

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

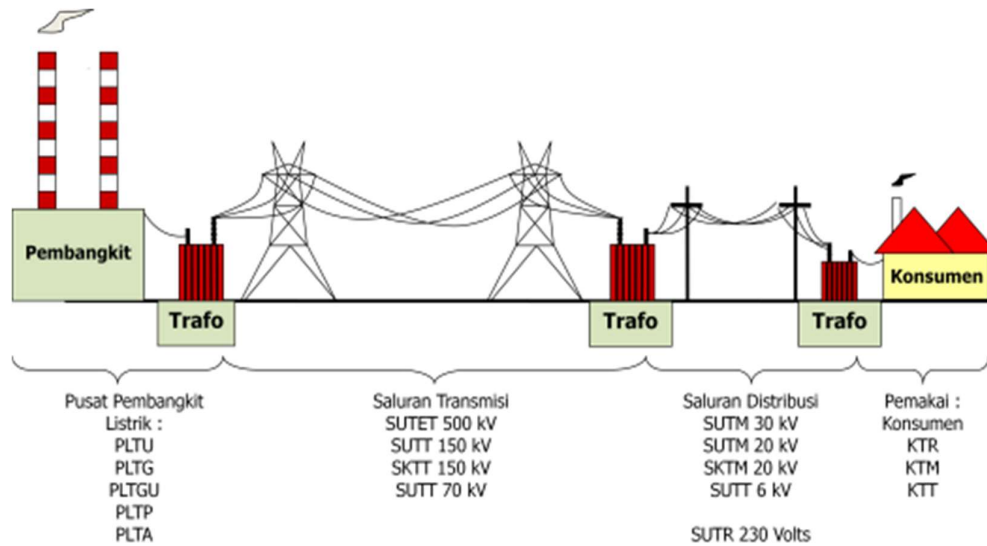
2.1. Landasan Teori

2.1.1. Konsep Dasar Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik pada dasarnya terdiri dari empat komponen utama, yaitu pembangkit listrik, jaringan transmisi beserta gardu induk, sistem distribusi, dan sambungan ke pelanggan. Keempat unsur ini saling terhubung dan membentuk satu kesatuan sistem kelistrikan yang terpadu. [1]

Fungsi utama sistem distribusi adalah menyalurkan energi listrik dari sumbernya menuju pengguna akhir. Secara umum, sistem distribusi dibedakan menjadi dua kategori, yaitu distribusi tegangan menengah dan distribusi tegangan rendah. Jaringan tegangan menengah beroperasi pada rentang di atas 1 kV hingga maksimum 35 kV, sedangkan jaringan tegangan rendah memiliki batas tegangan hingga 1 kV.

Umumnya, jaringan distribusi tegangan menengah berawal dari gardu induk atau pusat pembangkit, khususnya pada sistem yang terpisah (isolated system). Di beberapa wilayah, jaringan ini juga dapat langsung bersumber dari pembangkit listrik. Konfigurasinya dapat berupa sistem radial maupun sistem radial terbuka (open loop). Sebaliknya, jaringan distribusi tegangan rendah hampir selalu menggunakan konfigurasi radial penuh. Bagian paling ujung dari sistem distribusi disebut sambungan pelayanan listrik, yang dilengkapi alat pembatas dan pengukur (APP) sebelum energi listrik dialirkan ke konsumen [1].



Gambar 2. 1 Sistem Penyaluran Eenergi Listrik ke Konsumen

Untuk mencapai tujuan utama dalam pengoperasian sistem tenaga listrik, terdapat tiga aspek penting yang harus diperhatikan, yaitu:

a) Aspek ekonomi, (*economy*)

Aspek ekonomi berhubungan dengan kemampuan sistem dalam menyalurkan energi listrik dengan biaya operasional yang efisien tanpa mengabaikan tingkat pelayanan. Pengoperasian sistem tenaga listrik yang baik harus mampu meminimalkan rugi-rugi daya, menekan energi tidak tersalurkan, serta mengoptimalkan biaya pemeliharaan jaringan. Kerugian energi akibat gangguan atau losses yang tinggi akan berdampak langsung pada menurunnya pendapatan perusahaan dan meningkatnya biaya operasional. Dalam praktik sistem tenaga modern, pendekatan optimasi operasi dilakukan untuk menjaga keseimbangan antara biaya investasi dan biaya akibat gangguan. Dengan demikian, peningkatan efisiensi teknis pada jaringan distribusi secara tidak langsung akan meningkatkan kinerja ekonomi perusahaan.

b) Aspek keandalan (*reliability*)

Aspek keandalan berkaitan dengan kemampuan sistem dalam mempertahankan kontinuitas penyaluran tenaga listrik kepada pelanggan. Sistem yang andal adalah sistem yang memiliki tingkat gangguan rendah serta waktu pemulihan yang cepat ketika terjadi gangguan. Evaluasi keandalan pada sistem distribusi umumnya menggunakan parameter seperti frekuensi gangguan rata-rata

pelanggan dan durasi pemadaman rata-rata dalam periode tertentu. Tingginya frekuensi trip penyulang atau lamanya waktu perbaikan menunjukkan bahwa sistem masih memiliki kerentanan terhadap gangguan, baik yang bersumber dari faktor internal maupun eksternal. Oleh karena itu, tindakan preventif seperti peningkatan sistem proteksi, pemeliharaan berkala, dan perlindungan tambahan pada konduktor menjadi bagian penting dalam upaya meningkatkan keandalan jaringan distribusi.

c) Aspek kualitas.(*quality*)

Sementara itu, aspek kualitas berkaitan dengan mutu tegangan dan kestabilan daya yang diterima oleh pelanggan. Sistem distribusi yang baik tidak hanya mampu mengalirkan energi secara kontinu, tetapi juga menjaga agar karakteristik tegangan tetap berada dalam batas standar yang diperbolehkan. Gangguan sesaat, fluktuasi tegangan, maupun distorsi harmonisa dapat mempengaruhi performa peralatan listrik, terutama pada pelanggan industri yang menggunakan peralatan sensitif. Dengan demikian, kualitas daya menjadi indikator penting dalam menilai tingkat pelayanan sistem tenaga listrik secara menyeluruh.

Secara keseluruhan dapat di artikan bahwa faktor ekonomi mengandung makna bahwa sistem kelistrikan perlu dijalankan secara efisien dan hemat biaya, namun tetap mempertahankan tingkat keandalan serta mutu pelayanan listrik. Keandalan berkaitan dengan kemampuan sistem dalam menghadapi dan mengatasi gangguan tanpa menyebabkan pemadaman pada sisi pelanggan. Gangguan adalah kondisi dimana aliran listrik tidak sampai ke konsumen[12]. Sementara itu, aspek kualitas merujuk pada kestabilan tegangan dan frekuensi yang harus dipertahankan agar tetap berada dalam batas standar yang telah ditetapkan [2].

Sistem distribusi adalah komponen penting dalam sistem tenaga listrik, berfungsi sebagai bagian yang berada paling dekat dengan pelanggan dan bertugas menyalurkan energi listrik kepada mereka.[11]. Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik kepada pengguna akhir. Secara umum, sistem ini dibagi menjadi dua jenis utama:

A. Sistem Jaringan Tegangan Menengah

Sistem distribusi tegangan menengah beroperasi pada rentang tegangan di atas 1 kV hingga maksimum 35 kV. Umumnya, jaringan distribusi ini dimulai dari gardu induk atau pusat kelistrikan dalam sistem yang berdiri sendiri (*isolated*

system). Di beberapa wilayah, jaringan tersebut juga dapat berasal langsung dari unit pembangkit listrik.



