa hubungan logam (konduktif) antara dua sirkuit.[4]



Gambar 2. 3 Transformator Distribusi

Hukum induksi Faraday menjelaskan pengaruh tegangan yang diinduksikan pada setiap kumparan karena perubahan fluks magnet yang mengelilingi kumparan. arus bolak-balik mengalir mengelilingi suatu inti besi maka inti besi tersebut akan berubah menjadi

magnet.

2.1.4 Panel Hubung Bagi Tegangan Rendah

Panel Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR) merupakan perangkat utama pada sisi tegangan rendah (400/230 Volt) yang berfungsi sebagai pusat pembagian, pengamanan, dan pengendalian daya listrik sebelum disalurkan ke jaringan tegangan rendah (JTR) dan pelanggan. Pada gardu distribusi 20 kV/400 V milik PLN UP3 Kotamobagu, PHB-TR ditempatkan setelah sisi sekunder transformator distribusi dan menjadi titik awal pendistribusian energi listrik ke berbagai jurusan beban.[2]

Secara konstruksi, PHB-TR terdiri dari rangka panel berbahan baja berlapis cat anti karat atau powder coating yang dirancang tahan terhadap kondisi lingkungan. Di dalam panel terdapat busbar tembaga sebagai penghantar utama fasa R, S, T, dan netral (N). Busbar ini terhubung langsung dengan terminal sekunder transformator distribusi, kemudian didistribusikan ke beberapa outgoing melalui perangkat pengaman seperti MCCB (Moulded Case Circuit Breaker) atau NH Fuse. Kapasitas arus dan ukuran busbar disesuaikan dengan daya transformator, misalnya 100 kVA, 160 kVA, atau 200 kVA, agar mampu menahan arus beban penuh serta arus hubung singkat sesuai perhitungan teknis

Fungsi utama PHB-TR adalah membagi beban secara merata pada masing-masing fasa untuk menjaga keseimbangan sistem. Ketidakseimbangan beban dapat menyebabkan arus netral tinggi, peningkatan rugi-rugi daya, serta penurunan kualitas tegangan. Oleh karena itu, konfigurasi pembagian jurusan pada PHB-TR dirancang berdasarkan analisis beban lapangan agar distribusi arus antar fasa relatif seimbang. Selain itu, panel ini juga berperan sebagai titik proteksi terakhir sebelum energi disalurkan ke pelanggan, sehingga apabila terjadi gangguan pada salah satu jurusan, hanya bagian tersebut yang terputus tanpa memadamkan seluruh sistem.

Dari sisi operasional, PHB-TR juga memudahkan proses pemeliharaan dan manuver jaringan. Operator dapat melakukan pemutusan sementara pada salah satu jurusan untuk pekerjaan perbaikan tanpa mengganggu jurusan lainnya. Panel biasanya dilengkapi dengan diagram satu garis (mini SLD), label identifikasi jurusan, serta alat ukur seperti amperemeter atau voltmeter untuk memantau kondisi beban secara langsung.

Panel hubung bagi tegangan rendah merupakan pusat pengendali JTR (Jaringan Tegangan Rendah) yang bisa menghubungkan dan memutuskan aliran listrik dengan mengoperasikan saklar utamanya.



Gambar 2. 4 PHB-TR.

2.1.5 Fuse Cut Out

Fuse Cut out atau sering disingkat FCO, merupakan alat proteksi di dalam gardu distribusi terhadap arus lebih atau arus hubung singkat yang terjadi untuk melindungi

peralatan dan jaringan agar tidak mengalami kerusakan. *Fuse cut out* berperan untuk melindungi gangguan-gangguan dari luar, terutama untuk lonjakan arus, misalnya terkena imbas sambaran petir.

Fuse Cut Out (FCO) merupakan peralatan proteksi yang digunakan pada jaringan distribusi tegangan menengah (umumnya 20 kV) untuk melindungi transformator distribusi dan peralatan jaringan dari gangguan arus lebih maupun hubung singkat. FCO bekerja berdasarkan prinsip pelelehan elemen fuse (sekering) apabila arus yang mengalir melebihi nilai nominal yang diizinkan, sehingga rangkaian akan terputus secara otomatis dan mencegah kerusakan peralatan yang lebih luas.

