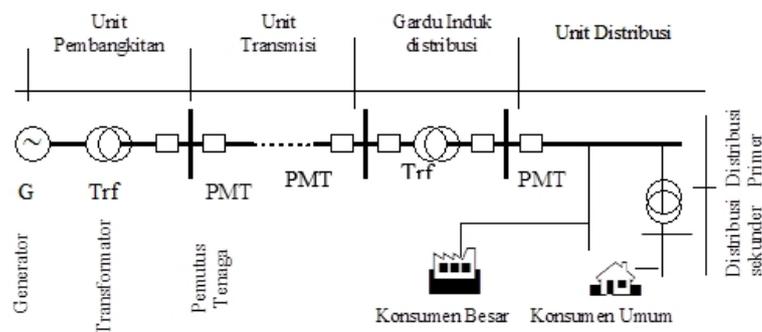


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Pendistribusian Tenaga Listrik

Sistem jaringan tenaga listrik adalah penyaluran energi listrik dari pembangkit tenaga listrik (*power station*) hingga sampai kepada konsumen (pemakai) pada tingkat tegangan yang diperlukan. Sistem tenaga listrik ini terdiri dari unit pembangkit, unit transmisi dan unit distribusi.^[10]



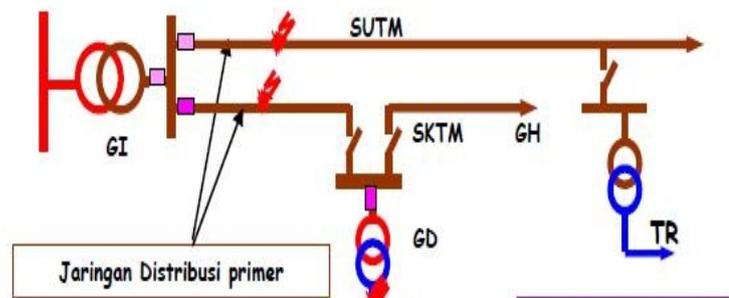
Gambar 2.1 Sistem Pendistribusian Tenaga Listrik

Pada gambar di atas, secara sederhana dapat dijelaskan bahwa listrik dihasilkan di pusat listrik yang menggunakan potensi mekanik (air, uap, panas bumi, nuklir, dll.) untuk menggerakkan turbin yang porosnya (as-nya) dikopel/digandeng dengan generator. Dari generator yang berputar pada kecepatan tertentu inilah energi listrik arus bolak balik tiga fasa dihasilkan. Energi listrik tersebut lalu melalui saluran distribusi ke gardu induk. Pada gardu induk, tegangan yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tersebut disesuaikan dengan tegangan yang akan dihantarkan. Misalnya, pembangkit mengeluarkan tegangan sebesar 20 kV, namun karena listrik tersebut harus dihantarkan konsumen melalui jarak jauh, maka tegangan listrik terlebih dahulu dinaikkan menggunakan transformator *step up*. Setelah itu melalui jaringan distribusi,

^[10] Daman Susanto, *Sistem Distribusi Tenaga Listrik* (Padang: Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang, 2009), hal. 5-7.

aliran listrik tersebut pun dialirkan ke konsumen, baik konsumen industri maupun perumahan. Tampak pada gambar di atas bahwa sebelum dialirkan ke konsumen, tegangan listrik kembali diturunkan dengan transformator step down sampai 220 V pada jaringan distribusi^[5]

2.1.1 Jaringan Distribusi Primer^[10]



Gambar 2.2 Jaringan Distribusi Primer 20 kV

Jaringan distribusi primer merupakan awal penyaluran tenaga listrik dari Pusat Pembangkit Tenaga Listrik ke konsumen untuk sistem pendistribusian langsung. Sedangkan untuk sistem pendistribusian tak langsung merupakan tahap berikutnya dari jaringan transmisi dalam upaya menyalurkan tenaga listrik ke konsumen. Jaringan distribusi primer atau jaringan distribusi tegangan tinggi (JDTT) memiliki tegangan sistem sebesar 20 kV. Untuk wilayah kota tegangan diatas 20 kV tidak diperkenankan, mengingat pada tegangan 30 kV akan terjadi gejala-gejala korona yang dapat mengganggu frekuensi radio, TV, telekomunikasi, dan telepon.

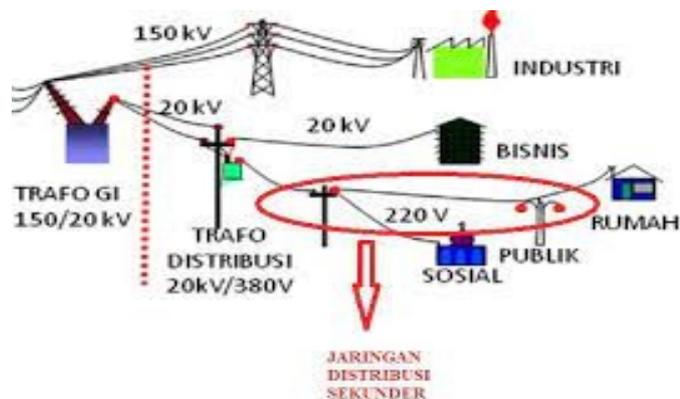
Sifat pelayanan sistem distribusi sangat luas dan kompleks, karena konsumen yang harus dilayani mempunyai lokasi dan karakteristik yang berbeda. Sistem distribusi harus dapat melayani konsumen yang terkonsentrasi di kota, pinggiran kota dan konsumen di daerah terpencil. Sedangkan dari karakteristiknya ada konsumen perumahan dan konsumen

^[5] Lim Steven, "Gardu Distribusi" (https://www.academia.edu/12458801/gardu_distribusi, diakses pada tanggal 30 Mei 2021).

^[10] Op.cit

dunia industri. Sistem konstruksi saluran distribusi terdiri dari saluran udara dan saluran bawah tanah. Pemilihan konstruksi tersebut didasarkan pada pertimbangan sebagai berikut: alasan teknis yaitu berupa persyaratan teknis, alasan ekonomis, alasan estetika dan alasan pelayanan yaitu kontinuitas pelayanan sesuai jenis konsumen.

