

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

Sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem infrastruktur energi yang terintegrasi dan dirancang untuk menghasilkan, mentransmisikan, serta mendistribusikan energi listrik dari sumber pembangkitan hingga ke pelanggan akhir secara kontinu, andal, dan ekonomis. Sistem ini bekerja dalam kondisi operasi steady state maupun dinamis, serta harus mampu mempertahankan keseimbangan antara daya yang dibangkitkan dan daya yang dikonsumsi setiap saat.

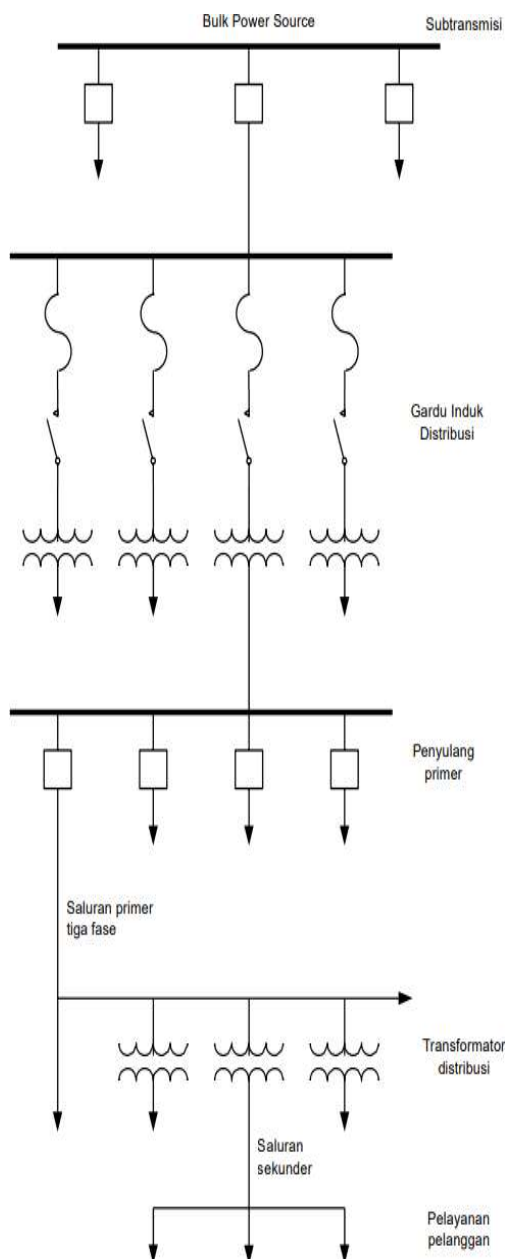
Secara fungsional, sistem tenaga listrik terdiri atas tiga subsistem utama, yaitu pembangkitan, transmisi, dan distribusi. Ketiga subsistem tersebut saling terhubung membentuk suatu jaringan besar yang dikenal sebagai sistem interkoneksi. Pada sistem interkoneksi skala besar, seperti sistem Jawa–Bali yang dikelola oleh PT PLN (Persero), operasi dilakukan secara terpusat dengan koordinasi pengaturan beban dan pembangkitan untuk menjaga kestabilan frekuensi dan tegangan sistem.

Sistem distribusi tidak hanya berfungsi sebagai penyalur energi, tetapi juga sebagai pengendali kualitas tegangan pada sisi pelanggan. Penurunan tegangan akibat impedansi saluran, fluktuasi beban, serta ketidakseimbangan fasa lebih dominan terjadi pada tingkat distribusi dibandingkan tingkat transmisi. Selain itu, sistem distribusi memiliki karakteristik beban yang sangat dinamis. Beban rumah tangga, komersial, dan industri ringan memiliki pola konsumsi berbeda sepanjang hari. Variasi ini menyebabkan perubahan aliran daya secara kontinu, sehingga analisis dan pengaturan sistem distribusi menjadi lebih kompleks.

Dalam sistem tenaga listrik modern, distribusi juga mulai bertransformasi menjadi jaringan aktif dengan adanya integrasi pembangkit tersebar (*distributed generation*) seperti pembangkit listrik tenaga surya atap. Kondisi ini mengubah paradigma distribusi dari sistem satu arah menjadi sistem dua arah, di mana daya dapat mengalir dari pelanggan kembali ke jaringan.

2.1.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik PLN yakni suatu rangkaian sistem terintegrasi yang berfungsi untuk mengalirkan energi listrik dari pusat pembangkit hingga sampai ke konsumen (pelanggan).



Gambar 1. Diagram satu garis sistem distribusi.

Gambar 1 menunjukkan diagram satu garis dari sistem distribusi yang khas. Rangkaian subtransmisi mengirimkan energi dari BPS ke gardu induk distribusi. Tegangan subtransmisi berkisar antara 12,47 kV dan 245 kV. Gardu induk distribusi, dimana menjadikan transformator daya bersama-sama dengan peralatan pengatur tegangan, bus-bus, dan peralatan hubung (switchgear), menurunkan tegangan subtransmisi ke tegangan sistem primer yang lebih rendah untuk distribusi lokal. Penyulang primer tiga fase, yang biasanya beroperasi pada rentang tegangan 4,16 kV hingga 34,5 kV, mendistribusikan energi listrik dari bus tegangan rendah pada gardu induk ke pusat-pusat beban. Pada pusat-pusat beban tersebut kemudian dibagi-bagikan ke menuju sub- penyulang dan cabang tunggal tiga fase.

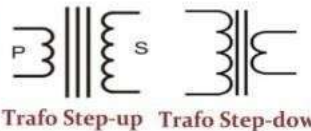
Transformator distribusi yang mempunyai rating dari 10 kVA hingga 500 kVA biasanya terhubung ke penyulang utama, sub-penyulang, dan cabang (lateral). Transformator distribusi menurunkan tegangan distribusi ke tegangan pelayanan. Sistem sekunder ini memfasilitasi jalur untuk mendistribusikan energi dari transformator distribusi ke pelanggan melalui pelayanan pelanggan (*service drops*).

1. Distribusi Primer (Tegangan Menengah)

Listrik dari SUTET/SUTT akan masuk ke Gardu Induk (GI) di dekat pusat beban (kota). Di sini, terjadi penurunan tegangan pertama:

- a. Penurunan Tegangan (Gardu Induk)

Trafo *step-down* di gardu induk akan menurunkan tegangan transmisi (150 kV) menjadi tegangan menengah (TM) yaitu 20 kV. Trafo *step down* adalah trafo yang digunakan untuk menurunkan taraf level tegangan AC dari taraf yang tinggi ke taraf yang lebih rendah. Pada trafo *step down* ini, rasio jumlah lilitan pada kumparan primer lebih banyak jika dibandingkan dengan jumlah lilitan pada kumparan sekundernya. Di jaringan distribusi, transformator atau trafo *step down* ini biasanya digunakan untuk 15 mengubah tegangan grid yang tinggi menjadi tegangan rendah yang bisa digunakan untuk peralatan rumah tangga.

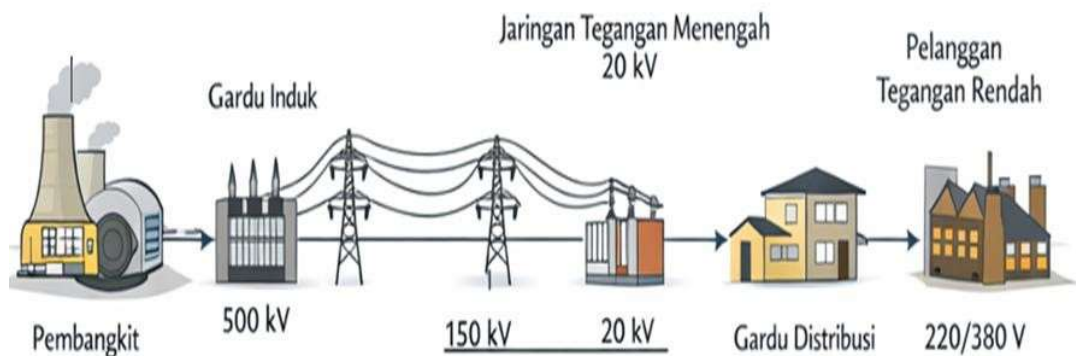
Nama Komponen	Gambar	Simbol
Transformator		 Trafo Step-up Trafo Step-down

Gambar 2. Jenis Transformator berdasarkan level tegangan

Pada Gambar 2. menampilkan gambar jenis transformator berdasarkan level tegangan yang terdiri dari trafo *step-up* dan trafo *step-down*. Selain itu juga terdapat jenis trafo lainnya yaitu seperti trafo OT (*output*) dan juga trafo IF (frekuensi menengah).

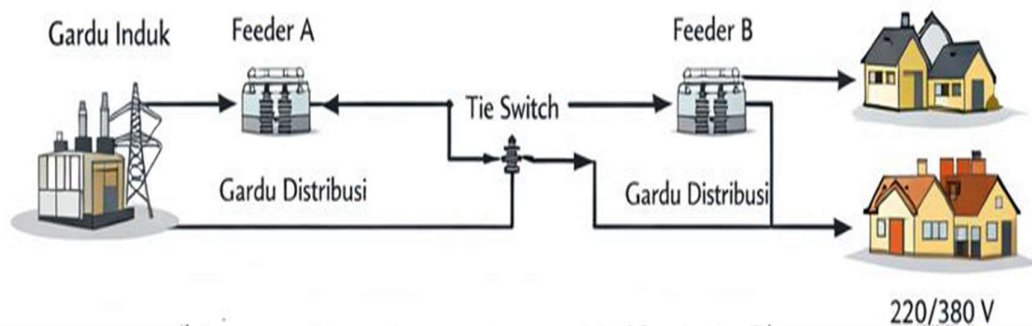
b. Jaringan Tegangan Menengah (JTM)

Jaringan Tegangan Menengah (JTM) sering disebut juga jaringan primer distribusi adalah suatu bagian dari pada tenaga listrik antara gardu induk dan gardu distribusi. Dalam penyaluran tenaga listrik pada jaringan distribusi primer menggunakan sistem saluran diantaranya saluran kawat udara saluran kabel dan sistem kabel tanah. Jaringan Tegangan Menengah (JTM) merupakan bagian dari sistem distribusi primer yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari gardu induk menuju gardu distribusi atau langsung ke pelanggan tegangan menengah. Pada sistem distribusi di Indonesia, JTM umumnya beroperasi pada tegangan nominal 20 kV dan menjadi penghubung antara subsistem transmisi dan distribusi sekunder.