Pada sistem distribusi milik PLN UP3 Kotamobagu, Fuse Cut Out biasanya dipasang pada sisi primer transformator distribusi 20 kV, tepat sebelum terminal masuk trafo. Peralatan ini dipasang pada tiang jaringan atau struktur gardu distribusi dan terhubung secara seri dengan konduktor fasa. Setiap fasa dilengkapi satu unit FCO, sehingga dalam sistem tiga fasa digunakan tiga buah FCO.



Gambar 2. 5 FCO (Fuse Cut Out)

2.1.6 Lightning Arrester

Lightning Arrester (LA) atau arrester petir merupakan peralatan proteksi yang dipasang pada sistem tenaga listrik untuk melindungi peralatan dari tegangan lebih (overvoltage) akibat sambaran petir maupun surja hubung (switching surge). Pada sistem distribusi tegangan menengah 20 kV, Lightning Arrester menjadi komponen penting untuk menjaga keandalan transformator distribusi dan peralatan jaringan dari kerusakan akibat lonjakan tegangan yang bersifat impulsif dan berdurasi sangat singkat.[5]

Pada prinsipnya Cara kerja, *arrester* membentuk jalan ke tanah sehingga arus kilat atau petir akan melaluinya akan langsung dialirkan ke tanah. *Arrester* berperan sebagai *bypass* atau jalan pintas bagi arus lebih sehingga tidak mengganggu aliran arus dayanya.

Di wilayah kerja PLN UP3 Kotamobagu, Lightning Arrester umumnya dipasang pada sisi primer transformator distribusi 20 kV, terhubung antara konduktor fasa dan tanah (grounding). Setiap fasa dipasang satu unit arrester, sehingga pada sistem tiga fasa digunakan tiga buah LA. Pemasangan dilakukan sedekat mungkin dengan terminal masuk transformator untuk memaksimalkan perlindungan terhadap lilitan trafo.

Prinsip kerja Lightning Arrester adalah berdasarkan karakteristik non-linier elemen ZnO. Dalam kondisi tegangan normal (20 kV), arrester bersifat sebagai isolator dengan arus bocor yang sangat kecil. Namun ketika terjadi lonjakan tegangan akibat petir, tahanan internal arrester akan turun secara drastis sehingga arrester menjadi konduktif dan menyalurkan arus surja langsung ke tanah melalui sistem grounding. Setelah tegangan kembali normal, arrester kembali bersifat *isolatif*

Efektivitas Lightning Arrester sangat bergantung pada kualitas sistem pentanahan. Nilai tahanan grounding yang rendah (umumnya ≤ 5 Ohm sesuai standar) akan mempercepat pelepasan arus surja ke tanah dan mengurangi risiko kenaikan potensial pada peralatan. Oleh karena itu, pemasangan LA selalu dikombinasikan dengan sistem grounding yang baik, menggunakan kabel BC (Bare Copper) dan ground rod yang terpasang dengan benar.

Dalam koordinasi proteksi, rating Lightning Arrester harus disesuaikan dengan level tegangan sistem (rated voltage) dan *Basic Insulation Level* (BIL) peralatan yang dilindungi. Pemilihan rating yang tepat akan memastikan arrester bekerja sebelum tegangan lebih mencapai level yang dapat merusak isolasi transformator



Gambar 2. 6 Lightning Arrester (LA).

2.1.7 Pentanahan (*Grounding*)

Sistem Pentanahan adalah sistem hubungan penghantar yang menghubungkan sistem, komponen peralatan dan instalasi ke tanah sehingga dapat mengamankan manusia dari sengatan listrik dan juga komponen-komponen itu sendiri dari tegangan dan arus lebih. Menjadi salah satu faktor utama dalam setiap usaha pengamanan rangkaian listrik untuk itu sistem pentanahan harus dirancang dengan baik dan benar.[4]

- a. Kabel BC (BARE COOPER)



Gambar 2. 7 Kabel BC (Bare Cooper)

Kabel BC (Bare Copper) merupakan penghantar listrik berbahan dasar tembaga tanpa isolasi (telanjang) yang banyak digunakan dalam sistem pentanahan (grounding) pada instalasi tenaga listrik. Karena tidak memiliki lapisan isolasi, kabel ini dirancang khusus untuk ditanam di dalam tanah atau dipasang terbuka pada sistem pembumian, sehingga dapat menghantarkan arus gangguan secara langsung ke tanah dengan hambatan sekecil mungkin.