2.1.2 Jaringan Distribusi Sekunder^[10]



Gambar 2.3 Jaringan Distribusi Sekunder 220 V

Jaringan distribusi sekunder atau jaringan distribusi tegangan rendah (JDTR) merupakan jaringan tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan konsumen. Oleh karena itu, besarnya tegangan untuk jaringan distribusi sekunder ini adalah 130/230 V dan 130/400 V untuk sistem lama, atau 230/400 V untuk sistem baru. Tegangan 130 V dan 230 V merupakan tegangan antara fasa dengan netral, sedangkan tegangan 400 V merupakan tegangan fasa dengan fasa.

2.2 Gardu Distribusi^[5]

Gardu distribusi merupakan salah satu komponen dari suatu sistem distribusi yang berfungsi untuk menghubungkan jaringan listrik ke konsumen atau mendistribusikan tenaga listrik pada beban/konsumen baik konsumen tegangan menengah maupun konsumen tegangan rendah. Transformator

^[10] Ibid

^[5] Op.cit

distribusi yang merupakan bagian utama dari gardu distribusi, digunakan untuk menurunkan tegangan listrik dari jaringan distribusi tegangan tinggi menjadi tegangan rendah (*step down transformer*) yaitu tegangan 20 kV menjadi tegangan 380/220 V. Sedangkan transformator yang digunakan untuk menaikkan tegangan listrik (*step up transformer*) hanya digunakan pada pusat pembangkit tenaga listrik agar tenaga yang didistribusikan pada suatu jaringan panjang (*long line*) tidak mengalami penurunan tegangan (*voltage drop*). Macam gardu distribusi ada dua, yaitu gardu pasang luar dan gardu pasang dalam.

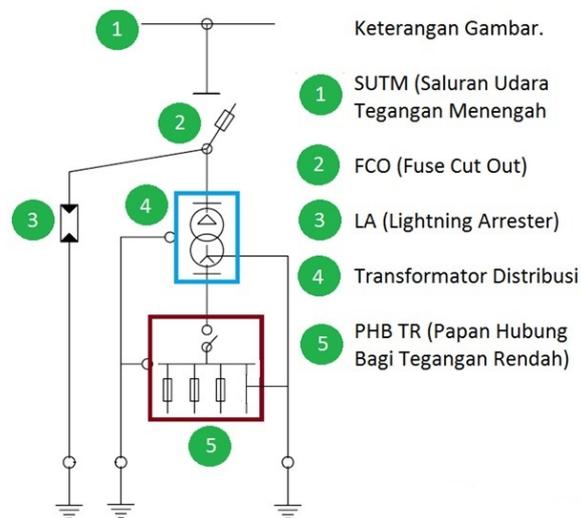
2.2.1 Gardu Distribusi Pasang Luar

2.2.1.1 Gardu Portal



Gambar 2.4 Gardu Portal

Gardu portal merupakan salah satu dari jenis konstruksi gardu tiang, yaitu gardu distribusi tenaga listrik tipe terbuka (*out-door*), dengan memakai konstruksi dua tiang atau lebih. Tempat kedudukan transformator sekurang-kurangnya 3 meter di atas permukaan tanah. Dengan sistem proteksi di bagian atas dan PHB TR di bagian bawah untuk memudahkan kerja teknis dan pemeliharaan. Berikut Single Line Diagram gardu portal:

Gambar 2.5 *Single Line Diagram* Gardu Portal

Adapun komponen utama gardu portal yaitu:

1. Transformator Distribusi^[1]

Transformator ini digunakan untuk mengubah suatu taraf listrik AC ke taraf yang lain. Maksud dari pengubahan taraf tersebut antara lain seperti menaikkan tegangan AC atau menurunkan tegangan AC dari 20 kV ke 380/220 V. Transformator ini bekerja berdasarkan prinsip Induksi Elektromagnet karenanya transformator hanya dapat bekerja pada tegangan yang berarus bolak balik.^[1]



Gambar 2.6 Transformator

^[1] BSTea, "Cara Kerja dan Fungsi Bagian Transformator (Trafo)" (<https://seputarilmu.com/2019/11/transformator.html>, diakses pada tanggal 30 Mei 2021).

2. Lightning Arrester (LA)

Berfungsi sebagai alat proteksi atau pengaman transformator distribusi dari tegangan lebih akibat surja petir, khususnya pada gardu pasang luar.



Gambar 2.7 *Lightning Arrester*

3. Fuse Cut Out (FCO)

Berfungsi sebagai proteksi atau pegaman lebur. Pada gardu distribusi khususnya, FCO ini berfungsi sebagai alat pelindung transformator dari arus hubungan singkat dan sebagai alat untuk membebaskan sumber tegangan jika akan dilakukan pemeliharaan. Proteksi pada FCO ini dipasang dalam bentuk *fuse link* yang dapat disesuaikan dengan arus nominal transformator distribusi yang terpasang.



Gambar 2.8 *Fuse Cut Out*

4. Wiring Gardu atau Pengawatan Gardu

Berupa pengawatan atau kawat penghubung untuk menghubungkan tegangan dari jaringan TM, *lightning arrester* (LA) dan *fuse cut out* (FCO) ke transformator distribusi.

5. Tiang

Tiang yang digunakan untuk gardu distribusi jenis ini bisa berupa tiang beton maupun tiang besi, yang memiliki kekuatan kerja sekurang kurangnya 500 daN dengan panjang 11 atau 12 meter.