Gambar 2. 2 : Jaringan tegangan Menengah
Sumber: Dokumentasi Pribadi

Pola konfigurasi jaringan pada distribusi primer terdiri dari 5 tipe, yaitu:

1) Sistem Radial

Jaringan radial merupakan jenis sistem distribusi tenaga listrik yang paling sederhana dan paling umum digunakan dibandingkan konfigurasi jaringan lainnya. Dalam sistem ini, energi listrik disalurkan secara radial dari gardu induk menuju pelanggan secara terpisah antara satu dengan yang lain. Disebut “radial” karena aliran listrik mengalir dari satu titik sumber utama dan bercabang ke berbagai titik beban yang dilayani. Sistem radial terdiri atas penyulang (feeder) yang menyalurkan daya ke beberapa gardu distribusi dalam pola radial. Berdasarkan konfigurasinya, sistem radial dibedakan menjadi dua jenis, yaitu sistem radial terbuka dan sistem radial paralel.

Sistem radial terbuka memiliki tingkat keandalan paling rendah karena hanya menggunakan satu jalur penyaluran tenaga listrik. Apabila terjadi gangguan pada saluran, suplai listrik ke konsumen akan terhenti hingga perbaikan selesai dilakukan. Hal ini menyebabkan kontinuitas pelayanan sistem ini kurang terjamin. Selain itu, semakin jauh jarak antara gardu induk dan pelanggan, semakin besar

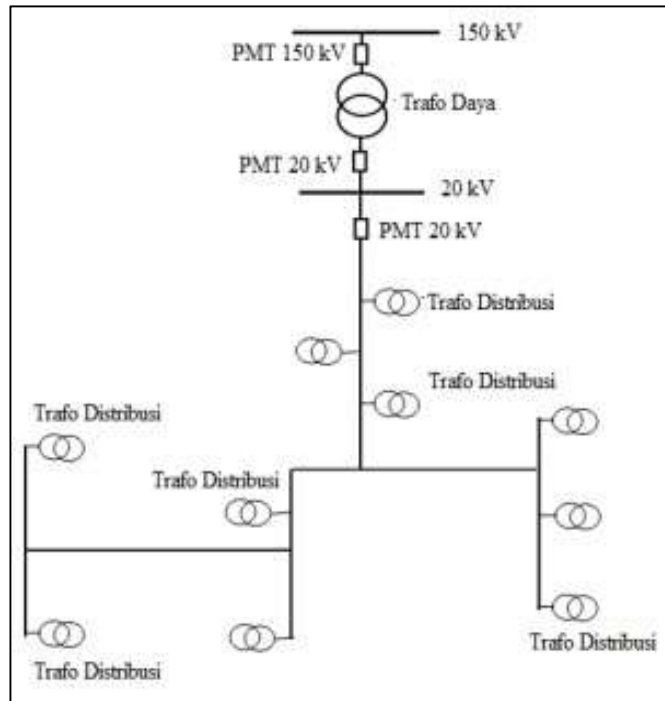
pula rugi-rugi tegangan yang terjadi, sehingga kualitas tegangan menurun dan kapasitas pelayanan menjadi terbatas [3].

Untuk mengatasi kelemahan tersebut, digunakan konfigurasi sistem radial paralel, di mana energi listrik dialirkan melalui dua saluran yang dipasang sejajar (paralel). Pada sistem ini, setiap titik beban dapat dilayani oleh dua jalur sekaligus. Jika salah satu jalur mengalami gangguan, jalur lainnya dapat mengambil alih penyaluran daya, sehingga pemadaman dapat dihindari. Sistem radial paralel memiliki keandalan lebih tinggi, kapasitas pelayanan lebih besar, dan mampu menangani beban puncak dengan lebih baik. Umumnya, beban hanya dilayani oleh satu saluran pada satu waktu untuk menjaga keandalan suplai ke pelanggan.

Tidak sedikit sistem pada distribusi tenaga listrik yang menerapkan sistem radial. Sistem ini sangat sederhana jika dibandingkan dengan tipe jaringan yang lain. Tenaga listrik yang disalurkan secara radial dilakukan dengan terpisah antara satu dengan lainnya melalui gardu induk ke konsumen-konsumen. Dinamakan radial karena saluran ini ditarik secara radial dari suatu titik yang merupakan sumber dari jaringan itu dan dicabang-cabangkan ke titik-titik beban yang dilayani. Sistem radial terdiri atas feeders atau penyulang yang menyuplai beberapa gardu distribusi secara radial. Konfigurasi jaringan sistem radial terbagi atas 2 (dua) bagian yaitu sistem radial terbuka dan sistem radial paralel

a. Sistem Radial terbuka

Penyaluran tenaga listrik pada sistem radial terbuka hanya dilakukan dengan menggunakan satu saluran saja. Maka dari itu, sistem radial sangat tidak bisa diandalkan karena ketika terjadi gangguan, penyaluran tenaga listrik akan terhenti dengan waktu yang cukup lama. Sistem radial dapat beroperasi kembali normal ketika gangguan tersebut telah diperbaiki.



Gambar 2. 3 Konfigurasi Jaringan Sistem Radial Terbuka

Konsumen yang berada jauh dari gardu induk menggunakan saluran yang semakin panjang. Hal ini mengakibatkan rugi rugi tegangan semakin besar, sehingga kualitas tegangan menjadi buruk dan tidak dapat diandalkan.

Kelebihan sistem radial terbuka :

1. Konstruksi lebih sederhana
2. Harga material lebih murah, karena penggunaannya sangat minim
3. Biaya pemeliharaan sistem yang murah
4. Biaya yang murah untuk penyaluran jarak pendek

Kelemahan sistem radial terbuka :

1. Rendahnya keandalan sistem
2. Faktor penggunaan konduktor 100%
3. Makin panjang jaringan (dari gardu induk atau gardu hubung) kondisi tegangan tidak dapat diandalkan
4. Besarnya rugi rugi tegangan
5. Terbatasnya kapasitas pelayanan
6. Penyaluran daya akan terhenti apabila terjadi gangguan

b. Sistem Radial Paralel

Sistem radial paralel dapat menjadi solusi untuk memperbaiki kekurangan dari sistem radial terbuka. Tenaga listrik disalurkan melalui dua saluran yang diparalelkan. Pada sistem ini terdapat dua saluran yang melayani titik beban, sehingga bila salah satu saluran mengalami kerusakan, maka dapat dibackup oleh saluran yang satunya lagi. Dengan demikian pemadaman dapat dihindari.

Kontinuitas pelayanan sistem radial paralel ini lebih terjamin dan kapasitas pelayanan bisa lebih besar dan sanggup melayani beban puncak (peak load) dalam batas yang diinginkan. Kedua saluran juga dapat difungsikan secara bersamaan untuk melayani satu titik beban.

Kelebihan sistem radial paralel :

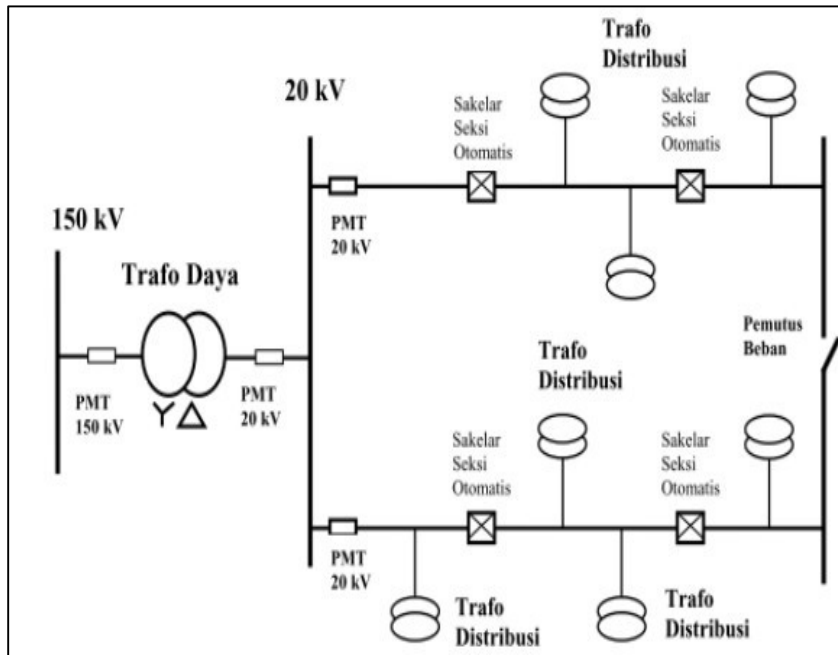
1. Kontinuitas pelayanan lebih andal, karena tidak bergantung hanya pada satu sumber saja
2. Besarnya kapasitas beban tersalurkan dengan maksimal ke konsumen, meskipun pada saat beban puncak
3. Kedua saluran dapat mensuplai titik beban secara bersamaan
4. Jika terjadi kerusakan pada salah satu saluran, saluran yang satu lagi dapat menjadi pengganti agar tidak terjadi pemadaman
5. Dapat menyalurkan daya listrik melalui dua saluran yang diparalelkan