Secara konstruksi, kabel BC umumnya terdiri dari serabut-serabut tembaga yang dipilin (stranded) untuk meningkatkan fleksibilitas dan mempermudah pemasangan. Material tembaga dipilih karena memiliki konduktivitas listrik yang sangat baik, tahan terhadap korosi dibandingkan logam lain, serta memiliki umur pakai yang relatif panjang. Dalam sistem pentanahan, kabel BC berfungsi sebagai penghantar utama yang menghubungkan peralatan listrik, titik netral trafo, lightning arrester, dan struktur logam lainnya ke elektroda grounding atau batang pentanahan yang tertanam di tanah.

Penggunaan kabel BC sangat penting dalam menjaga keandalan sistem proteksi. Saat terjadi gangguan hubung singkat ke tanah atau sambaran petir, arus gangguan akan mengalir melalui kabel BC menuju sistem pembumian. Oleh karena itu, pemilihan luas penampang kabel harus disesuaikan dengan besar arus gangguan yang mungkin terjadi agar kabel mampu menahan arus tersebut tanpa mengalami pemanasan berlebih atau kerusakan mekanis. Ukuran yang umum digunakan pada gardu distribusi antara lain 16 mm², 25 mm², 35 mm², hingga 50 mm², tergantung pada kapasitas sistem dan standar teknis yang diterapkan.

Selain sebagai penghantar arus gangguan, kabel BC juga berperan dalam menyamakan potensial (equipotential bonding) antar bagian logam pada instalasi. Dengan adanya sistem bonding yang baik, perbedaan tegangan sentuh dan tegangan langkah dapat diminimalkan sehingga meningkatkan keselamatan personel di sekitar peralatan listrik.

Namun demikian, karena terpasang tanpa isolasi dan sering ditanam di tanah, kabel BC rentan terhadap korosi akibat kelembapan, kandungan kimia tanah, atau reaksi elektrokimia. Oleh sebab itu, pemasangan harus dilakukan dengan metode yang benar,

seperti penggunaan sambungan yang kuat dan tahan korosi, serta dilakukan pemeriksaan dan pengukuran tahanan pentanahan secara berkala untuk memastikan kinerjanya tetap optimal.

Secara keseluruhan, kabel BC merupakan komponen penting dalam sistem pentanahan yang berfungsi menjamin keselamatan, keandalan proteksi, serta kestabilan sistem tenaga listrik dari risiko gangguan arus lebih dan sambaran petir.

Kabel BC terbuat dari tembaga murni dengan tingkat konduktivitas tinggi ($\pm 99\%$ IACS), sehingga memiliki resistansi listrik yang rendah. Beberapa karakteristik utamanya meliputi:

- Tidak berisolasi (telanjang)
- Tahan terhadap korosi dalam kondisi tanah normal
- Memiliki fleksibilitas yang baik
- Daya hantar arus tinggi

Sifat konduktivitas yang tinggi membuat kabel BC sangat efektif dalam menyalurkan arus gangguan ke tanah dengan cepat, sehingga mengurangi risiko tegangan sentuh dan tegangan langkah.

b. Ground Rod



Gambar 2. 8 Ground ROD

Ground rod atau elektroda pentanahan merupakan komponen utama dalam sistem grounding yang berfungsi sebagai media pelepasan arus gangguan listrik ke dalam tanah. Ground rod ditanam secara vertikal ke dalam tanah dan dihubungkan dengan konduktor pentanahan (umumnya kabel BC/Bare Copper) untuk menciptakan jalur impedansi rendah terhadap arus gangguan, baik akibat hubung singkat maupun sambaran petir.

Keberadaan ground rod sangat penting dalam sistem tenaga listrik karena menentukan besar kecilnya nilai tahanan pentanahan. Semakin rendah nilai tahanan tanah, maka semakin efektif sistem dalam meredam tegangan lebih dan mengurangi risiko tegangan sentuh (touch voltage) serta tegangan langkah (step voltage).

Ground rod bekerja dengan prinsip penyebaran arus ke massa tanah di sekitarnya. Ketika terjadi gangguan, arus akan mengalir melalui konduktor pentanahan

menuju ground rod, kemudian menyebar ke dalam tanah. Luas area kontak antara elektroda dan tanah sangat mempengaruhi nilai tahanan pentanahan.