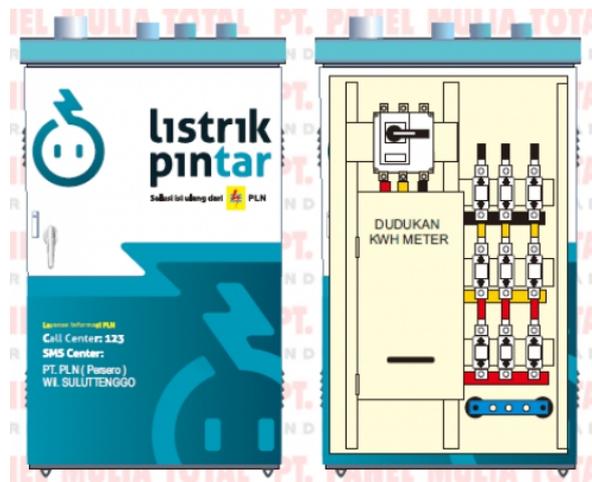
6. Rangka Gardu

Pada dasarnya berfungsi untuk menempatkan transformator distribusi dan komponen lainya pada tiang. Rangka gardu ini biasanya sudah berupa satu set lengkap.

7. Pipa Jurusan

Berfungsi untuk menempatkan kabel naik atau kabel jurusan dari PHB-TR ke jaringan SUTR di bagian atas.

8. Panel Hubung Bagi Tegangan Rendah



Gambar 2.9 Rak TR (PHB-TR)

PHB TR adalah singkatan dari Panel Hubung Bagi Tegangan Rendah, atau istilah lainnya papan bagi. Fungsinya untuk membagi tegangan rendah ke saluran rumah tangga, istilah mudahnya PHB TR adalah



terminal pembagi dari transformator pada gardu listrik ke jaringan rumah tangga.

Pada PHB TR juga memiliki bagian-bagian tertentu yaitu:

1) Saklar Utama (*Disconnecting Switch*)

Berfungsi sebagai saklar pemutus hubungan listrik dari transformator (keluaran 380/220 V) ke peralatan listrik di dalam lemari PHB dan ke pelanggan.

2) Saluran Pembagi

Berfungsi sebagai hantaran listrik yang terdiri dari 3 atau lebih rel busbar yang nantinya sebagai susunan cabang keluaran dari saklar utama ke pembagian beban yang dihubungkan secara terpisah.

3) *Fuse Holder*

Berfungsi sebagai tempat dudukan pengaman lebur (*NH Fuse*) dan sebagai titik kontak penghubung antara busbar dan saluran pembagi.

4) *Fuse* (Pelebur)

Berfungsi sebagai pengaman arus lebih pada jaringan tegangan rendah.

5) Pentanahan (*Grounding*)

Pentanahan berfungsi untuk mengamankan rangkaian atau instalasi dari tegangan atau arus lebih serat tegangan sentuh.

6) Dudukan kWh meter

Tempat untuk memasang kWh meter di dalam PHB TR.

2.2.1.2 Gardu Cantol



Gambar 2.10 Gardu Cantol

Gardu cantol adalah gardu distribusi tipe tiang untuk pasangan terbuka (out-door) dengan memakai konstruksi satu tiang. Seluruh bagian transformator distribusi dan papan hubung bagi atau (PHB TR) dicantolkan pada satu tiang yang sama. Transformator distribusi di pasang pada bagian atas dan lemari panel / PHB-TR pada bagian bawah. Pada umumnya, Single Line Diagram (SLD) gardu cantol sama saja dengan gardu portal. Komponennya pun hampir sama dengan gardu portal, perbedaannya hanya pada jumlah tiang, penampang trafo dan juga terkadang pada transformatornya. Tiang pada gardu cantol hanya satu, penampang transformatornya lebih kecil, dan juga umumnya gardu cantol memiliki transformator dengan ukuran/kapasitas yang lebih kecil dari gardu portal.

2.2.1.3 Gardu Kios

Gardu kios merupakan gardu distribusi tenaga listrik yang konstruksi pembuatannya terbuat dari bahan konstruksi baja, fiberglass atau kombinasinya. Gardu ini dibangun di lokasi yang tidak memungkinkan didirikan gardu beton atau gardu tembok. Karna sifatnya mobilitas, maka kapasitas transformator yang terpasang terbatas yakni maksimum 400 kVA. Ada beberapa jenis gardu kios ini, seperti gardu kios

kompak, gardu kios modular dan gardu kios bertingkat. Khusus untuk gardu kompak, seluruh komponen utama gardu sudah dirangkai selengkapnya di pabrik, sehingga pembuatan gardu ini lebih cepat di banding pembuatan gardu beton. Perbedaan gardu kios dengan gardu portal dan cantol ada pada penggunaan tiang. Gardu kios tidak menggunakan tiang melainkan hanya diletakkan di dalam kios diatas permukaan tanah. Komponen lainnya pun sama seperti gardu pasang luar lainnya.



Gambar 2.11 Gardu Kios

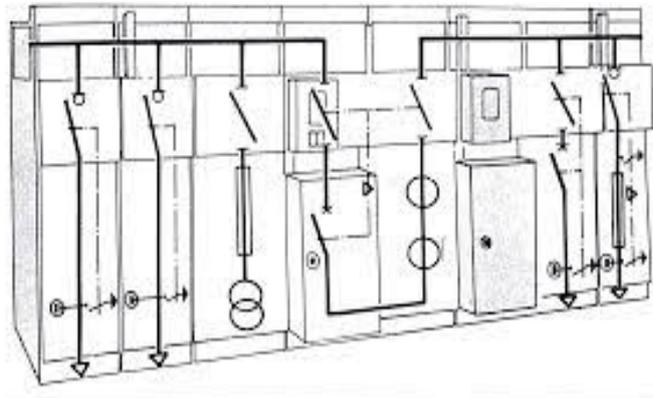
2.2.2 Gardu Pasang Dalam

2.2.2.1 Gardu Kubikel



Gambar 2.12 Gardu Kubikel

Kubikel adalah salah satu perlengkapan atau peralatan listrik yang bekerja sebagai penghubung penghubung dan pelindung serta membagi tenaga listrik dari sumber tenaga listrik, Kubikel istilah umum yang mencakup peralatan switching dan kombinasinya dengan peralatan kontrol, pengukuran, proteksi dan peralatan pengatur. Peralatan tersebut dirakit dan saling terkait dengan perlengkapan, selungkup dan penyangga. Sesuai IEC 298 : 1990 didespesifikasikan sebagai perlengkapan hubung bagi dan kontrol berselungkup logam rakitan pabrik untuk arus bolak-balik dengan tegangan pengenal diatas 1 kV sampai dengan dan termasuk 35 kV, untuk pasangan dalam dan pasangan luar dan untuk frekuensi sampai 50 Hz. Berikut adalah Single Line Diagram (SLD) dari kubikel:



