

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Yang Relevan

Pada penelitian ini saya melakukan tinjauan literatur pada beberapa penelitian yang relevan guna dijadikan Referensi yang berasal dari jurnal, artikel, skripsi, atau buku yang relevan. Beberapa referensi yang penulis dapatkan diantaranya sebagai berikut :

1. Badaruddin dan H. Kiswanto, “Studi analisa perencanaan instalasi distribusi saluran udara tegangan menengah (SUTM) 20 kV,” *Jurnal Teknologi Elektro Universitas Mercu Buana*, 2015. Membahas analisis pemilihan ukuran penampang konduktor yang paling ekonomis pada jaringan distribusi 20 kV. Hasil penelitian menegaskan bahwa ukuran konduktor berpengaruh langsung terhadap rugi-rugi daya dan biaya investasi jaringan, sehingga diperlukan perencanaan yang matang agar efisien dari segi teknis dan ekonomi. Kajian ini menjadi dasar dalam menentukan konduktor optimum berdasarkan keseimbangan antara biaya dan performa.
2. PT PLN (Persero), *Kriteria Desain Enjiniring Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik*, Edisi 1, 2010. Membahas PT PLN (Persero) menetapkan pedoman teknis perencanaan jaringan distribusi, termasuk perhitungan jatuh tegangan, kemampuan hantar arus, gaya mekanis pada tiang, pembumian, dan parameter konstruksi. Dokumen ini menjadi acuan utama dalam desain SUTM, SKTM, gardu distribusi, dan jaringan tegangan rendah, serta digunakan sebagai referensi wajib dalam proyek kelistrikan di Indonesia
3. B. Santoso, A. Gifson, dan D. Pratama, “Perbaikan tegangan pada jaringan tegangan menengah 20 kV penyulang Tomat Gardu Induk Mariana Sumatera Selatan,” *Jurnal Teknik Elektro*, 2017. Membahas permasalahan tegangan ujung yang rendah akibat panjang penyulang mencapai lebih dari 100 km. Dalam penelitiannya digunakan aplikasi ETAP 12.6.0 untuk menganalisis kondisi tegangan dan menguji tiga metode perbaikan, yaitu penggantian konduktor, pemasangan kapasitor, serta pengaturan tap transformator. Hasil analisis menunjukkan perbaikan signifikan pada profil tegangan di ujung penyulang hingga sesuai dengan standar SPLN 72:1987 (variasi $\pm 5\%$ sampai -10%). Penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi pendekatan teknis sederhana

dapat memberikan hasil efektif terhadap peningkatan kualitas tegangan jaringan panjang.

4. A. Soares dan T. Suheta, “Perencanaan saluran udara tegangan menengah (SUTM) 20 kV di Desa Biqueli Kecamatan Atauro,” *Jurnal Teknik Elektro*, 2019. Membahas rencana jaringan SUTM 20 kV untuk memenuhi kebutuhan elektrifikasi masyarakat pesisir. Spesifikasi hasil perencanaan adalah tiang beton 11 meter 200 daN, konduktor AAAC 70 mm², panjang jaringan 14 km, dan KHA 435 Ampere. Penurunan tegangan (voltage drop) dihitung sebesar 21,08 Volt, dan seluruh perencanaan dinyatakan memenuhi standar PUIL 2000 dan SPLN 1987–2010. Hasil penelitian menegaskan bahwa standar nasional PLN masih relevan untuk kondisi lapangan di daerah kepulauan dan perdesaan.
5. J. A. Kumambow, G. C. Mangindaan, dan H. Tumaliang, “Perbaikan kualitas tegangan pada jaringan distribusi primer 20 kV di Kota Ternate,” *Jurnal Teknik Elektro*, 2020. Membahas permasalahan tegangan ujung yang rendah akibat panjang penyulang mencapai lebih dari 100 km. Dalam penelitiannya digunakan aplikasi ETAP 12.6.0 untuk menganalisis kondisi tegangan dan menguji tiga metode perbaikan, yaitu penggantian konduktor, pemasangan kapasitor, serta pengaturan tap transformator. Hasil analisis menunjukkan perbaikan signifikan pada profil tegangan di ujung penyulang hingga sesuai dengan standar SPLN 72:1987 (variasi $\pm 5\%$ sampai -10%). Penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi pendekatan teknis sederhana dapat memberikan hasil efektif terhadap peningkatan kualitas tegangan jaringan panjang.
6. J. A. Kumambow, G. C. Mangindaan, dan H. Tumaliang, “Perbaikan kualitas tegangan pada jaringan distribusi primer 20 kV di Kota Ternate,” *Jurnal Teknik Elektro*, 2020. Membahas permasalahan jatuh tegangan yang melebihi batas standar SPLN (10%) di beberapa penyulang di Kota Ternate. Penelitian ini menggunakan metode pemasangan kapasitor bank untuk memperbaiki profil tegangan. Dari hasil analisis, nilai jatuh tegangan pada penyulang-penyulang yang sebelumnya melebihi batas dapat diturunkan hingga sesuai standar, yaitu menjadi sekitar 10%. Penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan kapasitor bank secara terencana mampu meningkatkan kualitas tegangan dan menjaga kestabilan sistem distribusi primer 20kV

2.2. Landasan Teori

2.2.1. Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik terdiri dari tiga bagian utama yaitu: pembangkit (generation), transmisi (transmission), dan distribusi (distribution). Tujuan sistem ini adalah menyalurkan energi listrik dari sumber (pembangkit) ke konsumen secara andal, efisien, dan dengan kualitas tegangan yang memenuhi standar.

