

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Pada penelitian dilakukan tinjauan literatur untuk menemukan referensi yang relevan dengan pokok bahasan penelitian ini. Referensi ini dapat berasal dari buku, artikel, jurnal, atau proposal skripsi yang relevan. Beberapa referensi yang berkaitan dengan penelitian ini, yaitu :

1. Menurut Utama, Pancene dan Abiyasa di tahun 2018 pada paper yang berjudul “*Optimization of Load Balancing with Feeder Network Reconfiguration Using ETAP Simulation*” membahas penelitian terkait rekonfigurasi untuk menurunkan losses dengan melakukan *switching* pada *feeder* untuk optimalisasi jaringan distribusi dilakukan pada Penyulang Tangeb di Kawasan Canggu Provinsi Bali. Sebelum adanya rekonfigurasi terdapat 84 bus yang memiliki kualitas tegangan dibawah 19 kV, setelah dilakukan rekonfigurasi secara manual dengan memasukan saklar LBS Pemaron-Munggu yang mengakibatkan adanya peralihan beban Penyulang Tangeb ke Penyulang Kaba terdapat perbaikan kualitas tegangan yang terkecil menjadi 19,275 kV Penyulang Tangeb dan 19,238 kV Penyulang Kaba. Selain itu terjadi penurunan *losses* dari yang sebelumnya 226,74 kW menjadi 178,73 kW. Kekurangan dari penelitian yang dilakukan proses *switching* masih dilakukan secara manual oleh petugas teknik di lapangan dan proses ini masih kurang optimal karena tidak bisa dilakukan secara real-time atau mengikuti pola beban setiap jam.[9]
2. Menurut Luis A. Gallego Pareja, Jesus M. Lopez-Lezama dan Oscar Gomez Carmona tahun 2023 pada paper yang berjudul “*Optimal Feeder Reconfiguration and Placement of Voltage Regulator in Electrical Distribution Networks Using a Linear Mathematical Model*” penelitian yang membahas tentang perbaikan tegangan dan megurangi rugi rugi daya dengan memasang *Voltage Regulator* (VR) dan melakukan *Distribution Network Reconfiguration* (DNR) dalam jaringan distribusi radial. Hasilnya didapatkan rekomendasi pemodelan jaringan baru dan diberikan lokasi strategis dalam menempatkan VR. Kekurangan dari simulasi ini masih berupa kajian awal dengan hasil berupa rekomendasi, sangat minim integrasi dengan model peramalan beban, minimnya evaluasi kinerja pasca rekonfigurasi dan minim implementasi teknologi. [10], [11], [12]

3. Menurut Daud. J. G Dkk tahun 2018 pada paper yang berjudul “*Reconfiguration Distribution Networks with Ant Colony*” Pada jaringan distribusi radial di Penyulang Barata dan Sulawesi dengan hasil 10 rekomendasi switching dengan metode Ant Colony yang mampu menurunkan losses sebesar 3.6 kW. Penelitian ini masih memiliki kekurangan dimana penelitian masih berupa perencanaan dan switching harus dilakukan oleh pihak konstruksi melalui pecah beban JTM (Jaringan Tegangan Menengah). [5]
4. Dalam penelitiannya yang berjudul *A survey on different techniques for distribution network reconfiguration*, Mishra dkk tahun 2024 menjelaskan bahwa salah satu tujuan utama rekonfigurasi jaringan distribusi adalah untuk mengurangi rugi-rugi daya yang meningkat akibat topologi radial dan suplai tunggal pada jaringan distribusi. Dengan menggabungkan rekonfigurasi jaringan dan alokasi kapasitor secara simultan, serta menggunakan metode optimasi Autonomous Group Particle Swarm Optimization, penelitian ini menunjukkan pengurangan rugi-rugi daya yang signifikan. Setelah penempatan kapasitor yang optimal, ukuran dan lokasi generator tersebar (Distributed Generators/DGs) juga dioptimalkan untuk meningkatkan injeksi daya aktif, sehingga semakin menurunkan rugi-rugi daya pada jaringan. Namun penelitian ini hanya berfokus pada optimasi statis dan belum mempertimbangkan dinamika beban waktu nyata (*real-time load variation*).[4]

Berbagai penelitian sebelumnya yang telah dipaparkan memiliki kesamaan dengan penelitian yang sedang penulis lakukan, yaitu mengenai rekonfigurasi jaringan distribusi guna meningkatkan efisiensi distribusi tenaga listrik. Akan tetapi, penelitian ini memiliki perbedaan dari penelitian-penelitian terdahulu karena akan membahas inovasi dalam penerapan rekonfigurasi jaringan distribusi dengan memanfaatkan fasilitas *Remote Control* (RC) SCADA yang telah tersedia pada gardu distribusi.

Tabel 2. 1 Perbandingan penelitian yang akan dilakukan dengan penelitian yang sudah dilakukan

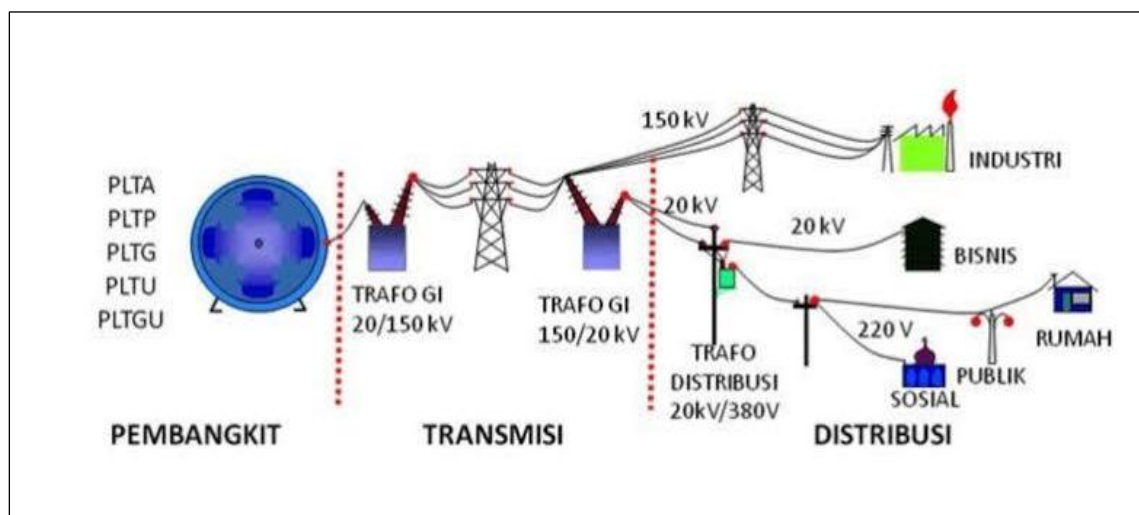
No	Judul	Fokus Utama	Variabel yang Dianalisis	Metodologi	Kondisi Operasi	Gap Riset
1	Optimization of Load Balancing with Feeder Network Reconfiguration Using ETAP Simulation (Sutama, Pancene dan Abiyasa) 2018	Load balancing & rekonfigurasi feeder	Losses, Profil tegangan	Load flow Newton-Raphson (ETAP)	Normal	Penurunan losses dan perbaikan kualitas tegangan telah dilakukan dengan memanfaatkan data riil dan simulasi ETAP. Namun, proses rekonfigurasi jaringan masih dilaksanakan secara manual oleh pihak pelaksana melalui pengoperasian <i>Load Break Switch</i> (LBS) secara langsung di lapangan.
2	Reconfiguration Distribution Networks with Ant Colony (Daud. J. G Dkk) 2018	Rekonfigurasi jaringan berbasis Ant Colony	Losses, Keseimbangan beban	Ant Colony Optimization	Normal	Penurunan losses dan penyeimbangan beban feeder dilakukan dengan memindahkan sebagian beban dari jaringan yang mengalami kelebihan beban. Proses ini masih dilaksanakan secara manual oleh pihak konstruksi melalui metode potong–sambung pada jaringan tegangan menengah.
3	Optimal Feeder Reconfiguration and Placement of Voltage Regulator in Electrical Distribution Networks Using a Linear Mathematical Model (Luis A. Gallego Pareja, Jesus M. Lopez-Lezama dan Oscar Gomez Carmona)2023	Optimasi global rekonfigurasi dan penempatan regulator	Losses, Profil tegangan	MILP (Linear Model)	Normal	Penelitian ini berfokus pada perbaikan kualitas tegangan melalui pemasangan Voltage Regulator pada titik-titik strategis, sehingga biaya investasi dapat ditekan tanpa mengurangi efektivitas peningkatan kualitas tegangan.
4	A survey on different techniques for distribution network reconfiguration (Mishra Dkk) 2024	Survey teknik DNR modern	Losses, Profil tegangan	Studi literatur & simulasi IEEE 33-bus	Normal	Membahas beberapa study dalam upaya menurunkan losses dan memperbaiki tegangan dengan sistem distribusi modern.
5	Penelitian Ini	Pemodelan strategi rekonfigurasi dalam sistem distribusi berbasis SCADA	Losses, Profil tegangan, Keseimbangan beban, Waktu automasi	Simulated Annealing + real-time trigger SCADA	Normal & N-1 Contingency	Mengisi celah integrasi rekonfigurasi feeder real-time untuk mendukung FLISR agar restorasi tetap dapat dilakukan tanpa melampaui batas arus feeder, sekaligus menekan losses.