Gambar 2.13 Single Line Diagram Kubikel

Adapun komponen/konstruksi dari kubikel adalah:

- 1) Kompartemen
- 2) Rel / Busbar
- 3) Kotak Pemutus
- 4) Pemisah Hubung Tanah
- 5) Terminal Penghubung
- 6) Fuse Holder
- 7) Mekanik Kubikel
- 8) Lampu Indikator

9) Pemanas (Heater)

10) Handle Kubikel (Tuas Operasi)

2.2.2.2 Gardu Beton



Gambar 2.14 Gardu Beton

Gardu beton adalah gardu distribusi yang bangunannya secara keseluruhan terbuat dari beton dan dibangun apabila kepadatan bebannya sudah melebihi 2 mVA/km². Ada beberapa macam gardu beton yang dibangun, disesuaikan dengan konsumen yang dilayani diantaranya:

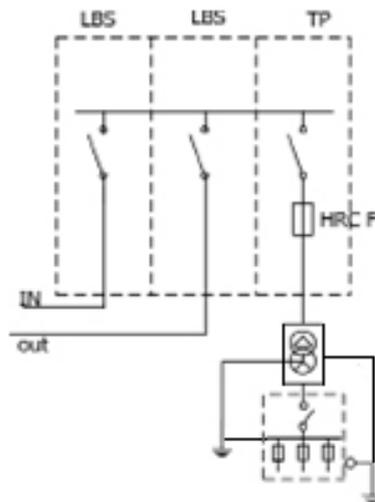
1. Gardu distribusi jenis beton untuk konsumen umum dapat dilengkapi dengan fasilitas :

- 1) Sebuah kubikel tipe pemisah (Disconnection Switch). Kubikel ini untuk melayani kabel masuk dari arah gardu induk (GI)
- 2) Sebuah kubikel tipe pemutus beban (Load Break Switch) atau pemutus tenaga dengan kode kubikel SDC. Kubikel ini untuk melayani kabel keluar.
- 3) Sebuah kubikel pengaman transformer, kubikel ini terdiri dari beberapa pemutus arus yang dilengkapi dengan pengaman lebur. Untuk gardu distribusi yang mempunyai 2 buah transformator dapat dipasang 2 buah kubikel tipe ini.
- 4) Dua buah transformator atau lebih dengan kapasitas maksimum 2 x 630 KVA.

- 5) Rak tegangan rendah dengan fasilitas 4 atau 8 feeder TR.
 - 6) Instalasi lain yang diperlukan diantaranya adalah : untuk instalasi penerangan jalan umum (PJU).
2. Gardu distribusi untuk konsumen tegangan menengah dapat dilengkapi dengan fasilitas :

- 1) Satu kubikel tipe pemisah
- 2) Satu kubikel tipe pemutus beban
- 3) Satu kubikel tipe trafo tegangan
- 4) Satu kubikel untuk pengaman dan pengukuran
- 5) Satu kubikel untuk penangkal petir (Lighting Arrester)

Adapun Single Line Diagram (SLD) dari gardu beton:



Gambar 2.15 *Single Line Diagram* Gardu Beton

2.3 Sistem Pentanahan^[9]

Pembumian atau pentanahan adalah sistem proteksi yang sangat penting dalam instalasi listrik, karena berfungsi membuang arus berlebih ke dalam tanah, atau juga mengamankan apabila terjadi tegangan sentuh, sehingga dapat mengamankan manusia serta peralatan listrik. Sistem pentanahan diharapkan

^[9] Aris Sunawar, "Analisis Pengaruh Temperatur dan Kadar Garam Terhadap Hambatan Jenis Tanah". SETRUM. Volume 2 No. 1, 2013, hal. 16.



memiliki nilai tahanan tanah yang sekecil mungkin, karena dengan hambatan yang kecil dapat mengalirkan arus berlebih langsung ke tanah.

Faktor yang mempengaruhi besar atau kecilnya tahanan pentanahan di suatu tempat adalah tahanan dari elektroda pentanahan, tahanan elektroda pentanahan dengan kontak tanah disekelilingnya dan tahanan jenis tanah. Masing-masing tanah memiliki karakteristik tahanan tanah yang berbeda dikarenakan tanah terdiri dari beberapa lapisan dan masing-masing dari lapisan tersebut berbeda kedalaman dan strukturnya, komposisi serta campuran tanah yang tidak seragam. Tahanan jenis tanah pada tanah yang sama seperti tanah berpasir dan berbatu saja cenderung memiliki nilai yang seragam. Faktor lingkungan yang dapat mempengaruhi besaran tahanan jenis tanah adalah faktor suhu tanah, kelembaban tanah dan berapa besar konsentrasi bahan campuran kimiawi yang terkandung dalam tanah tersebut.

Tabel 2.1 Tahanan Jenis Berbagai Jenis Tanah^[6]

Jenis Tanah	Tahanan Jenis (Ohm-meter)
Tanah Rawa	30
Tanah Liat dan Tanah Ladang	100
Pasir Basah	200
Kerikil Basah	500
Pasir dan Kerikil Kering	1000
Tanah Berbatu	3000

2.3.1 Fungsi Pentanahan^[7]

Konstruksi dari elektroda bergantung dari daerah yang akan dipasang pentanahannya. Fungsinya untuk mengadakan sebuah resistansi yang rendah

^[6] PUIL 2000, *PUIL2000* (Jakarta: Yayasan PUIL, 2000), hal. 5.