Nilai tahanan pentanahan dipengaruhi oleh:

- Resistivitas tanah
- Kedalaman penanaman
- Diameter dan panjang elektroda
- Jumlah elektroda yang dipasang

Pada kondisi tanah dengan resistivitas tinggi, sering dilakukan penambahan ground rod secara paralel dengan jarak antar elektroda minimal 2–3 meter untuk menurunkan nilai tahanan.

Untuk mendapatkan nilai suatu pentanahan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$R = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \dots\dots\dots [2]$$

Berdasarkan besarnya arus gangguan dan kenaikan tegangan phasa yang tidak terganggu, impedansi pentanahan netral dapat diatur. Pemilihan impedansi harus dilakukan secara analitis bila Z_n = besar, I_f = kecil dan Δ = besar, maka sistem pentanahan memperbaiki [3]:

1. Arus gangguan hubung singkat yang tidak terlalu besar, sehingga bahaya yang

ditimbulkan tidak berlebihan.

2. Tegangan lebih yang terjadi pada phasa yang tidak terganggu tidak terlalu besar sehingga batas isolasi peralatan dapat dipertahankan atau dikurangi.

Sistem pentanahan dibagi menjadi dua :

1. Pentanahan sistem (Pentanahan Netral)

Pentanahan netral merupakan suatu keharusan pada saat ini, karena sistem sudah demikian besar dengan jangkauan yang luas dan tegangan yang tinggi. Pentanahan netral ini dilakukan pada pembangkit listrik dan transformator daya pada gardu-gardu distribusi. Oleh karena itu pada saat dimana sistem-sistem tenaga relatif mulai besar, sistem-sistem ini diketanahkan melalui tahanan reaktansi. Pentanahan ini umumnya dilakukan dengan menghubungkan netral transformator daya ke tanah.

2. Pentanahan Umum (Pentanahan Peralatan)

Pentanahan peralatan berfungsi untuk melindungi makhluk hidup terhadap tegangan sentuh.

- A. Tegangan Sentuh

Tegangan sentuh adalah tegangan yang terdapat diantara suatu objek yang disentuh dan suatu titik berjarak 1 meter, dengan asumsi bahwa objek yang disentuh dihubungkan dengan kisi-kisi pentanahan yang berada dibawahnya. Besar arus gangguan dipengaruhi oleh tahanan orang dan tahanan kontak ke tanah dari orang tersebut.[4]

Untuk mendapatkan nilai tegangan sentuh untuk orang dengan berat maksimal 70 kg dan 50 kg dapat menggunakan persamaan berikut :

$$Et_{70} = (1000 + 1.5 \times Cs \times \rho s) \times Ib_{70} \quad \dots\dots\dots[2.1]$$

$$Et_{50} = (1000 + 1.5 \times Cs \times \rho s) \times Ib_{50} \quad \dots\dots\dots[2.2]$$

Dimana :

$$Cs = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho s} \right)}{2.hs + 0.09} \quad Ib_{70} = \frac{0.157}{\sqrt{tf}}$$

B. Tegangan Langkah

Tegangan langkah adalah tegangan yang timbul diantara dua kaki yang sedang berdiri diatas tanah yang sedang dialiri oleh arus kesalahan ke tanah. Dalam hal ini dicontohkan jarak antara kedua kaki adalah 1 meter dan diameter misalkan 8 cm dalam keadaan tidak menggunakan sepatu.[4]

Untuk mendapatkan tegangan langkah untuk orang dengan berat maksimal 70 kg dan orang dengan maksimal 50 kg menggunakan persamaan berikut :

$$Es_{70} = (1000 + 6 \times Cs \times \rho s) \times Ib_{70} \quad \dots\dots\dots[2.3]$$

$$Es_{50} = (1000 + 6 \times Cs \times \rho s) \times Ib_{50} \quad \dots\dots\dots[2.4]$$