2.2 Landasan Teori

Teori yang digunakan dalam penelitian ini adalah teori yang berkaitan dengan pemodelan rekonfigurasi jaringan spindle distribusi 20 kV berbasis SCADA. Teori ini menjelaskan konsep-konsep utama yang menjadi acuan dalam penelitian, mulai dari teori sistem distribusi tenaga listrik, prinsip kerja SCADA, hingga metode rekonfigurasi jaringan untuk meningkatkan efisiensi.

2.2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah kumpulan komponen yang saling terintegrasi dan bekerja secara bersamaan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik bagi pengguna. Secara umum, sistem ini mencakup berbagai aspek, mulai dari pembangkitan listrik, penyaluran melalui saluran transmisi, pengolahan di gardu induk, hingga pendistribusian daya listrik kepada konsumen akhir.



Gambar 2. 1 *Sistem Tenaga Listrik*

Gambar 2.1 menggambarkan sistem tenaga listrik dari pembangkit hingga konsumen akhir melalui berbagai tingkatan tegangan dan jaringan distribusi. Proses ini diawali dari pembangkit utama yang menghasilkan daya dalam jumlah besar, seperti pembangkit listrik tenaga batu bara, tenaga nuklir, dan tenaga air. Energi listrik yang dihasilkan disalurkan melalui sistem tegangan ekstra tinggi (Extra High Voltage), yang umumnya menggunakan arus bolak-balik (AC) dengan beberapa aplikasi HVDC, guna meningkatkan efisiensi dalam penyaluran daya jarak jauh.

Setelah melewati jaringan tegangan ekstra tinggi, listrik dialirkan ke jaringan tegangan tinggi (High Voltage), yang menghubungkan pembangkit berkapasitas menengah

dan kecil, seperti pembangkit industri, dengan sistem distribusi. Pada tahap ini, daya mulai dialirkan ke pusat-pusat beban yang lebih dekat dengan pelanggan.

Selanjutnya, listrik diteruskan ke jaringan transmisi dan distribusi, yang terdiri dari tegangan menengah dan rendah, untuk disalurkan ke wilayah perkotaan dan pedesaan. Pada tahap tegangan rendah, listrik disalurkan melalui gardu distribusi untuk memastikan daya dapat digunakan oleh pelanggan di berbagai sektor, termasuk pemukiman di kota maupun di daerah terpencil.[13]

2.2.2 Jaringan Distribusi

Distribusi tenaga listrik merupakan tahap penyaluran energi dari gardu induk step down menuju pelanggan akhir. Sistem ini terdiri dari dua jenis jaringan, yaitu distribusi primer dan distribusi sekunder. Distribusi primer, yang dikenal sebagai jaringan tegangan menengah (JTM), beroperasi pada tegangan 11 kV atau 20 kV. Sementara itu, distribusi sekunder, atau jaringan tegangan rendah (JTR), beroperasi pada tegangan 380 V untuk sistem tiga fasa dan 220 V untuk satu fasa.[13]

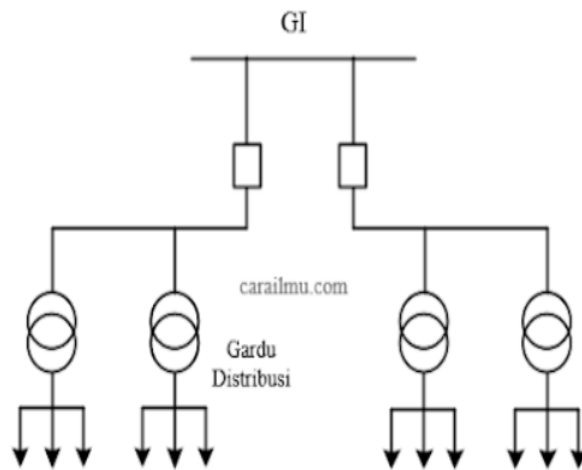
Sebelum listrik dapat digunakan oleh pelanggan umum, tegangan pada jaringan tegangan menengah (20 kV) perlu diturunkan menjadi 380/220 V melalui transformator step down yang terdapat di gardu distribusi, sehingga sesuai dengan batas aman untuk peralatan rumah tangga. Namun, pelanggan industri seperti pabrik umumnya membutuhkan pasokan listrik dengan tegangan menengah (20 kV) dan memiliki peralatan sendiri untuk menyesuaikan tegangan sesuai dengan kebutuhan operasional mereka. Distribusi tenaga listrik memiliki beberapa fungsi utama, diantaranya menyalurkan daya listrik dari sistem transmisi ke pelanggan, mendistribusikan energi ke berbagai lokasi, serta menurunkan tegangan dari 20 kV menjadi 380/220 V agar dapat digunakan oleh pelanggan secara aman dan efisien.