^[7] Pebi Muhammad Rizki dan Dian Eka Putra, "Pengaruh Paralel Pentanahan Transformator Dan Pentanahan Arrester Terhadap Kinerja Resistansi Pentanahan Transformator Distribusi 250 kVA Gardu BA 005 di PT. PLN (Persero) UP3 Bengkulu ULP Teluk Segara", *JURNAL AMPERE* Volume 5 No. 2, 2020, hal. 49.

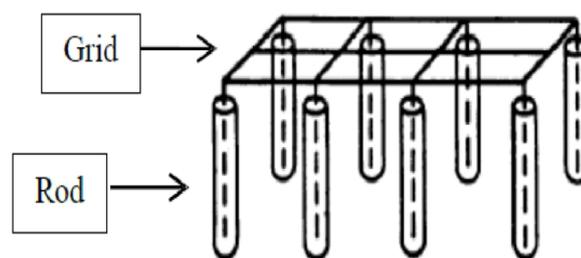
sebagai jalan aliran listrik menuju ke tanah. Elektroda pentanahan dapat dilakukan dengan memakai konduktor yang pada dasarnya untuk kontak/penghubung dengan tanah. Akhir dari pemasangan nantinya, sambungan elektroda pentanahan harus terpasang dengan kuat, agar fungsi yang diharapkan dapat tercapai.

2.3.2 Macam Pentanahan

Sistem pentanahan dapat dibedakan menjadi 3 yaitu:

2.3.2.1 Pentanahan Sistem

Salah satu faktor kunci dalam setiap usaha pengaman (perlindungan) rangkaian listrik adalah pentanahan. Pentanahan sistem di mana pentanahan dari titik yang merupakan bagian dari jaringan listrik, misalnya titik netral generator, titik netral transformator atau titik pada hantaran tengah atau hantaran netral. Suatu gangguan pentanahan pada salah satu bagian sistem harus dapat diisolir dan diamankan tanpa mematikan atau mengganggu keseluruhan sistem, sehingga keandalan dan kontinuitas pelayanan kepada pengguna energi listrik ini (konsumen) dapat dijamin. Dengan dipasangnya peralatan pentanahan sistem ini diharapkan gangguan dapat dibatasi pada grup sistem yang mengalami gangguan saja.



Gambar 2.16 Pentanahan Sistem

Berdasarkan standar yang ada dalam PUIL 2000, resistansi pembumian total seluruh sistem tidak boleh lebih dari 5 Ω . Untuk daerah yang resistansi jenis tanahnya sangat tinggi, resistansi pembumian total seluruh sistem boleh mencapai 10 Ω .^[6]

^[6] Op.cit

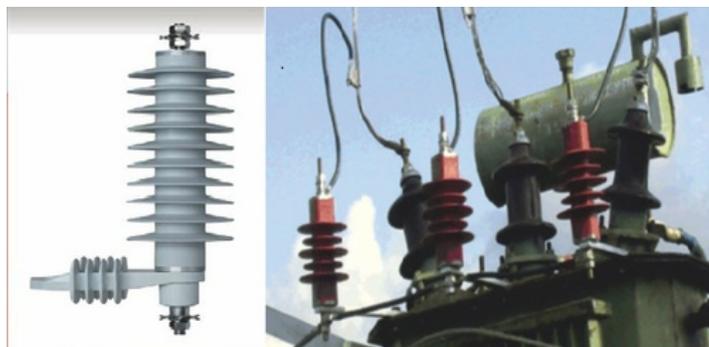
1. Pentanahan Peralatan Sistem *Grid*

Pentanahan ini adalah sistem pentanahan dengan menggunakan batang-batang elektroda yang ditanamkan sejajar dipermukaan tanah, batang-batang ini terhubung satu sama lain, bertujuan untuk meratakan tegangan yang mungkin timbul. Dengan cara ini bila jumlah elektroda yang ditanam banyak, maka bentuknya mendekati bentuk plat dan ini merupakan bentuk maksimum atau bentuk yang mempunyai harga tahanan yang paling kecil untuk daerah tertentu. Tetapi bentuk ini mahal harganya, oleh karena itu perlu dicari bentuk yang sederhana dan murah tetapi mempunyai harga tahanan yang memenuhi persyaratan.

2. Pentanahan Peralatan Sistem *Rod*

Pentanahan ini adalah pentanahan yang menggunakan batang elektroda yang ditanamkan secara tegak lurus ke dalam tanah, fungsinya hanya untuk mengurangi atau memperkecil tahanan pentanahan. Bila dilakukan paralel elektroda yang lebih banyak, maka tahanan pentanahan akan lebih kecil. Penanaman batang elektroda ini ke dalam tanah dapat berbentuk bujur sangkar atau persegi panjang dengan jarak antara elektroda sama. Sedangkan konduktor penghubung elektroda terletak diatas permukaan tanah sehingga tidak diperhitungkan tahanannya.

2.3.2.2 Pentanahan *Arrester*

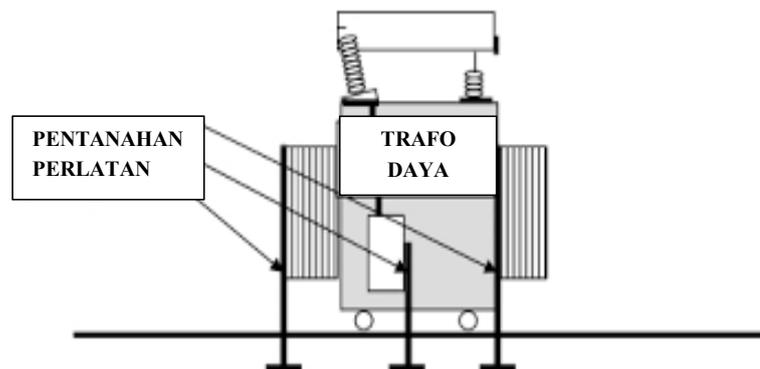


Gambar 2.17 *Arrester*

Fungsi *arrester* sangat penting dalam sistem koordinasi isolasi pada instalasi tenaga listrik. Oleh sebab itu, pemasangan alat ini harus betul-betul memenuhi persyaratan teknis. Dalam prakteknya kebanyakan *arrester* dilakukan dengan pentanahan lokal, yaitu rod yang dimasukkan ke tanah dekat dengan *arrester*. Selanjutnya dari terminal pentanahan *arrester* dihubungkan ke rod dengan menggunakan konduktor, besarnya tahanan dibuat sekecil mungkin yaitu $1,7\Omega$ dan harganya paling besar $0,2\Omega$ berdasarkan SPLN 3:1978.