Gambar 3. Sistem Tenaga Listrik

Menunjukkan struktur hierarkis sistem tenaga listrik secara keseluruhan. Energi listrik dibangkitkan pada pembangkit, kemudian dinaikkan tegangannya untuk efisiensi transmisi jarak jauh. Setelah sampai di gardu induk, tegangan diturunkan menjadi tegangan menengah dan disalurkan melalui Jaringan Tegangan Menengah (JTM). Pada gardu distribusi, tegangan kembali diturunkan menjadi 380/220 volt untuk melayani pelanggan. Gambar 3 menegaskan bahwa sistem distribusi, khususnya JTM, merupakan subsistem yang langsung memengaruhi kualitas pelayanan kepada pelanggan. Oleh karena itu, optimalisasi pada level distribusi memiliki dampak signifikan terhadap performa sistem secara keseluruhan.



Gambar 4. Konfigurasi Jaringan Tengah Menengah

Gambar 4 memperlihatkan konfigurasi radial pada JTM. Dalam sistem ini, daya mengalir satu arah dari sumber menuju beban. Setiap gardu distribusi hanya memiliki satu jalur suplai utama. Keunggulan sistem radial adalah kesederhanaan proteksi dan biaya instalasi yang relatif rendah. Namun, kelemahannya adalah rendahnya fleksibilitas ketika terjadi gangguan. Jika terjadi gangguan pada satu segmen, seluruh beban di hilir akan terputus. Oleh karena itu, biasanya disediakan tie switch yang dalam kondisi normal terbuka, namun dapat ditutup saat diperlukan untuk manuver jaringan.

Secara fungsional, JTM memiliki peran strategis karena menjadi jalur utama pembawa daya dalam jumlah relatif besar sebelum diturunkan tegangannya menjadi 380/220 volt pada sisi tegangan rendah. Kinerja JTM sangat menentukan kualitas tegangan, tingkat rugi daya, serta keandalan pelayanan kepada pelanggan. Secara topologi, JTM umumnya berbentuk radial dengan satu sumber suplai utama dari gardu

induk. Setiap penyulang (feeder) berfungsi sebagai jalur distribusi primer yang menyuplai beberapa gardu distribusi sepanjang lintasannya.

Namun, untuk meningkatkan fleksibilitas dan keandalan, antar penyulang biasanya dihubungkan oleh *tie switch* yang dalam kondisi normal terbuka. *Tie switch* ini memungkinkan dilakukannya manuver jaringan apabila terjadi gangguan pada salah satu penyulang. Dengan mekanisme tersebut, sebagian beban dapat dialihkan ke penyulang lain tanpa membentuk *loop* tertutup permanen. Konfigurasi ini dikenal sebagai sistem radial terbuka (*open loop system*), yang secara operasional tetap radial tetapi memiliki kemampuan rekonfigurasi.

JTM terdiri dari beberapa komponen penting yang bekerja secara terintegrasi. Konduktor merupakan elemen utama yang berfungsi menghantarkan arus listrik. Jenis konduktor yang digunakan biasanya berbahan aluminium atau campuran aluminium dengan inti baja untuk meningkatkan kekuatan mekanis. Selain konduktor, JTM dilengkapi dengan isolator untuk memisahkan penghantar dari struktur penopang, serta tiang atau struktur mekanis sebagai penyangga fisik jaringan. Pada sistem kabel tanah, digunakan kabel berisolasi khusus dengan pelindung mekanis untuk mencegah gangguan eksternal.

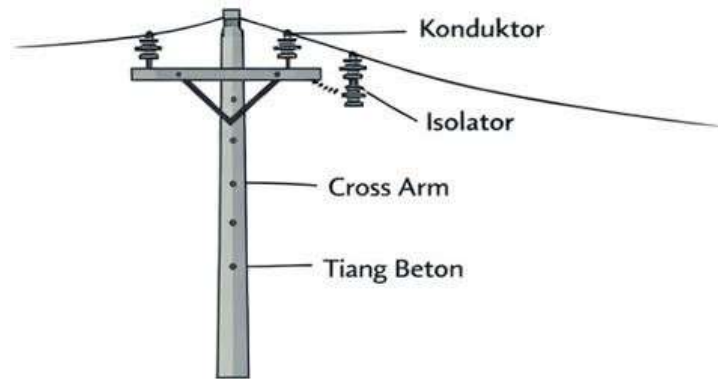
Peralatan proteksi pada JTM meliputi *recloser*, *load break switch*, dan *fuse cut out*. *Recloser* berfungsi memutus dan menyambung kembali arus secara otomatis saat terjadi gangguan sementara. *Fuse cut out* digunakan sebagai pengaman trafo distribusi dari gangguan arus lebih. *Load break switch* memungkinkan pemutusan beban dalam kondisi berbeban tanpa menimbulkan busur api berbahaya.

Jaringan Tegangan Menengah yang digunakan oleh PLN yaitu 20 KV. Adapun konstruksi Jaringan Tegangan Menengah (JTM) terdiri dari :

A. Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)

Pada konstruksi jaringan udara, komponen utama yang pertama adalah konduktor. Konduktor berfungsi sebagai media penghantar arus listrik dari gardu induk menuju gardu distribusi. Material konduktor yang digunakan umumnya berbahan aluminium atau campuran aluminium dengan inti baja, seperti ACSR atau AAAC, karena memiliki konduktivitas listrik yang baik serta kekuatan mekanis yang memadai terhadap beban tarik dan pengaruh lingkungan. Luas penampang konduktor ditentukan

berdasarkan kemampuan hantar arus, batas kenaikan temperatur, serta jarak bentang antar tiang. Pemilihan penampang yang tidak tepat dapat menyebabkan rugi daya berlebih atau bahkan overheating pada kondisi beban puncak.



Gambar 5. Konstruksi Jaringan Tengah Menengah

Konduktor pada JTM dipasang pada struktur penopang berupa tiang. Tiang dapat terbuat dari beton bertulang, baja, atau kayu, tergantung pada standar konstruksi dan kondisi geografis wilayah. Tiang beton bertulang paling banyak digunakan karena memiliki umur pakai panjang dan tahan terhadap kondisi cuaca tropis. Ketinggian tiang disesuaikan dengan standar jarak bebas minimum terhadap permukaan tanah dan objek di sekitarnya untuk menjamin keselamatan umum.

Agar konduktor tidak bersentuhan langsung dengan struktur tiang, digunakan isolator. Isolator berfungsi memisahkan penghantar bertegangan dari struktur penopang yang terhubung ke tanah. Isolator pada JTM harus memiliki kemampuan menahan tegangan kerja normal maupun tegangan lebih akibat gangguan sementara seperti petir. Material isolator umumnya berbahan porselen atau polimer komposit yang memiliki sifat dielektrik tinggi serta tahan terhadap polusi lingkungan.

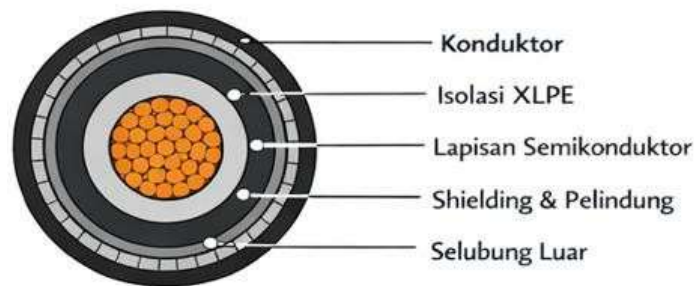
Merupakan konstruksi termurah yang digunakan untuk penyaluran tenaga listrik pada daya yang sama. Konstruksi ini paling banyak digunakan di Indonesia untuk konsumen jaringan tegangan menengah. SUTM juga disebut jaringan kawat yang tidak berisolasi. Ciri paling utama pada jaringan ini yaitu penggunaan penghantar yang telanjang yang ditopang dengan isolator pada tiang besi atau beton. Bagian-bagian utama dari jaringan ini adalah tiang beton atau besi, *Cross Arm* serta konduktor.

Biasanya konduktor yang digunakan yaitu aluminium atau AAAC yang berukuran 240 mm², 150mm², 70mm², dan 35mm².

B. Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM)

Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM) merupakan bagian dari jaringan distribusi primer yang menggunakan kabel berisolasi dan dipasang di dalam tanah atau saluran khusus untuk menyalurkan energi listrik pada tegangan nominal 20 kV. SKTM umumnya digunakan di kawasan perkotaan, kawasan industri, atau wilayah dengan keterbatasan ruang dan pertimbangan estetika, di mana penggunaan jaringan udara kurang memungkinkan.

Secara fungsional, SKTM memiliki tujuan yang sama dengan Jaringan Tegangan Menengah udara, yaitu menyalurkan daya dari gardu induk menuju gardu distribusi. Namun, secara konstruksi dan karakteristik teknis, SKTM memiliki perbedaan signifikan yang memengaruhi performa sistem, baik dari sisi kelistrikan maupun keandalan. Kontruksi SKTM atau saluran kabel tegangan menengah ini termasuk kontruksi yang aman dan andal untuk pendistribusian tenaga listrik tegangan menengah, namun relative mahal untuk penyaluran daya yang sama.



Gambar 6. Struktur Kabel Jaringan Tengah Menengah

Perbandingan dengan SUTM atau saluran tegangan menengah, menggunakan SKTM akan memperkecil atau meminimalisir angka resiko kegagalan operasi akibat faktor eksternal atau meningkatkan safety atau keamanan ketenagalistrikan. Kabel yang sering digunakan pada jaringan ini adalah berisolasi XLPE. Dimana kabel ini ditanam langsung di tanah pada kedalaman yang ditentukan serta diberikan pelindung terhadap pengaruh mekanisme dari luar. Kabel tanah ini memiliki isolasi yang mampu menahan

tegangan tembus yang akan di timbulkan.