Adapun kelemahan sistem radial paralel :

1. Banyaknya peralatan yang harus disediakan, terutama peralatan proteksi
2. Biaya investasi aset lebih mahal

2) Sistem *Loop*

Sistem jaringan loop atau ring merupakan konfigurasi jaringan tertutup yang membentuk suatu lingkaran. Dalam sistem ini, setiap titik beban dapat menerima suplai daya dari dua arah, sehingga kontinuitas penyaluran listrik lebih terjamin dan mutu dayanya menjadi lebih stabil.



Gambar 2. 4 Konfigurasi Jaringan Sistem Loop

Struktur jaringan loop pada dasarnya merupakan kombinasi dari dua jaringan radial yang dihubungkan pada ujungnya melalui pemutus tenaga (PMT) atau pemisah tenaga (PMS). Ketika terjadi gangguan, bagian yang bermasalah dapat diisolasi, sementara pemutus atau pemisah dapat ditutup untuk menjaga agar aliran listrik ke bagian lain tetap berlangsung. Biasanya, penghantar yang digunakan pada sistem ini memiliki ukuran konduktor yang seragam dan dirancang agar mampu menyalurkan total daya dari seluruh beban pada loop tersebut, yang merupakan gabungan beban dari dua sistem radial. Sistem distribusi tipe loop menawarkan keandalan serta kualitas pelayanan listrik yang lebih tinggi dibandingkan sistem terbuka, meskipun biaya investasinya lebih besar. Oleh karena itu, sistem ini umumnya diterapkan di wilayah dengan kepadatan beban tinggi dan kebutuhan keandalan yang besar [4].

Terdapat dua konfigurasi utama dalam sistem jaringan loop, yaitu open loop dan close loop. Pada sistem open loop, terdapat normally open switch (saklar terbuka normal) yang ditempatkan di salah satu gardu distribusi, sehingga pada kondisi normal rangkaian dalam keadaan terbuka. Sementara itu, sistem close loop menggunakan normally close switch (saklar tertutup normal) yang dipasang di antara gardu distribusi, dan dalam kondisi normal rangkaian selalu tertutup [5].

Jaringan pola loop merupakan jaringan yang dimulai dari pada titik di busbar, berputar di sekitar area beban, dan kembali ke titik busbar semula.. Pola ini juga ditandai dengan adanya dua sumber pengisian yaitu suplai utama dan sebuah suplai cadangan. Jika terjadi gangguan pada salah satu sumber pengisian (suplai utama), maka dapat digantikan dengan sumber pengisian yang lain (suplai cadangan). Jaringan dengan polaini seringdigunakan pada sistem distribusi yang melayani beban denganpersyaratan layanan kontinuitas pelayanan yang baik (lebih baik dari pada pola radial).

Kelebihan sistem loop :

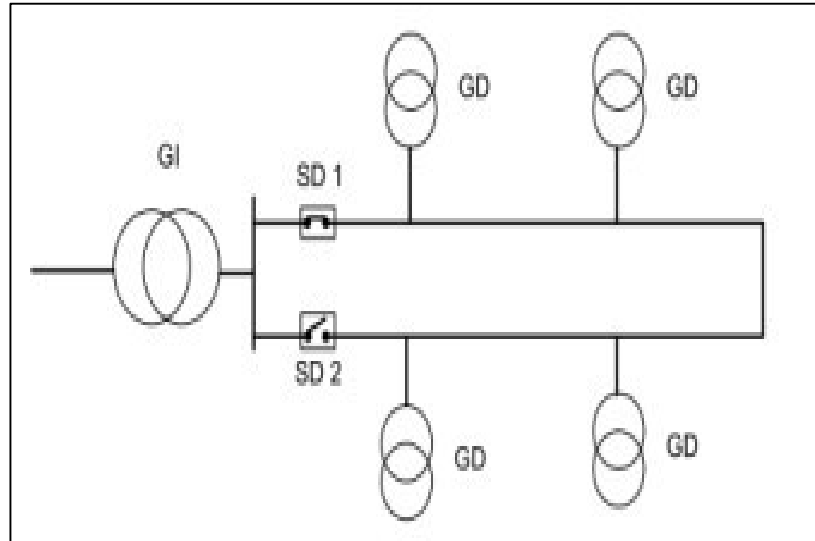
1. Daya listrik dapat dialirkan lewat satu atau dua saluran feeder yang saling terhubung
2. Meguntungkan dari sudut pandang ekonomis
3. Jika pada salah satu saluran terjadi gangguan, maka saluran lain dapat berfungsi menggantikan penyaluran daya listrik
4. Terjaminnya kontinyitas penyaluran daya listrik
5. Rendahnya biaya konstruksi
6. Faktor pemanfaatan konduktor yang cukup rendah, yaitu 50%
7. Keadaan relatif lebih baik

Kelemahan sistem loop :

1. Lebih rendahnya keandalan sistem
2. Penurunan tegangan meningkat
3. Kapasitas pelayanan menjadi lebih buruk, apabila beban yang dilayani meningkat

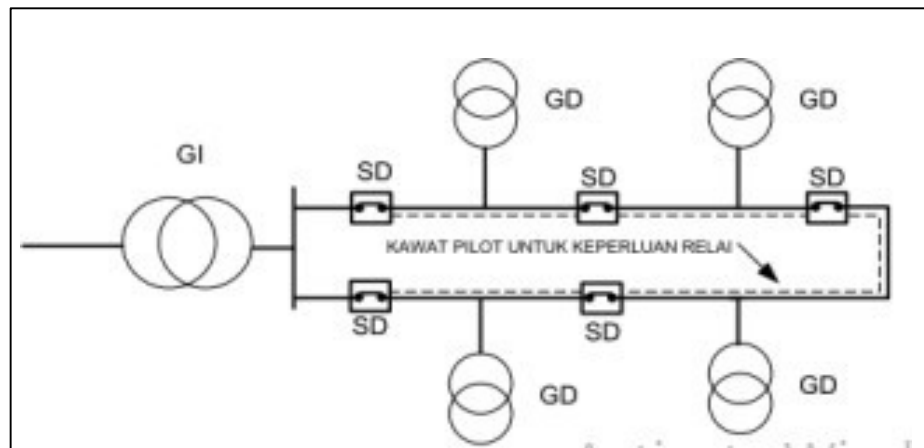
Terdapat 2 macam bentuk sistem saluran loop, yaitu :

1. Bentuk open loop, bentuk ini dilengkapi dengan saklar normally open yang diletakkan pada salah satu bagian gardu distribusi, dan saat kondisi normal rangkaian selalu terbuka.



Gambar 2. 5 Skema Rangkaian Loop Terbuka

2. Bentuk close loop, bentuk ini dilengkapi dengan saklar normally close yang diletakkan pada salah satu bagian diantara gardu distribusi dan rangkaian selalu tertutup saat kondisi normal.