Jaringan distribusi memiliki beberapa sistem operasi, berikut ini adalah beberapa sistem operasi pada jaringan distribusi yang ada di Indonesia:

1. Sistem Radial

Sistem radial adalah konfigurasi jaringan distribusi tenaga listrik di mana aliran daya mengalir dari sumber atau gardu induk ke pelanggan melalui satu jalur utama tanpa adanya cabang yang kembali ke sumber. Dalam sistem ini, setiap jalur distribusi hanya terhubung ke satu sumber pasokan, sehingga arus listrik mengalir secara searah, dimulai dari pusat hingga mencapai titik akhir jaringan.[14]

Keunggulan utama dari sistem radial terletak pada kesederhanaannya, baik dalam hal konstruksi maupun operasional. Karena desainnya yang lebih sederhana, sistem ini umumnya diterapkan di daerah dengan kepadatan beban rendah, seperti wilayah perdesaan. Selain itu, biaya instalasinya relatif lebih rendah dibandingkan dengan konfigurasi jaringan lainnya.



Gambar 2. 2 *Sistem Radial*

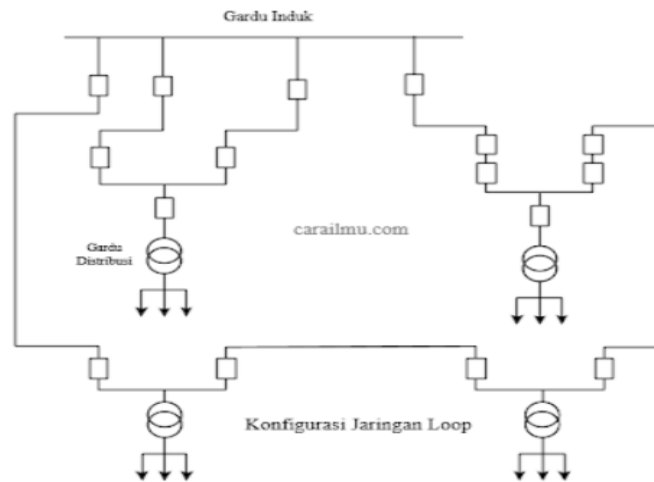
Namun, kelemahan utama dari sistem radial adalah tingkat keandalannya yang lebih rendah. Jika terjadi gangguan di salah satu titik pada jalur utama, seluruh area yang berada di hilir gangguan tersebut akan mengalami pemadaman, karena tidak adanya jalur alternatif untuk penyaluran listrik. Hal ini menjadikan sistem radial kurang efektif untuk daerah dengan kebutuhan keandalan tinggi, seperti kawasan industri atau perkotaan dengan konsumsi listrik yang besar.[13]

2. Sistem Loop

Sistem loop umumnya diterapkan di wilayah dengan kepadatan beban tinggi, seperti perkotaan atau kawasan industri, di mana keandalan pasokan listrik menjadi faktor krusial dalam mendukung aktivitas yang berkelanjutan. Konfigurasi ini memungkinkan perawatan jaringan dilakukan dengan lebih mudah, karena sebagian jalur dapat dimatikan untuk perbaikan tanpa harus menghentikan suplai listrik ke seluruh jaringan.

Meskipun memiliki tingkat keandalan yang lebih tinggi dibandingkan sistem radial, sistem loop memerlukan biaya instalasi yang lebih besar. Hal ini disebabkan oleh kebutuhan akan lebih banyak peralatan dan kabel guna menghubungkan seluruh

titik dalam sirkuit tertutup. Gambar 2.3 menunjukkan bahwa sistem loop merupakan konfigurasi jaringan distribusi di mana aliran listrik membentuk jalur tertutup atau berbentuk lingkaran.

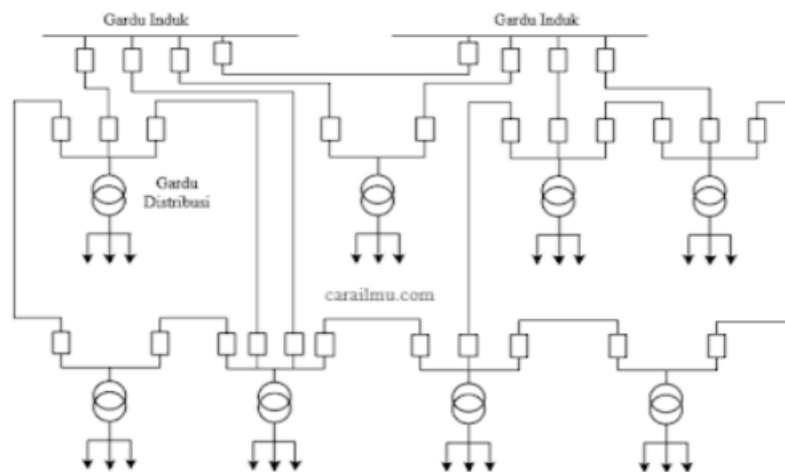


Gambar 2. 3 *Sistem Loop*

Pada sistem ini, setiap titik dalam jaringan memiliki dua sumber pasokan, yakni dari sisi kiri maupun sisi kanan, sehingga meningkatkan keandalan distribusi listrik. Jika terjadi gangguan di salah satu sisi jaringan, listrik dapat dialihkan melalui jalur lain, memungkinkan pelanggan tetap mendapatkan pasokan tanpa mengalami pemadaman [15].

3. Sistem Kluster

Sistem kluster merupakan konfigurasi jaringan distribusi listrik yang mengelompokkan beban atau pelanggan ke dalam beberapa kluster, di mana setiap kluster dilayani oleh satu gardu distribusi atau sumber listrik tertentu. Dalam kondisi tertentu, kluster-kluster ini dapat saling terhubung, memungkinkan adanya pasokan listrik alternatif jika terjadi gangguan pada salah satu kluster.