Arrester yang sering dipakai berjenis *Expulsion Type Lightning Arrester* sebagai tabung pelindung untuk peralatan listrik yang berfungsi memotong petir.

2.3.2.3 Pentanahan Peralatan^[3]



Gambar 2.18 Pentanahan Peralatan

Pentanahan peralatan berkaitan dengan sistem penghantar listrik di mana semua struktur logam yang tidak membawa arus di dalam pabrik industri saling berhubungan dan diketanahkan.

Khusus bagi sistem yang hantaran netral JTR dihubungkan/dijadikan satu dengan hantaran netral JTM berlaku ketentuan bahwa nilai tahanan pentanahannya:^[8]

^[3] IEEE, *Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*, (New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1993), hal. 370.

^[8] SPLN 3: 1978. Pentanahan Jaring Tegangan Rendah PLN dan Pentanahan Instalasi. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum dan Listrik Negara

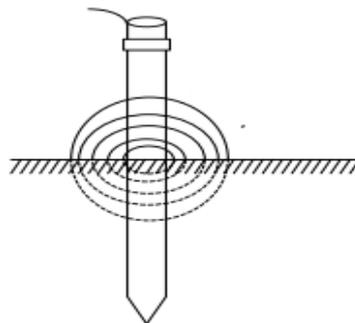
1. Tidak melebihi 3 ohm, bila dapat dipergunakan pipa saluran air minum sebagai elektroda tanah.
2. Tidak melebihi 25 ohm, bila digunakan elektroda jenis lain. Bila dengan sebuah elektroda tanah tidak dapat tercapai nilai 25 ohm, dapat menyimpang dari ketentuan ini namun harus digunakan dua atau lebih elektroda tanah dengan jarak satu sama lain tidak kurang dari 2 meter.

Tujuan utama pentanahan peralatan adalah sebagai berikut:

- a. Untuk menjaga perbedaan potensial yang rendah antara komponen logam, meminimalkan kemungkinan kejutan listrik pada personil di area tersebut (area yang berkaitan);
- b. Untuk berkontribusi pada kinerja perangkat pelindung yang unggul dari sistem kelistrikan, keselamatan personil dan peralatan; dan
- c. Untuk menghindari kebakaran dari bahan yang mudah menguap dan sambaran gas di atmosfer yang mudah terbakar dengan menyediakan sistem konduktor listrik yang efektif untuk aliran arus gangguan tanah serta petir dan pelepasan statis untuk pada dasarnya menghilangkan busur api dan gangguan termal lainnya pada peralatan listrik.

2.3.3 Elektroda Pentanahan

Elektroda pentanahan adalah suatu penghantar yang ditanamkan ke dalam tanah dan membuat kontak langsung dengan tanah. Adanya kontak langsung ini dengan tujuan agar diperoleh jalur arus yang sebaik-baiknya apabila terjadi gangguan sehingga arus tersebut disalurkan ke tanah.



Gambar 2.19 Elektroda Pentanahan

Bahan konduktor merupakan bahan yang digunakan sebagai elektroda pentanahan, bahan tersebut adalah besi, aluminium, dan tembaga. Dari ketiga jenis bahan tersebut ditinjau dari sifat mekanis, elektris dan kimiawi maka tembaga mempunyai keunggulan yang lebih tinggi dibandingkan dengan bahan yang lain namun ditinjau dari segi biaya tembaga cenderung lebih mahal, tetapi mengingat kesulitan yang timbul bila elektroda tersebut mengalami kerusakan baik pengaruh elektris, mekanis dan kimiawi maka tembaga lebih unggul. Prinsip dasar untuk memperoleh tahanan yang kecil adalah dengan membuat permukaan elektroda bersentuhan dengan tanah sebesar mungkin, sesuai dengan rumus:

$$R = \frac{\rho L}{A} \dots \dots \dots (2.1)$$

Di mana:

R = Tahanan pentanahan (Ω)

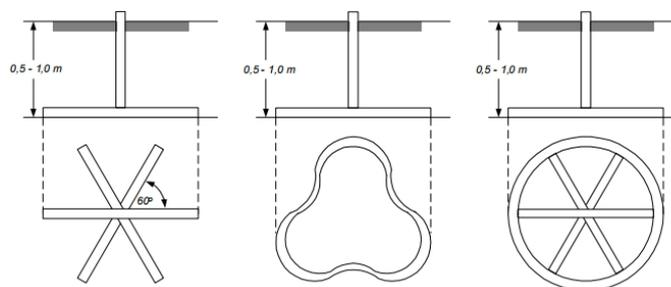
ρ = Tahanan jenis tanah (Ωm)

L = Panjang lintasan arus pada tanah (m)

A = Luas penampang lintasan arus pada tanah (m^2)

2.3.3.1 Jenis Elektroda Pentanahan^[6]

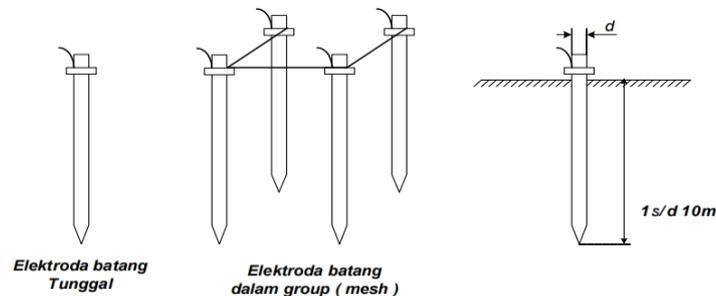
1. Elektrode Pita. Elektroda pita ialah elektroda yang dibuat dari penghantar berbentuk pita atau berpenampang bulat, atau penghantar pilin yang pada umumnya ditanam secara dangkal.