3) Sistem *Spindel*

Jaringan distribusi spindel merupakan sistem penyaluran tenaga listrik menggunakan kabel bawah tanah tegangan menengah (SKTM) yang umumnya diterapkan di kawasan perkotaan besar. Dalam konfigurasi ini, sistem spindel biasanya terdiri dari hingga enam penyulang yang beroperasi dalam kondisi berbeban dan satu penyulang tambahan yang berfungsi tanpa beban. Penyulang

yang membawa arus beban disebut working feeder atau saluran kerja, sedangkan penyulang yang tidak dialiri beban dikenal sebagai express feeder.

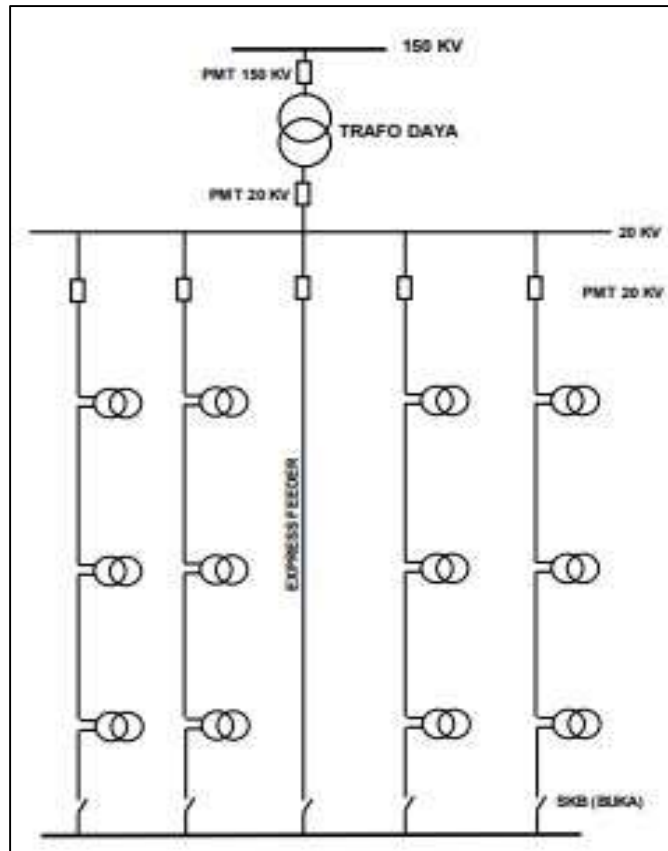
Peran express feeder tidak hanya sebagai saluran cadangan ketika terjadi gangguan pada salah satu saluran kerja, tetapi juga membantu mengurangi penurunan tegangan (voltage drop) dalam kondisi operasi normal pada sistem distribusi tersebut.

Berikut adalah operasi jaringan spindel :

1. Dalam keadaan normal semua saluran di gardu hubung (GH) terbuka sehingga semua SKTM beroperasi radial.
2. Dalam keadaan normal saluran ekspres tidak dibebani dan dihubungkan dengan rel di gardu hubung dan digunakan sebagai pemasok cadangan dari gardu hubung.
3. Bila salah satu seksi dari SKTM mengalami gangguan, maka saklar beban di kedua ujung seksi yang terganggu dibuka. Kemudian sisi gardu induk (GI) mendapat suplai dari GI, dan gardu hubung mendapat supply dari gardu hubung melalui saluran ekspres.

Sistem jaringan distribusi spindel sangat tepat untuk melengkapi kebutuhan kebutuhan antara lain :

1. Penambahan keandalan atau keberlangsungan pelayanan sistem
2. Rugi-rugi karena gangguan dapat ditekan atau diturunkan
3. Sangat baik guna menyuplai wilayah beban yang mempunyai kerapatan beban yang cukup tinggi
4. Ekspansi jaringan lebih mudah

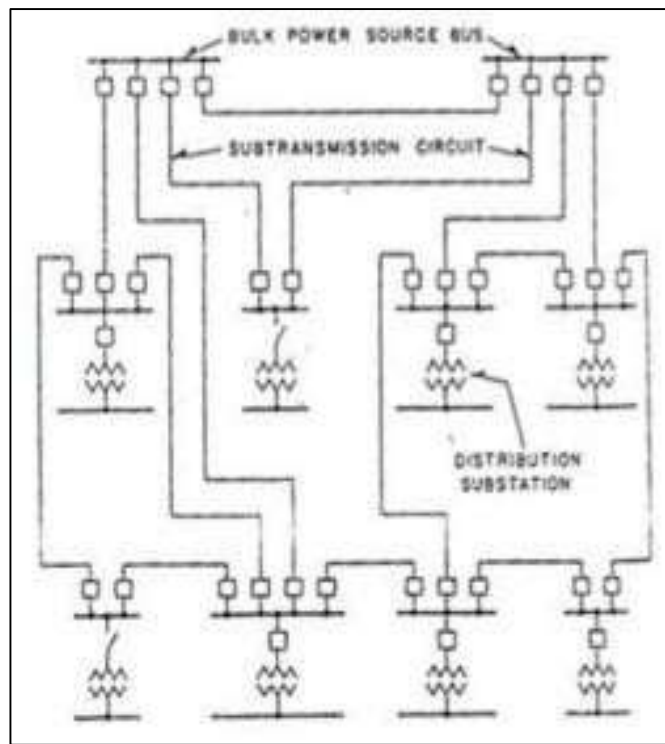


Gambar 2. 6 Konfigurasi Jaringan Sistem Spindel

4) Sistem *Spot Network*

Bagi pelanggan yang membutuhkan pasokan listrik tanpa gangguan (VVIP customers), suplai energi diberikan melalui konfigurasi jaringan spot network yang dilengkapi minimal dua penyulang serta sistem Automatic Change Over (ACO). Spot network merupakan sistem distribusi di mana tenaga listrik disalurkan secara bersamaan oleh dua atau lebih penyulang yang terhubung ke gardu induk dan beberapa pembangkit listrik yang beroperasi secara paralel. Sistem ini merupakan pengembangan dari konfigurasi jaringan sebelumnya dan dianggap sebagai sistem dengan tingkat keandalan tertinggi karena dilayani oleh lebih dari satu sumber daya listrik. Selain itu, jumlah cabang pada sistem ini biasanya lebih banyak dibandingkan jumlah titik penyulangannya. Spot network umumnya diterapkan di wilayah perkotaan dengan kepadatan beban tinggi, di mana diperlukan kapasitas besar dan kontinuitas suplai yang sangat baik. Ketika salah satu saluran mengalami gangguan, sistem tetap dapat beroperasi tanpa menyebabkan pemadaman karena

seluruh titik beban tersambung paralel dengan beberapa sumber tenaga listrik.



Gambar 2. 7 Konfigurasi Jaringan Sistem Spot Network

Karena memiliki kapasitas dan kontinuitas pelayanan yang sangat baik, sistem spot network juga sangat cocok diterapkan di daerah daerah yang padat, seperti perkotaan. Kerusakan yang ditimbulkan oleh salah satu penyulang juga tidak akan mengganggu kontinuitas pelayanannya, sebab sumber tenaga listrik dipasang pada titik beban yang terhubung secara paralel.