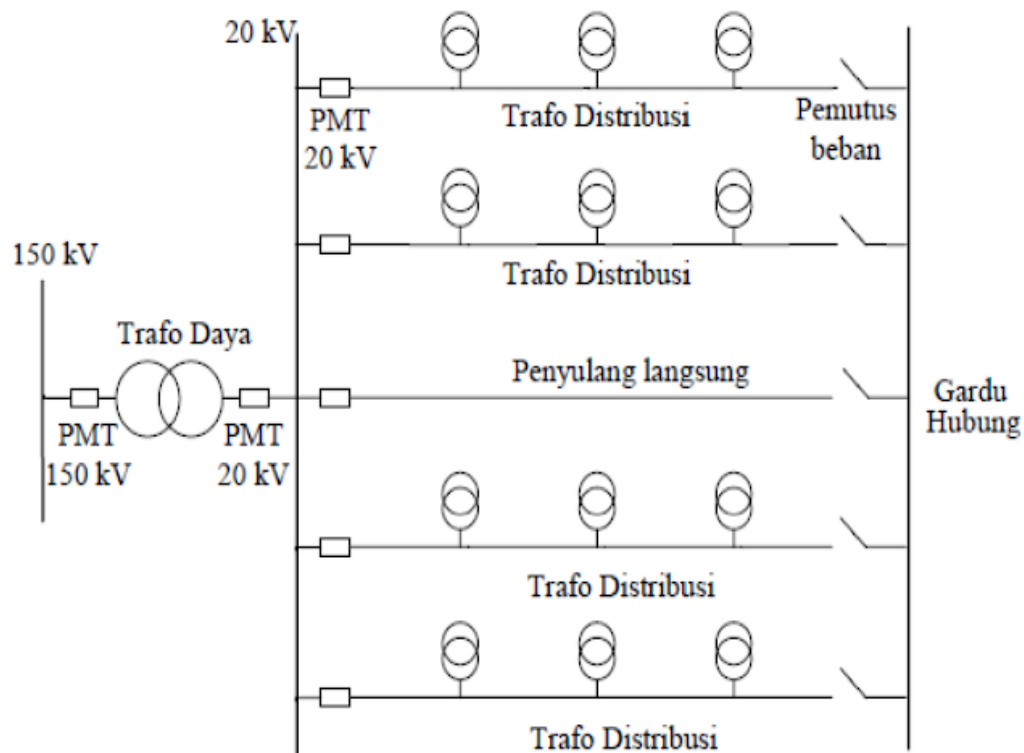


Gambar 2. 4 *Sistem Kluster*

Sistem ini banyak diterapkan di kawasan perkotaan atau industri, di mana beban listrik dikelompokkan secara geografis untuk memudahkan pengelolaan dan meningkatkan keandalan jaringan. Jika terjadi gangguan pada salah satu kluster, aliran listrik dapat dialihkan melalui jalur penghubung atau tie line, sehingga pelanggan tetap mendapatkan pasokan tanpa mengalami pemadaman total. Selain meningkatkan keandalan, sistem kluster juga mempermudah manajemen jaringan dan proses pemeliharaan, karena gangguan atau perbaikan dapat dilakukan pada satu kluster tanpa mengganggu operasional kluster lainnya.

4. Sistem Spindle

Gambar 2.6 menggambarkan sistem spindle pada jaringan distribusi 20 kV, yang memiliki karakteristik khusus dalam konfigurasi aliran dayanya. Pada kondisi normal, feeder utama beroperasi dengan Load Break Switch (LBS) di Gardu Hubung dalam keadaan terbuka. Hal ini memungkinkan pengaturan distribusi daya yang lebih fleksibel dan meminimalkan gangguan pada jaringan utama.



Gambar 2. 5 Sistem Spindle

Selain itu, setiap Gardu Hubung dalam sistem spindle dilengkapi dengan Penyulang Langsung (Feeder Express) yang berfungsi sebagai feeder cadangan (backup feeder). Peran utama feeder ini adalah sebagai jalur alternatif ketika terjadi gangguan pada feeder utama yang membawa beban. Dengan adanya Feeder Express, sistem distribusi tetap dapat mempertahankan pasokan listrik kepada pelanggan dengan cara mengalihkan aliran daya melalui jalur lain, sehingga mengurangi kemungkinan pemadaman listrik secara luas.

Konfigurasi sistem spindle ini dirancang untuk meningkatkan keandalan jaringan distribusi 20 kV dengan memastikan adanya jalur cadangan yang dapat diaktifkan secara cepat saat terjadi gangguan. Selain itu, sistem ini memungkinkan pengelolaan beban yang lebih efisien serta mempermudah proses pemeliharaan dan perbaikan jaringan tanpa harus memutus seluruh pasokan listrik di area terdampak.[13]

2.2.3 Jenis Saluran Jaringan Distribusi

Saluran distribusi merupakan jaringan transmisi tegangan menengah yang berperan dalam menyalurkan energi listrik dari gardu induk ke gardu distribusi hingga akhirnya mencapai pelanggan. Jaringan ini memastikan bahwa listrik yang dihasilkan dari pembangkit

dan dikirim melalui sistem transmisi dapat diterima oleh konsumen dengan tegangan yang telah disesuaikan sesuai kebutuhan mereka.

Saluran distribusi terdiri dari berbagai komponen, termasuk kabel, tiang listrik, gardu distribusi, serta perangkat pendukung lainnya yang dirancang untuk memastikan penyaluran daya listrik berjalan dengan andal dan efisien. Jaringan ini berfungsi mendistribusikan listrik dari gardu induk ke berbagai jenis pelanggan, seperti rumah tangga, bangunan komersial, serta fasilitas industri, sehingga memungkinkan akses listrik yang stabil dan berkualitas bagi pengguna akhir.[13]

Jaringan distribusi memiliki beberapa jenis saluran, berikut ini adalah beberapa jenis saluran pada jaringan distribusi yang ada di Indonesia:

1. SUTM (Saluran Udara Tegangan Menengah)

SUTM merupakan sistem distribusi listrik yang menggunakan konduktor yang dipasang di atas tiang listrik untuk menyalurkan daya. Jaringan ini beroperasi pada tegangan menengah, biasanya dalam rentang 11 kV sampai dengan 20 kV. SUTM umumnya diterapkan di wilayah dengan jarak antar pelanggan yang cukup jauh, seperti daerah pedesaan atau pinggiran kota, karena lebih ekonomis.

Konstruksi SUTM terdiri dari tiang penyangga, konduktor, isolator, serta berbagai perlengkapan pendukung yang memastikan kelancaran aliran listrik. Meskipun biaya pemasangannya relatif lebih rendah, sistem ini memiliki kerentanan yang lebih tinggi terhadap gangguan eksternal, seperti cuaca buruk, pohon tumbang, atau gangguan dari hewan, yang dapat menyebabkan pemadaman listrik atau gangguan dalam distribusi daya. [16], [17]

2. SKTM (Saluran Kabel Tegangan Menengah)

Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM) adalah sistem distribusi listrik yang menggunakan kabel bawah tanah atau kabel tertutup yang ditanam di dalam tanah atau ditempatkan dalam jalur khusus. Jaringan ini beroperasi pada tegangan menengah, umumnya 11 kV hingga 20 kV, dan sering digunakan di kawasan perkotaan atau area yang membutuhkan tampilan lebih estetik serta tingkat keamanan yang lebih tinggi, seperti pusat kota, bandara, dan kawasan industri.

Dibandingkan dengan saluran udara, SKTM lebih terlindungi dari gangguan eksternal, seperti cuaca ekstrem atau gangguan dari vegetasi yang sering menjadi masalah pada jaringan udara. Namun, sistem ini memiliki biaya instalasi dan

perawatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM). Selain itu, jika terjadi gangguan, pelaksanaan perbaikannya cenderung lebih kompleks dan membutuhkan waktu lebih lama. [18], [19], [20]

3. MVTIC (*Medium Voltage Transmission in Cables*)

MV Tic atau "Medium Voltage Transmission in Cables" adalah teknologi distribusi listrik yang menggunakan kabel tegangan menengah khusus untuk menyalurkan daya. Teknologi ini menggabungkan keunggulan dari saluran udara dan saluran kabel bawah tanah, sehingga menawarkan solusi distribusi yang lebih andal dan aman. MV Tic menggunakan kabel berisolasi kuat, yang dilengkapi dengan lapisan pelindung tambahan guna meningkatkan daya tahan terhadap berbagai gangguan eksternal.

Sistem ini sangat ideal untuk diterapkan di wilayah dengan kepadatan penduduk tinggi atau kawasan industri yang memerlukan perlindungan ekstra terhadap gangguan eksternal. Dibandingkan dengan saluran udara konvensional, MV Tic memiliki keandalan yang lebih tinggi serta perlindungan yang lebih baik, meskipun biaya investasi dan pemasangannya relatif lebih besar. [21], [22]

2.2.4 Smart Grid Distribution

Smart Grid dalam sistem distribusi merupakan inovasi dalam jaringan listrik yang mengintegrasikan teknologi digital dan otomasi untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, dan fleksibilitas dalam penyaluran daya listrik. Sistem ini memungkinkan komunikasi dua arah antara penyedia listrik dan pelanggan, serta mendukung pemantauan dan pengendalian jaringan secara real-time.