Dari sisi keandalan terhadap gangguan eksternal seperti angin, pohon tumbang, dan petir, SKTM memiliki keunggulan dibandingkan jaringan udara. Karena tertanam di dalam tanah, risiko gangguan akibat cuaca jauh lebih kecil. Hal ini menjadikan SKTM cocok untuk wilayah dengan kepadatan tinggi dan kebutuhan keandalan yang tinggi. Namun, jika terjadi gangguan internal seperti kerusakan isolasi atau hubung singkat dalam kabel, proses deteksi dan perbaikan relatif lebih kompleks dan memerlukan waktu lebih lama dibandingkan jaringan udara. Lokasi gangguan harus ditentukan dengan alat khusus sebelum dilakukan penggalian dan perbaikan.

Biaya investasi awal SKTM juga jauh lebih tinggi karena memerlukan pekerjaan sipil seperti penggalian, pemasangan *ducting*, dan sistem drainase untuk mencegah genangan air. Pemasangan SKTM dapat dilakukan secara langsung ditanam (*direct buried*) atau melalui sistem *ducting* dan *manhole*. Pada sistem *ducting*, kabel ditempatkan dalam pipa pelindung yang memudahkan penggantian tanpa penggalian besar. Kedalaman pemasangan harus memenuhi standar keselamatan untuk mencegah gangguan akibat aktivitas permukaan tanah. Selain itu, sistem pembumian (*grounding*) harus dirancang dengan baik untuk mengalirkan arus gangguan ke tanah secara aman.

Dalam konfigurasi jaringan distribusi, SKTM dapat berfungsi sebagai penyulang utama atau sebagai penghubung antar gardu pada sistem ring. Pada beberapa kawasan industri, sistem distribusi menggunakan konfigurasi ring tertutup dengan SKTM untuk meningkatkan keandalan suplai.

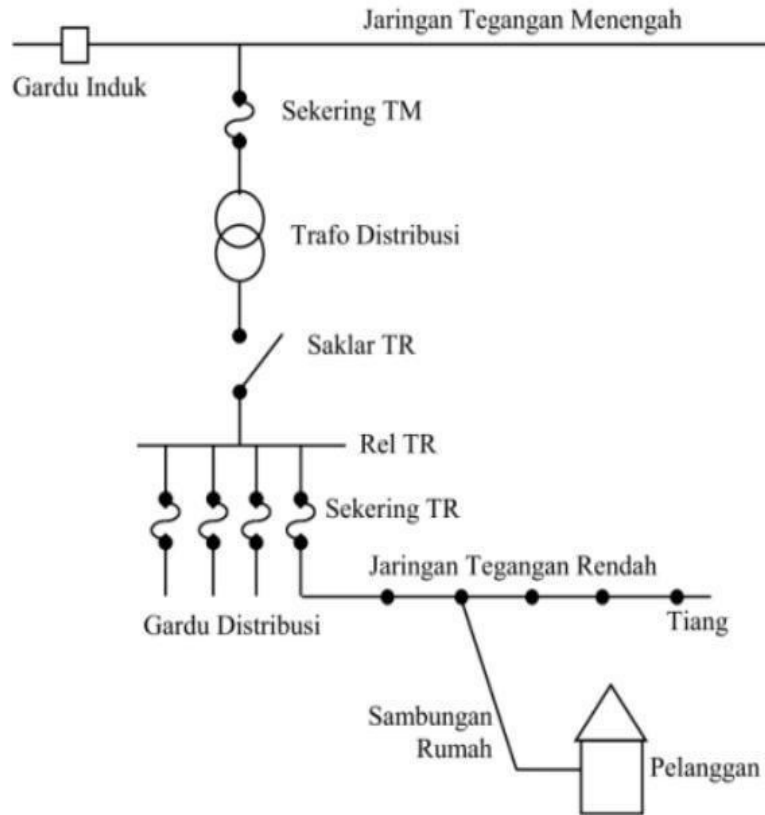
Jaringan Tengah Menengah lebih rentan terhadap gangguan eksternal dibandingkan sistem transmisi karena lokasinya lebih dekat dengan lingkungan permukiman dan vegetasi. Gangguan dapat berupa hubung singkat akibat pohon tumbang, hewan, cuaca ekstrem, maupun kerusakan isolator. Untuk mengurangi dampak gangguan, sistem proteksi pada Jaringan Tengah Menengah dirancang selektif dan terkoordinasi. Recloser akan bekerja lebih dahulu untuk gangguan sementara, sedangkan gangguan permanen akan diisolasi melalui sectionalizing switch agar area terdampak dapat diminimalkan. Keandalan Jaringan Tengah Menengah sangat menentukan nilai indeks keandalan sistem distribusi secara keseluruhan karena sebagian besar gangguan terjadi pada tingkat ini.

Jaringan Tengah Menengah merupakan objek utama perubahan konfigurasi. Variabel keputusan dalam optimasi biasanya berupa status buka atau tutup saklar pada jaringan tegangan menengah. Perubahan jalur aliran daya pada Jaringan Tengah Menengah dapat mengurangi konsentrasi arus pada segmen tertentu dan memperbaiki profil tegangan pada gardu distribusi. Dengan tetap mempertahankan struktur radial, rekonfigurasi dilakukan untuk mencapai distribusi beban yang lebih seimbang. Karena daya yang dibawa JTM relatif besar dibandingkan jaringan tegangan rendah, perubahan kecil pada konfigurasi JTM dapat menghasilkan pengurangan rugi daya yang signifikan.

2. Distribusi Sekunder (Tegangan Rendah)

Sering disebut Sistem Jaringan Tegangan Rendah (JTR) dengan tegangan operasi nominal 380 / 220 volt. Untuk rumah tangga dan bisnis kecil, tegangan 20 kV masih terlalu tinggi, sehingga perlu diturunkan kembali. Distribusi sekunder adalah jaringan daya listrik yang termasuk dalam kategori tegangan rendah (sistem 380/220 Volt), kawat penghantarnya berupa kabel bawah tanah atau kawat udara yang menghubungkan dari gardu distribusi yang merupakan sisi sekunder transformator distribusi ke konsumen/pelanggan, yaitu rating yang sama dengan tegangan peralatan yang dilayani.

Jaringan distribusi sekunder bermula dari sisi sekunder transformator distribusi dan berakhir hingga ke alat ukur (meteran) pelanggan. Sistem jaringan distribusi sekunder disalurkan kepada para pelanggan melalui kawat berisolasi. Sistem distribusi sekunder digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu distribusi ke beban-beban yang ada di konsumen. Pada sistem distribusi sekunder bentuk saluran yang paling banyak digunakan ialah sistem radial. Sistem ini biasanya disebut sistem tegangan rendah yang langsung akan dihubungkan kepada konsumen, jaringan distribusi sekunder seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Jaringan Distribusi Sekunder

Gambar 7 merupakan diagram satu garis sistem distribusi tenaga listrik yang menunjukkan alur penyaluran energi listrik dari sisi tegangan menengah hingga sampai ke pelanggan rumah tangga pada sisi tegangan rendah. Sistem ini adalah sistem distribusi radial yang umum digunakan dalam jaringan distribusi di Indonesia. Prosesnya dimulai dari Gardu Induk, yaitu instalasi tenaga listrik yang menerima daya dari sistem transmisi bertegangan tinggi, kemudian menurunkannya menjadi tegangan menengah, umumnya 20 kV. Dari gardu induk, daya disalurkan melalui Jaringan Tegangan Menengah menuju gardu distribusi yang berada lebih dekat dengan pusat beban. Jaringan tegangan menengah ini berfungsi membawa daya dalam kapasitas cukup besar dengan arus yang relatif lebih kecil dibanding tegangan rendah sehingga rugi-rugi daya dapat ditekan.

Sebelum masuk ke trafo distribusi, pada sisi tegangan menengah terdapat sekering TM yang berfungsi sebagai pengaman utama trafo terhadap gangguan arus lebih maupun hubung singkat. Jika terjadi gangguan pada trafo atau sisi bawahnya yang menyebabkan arus melonjak, sekering ini akan melebur sehingga memutus hubungan dengan jaringan utama. Dengan demikian gangguan tidak merambat kembali ke penyulang dan tidak memengaruhi jaringan yang lebih luas.

Trafo distribusi merupakan komponen utama dalam gardu distribusi karena berfungsi menurunkan tegangan dari 20 kV menjadi 380/220 volt. Tegangan 380 volt digunakan untuk sistem tiga fasa, sedangkan 220 volt digunakan untuk sistem satu fasa yang umumnya dipakai pelanggan rumah tangga. Prinsip kerja trafo adalah berdasarkan induksi elektromagnetik, di mana perubahan fluks magnet pada kumparan primer akan menginduksikan tegangan pada kumparan sekunder sesuai dengan perbandingan jumlah lilitan.

Setelah tegangan diturunkan, daya mengalir ke sisi tegangan rendah melalui saklar TR. Saklar ini berfungsi sebagai pemutus dan penghubung rangkaian pada sisi tegangan rendah, biasanya digunakan saat pemeliharaan atau ketika terjadi kondisi darurat. Dari saklar tersebut daya masuk ke rel TR atau busbar tegangan rendah yang berfungsi sebagai titik pembagi arus ke beberapa jurusan distribusi. Rel ini memungkinkan pembagian beban secara merata ke beberapa saluran keluar. Setiap saluran keluar dari rel dilengkapi dengan sekering TR. Pengaman ini bekerja secara selektif, artinya jika terjadi gangguan pada salah satu jalur tegangan rendah, hanya sekering pada jalur tersebut yang akan putus sehingga jalur lain tetap beroperasi. Hal ini meningkatkan keandalan sistem distribusi karena gangguan dapat dilokalisasi pada area tertentu saja.

Dari sekering TR, daya disalurkan melalui Jaringan Tegangan Rendah yang biasanya berupa kabel udara pada tiang-tiang distribusi. Tegangan pada jaringan ini adalah 380/220 volt. Sepanjang jaringan tersebut terdapat titik-titik sambungan menuju pelanggan. Tiang berfungsi sebagai penopang konduktor sekaligus tempat percabangan sambungan rumah.