Kelebihan sistem spot network :

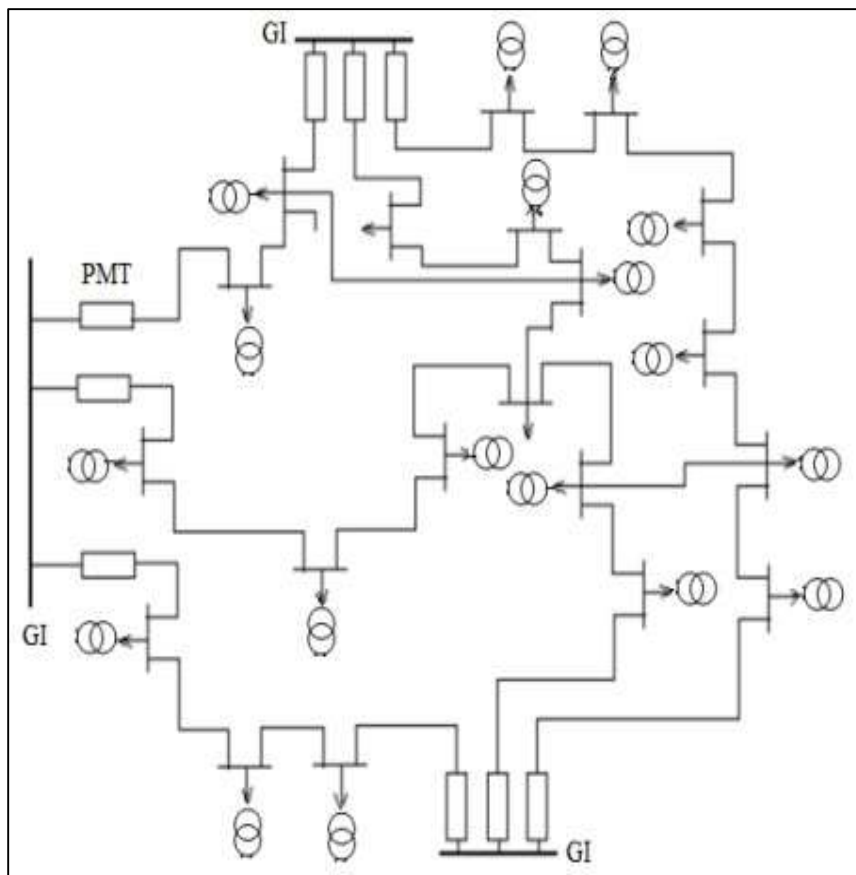
1. Penyaluran tenaga listrik dapat dilangsungkan selama 24 jam tanpa henti dengan menggunakan dua atau lebih penyulang
2. Merupakan peningkatan inovasi dari sistem - sistem sebelumnya
3. Tingginya tingkat keandalanya
4. Jumlah cabang lebih banyak dari jumlah titik penyulang
5. Cocok diterapkan di daerah yang memiliki tingkat kepadatan yang tinggi
6. Memiliki kapasitas yang sangat baik dan pelayanan yang berkesinambungan
7. Kerusakan yang ditimbulkan oleh saluran mana pun tidak akan mengganggu kontinuitas pelayanannya.

Kelemahan sistem spot network :

1. Anggaran yang dibutuhkan untuk pembangunan konstruksi mahal
2. Penyetelan perangkat pelindung lebih sulit

5) Sistem Interkoneksi

Sistem interkoneksi merupakan bentuk pengembangan dari sistem spot network, di mana energi listrik disalurkan dari beberapa pembangkit yang beroperasi secara paralel. Dengan konfigurasi ini, penyaluran daya dapat berlangsung secara berkesinambungan tanpa gangguan, meskipun melayani wilayah dengan kepadatan dan cakupan beban yang luas. Namun, penerapan sistem ini memerlukan biaya investasi yang tinggi serta perencanaan teknis yang matang. Meskipun demikian, sistem interkoneksi memiliki prospek yang sangat baik untuk pengembangan di masa depan karena menawarkan tingkat keandalan dan kualitas suplai yang tinggi.



Gambar 2. 8 Konfigurasi Jaringan Sistem Interkoneksi

Dalam sistem ini, apabila salah satu pembangkit mengalami kerusakan, pasokan listrik dapat segera dialihkan ke pembangkit lain. Pembangkit dengan kapasitas kecil dapat difungsikan sebagai pendukung bagi pembangkit utama yang memiliki daya lebih besar. Dengan demikian, kebutuhan beban harian normal dapat ditanggung secara efisien, sehingga biaya operasional pembangkitan dapat ditekan.

Selain itu, pada sistem interkoneksi, setiap pembangkit dioperasikan secara bergiliran sesuai jadwal yang telah ditetapkan. Pola pengoperasian bergantian ini tidak hanya membantu menjaga kestabilan sistem, tetapi juga memperpanjang umur operasional dari masing-masing unit pembangkit.

Pada sistem interkoneksi, ketika salah satu pembangkit tenaga listrik mengalami kerusakan, listrik masih bisa dialirkan ke pusat pembangkit lain. Pusat pembangkit utama yang memiliki kapasitas tenaga listrik yang lebih besar, dioperasikan dengan dibantu dengan pusat pembangkit dengan kapasitas yang lebih kecil.

Pada sistem interkoneksi ini pusat pembangkit tenaga listrik tidak beroperasi secara terus menerus, melainkan beroperasi secara bergantian berdasarkan jadwal yang sebelumnya telah direncanakan dan disetujui oleh pihak terkait. Hal ini diterapkan guna memperpanjang usia pusat pembangkit, serta diharapkan juga dapat berpengaruh pada kestabilan sistem pembangkitan.

Kelebihan Sistem Interkoneksi :

1. Merupakan pengembangan sistem spot network
2. Kebutuhan tenaga listrik dapat dipenuhi dengan mengalirkannya melalui beberapa pusat pembangkit tenaga listrik
3. Pada daerah dengan kepadatan beban yang cukup tinggi dan luas, tenaga listrik dapat dialirkan secara terus menerus tanpa berhenti
4. Keterandalan dan kualitas sistem sangat terjamin
5. Apabila salah satu pembangkit mengalami kerusakan, maka penyaluran tenaga listrik dapat dialihkan ke pusat pembangkit lainnya.
6. Pembangkit dengan kapasitas lebih kecil dapat difungsikan sebagai backup atau cadangan bagi pusat pembangkit utama yang memiliki kapasitas tenaga listrik lebih besar

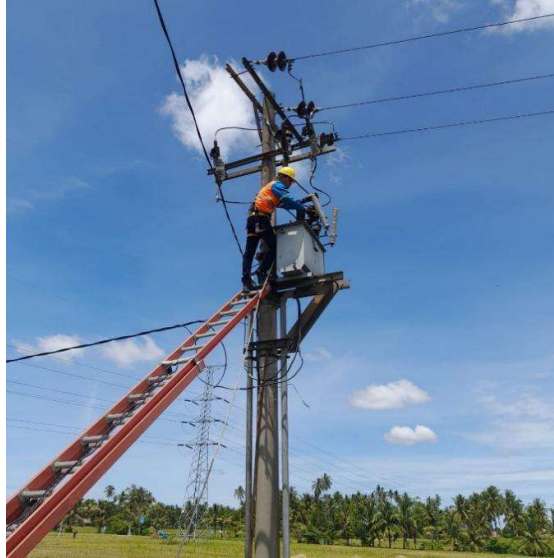
7. Biaya operasional pembangkitan sangat minimalis
8. Sistem ini dapat dijalankan secara bergantian sesuai jadwal yang telah direncanakan sebelumnya
9. Dapat memperbaiki lifetime pusat pembangkit
10. Dapat menjaga kestabilan sistem pembangkitan
11. Tingkat keterandalan yang lebih baik

Kelemahan Sistem Interkoneksi

1. Anggaran yang dibutuhkan untuk pembangunan konstruksi mahal
2. Membutuhkan perancangan yang lebih matang
3. Saat terjadi gangguan hubung singkat pada penghantar jaringan, maka semua pusat pembangkit akan tergabung di dalam sistem dan akan ikut menyumbang arus hubung singkat ke tempat gangguan tersebut
4. Apabila unit - unit mesin pada pusat pembangkit mengalami gangguan, maka sebagian atau seluruh sistem akan jatuh
5. Diperlukan penyesuaian produksi tenaga listrik yang dapat mengimbangi besarnya kapasitas pemakaian beban
6. Terjadinya petir sangat menyulitkan untuk sistem ini.

B. Sistem Jaringan Tegangan Rendah

Sistem distribusi tegangan rendah beroperasi dengan batas tegangan maksimum 1 kV dan umumnya memiliki konfigurasi radial murni. Bagian paling ujung dari sistem distribusi ini adalah sambungan tenaga listrik, yang dilengkapi dengan Alat Pembatas dan Pengukur (APP) untuk menyalurkan energi listrik ke pelanggan akhir.