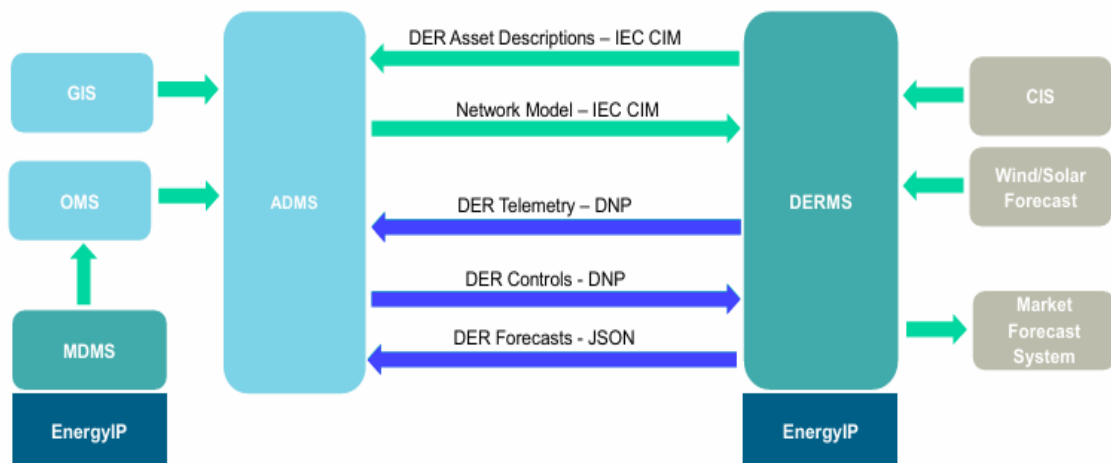
Dengan penerapan Smart Grid, distribusi tenaga listrik menjadi lebih adaptif terhadap perubahan beban dan kondisi jaringan, sehingga dapat mengurangi losses, mempercepat deteksi serta pemulihan dari gangguan, dan meningkatkan kestabilan sistem secara keseluruhan. Teknologi seperti SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), sensor pintar, smart meter, dan remote control memainkan peran penting dalam mendukung operasional jaringan distribusi berbasis Smart Grid. [23], [24]

Selain itu, Smart Grid juga mendukung integrasi energi terbarukan dalam sistem distribusi, seperti tenaga surya dan angin, serta memfasilitasi penggunaan kendaraan listrik

(EV) dengan lebih efisien. Dengan adanya sistem ini, pelanggan juga dapat lebih aktif dalam mengelola konsumsi listrik mereka melalui informasi yang tersedia secara real-time, sehingga mendorong penggunaan energi yang lebih hemat dan berkelanjutan.

Implementasi Smart Grid dalam jaringan distribusi 20 kV dapat meningkatkan efisiensi operasional, mengoptimalkan rekonfigurasi jaringan, serta memastikan pasokan listrik yang lebih andal dan berkualitas bagi pelanggan.

Gambar 2.6 merupakan rencana Smart Grid Jakarta yang akan diterapkan, rencana pengembangan smart grid distribusi ke depan bertumpu pada penerapan *Advanced Distribution Management System* (ADMS) yang akan mengintegrasikan berbagai sistem seperti *Geographic Information System* (GIS), *Outage Management System* (OMS), dan *Meter Data Management System* (MDMS) ke dalam satu platform yang terpusat.



Gambar 2. 6 Future Smart Grid Jakarta

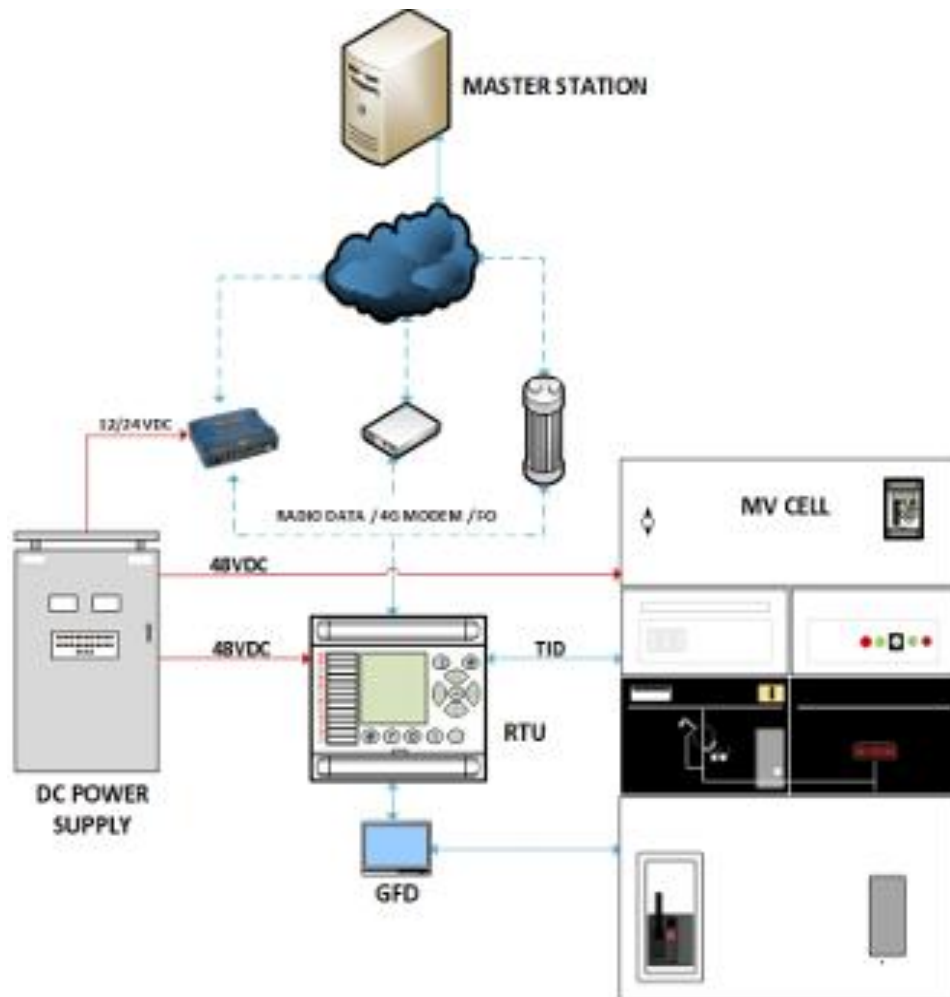
Advanced Distribution Management System (ADMS) merupakan inti dari sistem otomasi dalam Smart Grid distribusi, berfungsi sebagai pusat kendali yang mengintegrasikan berbagai teknologi cerdas untuk memastikan keandalan, efisiensi, dan fleksibilitas jaringan distribusi listrik. Sebagai otak dari sistem otomasi, ADMS memungkinkan pengelolaan jaringan distribusi secara lebih adaptif, , dan berbasis data, menjadikannya komponen utama dalam transformasi jaringan listrik konvensional menjadi *Smart Grid*.