Sambungan rumah merupakan penghubung antara jaringan tegangan rendah dan instalasi pelanggan. Pada bagian ini biasanya terdapat alat pembatas dan pengukur

seperti kWh meter dan MCB yang berfungsi membatasi daya sesuai kontrak pelanggan serta melindungi instalasi rumah dari arus lebih. Setelah melewati alat ukur dan pembatas tersebut, energi listrik masuk ke instalasi internal pelanggan dan digunakan untuk mengoperasikan berbagai peralatan listrik.

Secara keseluruhan, gambar tersebut memperlihatkan sistem distribusi listrik dari hulu ke hilir dengan susunan proteksi berlapis mulai dari sisi tegangan menengah hingga tegangan rendah. Sistem radial seperti ini memiliki konstruksi sederhana dan biaya investasi relatif lebih rendah, namun memiliki kelemahan yaitu apabila terjadi gangguan di sisi hulu maka seluruh beban di sisi hilir akan terdampak pemadaman.

a. Penurunan Tegangan (Gardu Distribusi)

Penurunan tegangan pada gardu distribusi merupakan tahap transisi penting dalam sistem distribusi tenaga listrik, di mana energi listrik yang disalurkan melalui Jaringan Tegangan Menengah (umumnya 20 kV di Indonesia) diturunkan menjadi tegangan rendah 380/220 volt untuk dapat dimanfaatkan oleh pelanggan. Proses ini dilakukan oleh transformator distribusi yang terpasang pada gardu tiang, gardu beton, atau gardu kios, tergantung pada kapasitas dan karakteristik wilayah pelayanan.

Transformator distribusi bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, dengan rasio lilitan primer dan sekunder yang menentukan besarnya tegangan keluaran. Tegangan 20 kV pada sisi primer diturunkan menjadi 380 volt antar fasa dan 220 volt antara fasa dan netral pada sisi sekunder. Sistem yang digunakan adalah tiga fasa empat kawat, di mana titik netral transformator dibumikan untuk menjaga stabilitas sistem dan keamanan terhadap gangguan hubung tanah.

Penurunan tegangan ini tidak hanya berfungsi sebagai konversi level tegangan, tetapi juga sebagai titik pembagian beban dalam sistem distribusi. Setiap gardu distribusi melayani kelompok pelanggan tertentu dalam radius terbatas. Kapasitas transformator harus direncanakan berdasarkan total daya tersambung dan faktor beban agar tidak terjadi overload yang dapat menyebabkan kenaikan suhu berlebih, percepatan degradasi isolasi, dan penurunan umur peralatan.

b. Jaringan Tegangan Rendah (JTR)

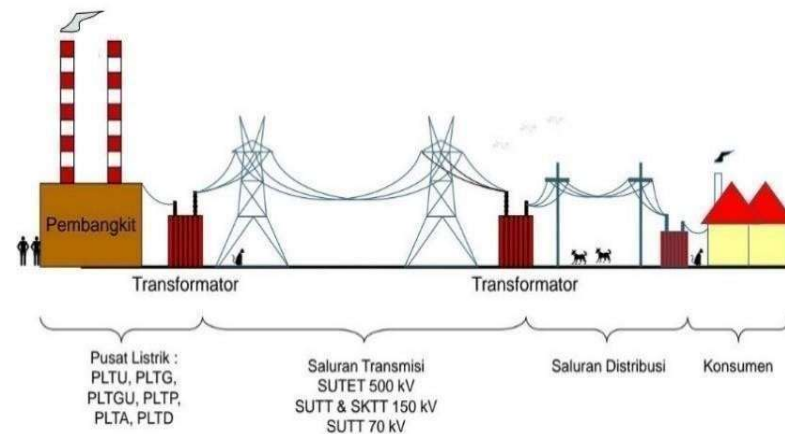
Setelah tegangan diturunkan, energi listrik disalurkan melalui Jaringan Tegangan Rendah (JTR). JTR merupakan sistem penghantar yang membawa daya dari

terminal sekunder transformator menuju pelanggan akhir. Karena bekerja pada tegangan rendah, arus yang mengalir relatif besar dibandingkan sisi tegangan menengah untuk daya yang sama. Hal ini menyebabkan rugi daya dan jatuh tegangan menjadi lebih signifikan apabila panjang jaringan terlalu jauh atau penampang konduktor tidak memadai.

Penurunan tegangan pada JTR secara teknis disebabkan oleh impedansi saluran yang terdiri dari resistansi dan reaktansi. Secara sederhana, besar jatuh tegangan dapat didekati dengan hubungan yang sebanding dengan arus beban dan impedansi penghantar. Semakin besar arus dan semakin panjang saluran, semakin besar pula penurunan tegangan yang terjadi. Oleh karena itu, standar perencanaan jaringan distribusi membatasi panjang maksimal penyulang tegangan rendah dan menentukan ukuran konduktor berdasarkan arus nominal serta batas toleransi tegangan yang diizinkan.

c. Konsumen Akhir

Dari jaringan JTR, listrik disambungkan ke setiap rumah melalui Sambungan Rumah (SR). Di setiap rumah, terdapat Alat Pembatas dan Pengukur (APP), atau yang lebih umum dikenal sebagai kWh meter atau meteran listrik, yang berfungsi membatasi daya yang digunakan pelanggan dan mengukur konsumsi energi listrik.



Gambar 8. Skema Penyaluran Energi Listrik dari Pusat Pembangkit Sampai ke Pelanggan.

Dari uraian diatas terlihat bahwa proses penyaluran daya listrik dari pembangkit ke pelanggan terdiri 5 komponen utama yakni : pusat pembangkit, Gardu Induk (GI)

,saluran transmisi, saluran distribusi primer dan distribusi sekunder. Gambar 8. menunjukkan skema penyaluran energi listrik dari pusat pembangkit sampai ke pelanggan.

2.1.2 Rekonfigurasi Jaringan

Rekonfigurasi distribusi jaringan (*Network Configuration*) merupakan suatu usaha merubah bentuk konfigurasi jaringan dengan mengoperasikan pensaklaran terkontrol jarak jauh (*Switching Remotely Controlled*), dengan cara mengatur ulang konfigurasi jaringan dengan jalan membuka dan menutup *switch* pada jaringan distribusi tanpa menimbulkan akibat yang beresiko pada operasi dan bentuk sistem jaringan distribusi secara keseluruhan.

Rekonfigurasi jaringan distribusi merupakan proses pengubahan struktur topologi jaringan distribusi dengan membuka atau menutup *sectionalized switches* dan *tie switch*. Pada saat perubahan kondisi operasi, rekonfigurasi jaringan dilakukan dengan membuka atau menutup *switch-switch* jaringan sesuai dengan kapasitas transformator, kapasitas termal penyulang, jatuh tegangan, dan kondisi jaringan.

Tujuan rekonfigurasi jaringan distribusi di antaranya: menurunkan rugi- rugi daya, menyeimbangkan beban, mengurangi deviasi tegangan, dan memulihkan sistem. Rekonfigurasi jaringan distribusi 114 mencakup permasalahan optimisasi yang kompleks. Hal ini disebabkan adanya batasan- batasan pada saat menemukan solusi optimal atau solusi yang mendekati optimal dari permasalahan yang ditangani.

Rekonfigurasi jaringan distribusi merupakan suatu metode pengoperasian sistem tenaga listrik dengan cara mengubah status buka–tutup peralatan switching pada jaringan, seperti load break switch (LBS), recloser, dan tie switch, tanpa menambah infrastruktur fisik baru. Tujuan utama dari rekonfigurasi adalah memperoleh kondisi operasi yang lebih optimal ditinjau dari aspek rugi daya, profil tegangan, pembebanan penyulang, serta keandalan sistem.

Pada sistem distribusi tegangan menengah 20 kV yang umumnya berkonfigurasi radial, setiap penyulang menyuplai beban melalui satu jalur utama dari gardu induk menuju gardu-gardu distribusi. Dalam kondisi normal, beberapa titik penghubung antar penyulang (*tie switch*) berada dalam posisi terbuka. Titik ini disediakan untuk fleksibilitas manuver saat terjadi gangguan atau untuk kebutuhan optimasi sistem.

Rekonfigurasi dilakukan dengan menutup satu atau lebih tie switch dan membuka sectionalizing switch tertentu, sehingga struktur jaringan tetap radial namun dengan pola aliran daya yang berbeda.

Secara teoritis, dasar dari rekonfigurasi jaringan berkaitan erat dengan distribusi arus dan rugi daya. Rugi daya pada suatu segmen saluran dinyatakan sebagai $P_{loss} = I^2 R$. Karena arus pada segmen awal penyulang biasanya paling besar akibat membawa akumulasi beban di hilir, maka rugi daya terbesar umumnya terjadi di bagian tersebut. Dengan melakukan rekonfigurasi, sebagian beban dapat dialihkan ke penyulang lain yang memiliki kapasitas lebih longgar, sehingga arus pada segmen kritis berkurang dan total rugi daya sistem dapat ditekan.

Selain rugi daya, rekonfigurasi juga berpengaruh terhadap profil tegangan. Penurunan tegangan sepanjang penyulang sebanding dengan arus dan impedansi saluran. Pada kondisi pembebanan tinggi, tegangan di ujung penyulang dapat mendekati batas bawah standar pelayanan. Dengan mengalihkan sebagian beban ke jalur alternatif yang lebih dekat ke sumber atau memiliki impedansi total lebih kecil, penurunan tegangan dapat diminimalkan. Hasilnya adalah distribusi tegangan antar bus menjadi lebih merata dan stabil.

Dalam konteks operasional, rekonfigurasi jaringan dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu rekonfigurasi untuk optimasi dan rekonfigurasi untuk restorasi. Rekonfigurasi optimasi dilakukan dalam kondisi sistem normal untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas tegangan. Sementara itu, rekonfigurasi restorasi dilakukan saat terjadi gangguan permanen pada suatu segmen, dengan tujuan mengisolasi bagian yang terganggu dan memulihkan suplai pada bagian lain melalui jalur alternatif.

Secara matematis, proses rekonfigurasi melibatkan analisis aliran daya pada sistem distribusi yang umumnya bersifat non-linear. Karena jaringan distribusi memiliki rasio R/X yang relatif besar, metode perhitungan seperti backward-forward sweep sering digunakan untuk mendapatkan hasil yang konvergen dan akurat. Dalam setiap skenario rekonfigurasi, dilakukan evaluasi terhadap parameter utama seperti total rugi daya aktif, tegangan minimum pada bus terjauh, arus maksimum pada penghantar, serta tingkat pembebanan transformator distribusi.