Gambar 2. 9 Pekerjaan Jaringan Tegangan Rendah
Sumber Dokumentasi Pribadi

Pada jaringan distribusi 380/220 V, terdapat beberapa ketentuan teknis yang harus dipatuhi (PLN, 1992: NP). Setiap tiang saluran tegangan rendah (STR) hanya boleh melayani maksimal lima sambungan layanan pelanggan (SLP). Selain itu, pada setiap sambungan layanan pelanggan, diperbolehkan maksimum lima pelanggan yang dihubungkan secara seri, dengan tetap mempertimbangkan batas jatuh tegangan yang diizinkan. Panjang sambungan dari tiang ke rumah terakhir tidak boleh melebihi 150 meter, sedangkan jarak antara tiang ke rumah atau antar rumah dibatasi maksimal 30 meter.

2.1.2. Keandalan Sistem Distribusi

Keandalan (reliability) menggambarkan sejauh mana suatu sistem atau bagian dari sistem mampu beroperasi dengan baik dan konsisten dalam jangka waktu serta kondisi tertentu. Untuk mengetahui tingkat keandalannya, dilakukan evaluasi melalui analisis maupun perhitungan terhadap keberhasilan sistem dalam menjalankan fungsinya. Sistem dengan keandalan tinggi mampu menyalurkan energi listrik kapan pun dibutuhkan, sedangkan sistem dengan keandalan rendah tidak dapat memberikan suplai listrik secara terus-menerus [6].

Tingkat kontinuitas pelayanan listrik, yang merupakan salah satu indikator

kualitas sistem tenaga listrik, sangat dipengaruhi oleh jenis jaringan distribusi serta perangkat pengamannya. Kontinuitas yang baik ditunjukkan oleh kecepatan sistem dalam memulihkan kembali pasokan listrik setelah terjadi gangguan. Berdasarkan tingkat performanya, keandalan sistem tenaga listrik dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori utama:

a. Keandalan Sistem yang Tinggi (*High Reliability System*)

Dalam kondisi normal, sistem ini mampu menyuplai daya hingga beban puncak dengan kestabilan tegangan yang baik.

b. Keandalan Sistem yang Menengah (*Medium Reliability System*)

Ketika terjadi gangguan, sebagian beban masih bisa disuplai, meskipun tidak seluruhnya. Oleh karena itu, sistem ini membutuhkan perlengkapan proteksi yang memadai untuk menjaga kontinuitas layanan.

c. Keandalan Sistem yang Rendah (*Low Reliability System*)

Meskipun dalam keadaan normal sistem dapat melayani beban puncak, namun ketika terjadi gangguan, seluruh pasokan daya akan terhenti. Sistem semacam ini hanya memiliki sedikit peralatan proteksi dan membutuhkan perbaikan sebelum dapat beroperasi kembali.

Tingkat kontinuitas distribusi listrik juga bergantung pada jenis saluran, konfigurasi jaringan, serta metode pengaturan operasionalnya. Secara umum, rancangan sistem distribusi dibuat untuk menyesuaikan karakteristik dan kebutuhan beban di wilayah tertentu. Penilaian kontinuitas dilakukan dengan melihat seberapa cepat suplai daya dapat dipulihkan setelah terjadi pemutusan akibat gangguan. Tingkatan pelayanan dibedakan menjadi empat level:

- a. Tingkat 1 yaitu Gangguan dapat menyebabkan pemadaman selama beberapa jam, karena dibutuhkan waktu untuk menemukan dan memperbaiki bagian sistem yang rusak.
- b. Tingkat 2 yaitu Pemadaman terjadi dalam waktu beberapa jam, namun pasokan dapat dipulihkan sementara melalui manuver jaringan atau penyaluran daya dari jalur lain setelah petugas melakukan penelusuran di lapangan.

- c. Tingkat 3 yaitu Gangguan dapat dipulihkan dalam beberapa menit melalui tindakan cepat dari petugas di gardu atau melalui sistem kendali jarak jauh menggunakan Distribution Control Centre (DCC).
- d. Tingkat 4 yaitu Pemulihan berlangsung dalam hitungan detik melalui sistem pengamanan dan pengendalian otomatis yang dioperasikan dari DCC. Pada sistem ini, bahkan memungkinkan suplai tetap menyala tanpa padam berkat adanya instalasi cadangan otomatis yang sepenuhnya terintegrasi.

Adapun indeks kehandalan diantaranya

a) Laju Kegagalan

Laju kegagalan merupakan rata-rata nilai dari jumlah gagal pada selang waktu tertentu (T), dan dinyatakan dalam satuan kegagalan pertahun. Pada suatu pengamatan, nilai laju kegagalan dinyatakan sebagai berikut :

$$\lambda = \frac{f}{T}$$

Dimana :

λ = Angka kegagalan (kali/tahun)

f = Banyaknya Kegagalan

T = Selang Waktu Pengamatan (1 tahun)

b) *SAIDI (System Average Interruption Duration Index)*

Indeks merupakan lama padam per pelanggan dalam waktu 1 tahun [13].

c) *SAIFI (System Average Interruption Frequency Index)*

Nilai indeks ini didefinisikan sebagai jumlah rata-rata gangguan sistem yang terjadi per pelanggan yang dilayani oleh sistem per satuan waktu (umumnya pertahun)[15].

2.1.3. Gangguan Sistem Jaringan Distribusi

Kondisi gangguan pada jaringan distribusi tegangan menengah 20 kV dapat dikategorikan berdasarkan sumber penyebabnya, yaitu:

a. Penyebab Gangguan *Eksternal*

Faktor-faktor luar yang menyebabkan terjadinya gangguan, yaitu :

- 1) Kondisi cuaca, seperti hujan deras, angin kencang, petir, dan gempa bumi.
- 2) Benda asing yang masuk ke jaringan listrik.

Gangguan pada jaringan distribusi udara dapat dikelompokkan menjadi dua:

- 1) Gangguan yang bersifat sesaat, Dimana gangguan yang dapat hilang tanpa perlu tindakan perbaikan, biasanya cukup dengan memutus arus sesaat pada bagian yang terganggu.
 - 2) Gangguan yang bersifat permanen, yaitu gangguan yang membutuhkan tindakan perbaikan fisik atau penghilangan penyebab kerusakannya agar sistem kembali normal.
- b. Penyebab dari faktor dalam

Gangguan ini umumnya bersifat permanen, disebabkan oleh peralatan yang tidak memenuhi standar, kesalahan dalam instalasi, atau akibat usia peralatan yang sudah tua. Gangguan internal dapat dibagi menjadi dua jenis.

yaitu :

- 1) Gangguan Sistem

Gangguan ini adalah gangguan pada jaringan distribusi tegangan menengah yang disebabkan oleh masalah pada sistem pembangkit atau transmisi.

- 2) Gangguan Jaringan

Gangguan jaringan, yaitu gangguan yang menyebabkan terputusnya suplai daya dari pembangkit menuju wilayah tertentu.

Gangguan jaringan distribusi yang disebabkan baik dari luar maupun dari dalam dapat mengakibatkan terjadinya tegangan lebih atau *short circuit* 1 Fasa, 3 Fasa atau 2 Fasa[7].

2.1.4. Manuver Sistem Jaringan Distribusi Tegangan Menengah

Manuver pada sistem distribusi tegangan menengah 20 kV merupakan proses pengaturan ulang kondisi operasi normal jaringan yang dilakukan ketika terdapat pekerjaan pemeliharaan atau gangguan permanen yang membutuhkan waktu perbaikan cukup lama, agar penyaluran daya listrik tetap berjalan optimal.

Pelaksanaan manuver pada jaringan distribusi dapat dilakukan dengan dua

metode, yaitu secara manual maupun melalui kendali jarak jauh (remote control).

Kegiatan yang dilakukan dalam manuver :

1. Memutuskan bagian-bagian jaringan yang sebelumnya terkoneksi dalam kondisi bertegangan/tidak bertegangan.
2. Mengaitkan bagian-bagian jaringan yang terpisah sesuai dengan kondisi operasinya dalam keadaan bertegangan/ tidak bertegangan.