2.2.5. SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) adalah sistem kendali terpusat yang digunakan untuk memantau, mengendalikan, dan mengumpulkan data dari proses industri atau infrastruktur penting secara real-time. Sistem ini terdiri dari beberapa

komponen utama, seperti Remote Terminal Units (RTU) yang berfungsi mengumpulkan data dari lapangan, serta Master Terminal Unit (MTU) yang bertindak sebagai pusat pemrosesan data dan pengendalian utama. Data yang dikumpulkan dikirim ke Human-Machine Interface (HMI), memungkinkan operator untuk memantau kondisi operasional serta melakukan kontrol jarak jauh terhadap perangkat yang terhubung. Dalam sistem distribusi listrik, SCADA memiliki peran penting dalam pemantauan beban secara real-time dan pengendalian jarak jauh peralatan listrik yang dikenal sebagai Remote Control (RC). Dengan kemampuannya dalam mengintegrasikan sensor dan perangkat kendali, SCADA memastikan operasi jaringan berjalan lebih efisien, aman, dan andal, serta mendukung pengumpulan data historis untuk analisis kinerja jaringan, perencanaan pemeliharaan preventif, dan pengambilan keputusan strategis.

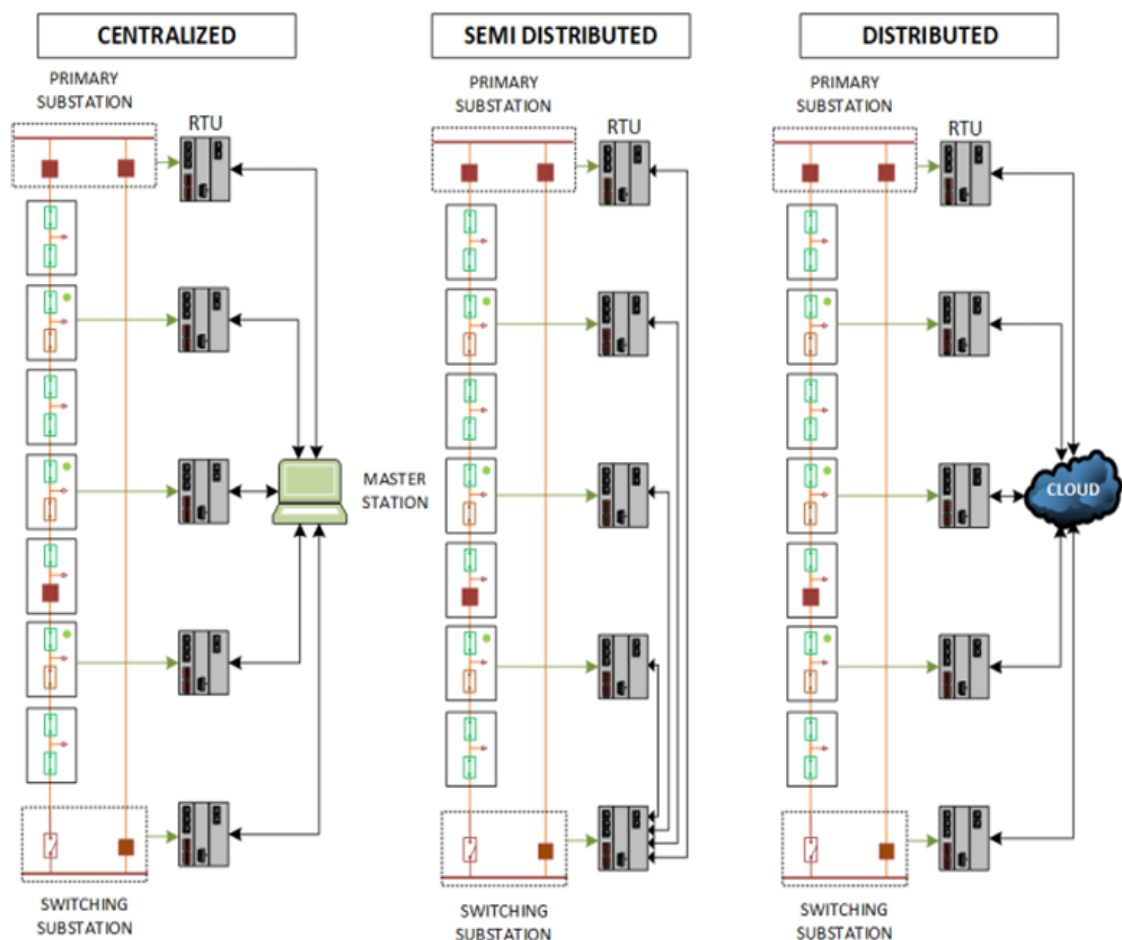
Dalam konteks Smart Grid, SCADA menjadi elemen kunci dalam meningkatkan efisiensi, stabilitas, dan keandalan jaringan distribusi listrik dengan memungkinkan respons cepat terhadap perubahan beban atau gangguan. Gambar 2.7 menunjukkan bahwa sistem SCADA terdiri dari beberapa komponen utama, termasuk Master Station sebagai pusat kendali dan pemantauan yang menerima data dari perangkat lapangan melalui jaringan komunikasi seperti radio, modem 4G, atau serat optik. Data tersebut dikumpulkan oleh Remote Terminal Unit (RTU), yang berfungsi untuk mengambil informasi dari peralatan lapangan, seperti status sakelar dan parameter operasional, serta mengirimkan perintah kendali dari Master Station ke perangkat tersebut. Selain itu, Ground Fault Detector (GFD) digunakan untuk mendeteksi gangguan arus tanah yang dapat merusak jaringan, sementara DC Power Supply berperan dalam menyediakan daya DC bagi RTU, GFD, dan sistem komunikasi lainnya guna memastikan stabilitas operasional perangkat.



Gambar 2. 7 Komponen SCADA

Komponen lain dalam sistem ini adalah Medium Voltage Cell (MV Cell), yang berfungsi sebagai panel distribusi tegangan menengah dan dilengkapi dengan switchgear yang dapat dikendalikan dari jarak jauh melalui SCADA untuk mengatur aliran listrik serta melindungi jaringan dari gangguan. Dengan kemampuan pemantauan, deteksi dini gangguan, dan pengendalian jarak jauh, SCADA meningkatkan efisiensi operasional serta keandalan jaringan distribusi listrik, memungkinkan sistem untuk beroperasi lebih responsif dan adaptif terhadap berbagai kondisi operasional.

Dalam sistem otomasi SCADA distribusi, terdapat tiga model komunikasi utama, yaitu Centralized, Semi Distributed, dan Distributed. Masing-masing memiliki keunggulan dan kelemahan dalam implementasi di jaringan distribusi listrik. Namun, sistem Centralized menjadi solusi yang lebih unggul dan direkomendasikan karena menawarkan pengendalian terpusat yang lebih efisien, mudah dikelola, dan lebih andal dalam operasi jaringan distribusi.



Gambar 2. 8 Model Komunikasi SCADA

Pada sistem Centralized, seluruh kendali jaringan berada di Master Station, yang berfungsi sebagai pusat pemantauan, analisis, dan pengendalian. Semua perangkat lapangan, seperti RTU di Primary Substation dan Switching Substation, terhubung langsung ke Master Station melalui berbagai media komunikasi, termasuk radio, modem 4G, dan serat optik (FO). Keunggulan utama dari sistem ini adalah konsistensi dalam pengelolaan data dan koordinasi operasi, sehingga pengambilan keputusan lebih cepat dan terpusat, mengurangi risiko kesalahan akibat sistem yang terlalu terfragmentasi.