Salah satu kendala dalam rekonfigurasi adalah menjaga struktur jaringan tetap radial. Sistem distribusi umumnya dirancang radial untuk menyederhanakan koordinasi proteksi. Oleh karena itu, setiap perubahan status switch harus memastikan tidak terbentuk loop tertutup permanen yang dapat mengganggu sistem proteksi dan selektivitas pemutusan gangguan. Dengan demikian, setiap kombinasi rekonfigurasi harus memenuhi batasan teknis berupa kontinuitas suplai, batas arus penghantar, batas tegangan, serta struktur radial.

Dalam implementasi praktis pada penyulang 20 kV, rekonfigurasi biasanya dilakukan dengan mempertimbangkan panjang penyulang, kepadatan beban, serta lokasi gardu distribusi. Penyulang dengan beban mendekati kapasitas nominal akan cenderung memiliki rugi daya dan penurunan tegangan lebih besar dibandingkan penyulang dengan pembebanan ringan. Oleh sebab itu, pengalihan sebagian beban dari penyulang padat ke penyulang yang lebih ringan dapat meningkatkan keseimbangan sistem secara keseluruhan.

Dari sisi keandalan, rekonfigurasi juga berperan dalam mengurangi nilai indeks gangguan seperti SAIDI dan SAIFI. Dengan adanya jalur alternatif, waktu pemulihan beban dapat dipercepat karena tidak seluruh pelanggan harus menunggu perbaikan selesai pada titik gangguan utama. Fleksibilitas ini sangat penting terutama pada wilayah dengan pertumbuhan beban yang cepat dan struktur jaringan yang kompleks.

Secara ekonomis, rekonfigurasi termasuk metode optimasi yang relatif murah karena tidak memerlukan investasi fisik besar. Perubahan hanya dilakukan pada pengoperasian switch yang sudah tersedia. Oleh karena itu, metode ini sering menjadi pilihan pertama sebelum dilakukan pembangunan penyulang baru atau uprating konduktor. Dengan demikian, rekonfigurasi jaringan distribusi merupakan strategi pengelolaan sistem yang berbasis optimasi struktur topologi. Pendekatan ini mengintegrasikan analisis teknis, batasan operasional, dan pertimbangan ekonomis untuk memperoleh sistem distribusi yang lebih efisien, andal, dan memenuhi standar kualitas tegangan. Dalam penelitian sistem distribusi tegangan menengah, rekonfigurasi menjadi metode yang sangat relevan karena mampu memberikan peningkatan performa signifikan tanpa memerlukan ekspansi infrastruktur secara langsung.

2.1.3 Aspek Keandalan Jaringan

Keandalan jaringan distribusi tenaga listrik merupakan ukuran kemampuan sistem dalam menyalurkan energi listrik secara kontinu, aman, dan sesuai standar kualitas tegangan kepada pelanggan. Dalam sistem distribusi 20 kV, aspek keandalan menjadi sangat krusial karena jaringan ini berfungsi sebagai penghubung antara gardu induk dan gardu distribusi yang secara langsung mempengaruhi kontinuitas pelayanan kepada pelanggan tegangan rendah maupun pelanggan tegangan menengah.

Secara teknis, keandalan tidak hanya diartikan sebagai minimnya gangguan, tetapi juga mencerminkan kemampuan sistem untuk mempertahankan parameter operasional dalam batas standar meskipun terjadi variasi beban atau gangguan lokal. Oleh karena itu, evaluasi keandalan jaringan mencakup analisis terhadap konfigurasi sistem, kapasitas peralatan, profil tegangan, tingkat pembebanan, rugi-rugi daya, sistem proteksi, serta fleksibilitas manuver jaringan.

1. Konfigurasi Jaringan dan Pengaruhnya terhadap Keandalan

Struktur topologi jaringan distribusi sangat mempengaruhi tingkat keandalan sistem. Pada umumnya, jaringan distribusi 20 kV menggunakan sistem radial karena lebih sederhana dan ekonomis. Namun, sistem radial memiliki kelemahan utama yaitu apabila terjadi gangguan pada satu titik, maka seluruh pelanggan di hilir titik gangguan akan mengalami pemadaman.

Untuk meningkatkan keandalan, digunakan sistem open loop atau ring system, di mana dua penyulang saling terhubung melalui tie switch. Dalam kondisi normal, salah satu sisi dalam keadaan terbuka (open point). Ketika terjadi gangguan, manuver jaringan dapat dilakukan dengan membuka titik gangguan dan menutup tie switch sehingga sebagian beban dapat dipasok dari penyulang lain. Fleksibilitas ini secara signifikan meningkatkan kontinuitas pelayanan dan memperkecil area terdampak gangguan.

Rekonfigurasi jaringan merupakan bagian dari strategi peningkatan keandalan, karena melalui pengaturan ulang titik buka-tutup saklar, distribusi beban dapat dioptimalkan tanpa harus menambah infrastruktur baru.

2. Kapasitas Hantar Arus (KHA) dan Tingkat Pembebanan

Setiap penghantar pada jaringan distribusi memiliki batas kemampuan dalam

menghantarkan arus listrik yang dikenal sebagai Kapasitas Hantar Arus (KHA). Nilai KHA ditentukan oleh luas penampang konduktor, jenis material, kondisi lingkungan, serta sistem pendinginan alami.

Jika arus beban mendekati atau melebihi KHA dalam waktu lama, maka suhu konduktor akan meningkat. Peningkatan suhu ini dapat menyebabkan:

- a. Penuaan isolasi lebih cepat,
- b. Penurunan kekuatan mekanis penghantar,
- c. Meningkatnya rugi-rugi daya,
- d. Risiko gangguan akibat sagging (andongan konduktor).

Secara teknis, sistem distribusi yang andal harus beroperasi dalam batas pembebanan yang aman, biasanya tidak melebihi persentase tertentu dari KHA dalam kondisi normal. Rekonfigurasi jaringan sering dilakukan untuk menyeimbangkan beban antar penyulang agar tidak ada satu penyulang yang bekerja mendekati batas maksimum secara terus-menerus.

3. Profil Tegangan dan Jatuh Tegangan

Kualitas tegangan merupakan indikator penting dalam keandalan jaringan distribusi. Tegangan yang diterima pelanggan harus berada dalam batas toleransi yang diizinkan. Pada jaringan distribusi 20 kV, jatuh tegangan terjadi akibat impedansi saluran yang terdiri dari resistansi dan reaktansi. Secara matematis, jatuh tegangan dipengaruhi oleh:

- a. Besarnya arus beban,
- b. Panjang saluran,
- c. Nilai resistansi dan reaktansi penghantar,
- d. Faktor daya beban.

Semakin panjang penyulang dan semakin besar arus yang mengalir, maka jatuh tegangan akan semakin besar. Apabila tegangan di ujung penyulang berada di bawah batas minimum standar, maka peralatan pelanggan dapat bekerja tidak optimal bahkan mengalami kerusakan.

Rekonfigurasi jaringan dapat memperbaiki profil tegangan dengan cara:

- a. Memperpendek jalur suplai untuk sebagian beban,
- b. Mengurangi arus pada penyulang yang sebelumnya overload,

- c. Mendistribusikan beban secara lebih merata.

Dengan demikian, sistem bekerja dalam kondisi tegangan yang lebih stabil dan sesuai standar.

4. Rugi-Rugi Daya (Losses)

Rugi-rugi daya pada jaringan distribusi terutama disebabkan oleh resistansi penghantar yang menghasilkan rugi daya I^2R . Secara teknis, losses meningkat secara kuadrat terhadap arus. Artinya, sedikit peningkatan arus dapat menghasilkan peningkatan losses yang signifikan.

Besarnya rugi-rugi daya dipengaruhi oleh:

- a. Nilai resistansi penghantar,
- b. Panjang jaringan,
- c. Besarnya arus beban,
- d. Faktor daya sistem.

Jika suatu penyulang mengalami pembebanan tinggi, maka losses pada penyulang tersebut akan meningkat secara signifikan. Selain menyebabkan pemborosan energi, losses juga meningkatkan suhu konduktor dan mempercepat degradasi peralatan. Rekonfigurasi jaringan dapat menurunkan losses dengan cara menurunkan arus pada penyulang yang sebelumnya berbeban tinggi dan mendistribusikan beban ke penyulang lain yang memiliki kapasitas cadangan

5. indeks Keandalan Sistem Distribusi

Keandalan sistem secara kuantitatif dinilai menggunakan indeks statistik, antara lain:

- a. SAIFI (System Average Interruption Frequency Index), yang menunjukkan rata-rata frekuensi gangguan per pelanggan dalam periode tertentu.
- b. SAIDI (System Average Interruption Duration Index), yang menunjukkan rata-rata durasi gangguan.
- c. CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index), yang menunjukkan rata-rata waktu pemulihan per gangguan.

6. Koordinasi Sistem Proteksi

Keandalan jaringan tidak terlepas dari sistem proteksi yang digunakan.

Proteksi harus mampu:

- a. Mendeteksi gangguan secara cepat,

- b. Mengisolasi bagian yang terganggu,
- c. Meminimalkan luas wilayah padam.

Rekonfigurasi jaringan harus tetap mempertahankan koordinasi proteksi agar selektivitas tetap terjaga. Perubahan aliran daya akibat rekonfigurasi dapat mengubah arus gangguan, sehingga perlu dipastikan bahwa setting relay masih sesuai.

7. Hubungan Rekonfigurasi dengan Peningkatan Keandalan

Secara keseluruhan, rekonfigurasi jaringan merupakan metode teknis yang relatif efisien untuk meningkatkan keandalan tanpa investasi besar pada infrastruktur baru. Dengan melakukan pengaturan ulang titik buka dan tutup saklar, sistem dapat:

- a. Menyeimbangkan pembebanan,
- b. Mengurangi rugi-rugi daya,
- c. Memperbaiki profil tegangan,
- d. Menurunkan risiko overload,
- e. Meningkatkan fleksibilitas operasi,
- f. Memperkecil dampak gangguan.