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari gardu induk ke konsumen akhir dengan tingkat keandalan, mutu tegangan, dan keselamatan yang sesuai standar. Sistem ini menjadi tahap akhir proses penyaluran daya setelah energi listrik dibangkitkan pada pembangkit dan ditransmisikan melalui jaringan transmisi tegangan tinggi. Pada tahap distribusi, tegangan diturunkan ke tingkat yang lebih aman dan sesuai dengan kebutuhan pelanggan.

Secara umum, sistem distribusi beroperasi pada dua tingkat tegangan, yaitu tegangan menengah (TM) dan tegangan rendah (TR). Tegangan menengah, yang di Indonesia umumnya sebesar 20 kV, digunakan untuk menyalurkan daya dari gardu induk menuju gardu distribusi melalui penyulang (feeder). Selanjutnya, pada gardu distribusi, tegangan diturunkan menjadi 220/380 V untuk disalurkan ke pelanggan melalui jaringan tegangan rendah. Pembagian tingkat tegangan ini bertujuan untuk mengurangi rugi-rugi daya selama penyaluran serta meningkatkan efisiensi sistem.



Gambar 2.1. Jaringan tegangan menengah (TM)



Gambar 2.2. Jaringan tegangan rendah (TR)

Struktur utama sistem distribusi terdiri atas beberapa komponen penting, yaitu jaringan distribusi primer, gardu distribusi, jaringan distribusi sekunder, dan sambungan pelanggan. Jaringan distribusi primer menggunakan penghantar udara (SUTM) atau kabel tanah (SKTM) untuk menyalurkan daya 20 kV. Gardu distribusi berfungsi sebagai pusat transformasi tegangan sekaligus tempat pemasangan peralatan proteksi dan pengaman. Jaringan distribusi sekunder menyalurkan daya tegangan rendah ke pelanggan, sedangkan sambungan pelanggan merupakan titik akhir penyaluran energi listrik yang dilengkapi alat pembatas dan pengukur (APP).

2.2.2. Komponen Utama Sistem Distribusi

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan bagian akhir dari sistem penyaluran energi listrik yang berfungsi menyalurkan daya dari gardu induk hingga ke konsumen akhir secara andal, aman, dan berkualitas. Keberhasilan operasi sistem distribusi ditentukan oleh koordinasi berbagai komponen utama, meliputi transformator, saluran, peralatan proteksi, peralatan pemutus, serta gardu distribusi.

2.2.2.1. Trafo Distribusi

Transformator distribusi adalah peralatan listrik statis yang berfungsi menurunkan tegangan dari jaringan distribusi primer 20 kV menjadi tegangan rendah 220/380 V sebelum disalurkan ke pelanggan. Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi

elektromagnetik, di mana energi listrik dari kumparan primer dipindahkan ke kumparan sekunder melalui medan magnet tanpa hubungan listrik langsung. Keberadaan transformator distribusi sangat penting untuk menjaga kualitas tegangan, efisiensi penyaluran daya, serta keselamatan konsumen.



Gambar 2.3. Trafo distribusi

Secara umum, transformator distribusi ditempatkan sedekat mungkin dengan pusat beban untuk meminimalkan rugi-rugi daya dan penurunan tegangan pada jaringan sekunder. Berdasarkan konstruksinya, transformator dibedakan menjadi trafo tiang, trafo gardu beton, dan trafo kios (compact), dengan kapasitas umum berkisar antara 25 kVA hingga 630 kVA.

2.2.2.2. Saluran Distribusi (Jaringan Penghantar)

Saluran distribusi berfungsi sebagai media penyalur energi listrik dari gardu induk menuju gardu distribusi dan selanjutnya ke pelanggan. Berdasarkan konstruksinya, saluran distribusi dibedakan menjadi:

1. Saluran Udara (SUTM/SUTR)

Penghantar saluran udara digunakan pada jaringan distribusi primer (SUTM 20 kV) maupun sekunder (SUTR 220/380 V) karena biaya pemasangan relatif ekonomis dan mudah dalam perawatan. Ada beberapa jenis penghantar yang umum dipakai meliputi:

a. *ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced)*

Kabel ini Memiliki inti baja sebagai penguat mekanis dan lapisan aluminium sebagai penghantar arus. Cocok untuk bentang panjang dan beban tarik tinggi,



Gambar 2.4. Kabel ACSR

b. *AAAC (All Aluminium Alloy Conductor)*

Terbuat dari paduan aluminium tanpa inti baja. Lebih ringan, tahan korosi, dan konduktivitas lebih baik daripada ACSR, sehingga sering digunakan pada jaringan distribusi 20 kV.