2.2 Penelitian yang Relevan

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

Tabel 2. 1 Penelitian yang Relevan

No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi
1.	Analisis Perbaikan Pentanahan (<i>Grounding</i>) Guna Mencegah Kerusakan Peralatan Listrik pada Gardu Distribusi PT. PLN (Persero) Rayon Dukuh Kupang. RAHARJA, YOAN KUSUMA	Penelitian ini mengangkat permasalahan yang terjadi pada saat gangguan yang berhubungan dengan tanah	Metode yang digunakan adalah dengan melakukan perbaikan dengan menggunakan metode <i>double staright</i> agar dapat mengatasi gangguan tersebut
2.	Perhitungan kapasitas trafo pembumian titik netral pada generator. M.J Tambunan. T. Koerniawan dan G. Ramadhan[5]	Untuk menjaga keandalan dan keberlanjutan generator dalam menghasilkan listrik bergantung pada sistem pentanahan yang digunakan. Kapasitas transformator yang dihasilkan dari perhitungan adalah	kapasitas transformator yang digunakan harus melebihi kapasitas transformator saat terjadi gangguan.
		33.045 kVA jika terjadi gangguan	

3.	Pemodelan Sistem Pembedaan Pada Gardu Induk 150 KV Tayan, Kalimantan Barat Menggunakan Grid Analysis Cymgrd . <i>SUTET, 14(1)</i>, 76–87.Johar Damiri, D. (2024)[6]	Pengembangan gardu induk meliputi tahap prakonstruksi, perencanaan sistem pembedaan yang bertujuan untuk merencanakan sistem pembedaan perpanjangan dan pengaruhnya terhadap sistem pembedaan eksisting	metode kuantitatif disertai dengan perencanaan eksperimental pengembangan sistem kelistrikan menggunakan metode perencanaan nilai pembedaan dengan perangkat lunak Cymgrd Grounding berdasarkan data perhitungan menurut Standar IEEE Std 80.
4.	Sistem proteksi generator dengan tahanan tinggi pada PLTU Labuhan Angin terhadap gangguan satu fasa ke bumi. R. Hariyati, H. Suryanto dan D.M Sitanggang[7]	Pentanahan resistansi tinggi merupakan salah satu cara untuk melindungi generator dari gangguan tanah satu fasa	ukuran resistor harus dipilih dengan cermat untuk setiap sistem. Standar IEEE C37.101 memberikan contoh terperinci tentang cara menentukan ukuran resistor pentanahan untuk memenuhi persyaratan yang disebutkan di atas, serta menghitung arus dan tegangan pentanahan yang dihasilkan

5.	Analisa hasil pengukuran Tahanan pentanahan pada peralatan di swichyard gardu induk angke PT. PLN (persero) UIT-JBB duri kosambi[6] I. Hajar dan D. Romadani[8]	Penelitian ini bertujuan untuk agar jaminan keselamatan dan keamanan untuk peralatan yang terpasang dan juga manusia yang ada di gardu induk.	Penelitian ini membahas tentang pengukuran tahanan pentanahan yang dilakukan pada peralatan di gardu induk dengan metode kuantitatif berdasarkan hasil pengukuran tahanan pentanahan peralatan, tegangan langkah, tegangan sentuh
6.	Perbandingan perbaikan sistem pentanahan instalasi listrik dengan menggunakan bentonit teraktivasi dan sisten pentanahan arang garam. Ibnu muhamad Nur, Itmi Hidayat Kurniawan dan Winarso[7]	membandingkan pentanahan mana yang resistansinya paling rendah dan mana resistansinya yang paling tinggi terhadap tanahnya.	Penelitian ini dilakukan dengan membandingkan dua lokasi dengan struktur tanah yang berbeda-beda.
7.	"High frequency response of grounding electrodes: effect of soil dielectric constant." <i>IET Generation, Transmission & Distribution</i> 14.15 (2020):	pengaruh variasi permitivitas relatif tanah terhadap tegangan transien induksi pada elektroda pentanahan.	Penelitian ini menyelidiki perilaku frekuensi tinggi elektroda pentanahan dengan memecahkan masalah elektromagnetik gelombang penuh menggunakan metode

	2915-2921.Salarieh, Bamdad, Jeewantha De Silva, and Behzad Kordi.		elemen hingga.
8.	Pengaruh paralel pentanahan transformator dan pentanahan arrester terhadap kinerja resistansi pentanahan transformator distribusi. Rizki, Pebi Muhamad dan Dian Eka Putra[8]	Menjaga keandalan dan penyediaan energi listrik dan melindungi peralatan dan manusia dari tegangan lebih ataupun arus bocor	Metode yang digunakan adalah dengan mempararelkan arrester dan ground body atau shell trafo tersebut