Dari sudut pandang teknis, hasil optimal atas keberhasilan manuver bergantung pada konfigurasi jaringan dan perangkat manuver yang tersedia di sepanjang jaringan. Peralatan jaringan yang dimaksud adalah peralatan pemutus dan penghubung yang terdiri dari berbagai macam seperti PMT, ABSW, Recloser, LBS, FCO, Sectionalizer. Masing-masing peralatan manuver ini memiliki spesifikasi dan fungsi kerja yang berbeda-beda.

Guna menjaga keandalan jaringan, yang mana di dalamnya terdapat konsumen listrik di suatu daerah, ada beberapa tujuan yang mengharuskan pelaksanaan manuver pada jaringan distribusi. Beberapa tujuan tersebut diantaranya adalah :

1. Percepatan penormalan jaringan akibat gangguan
2. Membatasi jumlah pelanggan padam saat pemeliharaan
3. Rekonfigurasi beban jaringan distribusi
4. Meninjau keandalan suatu jaringan distribusi
5. Untuk menjaga keamanan instalasi atau peralatan saat pemeliharaan
6. Untuk menjaga keselamatan pekerja saat melakukan pekerjaan perbaikan atau pengamanan dari tegangan.

2.1.5. Standar Keandalan Sistem Distribusi

Keandalan (reliability) didefinisikan sebagai kemungkinan suatu sistem atau komponen mampu menjalankan fungsinya dengan baik selama jangka waktu tertentu dalam kondisi operasi normal. Dengan kata lain, keandalan menunjukkan probabilitas sistem tidak mengalami kegagalan selama beroperasi. Ada lima faktor utama yang memengaruhi tingkat keandalan suatu sistem, yaitu:

1. Fungsi – Menunjukkan kemampuan suatu komponen untuk melaksanakan tugasnya secara optimal dalam periode tertentu. Kegagalan fungsi dapat timbul akibat pemeliharaan yang tidak terencana (unplanned maintenance).

2. Probabilitas – Menggambarkan seberapa sering gangguan atau kegagalan terjadi dalam jangka waktu tertentu pada sistem atau jaringan.
3. Kinerja atau kecukupan performa – Menunjukkan kemampuan sistem penyaluran tenaga listrik untuk beroperasi secara kontinu tanpa gangguan.
4. Waktu – Mengindikasikan durasi komponen atau jaringan mampu berfungsi normal; semakin lama beroperasi, semakin tinggi kemungkinan terjadinya kerusakan.
5. Kondisi operasi – Menjelaskan pengaruh lingkungan terhadap keandalan sistem, seperti suhu, kelembapan, serta getaran yang dapat memengaruhi kinerja jaringan.

Standar indeks keandalan merupakan batas minimum yang harus dipenuhi oleh sistem distribusi tenaga listrik agar kontinuitas dan mutu pasokan energi kepada pelanggan tetap terjamin. Selain itu, standar ini juga berfungsi sebagai acuan dalam menilai peningkatan kualitas dan kinerja layanan yang ingin dicapai oleh PLN[7].

Standar keandalan yang ditetapkan oleh SPLN memiliki tujuan untuk menentukan serta menggambarkan tingkat keandalan sistem distribusi listrik, sekaligus menjadi parameter dalam menilai perkembangan dan pencapaian target peningkatan mutu pelayanan pada perusahaan penyedia tenaga listrik tersebut.

1. Energi (kWh) Terselamatkan

Pada saat pelaksanaan pekerjaan pemeliharaan ataupun perluasan jaringan energi listrik jika pekerjaan tersebut dilakukan menggunakan metode PDKB maka akan mendapatkan energi (kWh) terselamatkan. Sedangkan apabila pekerjaan pemeliharaan ataupun perluasan jaringan energi listrik dilakukan dengan pemadaman maka energi listrik (kWh) akan hilang (tidak terjual/tidak terselamatkan). Untuk menghitung energi listrik (kWh) terselamatkan digunakan persamaan (2.1).

$$E_{safe} = \sqrt{3} \times 20 \text{ kV} \times I \times \cos\phi \times t \quad (2.1)$$

Dengan:

E_{safe} : Energi terselamatkan (kWh)

20 kV : Tegangan *line to line*

I : Arus atau beban (Ampere)

$\cos\phi$: Faktor Daya

t : Lama pengerjaan (Jam)

2. Rupiah Terselamatkan

Rupiah terselamatkan merupakan keuntungan finansial dari penjualan energi listrik secara terus menerus yang didapatkan apabila pekerjaan pemeliharaan atau perluasan jaringan energi listrik menggunakan metode PDKB. Untuk menghitung rupiah terselamatkan digunakan persamaan (2.2).

$$Rpsafe = Esafe \times Rp \text{ per kWh} \quad (2.2)$$

Dengan :

$Rpsafe$: Rupiah terselamatkan (Rp)

$Esafe$: kWh terselamatkan (kWh)

$Rp \text{ per kWh}$: Harga rata-rata per kWh (Rp)

3. SAIDI (System Average Interruption Duration Index)

SAIDI adalah salah satu indeks yang menyatakan lamanya pemadaman (gangguan) yang terjadi pada pelanggan (konsumen) pada suatu sistem secara menyeluruh[14]. Jumlah lama gangguan pelanggan adalah baik karena pemadaman ataupun gangguan akibat pemeliharaan. Untuk menghitung nilai SAIDI dapat menggunakan persamaan (2.3).

$$SAIDI = \frac{\sum Ui \times Ni}{NTotal} \quad (2.3)$$

Dengan :

$SAIDI$: Durasi atau lama gangguan Menit/Plg

Ni : Jumlah pelanggan yang terdampak padam

U_i : Durasi atau lama padam (jam)
 N_{total} : Jumlah pelanggan total unit

4. *SAIFI (System Average Interruption Frequency Index)*

SAIFI adalah kali (jumlah) pemadaman yang dialami oleh pelanggan (konsumen) pada suatu sistem secara menyeluruh, baik itu pemadaman akibat terjadi gangguan ataupun akibat gangguan / pemeliharaan. Untuk menghitung nilai *SAIFI* dapat menggunakan persamaan 2.4

$$SAIFI = \frac{\sum Ni}{N_{total}} \quad (2.4)$$

Dimana:

SAIFI : Frekuensi pemadaman (kali/pelanggan)
 N_i : Jumlah Pelanggan terdampak Padam
 N_{total} : Jumlah Pelanggan Total Unit

2.1.6. **PDKB (Pekerjaan dalam keadaan Bertegangan)**

Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB) adalah satuan kerja khusus di PT PLN (Persero) yang bertugas melaksanakan pemeliharaan dan perluasan jaringan listrik tanpa menghentikan aliran tegangan pada sistem tersebut. Di lingkungan PLN, PDKB dibedakan menjadi tiga kategori, yaitu PDKB Tegangan Menengah (TM), PDKB Tegangan Tinggi/Tegangan Ekstra Tinggi (TT/TET), dan PDKB Gardu Induk TT/TET. Perbedaan ketiganya terletak pada cakupan wilayah dan level tegangan kerja. PDKB TM menangani jaringan distribusi 20 kV, PDKB TT/TET beroperasi pada sistem transmisi 150–500 kV, sedangkan PDKB GI TT/TET berfokus di area gardu induk.[8]



Gambar 2. 10 Pekerjaan dalam keadaan Bertegangan
Sumber : Dokumentasi Pribadi

Untuk metode PDKB Tegangan Menengah Berjarak, terdapat jarak aman minimum yang wajib dijaga oleh pelaksana agar pekerjaan tetap aman dari risiko sengatan listrik. Petugas harus memastikan dirinya serta peralatannya tidak melewati batas aman tersebut. Dalam metode ini, jarak aman dikenal dengan istilah Elemen Pelindung (EP), di mana 1 EP setara dengan 10 cm udara, dan batas keselamatan ditetapkan minimal 6 EP. Pelanggaran terhadap jarak tersebut dikategorikan sebagai pelanggaran berat karena berpotensi menimbulkan kecelakaan kerja. Pembagian tugas personel PDKB TM meliputi:

1. Team Leader – Mengkoordinasikan pekerjaan di lapangan, memastikan ketersediaan peralatan, dan memantau perkembangan karier anggota tim.
2. Preparator – Melakukan survei lokasi kerja berdasarkan permintaan unit terkait serta menyusun langkah-langkah teknis untuk pelaksanaan pekerjaan.
3. Kepala Regu – Memimpin kegiatan di lapangan dan mengawasi seluruh aktivitas personel agar tetap sesuai prosedur dan mencapai Zero Accident.
4. Petugas K3 – Mengontrol serta memastikan seluruh perlengkapan keselamatan kerja digunakan dengan benar oleh tim.