Gambar 2.5. Kabel AAAC

c. *AAAC-S (All Aluminium Alloy Conductor- Shielded/Sheathed)*

Jenis kabel yang berbahan aluminium dengan pembungkus lapisan pelindung luar berbahan *Cross-linked Polyethylene (XLPE)* berwarna hitam. Merupakan kabel

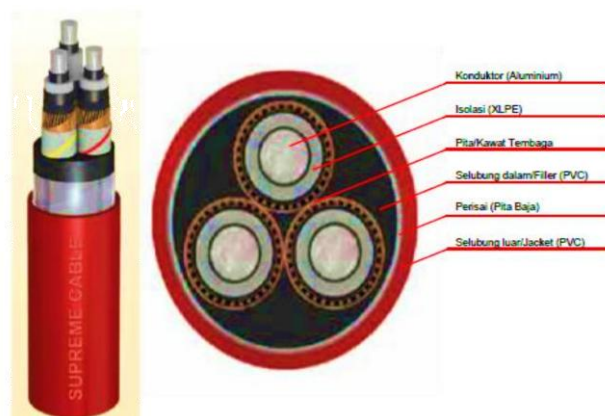
penghantar AAAC yang memiliki isolasi tipis (*semi-insulated*). Digunakan pada daerah dengan vegetasi rapat atau risiko gangguan sentuhan pohon untuk meningkatkan keandalan dan mengurangi gangguan hubung singkat.



Gambar 2.6. Kabel AAAC-S

2. Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM)

Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM) adalah jaringan distribusi listrik dengan tegangan menengah (umumnya 20 kV) yang menggunakan kabel berisolasi dan dipasang di bawah tanah. SKTM banyak digunakan di kawasan perkotaan karena lebih aman, rapi, dan tidak mengganggu estetika lingkungan. Keunggulannya adalah tahan terhadap gangguan cuaca, pohon tumbang, dan petir, sehingga lebih andal dibanding saluran udara. Namun, kelemahannya terletak pada biaya pembangunan yang tinggi serta kesulitan dalam mendeteksi dan memperbaiki gangguan karena kabel berada di bawah tanah dan membutuhkan teknisi serta alat khusus.



Gambar 2.7. Kabel SKTM

2.2.2.3.Isolator

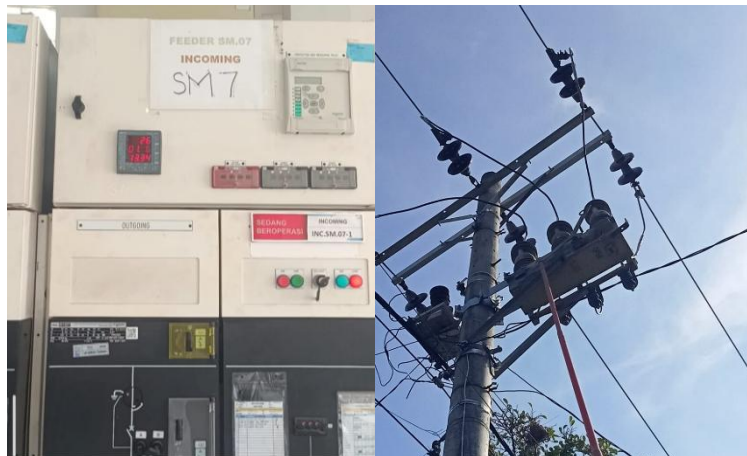
Isolator adalah komponen berfungsi menopang konduktor pada saluran udara sekaligus memberikan isolasi agar arus listrik tidak bocor ke tiang atau tanah. Isolator biasanya terbuat dari bahan porselen, kaca, atau polimer komposit yang memiliki ketahanan tinggi terhadap tegangan tembus, beban mekanis, serta kondisi lingkungan seperti hujan, panas, dan polusi. Isolator digunakan pada jaringan saluran udara tegangan menengah (SUTM) dengan tegangan operasi sekitar 6–20 kV. Jenis isolator yang umum dipakai meliputi isolator pin, isolator gantung (*suspension*), dan isolator tarik (*strain*), masing-masing disesuaikan dengan posisi dan kebutuhan jaringan.