Gambar 2.20 Elektroda Pita

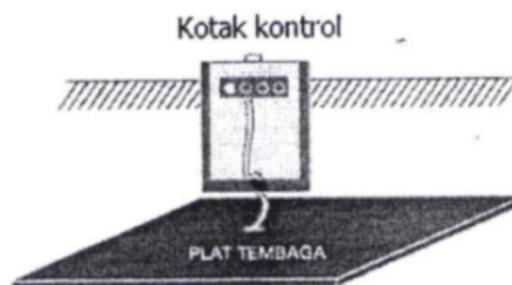
^[6] Op.cit

2. Elektroda batang ialah elektroda dari pipa besi, baja profil, atau batang logam lainnya yang dipancangkan ke dalam tanah.



Gambar 2.21 Elektroda Batang

3. Elektroda pelat ialah elektroda dari bahan logam utuh atau berlubang. Pada umumnya elektrode pelat ditanam secara dalam.



Gambar 2.22 Elektroda Pelat

2.3.4 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Tahanan Pentanahan

Faktor-faktor yang mempengaruhi besar tahanan pentanahan adalah luas^[11]:

2.3.4.1 Jenis Elektroda

2.3.4.2 Bahan dan Ukuran Elektroda

Sebagai konsekuensi peletakannya di dalam tanah, maka elektroda dipilih dari bahan-bahan tertentu yang memiliki konduktivitas sangat baik dan tahan terhadap sifat-sifat yang merusak dari tanah, seperti

[11] Djoko Laras Budiyo Taruno, Zamtinah, Alex Sandria Jaya Wardhana, *Instalasi Listrik Industri* (Yogyakarta: UNY Press, 2019), hal. 164-166.



korosi. Ukuran elektroda dipilih yang mempunyai kontak paling efektif dengan tanah.

2.3.4.3 Jumlah dan Konfigurasi Elektroda

Untuk mendapatkan tahanan pentanahan yang dikehendaki dan bila tidak cukup dengan satu elektroda, bisa digunakan lebih banyak elektroda dengan bermacam-macam konfigurasi pemancangannya di dalam tanah.

2.3.4.4 Kedalaman Penanaman Elektroda Tanah

Pemancangan ini tergantung dari jenis dan sifat-sifat tanah. Ada yang lebih efektif ditanam secara dalam, namun ada pula yang cukup ditanam secara dangkal.

2.3.4.5 Resistansi Tanah

Harga ρ tidak sama dan tergantung pada beberapa faktor:

- a. Sifat Geologi Tanah
- b. Kandungan Air Tanah
- c. Temperatur Tanah

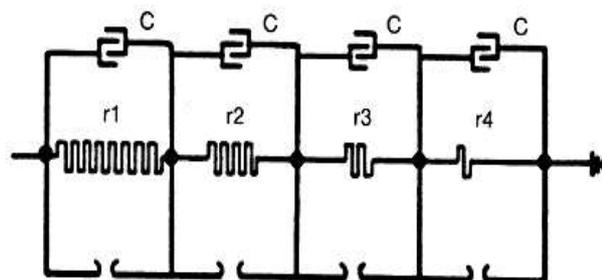
Teknik untuk mengukur resistivitas tanah pada dasarnya sama apapun tujuan pengukurannya. Namun, hasil data yang tercatat dapat sangat bervariasi, terutama di tanah dengan resistivitas tanah yang tidak seragam. Nilai yang bervariasi disebabkan oleh tanah yang tidak seragam merupakan hal yang umum, dan hanya dalam beberapa kasus saja nilai resistivitas tanah konstan seiring dengan bertambahnya kedalaman. Resistivitas bumi bervariasi tidak hanya tergantung dengan jenis tanah tetapi juga dengan suhu, kelembaban, kadar garam, dan kepadatan. Literatur menunjukkan bahwa nilai resistivitas bumi bervariasi dari 0,01 hingga 1 Ωm untuk air laut dan bisa mencapai $10^9 \Omega\text{m}$ untuk batupasir. Resistivitas bumi meningkat perlahan dengan penurunan suhu dari 25 °C ke 0 °C. Di bawah 0 °C resistivitas meningkat dengan cepat. Di tanah

beku, seperti pada lapisan permukaan di musim dingin, resistivitasnya mungkin sangat tinggi.^[2]

Salah satu cara yang pasti dalam menentukan tahanan adalah dengan melakukan pengukuran pada kondisi *real* sistem. Pengukuran juga hendaknya dilakukan dengan mengukur masing-masing elektroda yang ada. Dan pada kedalaman yang konstan. Nilai tahanan jenis tanah (ρ) sangat tergantung pada tahanan tanah (R) dan jarak antara elektroda-elektroda yang digunakan pada waktu pengukuran. Pengukuran perlu dilakukan pada beberapa tempat yang berbeda guna memperoleh nilai rata-ratanya. Perbedaan tahanan jenis tanah akibat iklim biasanya terbatas sampai kedalaman beberapa meter dari permukaan tanah, selanjutnya pada bagian yang lebih dalam secara praktis akan konstan^[9]

2.3.5 Karakteristik Tanah^[4]

Perilaku elektroda pentanahan yang ditanam di dalam tanah dapat dianalisis melalui rangkaian pada gambar 2.23. Seperti yang ditunjukkan, sebagian besar tanah bertindak baik sebagai konduktor resistansi (R), dan sebagai dielektrik.