Dibandingkan dengan sistem Semi Distributed, yang mengandalkan RTU bantu di Switching Substation dan hanya mendukung komunikasi berbasis serat optik (FO), sistem Centralized lebih fleksibel dalam pemilihan media komunikasi, memungkinkan integrasi dengan berbagai teknologi yang ada tanpa ketergantungan pada satu jenis infrastruktur. Selain itu, dibandingkan dengan sistem Distributed, yang bergantung pada komunikasi berbasis cloud, sistem Centralized lebih terkontrol dan memiliki keamanan data yang lebih

tinggi, karena semua komunikasi terjadi dalam jaringan internal tanpa harus mengandalkan infrastruktur eksternal.

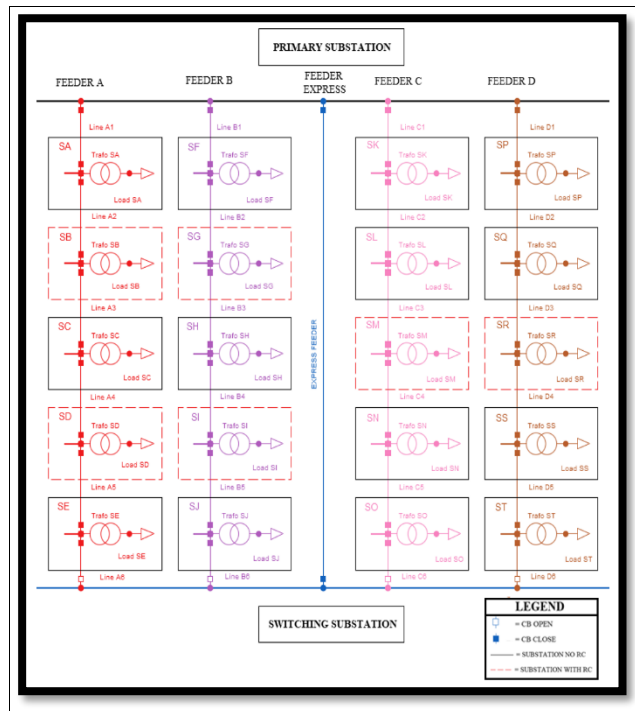
Keunggulan lain dari sistem Centralized adalah stabilitas operasional yang lebih baik. Dengan pusat kendali tunggal, monitoring jaringan dapat dilakukan secara real-time, memungkinkan deteksi gangguan lebih cepat dan tindakan korektif yang lebih efektif. Selain itu, sistem ini lebih mudah dioperasikan dan dikelola, karena semua keputusan dan kendali berada dalam satu titik koordinasi, meminimalkan kompleksitas dalam konfigurasi dan pemeliharaan sistem.

Dengan mempertimbangkan keandalan, fleksibilitas, keamanan, dan kemudahan pengelolaan, sistem Centralized menjadi solusi terbaik dalam otomasi SCADA distribusi. Sistem ini lebih cocok untuk memastikan efisiensi operasional, mengoptimalkan rekonfigurasi jaringan, dan meningkatkan keandalan pasokan listrik di berbagai skenario distribusi tenaga listrik.

2.2.6 Rekonfigurasi Jaringan

Sistem spindle sebelum dilakukan rekonfigurasi memiliki pola operasi di mana penyulang berbeban beroperasi secara normal untuk melayani distribusi daya ke pelanggan melalui Gardu Hubung. Dalam kondisi ini, sebagian besar arus listrik disuplai melalui penyulang utama, sehingga beban cenderung terpusat pada jalur-jalur tertentu. Sementara itu, terdapat penyulang ekspres atau penyulang cadangan yang pada kondisi normal tidak berbeban dan hanya difungsikan sebagai backup ketika terjadi gangguan atau kondisi darurat. Penyulang ekspres ini sebenarnya memiliki potensi untuk membantu pemerataan beban dan mengurangi susut, namun pada konfigurasi awal sistem spindle, potensi tersebut belum dimanfaatkan secara optimal.

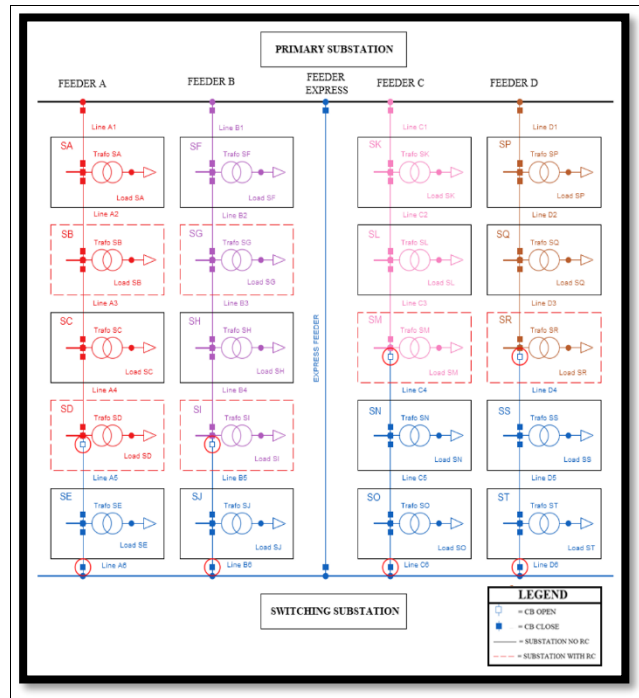
Rekonfigurasi jaringan tegangan menengah adalah suatu proses pengaturan ulang topologi jaringan distribusi dengan cara mengubah kondisi operasi peralatan hubung seperti Load Break Switch (LBS), recloser, dan sectionalizer, tanpa melakukan penambahan sumber atau perubahan konstruksi jaringan utama[25]. Tujuan rekonfigurasi adalah untuk memperoleh konfigurasi jaringan yang paling optimal dalam hal pemerataan beban, penurunan susut daya, perbaikan profil tegangan, peningkatan keandalan, serta efisiensi pengoperasian sistem distribusi. Rekonfigurasi ini dapat dilakukan secara manual maupun otomatis berbasis sistem SCADA, sehingga memungkinkan pengaturan jaringan dilakukan secara cepat, fleksibel, dan terkontrol[26].



Gambar 2. 9 Sistem Spindle Normal Operasi pada Gardu Hubung Sebelum Rekonfigurasi

Pada Gambar 2.9 ditunjukkan topologi jaringan pada sistem spindle, di mana setiap penyulang bermuara pada Gardu Hubung dengan kondisi jaringan *normally open* (NO) di titik tersebut. Konfigurasi ini menunjukkan bahwa pada kondisi awal, penyulang ekspres belum dimanfaatkan dalam penyaluran daya dan hanya difungsikan sebagai penyulang cadangan.

Setelah dilakukan rekonfigurasi jaringan, terjadi perubahan topologi jaringan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.10. Pada konfigurasi ini, penyulang berbeban tidak selalu beroperasi dalam kondisi *normally open* (NO) di Gardu Hubung. Selain itu, penyulang ekspres mulai dioperasikan secara aktif dan berkontribusi dalam proses penyaluran daya, sehingga tidak lagi hanya berfungsi sebagai cadangan gangguan, tetapi juga berperan dalam optimalisasi kinerja jaringan distribusi.