Gambar 2.8. Isolator 20 kV

2.2.2.4.Pemutus Tenaga (*Circuit Breaker*)

Pemutus Tenaga (*Circuit Breaker*) adalah peralatan proteksi dan pengendali pada sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi untuk menghubungkan dan memutus aliran listrik baik dalam kondisi operasi normal maupun saat terjadi gangguan seperti arus lebih, hubung singkat, atau gangguan tanah. Peralatan ini memiliki kemampuan memadamkan busur api listrik (*arc*) sehingga mampu memutus arus gangguan dengan aman tanpa merusak sistem. *Circuit breaker* umumnya bekerja secara otomatis melalui koordinasi dengan rele proteksi (OCR/GFR) untuk mengisolasi bagian jaringan yang terganggu, sehingga kontinuitas penyaluran tenaga listrik tetap terjaga. Pada jaringan distribusi 20 kV, pemutus tenaga dapat berupa *vacuum circuit breaker* (VCB), *recloser*, maupun *load break switch* (LBS) sesuai dengan fungsi dan kapasitas pemutusannya.



Gambar 2.9. *Circuit breaker (CB) dan LBS*

2.2.2.5. Pemisah Tenaga (*Disconnection Switch/DS*)

Pemisah tenaga (DS) merupakan peralatan hubung yang berfungsi untuk memisahkan atau mengisolasi bagian tertentu dari jaringan distribusi guna keperluan pengoperasian dan pemeliharaan. Peralatan ini digunakan untuk memastikan suatu bagian instalasi berada dalam kondisi tidak bertegangan sehingga pekerjaan dapat dilakukan dengan aman. Berbeda dengan pemutus tenaga (*circuit breaker*), pemisah tenaga tidak dirancang untuk memutus arus beban maupun arus gangguan, sehingga pengoperasiannya hanya dilakukan saat kondisi tanpa beban (*no load*).



Gambar 2.10. Gambar *disconennection swicth/DS*)

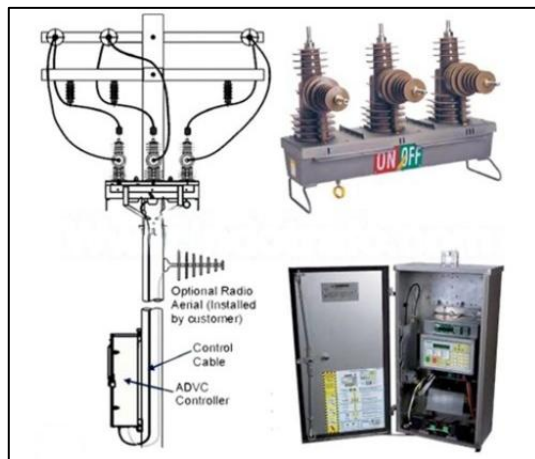
2.2.2.6. Peralatan Proteksi (Relay dan Fuse)

Peralatan proteksi pada jaringan distribusi tegangan menengah 20 kV berfungsi untuk melindungi sistem tenaga listrik dari gangguan seperti hubung singkat, beban lebih, gangguan tanah, serta gangguan transien akibat petir atau switching. Sistem proteksi dirancang agar mampu mendeteksi gangguan secara cepat, mengisolasi bagian yang terganggu, serta menjaga kontinuitas pelayanan pada bagian jaringan yang sehat. Dengan demikian, keandalan (*reliability*), keselamatan (*safety*), dan kualitas penyaluran energi listrik tetap terjaga sesuai standar SPLN dan praktik operasi PLN.

Secara umum, peralatan proteksi pada jaringan 20 kV meliputi relay proteksi, pemutus tenaga (*circuit breaker/CB*), *recloser*, *fuse cut out (FCO)*, dan *lightning arrester (LA)*. Peralatan-peralatan ini bekerja secara terkoordinasi melalui pengaturan arus dan waktu kerja (*time current characteristic*) sehingga selektivitas proteksi dapat tercapai.

1. Relay Proteksi dan Pemutus Tenaga (*Recloser*)

Relay proteksi merupakan perangkat penginderaan yang berfungsi mendeteksi kondisi tidak normal seperti arus lebih (*overcurrent*), gangguan hubung singkat (*short circuit*), dan gangguan tanah (*ground fault*). Relay akan mengirimkan sinyal *trip* ke pemutus tenaga (CB atau *recloser*) untuk membuka rangkaian sehingga bagian terganggu terisolasi.



Gambar 2.11. Recloser dan relay proteksi

Pemutus tenaga (CB/*recloser*) berfungsi memutus arus gangguan dengan media pemadam busur api (vakum atau SF₆). Khusus *recloser*, alat dapat menutup kembali secara otomatis setelah trip untuk mengatasi gangguan sementara seperti sentuhan ranting atau petir.