Oleh karena itu, dari sudut pandang teknis, rekonfigurasi jaringan 20 kV merupakan salah satu strategi yang efektif dalam menjaga kontinuitas pasokan dan meningkatkan performa sistem distribusi secara menyeluruh.

• Aspek Ekonomis Rekonfigurasi Jaringan

Aspek ekonomis dalam rekonfigurasi jaringan distribusi tenaga listrik merupakan kajian yang menilai sejauh mana suatu tindakan teknis memberikan manfaat finansial yang lebih besar dibandingkan dengan biaya yang dikeluarkan. Dalam sistem distribusi 20 kV, setiap keputusan teknis tidak hanya mempertimbangkan peningkatan keandalan dan kualitas tegangan, tetapi juga harus dianalisis dari sisi efisiensi investasi dan dampaknya terhadap kinerja keuangan perusahaan. Hal ini penting karena sistem distribusi merupakan bagian yang langsung berhubungan dengan pelanggan dan berkontribusi terhadap pendapatan perusahaan melalui energi yang disalurkan dan ditagihkan.

Rekonfigurasi jaringan pada dasarnya merupakan upaya pengaturan ulang konfigurasi eksisting melalui manuver saklar, pemindahan sebagian beban antar penyulang, atau optimalisasi titik buka dan titik tutup pada jaringan. Dibandingkan

dengan pembangunan penyulang baru atau penambahan gardu induk, rekonfigurasi termasuk solusi yang relatif lebih ekonomis karena memanfaatkan infrastruktur yang sudah ada. Namun demikian, meskipun investasi yang dibutuhkan relatif lebih kecil, tetap diperlukan analisis finansial yang sistematis untuk memastikan bahwa tindakan tersebut benar-benar memberikan keuntungan jangka panjang bagi perusahaan.

Dari sisi biaya, rekonfigurasi jaringan tetap memerlukan pengeluaran yang meliputi pengadaan peralatan switching seperti load break switch, recloser, atau pemutus tenaga, biaya pekerjaan konstruksi, biaya tenaga kerja teknis, serta biaya pengujian dan commissioning. Selain itu, dalam beberapa kondisi juga terdapat biaya tidak langsung seperti potensi kehilangan energi akibat pemadaman terencana saat pelaksanaan pekerjaan. Seluruh biaya tersebut merupakan investasi awal yang harus dibandingkan dengan manfaat ekonomis yang akan diperoleh setelah rekonfigurasi dilakukan.

Manfaat ekonomis utama dari rekonfigurasi jaringan distribusi umumnya berasal dari pengurangan rugi-rugi daya. Rugi daya aktif pada saluran distribusi berbanding lurus dengan kuadrat arus yang mengalir dan resistansi penghantar. Secara matematis, rugi daya dinyatakan dengan persamaan $P_{loss} = 3I^2R$. Persamaan ini menunjukkan bahwa peningkatan arus sedikit saja dapat menyebabkan peningkatan losses yang signifikan karena hubungan kuadrat terhadap arus. Apabila suatu penyulang mengalami pembebanan tinggi, maka nilai arus meningkat dan kerugian energi juga meningkat. Energi yang hilang tersebut tidak dapat ditagihkan kepada pelanggan, sehingga secara langsung mengurangi potensi pendapatan perusahaan.

Ketika rekonfigurasi dilakukan dan beban dialihkan sebagian ke penyulang lain yang masih memiliki kapasitas cadangan, arus pada penyulang yang sebelumnya overload akan menurun. Karena losses berbanding kuadrat terhadap arus, maka penurunan arus menghasilkan penurunan rugi daya yang lebih besar secara proporsional. Energi yang sebelumnya hilang akibat pemanasan konduktor kini dapat disalurkan dan ditagihkan, sehingga meningkatkan pendapatan bersih. Dalam jangka panjang, pengurangan losses ini dapat menghasilkan nilai ekonomis yang signifikan dan sering kali menjadi faktor utama yang membuat proyek rekonfigurasi layak secara finansial.

Selain pengurangan losses, manfaat ekonomis juga diperoleh dari penurunan frekuensi dan durasi gangguan. Gangguan jaringan menyebabkan energi tidak tersalurkan kepada pelanggan, yang dikenal sebagai Energy Not Supplied (ENS). ENS dapat dihitung dari besarnya daya beban dikalikan dengan lama gangguan. Energi yang tidak tersalurkan berarti kehilangan potensi penjualan listrik. Dengan adanya rekonfigurasi, distribusi beban menjadi lebih seimbang dan risiko overload menurun, sehingga kemungkinan terjadinya trip akibat pembebanan berlebih dapat diminimalkan. Selain itu, konfigurasi yang lebih fleksibel memungkinkan proses manuver jaringan dilakukan lebih cepat saat terjadi gangguan, sehingga durasi pemadaman dapat dipersingkat. Penurunan ENS ini memiliki dampak langsung terhadap peningkatan pendapatan serta pengurangan biaya operasional darurat.

Dalam perspektif investasi, kelayakan ekonomis suatu proyek rekonfigurasi umumnya dianalisis menggunakan pendekatan nilai waktu uang (time value of money). Hal ini karena manfaat pengurangan losses dan penurunan gangguan terjadi secara bertahap selama umur proyek. Oleh sebab itu, diperlukan metode evaluasi seperti Net Present Value (NPV), Benefit Cost Ratio (BCR), Internal Rate of Return (IRR), dan Payback Period. NPV menghitung selisih antara nilai sekarang dari manfaat dan biaya selama periode tertentu dengan mempertimbangkan tingkat diskonto. Apabila NPV bernilai positif, maka proyek menghasilkan manfaat bersih. BCR membandingkan total manfaat terdiskonto dengan total biaya terdiskonto, di mana nilai lebih dari satu menunjukkan proyek layak. IRR menunjukkan tingkat pengembalian internal investasi, sedangkan Payback Period menggambarkan waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan modal awal dari manfaat tahunan yang diperoleh.

Dalam konteks sistem distribusi 20 kV seperti pada kasus pemindahan beban antara Penyulang Mentor dan Penyulang Fakultas, aspek ekonomis sangat berkaitan dengan kondisi teknis sebelum dan sesudah rekonfigurasi. Sebelum dilakukan pengaturan ulang, penyulang yang mendekati kapasitas maksimum akan mengalami arus tinggi, losses besar, serta peningkatan risiko gangguan. Kondisi tersebut tidak hanya menurunkan efisiensi teknis tetapi juga berdampak finansial melalui peningkatan energi hilang dan potensi kehilangan pendapatan akibat gangguan. Setelah rekonfigurasi dilakukan dan beban terbagi lebih merata, arus pada penyulang yang sebelumnya

overload menurun, rugi-rugi daya berkurang, dan risiko gangguan menurun. Perbaikan teknis ini secara langsung diterjemahkan menjadi peningkatan efisiensi ekonomi.

Selain manfaat langsung berupa pengurangan losses dan ENS, rekonfigurasi juga dapat menunda kebutuhan investasi besar seperti pembangunan penyulang baru atau peningkatan kapasitas gardu induk. Penundaan investasi ini memiliki nilai ekonomis karena dana yang seharusnya digunakan untuk proyek besar dapat dialihkan ke kebutuhan lain yang lebih prioritas. Dalam analisis ekonomi, penundaan pengeluaran modal ini dianggap sebagai keuntungan karena mengurangi tekanan arus kas perusahaan pada periode berjalan.

Secara keseluruhan, aspek ekonomis rekonfigurasi jaringan menekankan bahwa setiap keputusan teknis harus memberikan nilai tambah finansial yang terukur. Rekonfigurasi dinyatakan layak secara ekonomis apabila manfaat dari pengurangan rugi-rugi daya, penurunan energi tidak tersalurkan, peningkatan efisiensi operasional, serta penundaan investasi lebih besar daripada biaya investasi dan operasional tambahan yang dikeluarkan. Dengan demikian, rekonfigurasi bukan hanya solusi teknis untuk meningkatkan keandalan jaringan, tetapi juga merupakan strategi efisiensi biaya yang mendukung keberlanjutan operasional dan kesehatan finansial perusahaan distribusi tenaga listrik dalam jangka panjang.

1. Kajian Kelayakan Operasi (KKO)

Kajian Kelayakan Operasi (KKO) merupakan evaluasi teknis yang dilakukan untuk memastikan bahwa suatu rencana pekerjaan atau proyek pengembangan jaringan dapat dioperasikan secara aman, andal, dan sesuai dengan standar teknis yang berlaku. Dalam sistem distribusi tenaga listrik, KKO menjadi tahap penting sebelum suatu proyek disetujui untuk dilaksanakan, karena hasil kajian ini menentukan apakah sistem setelah perubahan tetap berada dalam batas parameter operasional yang diperbolehkan. Dalam konteks rekonfigurasi jaringan 20 kV, KKO berfokus pada analisis performa sistem sebelum dan sesudah perubahan konfigurasi. Evaluasi ini mencakup studi aliran daya (load flow), analisis pembebanan penyulang, evaluasi profil tegangan, perhitungan rugi-rugi daya, serta analisis arus hubung singkat dan koordinasi proteksi. Tujuan utamanya adalah memastikan bahwa rekonfigurasi tidak menimbulkan permasalahan baru pada sistem, seperti overload pada penyulang lain, deviasi tegangan yang melebihi

batas toleransi, atau gangguan pada sistem proteksi.

Pada tahap studi aliran daya, dianalisis distribusi arus dan daya aktif maupun reaktif pada setiap segmen jaringan. Hasil simulasi menunjukkan apakah setelah rekonfigurasi terjadi perbaikan pembebanan atau justru muncul ketidakseimbangan baru. Profil tegangan pada setiap titik penting, terutama pada ujung penyulang, dibandingkan dengan batas toleransi tegangan yang diizinkan. Apabila seluruh titik berada dalam rentang standar, maka dari sisi kualitas tegangan proyek tersebut dinyatakan layak.

Selanjutnya, dalam KKO juga dilakukan evaluasi tingkat pembebanan terhadap kapasitas hantar arus (KHA) konduktor dan rating peralatan seperti transformator dan pemutus tenaga. Sistem dinyatakan layak apabila seluruh komponen bekerja dalam batas aman operasional dengan tetap mempertahankan margin cadangan untuk kondisi darurat. Margin ini penting untuk menjamin keandalan jangka panjang dan mengantisipasi pertumbuhan beban.