Gambar 2. 10 Sistem Spindle pada Gardu Hubung Setelah Rekonfigurasi

2.2.7 Efisiensi Sistem Distribusi

Efisiensi pada sistem distribusi listrik mencerminkan kemampuan jaringan dalam menyalurkan energi listrik dari gardu induk hingga ke pelanggan akhir dengan tingkat kehilangan daya (losses) yang minimal serta pemanfaatan sumber daya yang optimal. Tingkat efisiensi ini menjadi salah satu indikator utama dalam menilai kinerja sistem distribusi, baik dari aspek keandalan penyaluran, kualitas listrik, maupun efektivitas biaya operasional. Selain faktor teknis jaringan, kondisi termal sistem juga berperan terhadap penurunan efisiensi. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa peningkatan suhu menyebabkan berkurangnya tegangan dan arus keluaran, yang pada akhirnya menurunkan efisiensi daya listrik[27].

Efisiensi dalam sistem distribusi listrik merupakan faktor penting dalam memastikan pasokan listrik yang optimal dengan minimnya susut, kualitas tegangan yang stabil, serta distribusi beban yang merata. Berikut ini tantangan utama dalam mencapai efisiensi:

1. Susut (*Losses*)

Susut energi listrik adalah selisih antara energi listrik yang dibangkitkan atau disalurkan dengan energi listrik yang benar-benar diterima dan dimanfaatkan oleh konsumen, yang terjadi akibat keterbatasan sifat fisik komponen sistem tenaga listrik

serta kondisi operasional jaringan. Temuan penelitian sebelumnya menegaskan bahwa penempatan sumber pembangkitan yang lebih dekat dengan titik beban merupakan salah satu strategi efektif untuk meminimalkan susut energi dalam jaringan listrik[28]. Susut yang terjadi selama proses penyaluran listrik. Susut teknis, seperti kehilangan daya akibat hambatan konduktor dan transformator, dapat dikurangi dengan menggunakan konduktor berimpedansi rendah, pemasangan kapasitor bank untuk kompensasi daya reaktif, serta rekonfigurasi jaringan yang lebih optimal. Fenomena susut energi listrik tidak terbatas pada jaringan distribusi, namun juga terjadi pada unit pembangkit akibat berbagai faktor operasional dan teknis[29]. Sementara itu, susut non-teknis, seperti pencurian listrik dan kesalahan pengukuran, dapat diminimalkan dengan implementasi smart meter dan Automated Metering Infrastructure (AMI) untuk pemantauan konsumsi listrik secara real-time.

Rugi rugi daya dapat dihitung dengan rumus rugi-rugi daya pada jaringan distribusi sebagai berikut:

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i \quad (2.1)$$

Dimana:

P_{loss} = Total rugi-rugi daya (kW)

I_i = Arus pada segmen I (A)

R_i = Resistansi pada segmen I (Ω)

n = Jumlah segmen penyulang

2. Tegangan

Tegangan yang terlalu rendah dapat menyebabkan peralatan pelanggan tidak berfungsi dengan baik, sementara tegangan yang terlalu tinggi dapat merusak peralatan dan meningkatkan rugi-rugi daya. Penurunan tegangan (*voltage drop*) sering terjadi pada jaringan distribusi jarak jauh, yang dapat dikurangi dengan menggunakan konduktor yang lebih besar atau menambahkan penyulang tambahan. Fluktuasi tegangan akibat perubahan beban yang tiba-tiba juga dapat dikendalikan dengan *Voltage Regulator* dan *Load Tap Changer* (LTC) pada transformator, serta sistem SCADA dan ADMS yang memungkinkan pengendalian distribusi daya secara otomatis.

Kualitas tegangan dapat dikontrol dengan memastikan tegangan di sisi pelanggan berada pada rentang tegangan minimal dan tegangan maksimal setiap penyulang. Kualitas tegangan pada sisi pelanggan dapat dihitung sebagai berikut:

$$\Delta V = I_i \cdot Z_i \quad (2.2)$$

$$V_{min} \leq V_{oper} \leq V_{max} \quad (2.3)$$

Dimana:

ΔV = Drop tegangan pada segmen (V)

I_i = Arus pada segmen i (A)

Z_i = Impedansi pada segmen i (Ω)

V_{oper} = Tegangan operasional dititik pelanggan (V)

V_{min} = Tegangan minimum yang diizinkan (V)

V_{max} = Tegangan maximum yang diizinkan (V)

3. Beban

Faktor lain yang mempengaruhi efisiensi adalah pemerataan atau keseimbangan beban dalam sistem distribusi. Ketidakseimbangan beban dapat menyebabkan peningkatan susut energi, pembebanan berlebih pada penyulang tertentu, serta potensi gangguan pada sistem tiga fasa. Oleh karena itu, penyesuaian pola beban (load balancing) menjadi salah satu aspek utama dalam rekonfigurasi jaringan distribusi[30]. Untuk meningkatkan efisiensi, diperlukan optimalisasi rekonfigurasi jaringan menggunakan SCADA dan ADMS, sehingga beban dapat dialihkan secara otomatis ke penyulang dengan kapasitas yang lebih besar. Penyeimbangan beban juga dapat dilakukan dengan perangkat seperti Automatic Load Transfer Switch (ALTS) yang membantu menyeimbangkan distribusi daya antar penyulang. Selain itu, strategi Demand Response Management memungkinkan operator mengatur konsumsi listrik saat beban puncak, sehingga jaringan tetap stabil dan efisien.

$$I_{total} = \sum_{i=1}^n I_{load}(i) \quad (2.4)$$

Jika $I_{total} > I_{kapasitas\ feeder}$ maka dilakukan rekonfigurasi.

Dimana:

$I_{load}(i)$ = Beban masing-masing *feeder* (A)

$I_{kapasitas\ feeder}$ = Kapasitas *max feeder* setelah satu feeder terganggu (A)

4. Energy Saved

Selain faktor beban, peningkatan efisiensi sistem distribusi juga dapat dicapai dengan mengurangi susut melalui strategi rekonfigurasi jaringan. Efektivitas langkah ini dapat diukur secara kuantitatif melalui perhitungan Energy Saved (ES), yaitu energi yang berhasil dihemat sebagai hasil dari optimasi konfigurasi jaringan. Nilai ES diperoleh dengan membandingkan total *losses* sebelum dan sesudah dilakukan rekonfigurasi, menggunakan rumus:

$$ES = (P_{loss\ before} - P_{loss\ after}) \cdot t \quad (2.5)$$

Dimana:

ES = Energy yang terselamatkan (kWh)

$P_{loss\ before}$ = Rugi-rugi daya sebelum rekonfigurasi feeder (kW)

$P_{loss\ after}$ = Rugi-rugi daya setelah rekonfigurasi feeder (kW)

t = Waktu operasional sistem atau durasi perhitungan (Jam)

Apabila dikonversi ke nilai ekonomis:

$$ES\ (Rp) = ES \cdot (Tarif\ kWh) \quad (2.6)$$

Dimana:

ES = Energy yang terselamatkan (kWh)

$Tarif\ kWh$ = Harga Listrik per kWh yang berlaku (Rp/kWh)