Jenis relay yang umum digunakan antara lain:

- a. *Over Current Relay* (OCR) : proteksi arus lebih dan hubung singkat antar fasa.
- b. *Ground Fault Relay* (GFR) : proteksi gangguan satu fasa ke tanah.
- c. *Directional Relay* : menentukan arah gangguan pada sistem bercabang

2. *Fuse Cut Out* (FCO) dan *Lightning Arrester* (LA)

Fuse Cut Out (FCO) adalah pengaman lebur yang bekerja berdasarkan prinsip pemutusan kawat lebur ketika arus melebihi batas nominal. FCO banyak dipasang pada percabangan penyulang dan sisi primer trafo distribusi. Keunggulannya adalah konstruksi sederhana, ekonomis, dan mudah terlihat secara visual saat putus (*drop out*).

Lightning Arrester (LA) berfungsi melindungi peralatan dari tegangan lebih akibat sambaran petir atau surja *switching* dengan cara menyalurkan arus lebih ke tanah. *Arrester* dipasang berdekatan dengan peralatan penting seperti trafo distribusi, kubikel, dan ujung penyulang untuk membatasi tegangan impuls.



Gambar 2.12. *Fuse Cut Off* (FCO) dan *Light Arrester* (LA)

2.2.2.7. Gardu Distribusi

Gardu distribusi merupakan instalasi penting dalam sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi untuk menurunkan tegangan dari jaringan tegangan menengah (20 kV) menjadi tegangan rendah (220/380 V), sekaligus sebagai titik pembagian beban, pengaman, dan pengaturan operasi jaringan. Keberadaan gardu distribusi memungkinkan energi listrik disalurkan secara efisien, aman, dan sesuai dengan kebutuhan pelanggan.

Pemilihan jenis gardu disesuaikan dengan kapasitas beban, kondisi lingkungan, ketersediaan lahan, serta aspek keselamatan dan estetika.

Jenis-jenis gardu distribusi diantaranya :

1. Gardu Tiang (*Pole Mounted Transformer*)

Gardu tiang adalah gardu distribusi yang transformatornya dipasang pada tiang beton atau baja. Jenis ini banyak digunakan pada daerah perumahan, pedesaan, atau beban kecil hingga menengah. Keunggulannya adalah biaya konstruksi rendah, pemasangan mudah, dan perawatan sederhana. Namun, kapasitasnya terbatas dan kurang cocok untuk beban besar.



Gambar 2.13. Gardu tiang

2. Gardu Beton (Permanen)

Gardu beton menggunakan bangunan beton permanen sebagai pelindung peralatan. Di dalamnya terdapat transformator, panel tegangan menengah, dan panel tegangan rendah. Jenis ini memiliki keamanan dan ketahanan lingkungan lebih baik, serta mampu menampung kapasitas daya lebih besar. Umumnya digunakan di kawasan industri, komersial, atau pusat kota.



Gambar 2.14. Gardu beton (permanen)

3. Gardu Kios (*Compact Substation*)

Desainnya ringkas, rapi, dan hemat ruang sehingga cocok untuk daerah perkotaan padat. Selain itu, tingkat keselamatan operasionalnya lebih tinggi karena seluruh peralatan tertutup.



Gambar 2.15. Gardu kios

4. Gardu Hubung (GH)

Gardu hubung tidak dilengkapi transformator, melainkan berfungsi sebagai titik manuver jaringan. Peralatan yang terdapat di dalamnya seperti *load break switch* (LBS), *recloser*, atau *circuit breaker* digunakan untuk pengaturan pembagian beban, isolasi gangguan, serta rekonfigurasi penyulang. Gardu ini berperan penting dalam meningkatkan fleksibilitas dan keandalan sistem distribusi.



Gambar 2.16. Gardu hubung (GH)

2.2.2.8. Tiang

Tiang listrik PLN adalah konstruksi penopang mekanis yang digunakan untuk menyangga dan menempatkan konduktor, isolator, *traves*, serta berbagai peralatan jaringan distribusi (seperti trafo distribusi, fuse cut-out, LBS, recloser, dan perlengkapan proteksi lainnya) agar posisi penghantar berada pada ketinggian yang aman, memenuhi jarak bebas (*clearance*), serta menjamin keandalan, keselamatan, dan kontinuitas penyaluran energi listrik kepada pelanggan.

Secara fungsional, tiang berperan sebagai struktur pendukung utama yang menahan beban vertikal (berat konduktor dan peralatan), beban horizontal (gaya tarik konduktor dan angin), serta beban dinamis akibat kondisi lingkungan. Oleh karena itu, perencanaan tiang harus mempertimbangkan aspek kekuatan mekanis, tinggi efektif, jarak bentang, jenis penghantar, serta standar keselamatan ketenagalistrikan sesuai ketentuan teknis yang berlaku (SPLN dan PUIL).

1. Tiang Tinggi Rendah ($\pm$ 7–9 meter)

Tiang dengan tinggi 7–9 meter umumnya digunakan pada jaringan tegangan rendah (SUTR 220/380 V) di lingkungan permukiman, perumahan, atau daerah dengan beban ringan. Ketinggian ini sudah mencukupi untuk menjaga jarak aman kabel terhadap permukaan tanah serta aktivitas masyarakat. Bentang antar tiang relatif pendek

($\pm 30\text{--}40\text{m}$) sehingga gaya mekanis pada konduktor lebih kecil. Penggunaannya ekonomis dan memudahkan pemeliharaan.