Aspek proteksi juga menjadi bagian krusial dalam KKO. Perubahan konfigurasi jaringan dapat memengaruhi distribusi arus gangguan. Oleh karena itu, dilakukan analisis arus hubung singkat untuk memastikan bahwa setting relay proteksi tetap selektif dan sensitif terhadap gangguan. Apabila diperlukan, penyesuaian setting dilakukan agar sistem tetap aman dan mampu mengisolasi gangguan secara tepat.

Secara keseluruhan, KKO bertujuan untuk menjawab pertanyaan mendasar: apakah jaringan setelah dilakukan perubahan masih dapat dioperasikan secara aman, stabil, efisien, dan sesuai standar mutu pelayanan? Jika seluruh parameter teknis memenuhi kriteria, maka proyek dinyatakan layak secara operasional.

2. Kajian Kelayakan Finansial (KKF)

Kajian Kelayakan Finansial (KKF) merupakan evaluasi yang dilakukan untuk menilai apakah suatu proyek memberikan manfaat ekonomi yang lebih besar dibandingkan biaya yang dikeluarkan selama umur proyek tersebut. Dalam sistem distribusi tenaga listrik, setiap investasi harus dianalisis secara finansial karena dana yang digunakan merupakan bagian dari anggaran perusahaan yang harus dipertanggungjawabkan secara ekonomis.

Dalam proyek rekonfigurasi jaringan 20 kV, KKF menghitung seluruh komponen biaya yang timbul, baik biaya investasi awal maupun biaya operasional tambahan. Biaya investasi meliputi pengadaan material, pemasangan peralatan, tenaga kerja, pengujian, serta biaya administrasi proyek. Seluruh biaya tersebut dihitung sebagai pengeluaran awal yang harus dibandingkan dengan manfaat finansial yang diperoleh setelah proyek berjalan.

Manfaat finansial dari rekonfigurasi jaringan umumnya berasal dari pengurangan rugi-rugi daya, peningkatan energi tersalurkan, penurunan energi tidak tersalurkan akibat gangguan (Energy Not Supplied), serta potensi penundaan investasi jaringan baru. Pengurangan losses berarti energi yang sebelumnya hilang kini dapat dijual kepada pelanggan, sehingga meningkatkan pendapatan perusahaan. Penurunan gangguan juga mengurangi kehilangan penjualan energi dan biaya perbaikan darurat.

Dalam KKF, analisis dilakukan menggunakan pendekatan nilai waktu uang (time value of money), karena manfaat proyek terjadi secara bertahap selama beberapa tahun. Parameter yang umum digunakan adalah Net Present Value (NPV), Benefit Cost Ratio (BCR), Internal Rate of Return (IRR), dan Payback Period. NPV menghitung selisih antara nilai sekarang manfaat dan biaya selama periode analisis. Apabila NPV bernilai positif, proyek dinilai menguntungkan. BCR menunjukkan perbandingan antara manfaat dan biaya; nilai lebih dari satu menunjukkan kelayakan. IRR menunjukkan tingkat pengembalian investasi, sedangkan Payback Period menunjukkan waktu yang diperlukan untuk mengembalikan modal awal.

Melalui KKF, perusahaan dapat memastikan bahwa proyek yang dilakukan bukan hanya menyelesaikan masalah teknis, tetapi juga memberikan kontribusi nyata terhadap efisiensi dan kesehatan keuangan perusahaan.

3. Hubungan antara KKO dan KKF

KKO dan KKF merupakan dua kajian yang saling melengkapi dan tidak dapat dipisahkan dalam proses pengambilan keputusan proyek di PLN. KKO memastikan bahwa proyek aman dan layak secara teknis, sedangkan KKF memastikan bahwa proyek menguntungkan dan efisien secara finansial. Suatu proyek dapat saja layak secara teknis, tetapi jika manfaat finansialnya tidak sebanding dengan biaya, maka proyek tersebut dapat ditunda atau dikaji ulang. Sebaliknya, proyek yang

menguntungkan secara finansial tetap tidak dapat dilaksanakan apabila tidak memenuhi standar teknis dan keselamatan.

Dalam konteks rekonfigurasi penyulang 20 kV, proyek dinyatakan benar-benar layak apabila hasil KKO menunjukkan perbaikan pembebanan, profil tegangan, dan losses tanpa melanggar standar operasi, serta hasil KKF menunjukkan bahwa manfaat pengurangan rugi-rugi daya dan penurunan gangguan lebih besar daripada biaya investasi yang dikeluarkan.

4. KKO dan KKF dalam Standar dan Regulasi Ketenagalistrikan Pelaksanaan Kajian Kelayakan Operasi (KKO) dan Kajian Kelayakan Finansial (KKF) di lingkungan PT PLN (Persero) tidak berdiri sendiri, melainkan mengacu pada standar teknis internal perusahaan serta regulasi nasional yang mengatur penyediaan tenaga listrik. Standar tersebut menjadi dasar evaluasi agar setiap proyek pengembangan atau rekonfigurasi jaringan tetap memenuhi prinsip keselamatan, keandalan, mutu pelayanan, dan efisiensi. Dalam aspek teknis operasi, KKO mengacu pada standar seperti SPLN (Standar PLN) yang mengatur perencanaan dan pengoperasian jaringan distribusi tegangan menengah 20 kV. SPLN memuat ketentuan mengenai batas toleransi tegangan, standar pembebanan penghantar, kriteria jatuh tegangan, standar konstruksi jaringan, serta koordinasi sistem proteksi. Evaluasi profil tegangan dalam studi aliran daya, misalnya, harus memastikan bahwa deviasi tegangan tidak melampaui batas yang diperbolehkan dalam standar distribusi. Demikian pula, tingkat pembebanan penyulang tidak boleh melebihi kapasitas hantar arus yang ditetapkan dalam spesifikasi teknis peralatan sesuai SPLN.

Selain SPLN, KKO juga harus memperhatikan ketentuan dalam PUIL (Persyaratan Umum Instalasi Listrik) yang menjadi acuan nasional dalam keselamatan instalasi tenaga listrik. PUIL mengatur prinsip perlindungan terhadap bahaya listrik, sistem pentanahan, serta keandalan instalasi agar aman bagi personel maupun masyarakat. Rekonfigurasi jaringan tidak boleh menurunkan tingkat keselamatan instalasi dan harus tetap memenuhi persyaratan teknis yang berlaku.

Dari sisi regulasi nasional, evaluasi proyek distribusi tenaga listrik juga mengacu pada ketentuan dalam Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2009 tentang Ketenagalistrikan. Undang-undang ini menegaskan bahwa penyedia tenaga listrik wajib menjamin keandalan dan mutu pelayanan kepada konsumen. Oleh karena itu, setiap proyek rekonfigurasi harus mendukung peningkatan kontinuitas pasokan dan kualitas

tegangan sebagai bagian dari kewajiban penyedia tenaga listrik.

Lebih lanjut, standar mutu pelayanan diatur dalam regulasi turunan seperti Peraturan Menteri ESDM Nomor 27 Tahun 2017 tentang Tingkat Mutu Pelayanan dan Biaya yang Terkait dengan Penyaluran Tenaga Listrik oleh PT PLN (Persero). Dalam regulasi ini ditetapkan indikator kinerja seperti SAIDI dan SAIFI sebagai tolok ukur mutu pelayanan. Dengan demikian, hasil KKO yang menunjukkan perbaikan keandalan melalui penurunan risiko gangguan dan peningkatan fleksibilitas manuver jaringan secara langsung mendukung pemenuhan target mutu pelayanan yang diatur oleh kementerian.

Dalam aspek keselamatan dan laik operasi, proyek jaringan juga harus memenuhi ketentuan Sertifikat Laik Operasi (SLO) sesuai regulasi ketenagalistrikan nasional. Artinya, setiap perubahan konfigurasi harus melalui proses verifikasi teknis untuk memastikan instalasi aman dioperasikan sebelum disambungkan secara permanen ke sistem.

Sementara itu, dalam Kajian Kelayakan Finansial (KKF), meskipun analisisnya bersifat ekonomis, pendekatan yang digunakan tetap harus selaras dengan prinsip tata kelola perusahaan dan regulasi investasi BUMN. Analisis seperti Net Present Value (NPV), Benefit Cost Ratio (BCR), dan Internal Rate of Return (IRR) dilakukan untuk memastikan bahwa penggunaan dana perusahaan efisien dan memberikan manfaat jangka panjang. Dalam konteks ini, pengurangan losses dan peningkatan keandalan bukan hanya parameter teknis, tetapi juga indikator efisiensi yang berpengaruh terhadap kinerja korporasi.

Dengan mengacu pada SPLN, PUIL, Undang-Undang Ketenagalistrikan, serta Peraturan Menteri ESDM mengenai mutu pelayanan, KKO dan KKF menjadi instrumen evaluasi yang memiliki dasar hukum dan standar teknis yang jelas. Hal ini memastikan bahwa rekonfigurasi jaringan distribusi 20 kV tidak hanya benar secara perhitungan teknis dan menguntungkan secara finansial, tetapi juga sah secara regulatif dan sesuai dengan kewajiban penyedia tenaga listrik dalam menjamin mutu pelayanan kepada masyarakat.