5. Linesman – Personel pelaksana yang langsung mengerjakan kegiatan lapangan di bawah arahan kepala regu.

Adapun tugas Personil PDKB Tegangan Menengah sebagai berikut:

1. *Team Leader* bertugas Mengkoordinasikan pekerjaan-pekerjaan yang ada di area dan juga melengkapi peralatan dan memantau jenjang karir personil PDKB.
2. *Preparator* Bertugas untuk mensurvey area pekerjaan di lapangan yang merupakan order dari bidang lain dan hasilnya menjadi pedoman untuk membuat langkah kerja yang selanjutnya dilaksanakan oleh tim PDKB TM.
3. Kepala Regu Bertugas untuk memimpin pekerjaan di lapangan dan memantau setiap pergerakan linesman sehingga tidak melanggar SOP yang bertujuan tercapainya *Zero Accident*.
4. Petugas K3 bertugas Memeriksa dan memantau peralatan K3 yang dipakai oleh *linesman*.
5. *Linesman* bertugas Personil yang bertugas melaksanakan pekerjaan di lapangan dan dipimpin

2.1.7. Protective Sleeve

Protective sleeve merupakan perangkat isolasi tambahan yang digunakan dalam pekerjaan dalam keadaan bertegangan (PDKB) untuk menciptakan penghalang listrik sementara antara bagian konduktif bertegangan dan pekerja. Berbeda dengan isolasi permanen pada penghantar, protective sleeve berfungsi sebagai proteksi temporer yang fleksibel dan mudah dipasang pada konduktor, sambungan, maupun peralatan jaringan distribusi guna membentuk zona kerja aman tanpa perlu melakukan pemadaman jaringan. Prinsip kerjanya didasarkan pada sifat bahan dielektrik yang mampu menahan tegangan listrik dan menyebarkan gradien medan listrik sehingga mengurangi konsentrasi medan pada titik tertentu yang berpotensi menyebabkan loncatan bunga api (*flashover*) maupun arus bocor permukaan. Material yang umum digunakan, seperti EPDM dan silikon karet, dipilih karena memiliki kekuatan dielektrik tinggi, sifat hidrofobik, ketahanan terhadap radiasi ultraviolet, serta stabil

terhadap kelembaban dan polusi lingkungan, sehingga tetap mempertahankan performa isolasi pada kondisi kerja lapangan yang ekstrem.

Dalam pelaksanaan pemeliharaan peralatan jaringan distribusi tegangan menengah, khususnya pada Load Break Switch Motorized (LBSM), protective sleeve digunakan untuk menutup konduktor aktif di sekitar area kerja, melindungi jumper bertegangan, serta meminimalkan risiko flashover saat manipulasi peralatan. Penggunaan sleeve memungkinkan pekerjaan dilakukan tanpa penghentian suplai listrik, sehingga kontinuitas pelayanan tetap terjaga. Dari perspektif keselamatan kerja, protective sleeve berfungsi sebagai proteksi sekunder setelah penerapan jarak aman kerja, penggunaan sarung tangan isolasi, dan peralatan berisolasi, sehingga mampu menurunkan risiko sengatan listrik, hubung singkat akibat kontak tidak disengaja, serta cedera akibat arc flash. Selain meningkatkan keselamatan personel, penerapan protective sleeve dalam metode PDKB berkontribusi terhadap peningkatan keandalan sistem distribusi dengan mengurangi kebutuhan pemadaman terencana, menekan durasi gangguan (SAIDI), dan menurunkan frekuensi gangguan yang dirasakan pelanggan (SAIFI).

Efektivitas protective sleeve sangat bergantung pada kondisi material dan kepatuhan terhadap prosedur pemasangan. Peralatan harus melalui inspeksi visual dan pengujian berkala untuk memastikan tidak terdapat retakan, kontaminasi, atau degradasi yang dapat menurunkan kemampuan isolasinya. Pemasangan yang tidak tepat dapat menimbulkan celah isolasi yang berpotensi menyebabkan kegagalan proteksi. Oleh karena itu, kepatuhan terhadap standar operasional PDKB dan pemeliharaan peralatan proteksi menjadi faktor krusial dalam menjamin keselamatan pekerja sekaligus menjaga keandalan sistem distribusi tenaga listrik.



Gambar 2. 11 Bentuk Selongsong Protective JTM

2.2. Penelitian Terkait

Penelitian oleh Putra (2016) menitikberatkan pada evaluasi kontribusi penerapan Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB) terhadap peningkatan energi listrik terjual (kWh jual) pada penyulang Virgo PT PLN (Persero) WS2JB Area Lahat. PDKB merupakan metode pemeliharaan jaringan distribusi yang dilakukan tanpa menghentikan suplai listrik, sehingga kontinuitas penyaluran daya tetap terpelihara. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penerapan teknik PDKB mampu menurunkan jumlah gangguan dan pemadaman akibat kegiatan pemeliharaan maupun perbaikan, sehingga keandalan sistem distribusi meningkat secara signifikan[9].

Sementara itu, Sugiarto (2014) melakukan penelitian mengenai analisis penghitungan energi listrik yang dapat diselamatkan (kWh terselamatkan) melalui penerapan PDKB pada Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) 20 kV di PLN Cabang Singkawang. Dalam penelitiannya, PDKB digunakan sebagai strategi

pemeliharaan preventif yang memungkinkan pekerjaan dilakukan tanpa pemutusan aliran listrik, sehingga pasokan energi ke pelanggan tetap terjaga secara kontinu [4].

Zaputra, Ayuni, Anshory, dan Falah (2025) meneliti inovasi penggunaan *temporary divider* sebagai alat untuk mengurangi rugi-rugi operasional di PT PLN (Persero) UP3 Sidoarjo. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan *temporary divider* mampu menekan durasi pemadaman saat pekerjaan pemeliharaan maupun penanganan gangguan, sehingga energi listrik yang berpotensi hilang dapat tetap tersalurkan ke pelanggan. Inovasi ini tidak hanya meningkatkan keandalan dan fleksibilitas operasi jaringan distribusi, tetapi juga memberikan manfaat ekonomi bagi perusahaan melalui pengurangan rugi-rugi energi dan peningkatan kWh jual.[10]

2.3. Kerangka Pemikiran

Penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk memahami karakteristik jaringan distribusi 20 kV, penyebab gangguan, serta peran *Protective Sleeve* dan metode PDKB sebagai upaya mitigasi tanpa pemadaman. Berdasarkan pemahaman tersebut, dilakukan identifikasi masalah pada titik-titik rawan gangguan di PT PLN (Persero) UP3 Padang, kemudian dilanjutkan dengan pengumpulan data gangguan sebelum dan sesudah pemasangan sleeve. Setelah itu, dilakukan pemasangan *Protective Sleeve* menggunakan PDKB dan analisis data untuk menilai efektivitasnya dalam menurunkan gangguan serta meningkatkan indikator keandalan seperti SAIDI, SAIFI, dan ENS. Hasil analisis tersebut menjadi dasar dalam menyusun kesimpulan dan rekomendasi mengenai dampak pemasangan sleeve dan potensi penerapannya secara lebih luas.