Gambar 2.17. Tiang 9 meter

2. Tiang Tinggi Menengah ($\pm 10\text{--}12$ meter)

Tiang dengan tinggi 10–12 meter merupakan standar utama jaringan tegangan menengah (SUTM 20 kV). Ketinggian ini memberikan ruang yang cukup untuk pemasangan traves, isolator, serta menjaga jarak aman antara konduktor fasa dan tanah. Selain itu, tinggi ini memungkinkan bentang antar tiang yang lebih panjang ($\pm 40\text{--}60$ m), sehingga jumlah tiang dapat dioptimalkan. Jenis ini paling banyak digunakan pada penyulang distribusi PLN karena seimbang antara kekuatan mekanis, keamanan, dan biaya konstruksi.



Gambar 2.18. Tiang 12 meter

3. Tiang Tinggi Besar ($\pm$ 13–16 meter atau lebih)

Tiang dengan tinggi 13–16 meter atau lebih digunakan pada lokasi khusus, seperti penyeberangan jalan raya, sungai, rel kereta, pemasangan gardu tiang (trafo distribusi), atau penempatan peralatan proteksi (LBS, recloser, FCO). Ketinggian tambahan diperlukan untuk memenuhi standar jarak bebas vertikal yang lebih besar dan menahan beban peralatan tambahan. Tiang ini memiliki spesifikasi kekuatan mekanis lebih tinggi dan biasanya terbuat dari beton pratekan atau baja.



Gambar 2.19. Tiang 13 meter

2.2.3. Kualitas Tegangan

Kualitas tegangan (*Voltage Quality* atau *Power Quality*) merupakan ukuran seberapa baik tegangan yang disuplai oleh sistem tenaga listrik memenuhi standar atau batas toleransi yang ditetapkan. Tegangan dikatakan berkualitas baik apabila memiliki amplitudo, frekuensi, dan bentuk gelombang yang tetap sesuai dengan standar, serta tidak menyebabkan gangguan pada peralatan listrik yang terhubung. Peraturan kualitas tegangan baik sesuai yang ditetapkan di SPLN No.1 tahun 1995 pasal 4 ialah tidak lebih dari -10% dari tegangan nominal 20 kV. Ini berarti tegangan jaringan 20 kV tidak boleh kurang dari 18 kV.

2.2.4. Penurunan Tegangan (*Voltage Drop*)

Penurunan tegangan (*Voltage Drop*) adalah selisih antara tegangan yang diterima pada ujung saluran dengan tegangan yang diberikan pada sumber, yang terjadi akibat adanya resistansi dan reaktansi pada penghantar. Fenomena ini merupakan hal yang wajar dalam sistem distribusi tenaga listrik karena setiap konduktor memiliki impedansi yang menyebabkan sebagian energi listrik hilang dalam bentuk rugi-rugi tegangan.

Penurunan tegangan (ΔV) terjadi karena adanya impedansi pada saluran distribusi yang dilalui arus beban. Secara matematis:

$$\Delta V = I(R_{\cos\theta} + X_{\sin\theta}) \dots\dots\dots 2.1$$

dimana:

- I = arus beban (A)
- R = resistansi saluran (Ω)
- X = reaktansi saluran (Ω)
- ϕ = sudut fasa antara tegangan dan arus

Besarnya penurunan tegangan dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain :

1. Panjang saluran distribusi : Semakin panjang saluran, semakin besar impedansi semakin besar penurunan tegangan.
2. Besarnya Beban puncak : Beban tinggi menaikkan arus memperbesar rugi tegangan dan daya.
3. Ukuran konduktor : Semakin kecil penampang, semakin tinggi resistansi tegangan drop meningkat.
4. Kualitas sambungan : Sambungan longgar meningkatkan resistansi kontak.

Penurunan tegangan yang berlebihan dapat menurunkan efisiensi sistem distribusi, menyebabkan peralatan listrik beroperasi tidak optimal, bahkan merusak motor induksi akibat arus lebih dan panas berlebih. Untuk mengurangi penurunan tegangan, dapat dilakukan beberapa langkah seperti memperbesar penampang konduktor, memperpendek jarak penyaluran, menjaga faktor daya mendekati satu dengan pemasangan kapasitor bank, serta melakukan rekonfigurasi jaringan distribusi untuk pemerataan beban. Dengan pengendalian penurunan tegangan yang baik, sistem distribusi tenaga listrik dapat beroperasi secara efisien, stabil, dan andal dalam menjaga kualitas tegangan di sisi pelanggan.