Gambar 2.23 Model Pentanahan

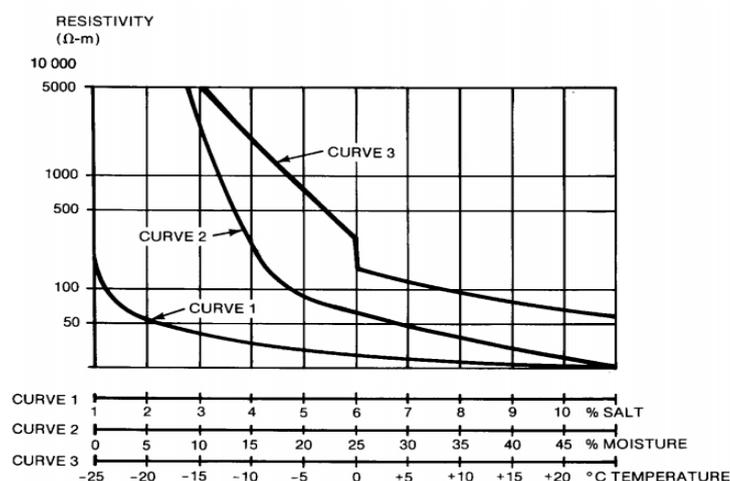
Banyaknya air lebih lanjut bergantung pada ukuran tanah, kepadatan, dan keanekaragaman ukuran butiran tanah. Tetapi, pada Gambar 2.24,

^[2] IEEE, *Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System* (New York: Institute of Electrical and Electronics Engineering, Inc, 1983), hal. 8.

^[9] Op.cit

^[4] IEEE, *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding* (New York: Institute of Electrical and Electronics Engineering, Inc, 2000), hal. 49-55.

kurva 2, tahanan jenis sedikit terpengaruh begitu kelembaban melebihi 22%. Efek suhu pada hambatan jenis tanah hampir tidak berarti untuk suhu diatas titik beku. Pada 0°C, air di tanah mulai membeku dan tahanan jenis bertambah secara cepat. Kurva 3 menunjukkan variasi untuk tanah liat yang berisi 15,2% kelembaban oleh berat. Susunan dan banyaknya garam dapat larut, asam, atau alkali yang terdapat di tanah sangat mungkin mempengaruhi tahanan jenisnya. Kurva 1 Gambar 2.24 menjelaskan efek khas garam (sodium klorida) pada tahanan jenis tanah yang mengandung kelembaban 30% dari berat.



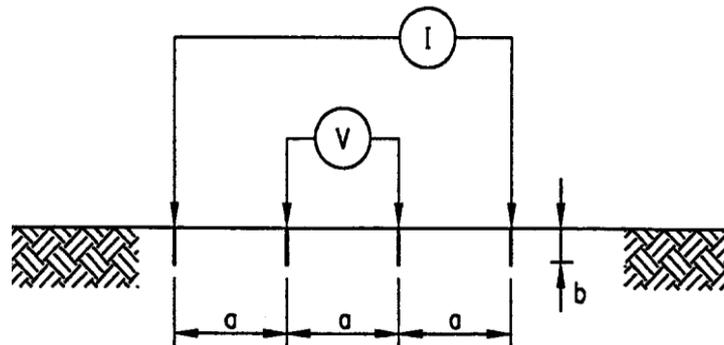
Gambar 2.24 Efek Kelembaban, Temperatur dan Garam Pada Tahanan Jenis Tanah

2.3.6 Metode Pengukuran Pentanahan

Untuk menentukan tahanan jenis tanah biasanya dilakukan dengan cara:

2.3.6.1 Metode Empat Titik (*Four Electrode Methode*)

Singkatnya, empat elektroda ditancapkan ke dalam tanah yang tersusun secara garis lurus, pada jarak yang sama (a), ditancapkan ke kedalaman b. Tegangan antara keduanya elektroda (potensial) kemudian diukur kemudian dibagi dengan arus antara dua elektroda arus untuk mendapatkan nilai resistansi.



Gambar 2.25 Pengukuran Tahanan Jenis Tanah Dengan Metode 4 Titik

Rumus yang digunakan:

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \dots\dots\dots(2.2)$$

Di mana:

- ρ_a = Tahanan jenis tanah (Ωm)
- R = Tahanan terukur (Ω)
- a = Jarak antara elektroda (m)
- b = Kedalaman elektroda (m)

Jika b lebih kecil dibandingkan dengan a , seperti halnya *probe* yang menembus tanah hanya dalam jarak yang pendek, persamaan dapat disederhanakan menjadi:

$$\rho = 2\pi a R \dots\dots\dots(2.3)$$

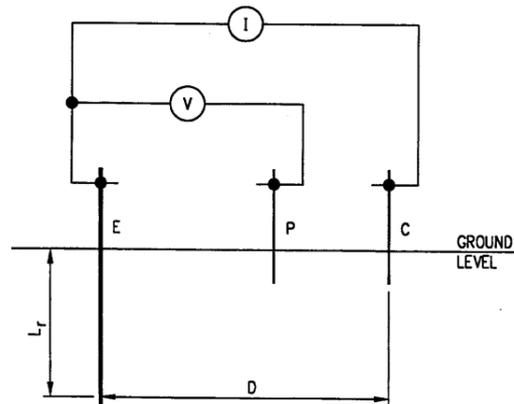
Di mana:

- a = Jarak antara elektroda (m)
- R = Tahanan elektroda (Ω)
- ρ = Tahanan jenis tanah (Ωm)

2.3.6.2 Metode Tiga Titik

Metode lain untuk mengukur resistansi tanah adalah metode tiga-pin atau metode potensial jatuh. Dalam metode ini, kedalaman (L_r) dari

elektroda batang yang terletak di dalam tanah yang akan diuji divariasikan. Dua elektroda lainnya, yang dikenal sebagai elektroda bantu, ditancapkan ke kedalaman yang dangkal secara garis lurus. Lokasi elektroda tegangan bervariasi antara elektroda uji dan elektroda arus. Elektroda tegangan juga dapat ditempatkan berlawanan dengan elektroda arus.



Gambar 2.26 Pengukuran Tahanan Jenis Tanah Dengan Metode 3 Titik

Sedangkan untuk menghitung ρ pada metode 3 titik digunakan rumus:

$$\rho_a = \frac{2\pi LR}{\ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1} \dots\dots\dots (2.4)$$

Di mana:

ρ_a = Hambatan jenis tanah (Ωm)

L = Panjang elektroda pentanahan (m)

d = Diameter elektroda (m)

R = Tahanan terukur (Ω)