2.2 Penelitian yang relevan

Referensi yang terkait dengan Analisis Kelayakan Rekonfigurasi Jaringan Tegangan Menengah 20 Kv Dalam Upaya Peningkatan Keandalan Pasokan Listrik Di UP3 Serpong dapat dilihat dari peneliti terdahulu seperti :

1. Menurut M. Ridho Afriza. 2024, dalam jurnal berjudul “Rekonfigurasi Jaringan Distribusi 20kv Di Pt Pln (Persero) Ulp Krueng Geukueh Dengan Metode Binary Particle Swarm Optimization (Bpso)”. Menjelaskan bahwa salah satu tantangan utama dalam menjaga keandalan pasokan daya adalah rugi-rugi daya dalam jaringan distribusi 20 kV, yang mengakibatkan kerugian finansial yang signifikan bagi PT. PLN (Persero) dan memengaruhi kualitas layanan kepada pelanggan. Pada penelitian tersebut mengusulkan penggunaan metode Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) untuk merancang ulang konfigurasi jaringan distribusi 20 kV dengan tujuan mengurangi rugi-rugi daya. Penelitian yang telah dilakukan dengan menggunakan sample yang ada di PT. PLN (Persero) ULP Krueng Geukueh dengan simulasi software Electrical Transient Analyzer Program (ETAP) versi 19.0.1 dan Matlab 2018b, hasil penelitian menunjukkan bahwa rekonfigurasi berhasil mengurangi rugi daya nyata secara signifikan, dengan penurunan dari 19.732 menjadi 19.4 kW.
2. Menurut Reza Rolianda. 2020, dalam jurnal berjudul “Konfigurasi Ulang Jaringan Distribusi 20 kv Menggunakan Metode Newton Raphson”. Mengurangi losses akibat beban yang dapat dilakukan dengan pemecahan beban. Pemecahan beban dilakukan dengan mengurangi beban di suatu penyulang yang memiliki beban besar dimanuver atau dialihkan pada penyulang lain yang memiliki beban yang lebih kecil. Mengurangi beban pada penyulang yang memiliki bebanyang besar sehingga penyulang tersebut memiliki beban efektif yang lebih handal. Beban yang efektif memiliki nilai losses yang lebih bagus dan nilai drop voltage yang lebih rendah sehingga jaringan tersebut lebih handal apabila terjadi gangguan (mudah dimanuver ke penyulang lain). Penyulang GL.01 GI Glugur memiliki beban yang besar. Untuk melakukan pemecahan beban pada penyulang GL.01 dibutuhkan konfigurasi jaringan. Konfigurasi jaringan dilakukan dengan memindahkan sebagian besar penyulang GL.01 ke penyulang GG.01 dan MA.05 berdasarkan simulasi yang dilakukan

nilai losses yang diperoleh sebelum dan sesudah berturut-turut sebesar 9.360,05 Watt dan 2.066,04 Watt., sedangkan nilai drop voltage baik sesudah maupun sebelum yaitu berturut turut 116,498 Volt dan 54,008 Volt. Berdasarkan hasil tersebut didapat saving 7294,01 Watt dan 62,49 Volt.

3. Menurut Taufik Hidayat. 2023, dalam jurnal berjudul “Analisa Rekonfigurasi Jaringan Distribusi 20 kv Di PT PLN Sungai Rumbai”. Menjelaskan bahwa penelitian berdasarkan kondisi tegangan pada sistem 20 Kv di PT PLN (Persero) Rayon Sungai Rumbai, khususnya pada feeder Kota Sungai Rumbai. Jatuh tegangan pada feeder Kota Sungai Rumbai sebelum rekonfigurasi sebesar 3853 Volt, setelah rekonfigurasi jatuh tegangan pada feeder Kota Sungai Rumbai didapatkan sebesar 3011 Volt. Jatuh tegangan pada feeder Kota Sungai Rumbai turun sebesar 4,215%.

Berdasarkan rugi daya pada sistem 20 Kv di PT PLN (Persero) Rayon Sungai Rumbai. Sebelum rekonfigurasi rugi daya di sistem 20 Kv PT PLN Rayon Sungai Rumbai sebesar 0,563 MW, setelah rekonfigurasi rugi daya didapatkan 0,553 MW. Artinya, dengan rekonfigurasi jaringan yang dilakukan dapat menurunkan rugi daya sebesar 0,01 MW dengan persentase turunnya sebesar 1,7%. Berdasarkan Rekonfigurasi yg sudah dilakukan jaringan ini membantu pemerataan beban untuk feeder Kota Sungai Rumbai dan feeder yang direncanakan. Beban feeder Kota Sungai Rumbai sebelum rekonfigurasi sebesar 117,4 Ampere, setelah rekonfigurasi beban feeder Kota Sungai Rumbai menjadi 68 Ampere. Beban feeder Kota Sungai Rumbai turun sebesar 42,078%. Sedangkan pada feeder yang direncanakan, setelah rekonfigurasi didapatkan beban sebesar 49 Ampere.

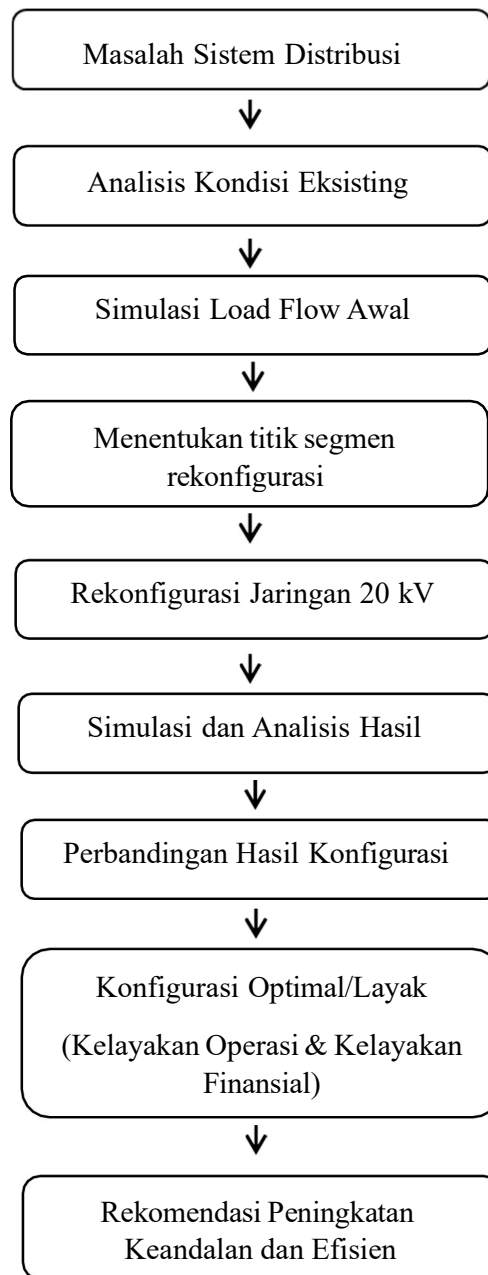
Tabel 1. Penelitian yang Relevan

No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodelogi	Hasil	Riset Gap
1	“Rekonfigurasi Jaringan Distribusi 20kv Di Pt Pln (Persero) Ulp Krueng Geukueh Dengan Metode Binary Particle Swarm Optimizatio n (Bps0)” M. Ridho Afriza. 2024	Masalah yang diangkat pada penelitian ini adalah indikasi rugi -rugi daya dalam jari ngan di stribusi 20 kV yang dapat mengurangi kualitas pelayanan yang diberikan kepada pelanggan.	Pada penelitian ini, akan dilakukan analisa rekonfigurasi jaringan distribusi dengan menggunakan metode optimasi Binary Particle Swarm Optimizati on (BPSO).	Hasil penelitian menunjukkan bahwa rekonfigurasi berhasil mengurangi rugi daya nyata secara signi fikan, dengan penurunan dari 19.732 menjadi 19.4 kW.	Penelitian selanjutnya dapat diperluas dengan menerapkan optimasi multi-objektif yang tidak hanya meminimalka n rugi daya, tetapi juga mempertimba ngkan faktor-faktor penting lainnya seperti perbaikan profil tegangan (voltage profile) atau peningkatan indeks stabilitas tegangan.
2	“Konfigurasi Ulang Jaringan Distribusi 20 kv Menggunakan Metode Newton Raphson”. Reza Rolianda. 2020,	Peningkatan rata-rata beban puncak siang dan malam penyulang GL.01 GI Glugur. Beban penyulang GL.01 yang besar menuntut Penulis untuk melakukan pemecahan beban terhadap penyulang tersebut.	Melalui cara memanuver sebagian beban pada penyulang GL.01 kepada penyulang lain yang berhubungan open loop dengan penyulang GL.01.	Berdasarkan simulasi yang dilakukan nilai losses yang diperoleh sebelum dan sesudah berturut-turut sebesar 9.360,05 Watt dan 2.066,04 Watt., sedangkan nilai drop voltage baik sesudah maupun sebelum yaitu	Penelitian ini menggunakan metode Newton Raphson sebagai dasar perhitungan aliran daya, namun penentuan konfigurasi optimal dilakukan secara manual (memanuver beban). Riset selanjutnya dapat

			berturut turut 116,498 Volt dan 54,008 Volt. Berdasarkan hasil terebut di dapat saving 7294,01 Watt dan 62,49 Volt	membandingkan hasil yang diperoleh dengan menggunakan algoritma optimasi heuristik (misalnya, BPSO, Genetic Algorithm, atau algoritma berbasis swarm lainnya) untuk mendapatkan solusi rekonfigurasi yang lebih optimal dan otomatis, terutama untuk sistem jaringan yang kompleks.	
3	“Analisa Rekonfigurasi Jaringan Distribusi 20 kv Di PT PLN Sungai Rumbai”. Taufik Hi dayat. 2023.	Kondisi jaringan distribusi yang tidak optimal akibat dari perubahan parameter-parameter saluran distribusi.	Dengan cara menentukan perbandingan pola operasi sebelum dan sesudah rekonfigurasi mana yang lebih baik diterapkan di penyulang tersebut tentunya dengan losses dan drop tegangan yang relatif kecil. Sebagai perbandingan penulis juga melakukan perhitungan	Berdasarkan kondisi tegangan jatuh tegangan sebelum rekonfigurasi 3853V, setelah rekonfigurasi sebesar 3011 V. Jatuh tegangan turun 4,215%. Berdasarkan rugi daya Sebelum rekonfigurasi 0,563 MW, setelah rekonfigurasi 0,553 MW. Dapat menurunkan	algoritma optimasi untuk memvalidasi atau melampaui hasil yang diperoleh dari analisis manual/simulasi Sincal.

menggunakan aplikasi Etap 19.0.1.	rugi daya 0,01 MW persentase turunnya 1,7%. Berdasarkan Rekonfigurasi beban feeder sebelum 117,4A , setelah rekonfigurasi 68 A. Turun sebesar 42,078%, sedangkan pada feeder yang direncanakan, setelah rekonfigurasi didapatkan beban sebesar 49 Ampere.
--	--

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 9. Kerangka Pemikiran