2.2.5. Rekonfigurasi Jaringan Distribusi

Rekonfigurasi jaringan distribusi adalah proses pengaturan ulang struktur jaringan listrik untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem. Tujuan utamanya Perubahan konfigurasi ini dilakukan untuk mengatur pembagian beban antar penyulang (*feeder*), mengurangi rugi-rugi daya, memperbaiki profil tegangan ujung, dan meningkatkan keandalan sistem distribusi. Melalui rekonfigurasi, aliran daya dalam jaringan dapat diatur agar pembebanan lebih merata dan efisien, sehingga kualitas tegangan di setiap titik tetap dalam batas standar.

2.2.6. Pembangunan Jaringan Rekonfigurasi

Pembangunan jaringan rekonfigurasi antara penyulang SM7 dan penyulang KSR6 sepanjang 1,9 km merupakan salah satu upaya untuk meningkatkan kualitas tegangan ujung pada penyulang SM7 dengan redistribusi beban atau membagikan sebagian beban pada penyulang SM7 ke penyulang KSR6 demi keandalan sistem distribusi tenaga listrik 20 kV serta memberikan kualitas listrik terbaik demi kepuasan pelanggan. Secara operasional, rekonfigurasi ini berfungsi sebagai jalur interkoneksi antar penyulang yang memungkinkan manuver beban dan fleksibilitas suplai ketika terjadi gangguan atau kondisi pemeliharaan, sehingga kontinuitas pelayanan listrik kepada pelanggan tetap terjaga sesuai kriteria keandalan sistem distribusi PLN.

Pelaksanaan pembangunan diawali dengan kegiatan survei lapangan dan penggambaran trase untuk menentukan jalur paling optimal dengan mempertimbangkan aspek teknis, keselamatan, dan ekonomi. Parameter yang dianalisis meliputi kondisi topografi, jarak aman terhadap bangunan dan vegetasi, kekuatan tanah untuk pondasi tiang, serta jarak bentang antar tiang sesuai standar konstruksi SUTM. Berdasarkan hasil perencanaan, jaringan sepanjang 1,9 km dipasang menggunakan konstruksi tiang beton dengan jarak bentang empiris $\pm 40\text{--}50$ m sehingga diperoleh kebutuhan sekitar 38–40 tiang (realisasi 39 tiang), dilengkapi konduktor jenis AAAC-S yang memiliki konduktivitas baik, berat relatif ringan, dan ketahanan mekanik tinggi



Gambar 2.20. Penanaman tiang

Tahap konstruksi meliputi pekerjaan pondasi dan penanaman tiang, pemasangan cross-arm, isolator, penarikan konduktor, penegang (stringing), serta pemasangan perlengkapan proteksi dan manuver jaringan seperti LBS/*sectionalizer*. Selanjutnya dilakukan penyambungan (jumper) ke kedua penyulang eksisting untuk membentuk sistem interkoneksi. Seluruh pekerjaan dilaksanakan sesuai prosedur K3 ketenagalistrikan dan standar SPLN terkait jarak bebas minimum, kekuatan mekanik, serta kualitas sambungan penghantar guna menjamin keselamatan personel dan keandalan operasi.



Gambar 2.21. Pemasangan kabel dan penarikan kabel

Setelah instalasi selesai, dilakukan pengujian teknis berupa pemeriksaan visual, uji kekencangan sambungan, pengukuran tahanan pembumian, tahanan isolasi, serta pengecekan kesinambungan sirkuit sebelum energisasi. Hasil rekonfigurasi diharapkan mampu menurunkan pembebanan arus pada penyulang SM7, memperbaiki tegangan ujung, serta menekan rugi-rugi daya, sehingga kinerja sistem distribusi menjadi lebih efisien, andal, dan memenuhi standar mutu pelayanan tenaga listrik.

2.2.7. Penentuan Titik Tiang Dalam Sistem Distribusi

Penentuan titik tiang dalam sistem distribusi tenaga listrik merupakan tahapan perencanaan yang sangat penting untuk menjamin keandalan, keselamatan, dan efisiensi konstruksi jaringan, baik pada Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) 20 kV maupun Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR). Penempatan tiang harus mempertimbangkan jarak antar tiang (*sag*), kekuatan mekanik konduktor, lendutan (*sag*), serta kondisi lingkungan sekitar agar konduktor tetap memiliki jarak bebas yang aman terhadap tanah, bangunan, pepohonan, dan fasilitas umum. Secara teknis, jarak antar tiang pada jaringan distribusi umumnya berkisar antara 40–80 meter tergantung kondisi wilayah, di mana daerah perkotaan menggunakan bentang lebih pendek dan daerah terbuka menggunakan bentang lebih panjang untuk efisiensi material.

Dalam menentukan panjang bentang maksimum dapat menggunakan rumus :

$$L = \sqrt{\frac{8Td}{w}} \dots\dots\dots 2.2$$

Keterangan:

- d = Lendutan / andongan (m)
- T = tegangan tarik maksimum kabel (N)
- L = jarak antar tiang (m)
- w = berat kabel per meter (N/m)

Selain faktor jarak, kondisi topografi dan tata ruang juga memengaruhi lokasi tiang. Pada daerah berbukit atau lembah diperlukan penyesuaian tinggi tiang untuk menjaga clearance, sedangkan pada lokasi persimpangan jalan, sungai, atau hambatan fisik lainnya diperlukan penempatan khusus dengan konstruksi yang lebih kuat. Tiang juga wajib ditempatkan pada titik perubahan arah jaringan, percabangan penyulang, ujung jaringan,

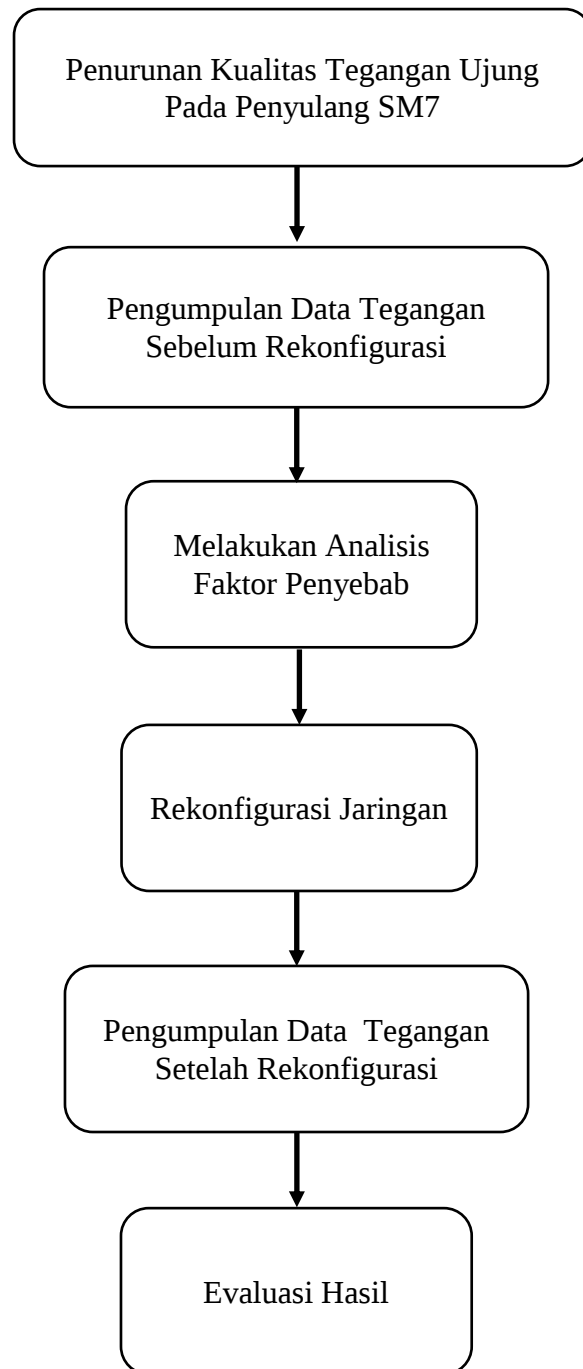
serta lokasi gardu distribusi karena titik-titik tersebut menerima gaya tarik mekanik yang lebih besar dan membutuhkan tiang sudut atau tiang penegang. Dengan demikian, setiap posisi tiang tidak hanya berfungsi sebagai penopang konduktor, tetapi juga sebagai elemen struktural yang menjaga stabilitas sistem.

Namun dalam perencanaan praktis PLN digunakan batas empiris jarak antar tiang:

Tabel 2.1 Batas empiris jarak antar tiang

No	Jenis Jaringan	Jarak Tiang (m)
1	SUTR	30 - 40 m
2	SUTM (AAAC/AAAC-S)	30 - 50 m
3	Jalur lurus datar	Max 70 m
4	Tikungan	25 - 40 m

2.3. Kerangka Pemikiran



Gambar 2.22. Kerangka pemikiran

Kerangka pemikiran penelitian ini menjelaskan langkah sistematis dalam mengatasi penurunan tegangan ujung pada penyulang SM7. Penelitian diawali dengan identifikasi masalah, yaitu rendahnya kualitas tegangan ujung saat beban puncak. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data lapangan untuk mengetahui kondisi aktual jaringan, kemudian dianalisis faktor penyebab utama penurunan tegangan. Berdasarkan hasil analisis, dilakukan rekonfigurasi jaringan dengan mengalihkan sebagian beban ke penyulang lain untuk memperbaiki profil tegangan. Setelah itu, data pasca-rekonfigurasi dikumpulkan dan dievaluasi untuk menilai efektivitas tindakan yang dilakukan. Melalui tahapan ini diharapkan diperoleh peningkatan kualitas tegangan ujung sesuai standar SPLN dan peningkatan keandalan sistem distribusi listrik di PLN (Persero) ULP Lima Puluh.