

BAB II

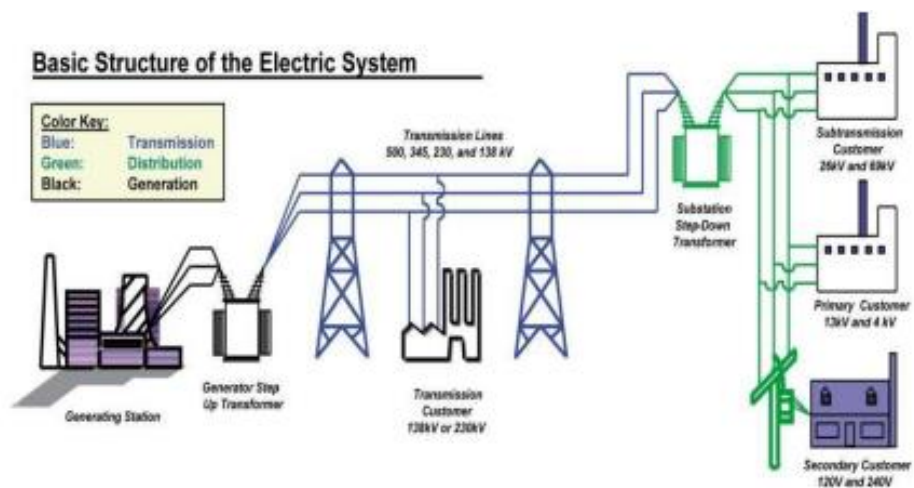
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan kumpulan peralatan yang mencakup sistem transmisi, sistem distribusi, dan sistem pembangkitan, di mana ketiga sistem tersebut saling berkaitan dan bekerja sama untuk menghasilkan listrik dan menyalurkannya, sehingga konsumen dapat menikmati listrik (Syahputra, 2021).

Gambar 2.1 menunjukkan struktur dasar sistem tenaga listrik



Gambar 2.1 Struktur Dasar Sistem Tenaga Listrik (Syahputra, 2021)

Pada sistem pembangkitan, sumber energi seperti panas bumi, hidro, dan fosil (gas alam, batubara, dan minyak bumi) diolah, disalurkan, dan digunakan energi potensialnya, sehingga mampu memutar turbin dan menghasilkan energi mekanis berupa putaran pada poros turbin yang sudah dihubungkan dengan generator sinkron. Dalam generator, energi mekanis diubah menjadi sebuah energi

listrik yakni sebesar 11 kV - 24 kV dan selanjutnya dinaikkan tegangannya dengan transformator *step up* menjadi 70 kV, 154 kV, 220 kV, dan 500 kV yang selanjutnya disalurkan menggunakan sistem transmisi (Suhadi , 2008).

Berikut merupakan penjelasan tentang bagian utama sistem tenaga listrik, yakni:

1. Pusat Pembangkit Listrik (*Power Plant*)

Power plant adalah fasilitas industri yang dirancang untuk menghasilkan listrik dalam jumlah yang besar dengan menggunakan berbagai sumber energi yang bertujuan untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat, industri, dan komersial. Pada umumnya, pusat pembangkit listrik mempunyai gardu induk. Terdapat beberapa peralatan utama dalam gardu induk, yakni: transformator, yang mempunyai fungsi untuk menaikkan tegangan generator (11,5 kV) menjadi tegangan tinggi atau tegangan transmisi (150 kV) dan juga peralatan pengaman serta pengatur.

2. Transmisi Tenaga Listrik

Transmisi tenaga listrik adalah proses penghantaran tenaga listrik dari pembangkit menuju gardu listrik. Jalur yang terinterkoneksi untuk memfasilitasi penghantaran dikenal dengan jaringan transmisi listrik.

3. Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem ini merupakan sub sistem tenaga listrik yang berhubungan secara langsung dengan pengguna listrik. Sistem ini mencakup: gardu induk atau pusat pengatur, gardu hubung, jaringan primer atau saluran tegangan menengah (6 kV dan 20 kV) yang berupa kabel bawah tanah atau saluran udara, jaringan sekunder

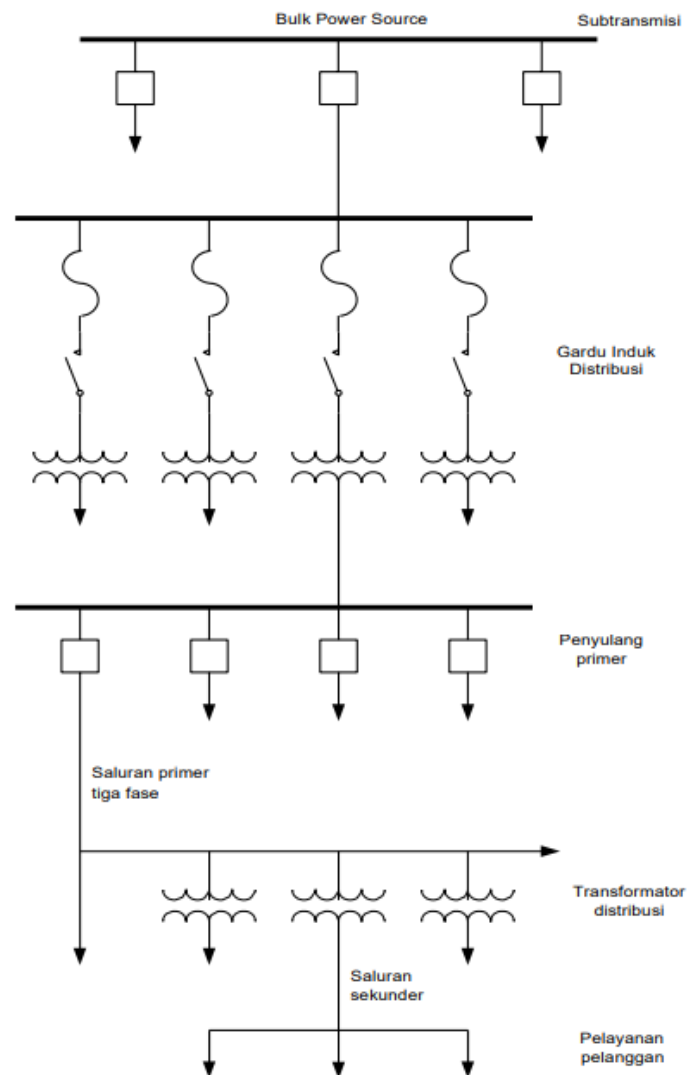
atau saluran tegangan rendah (380 V dan 220 V), gardu distribusi tegangan terdiri dari beberapa panel yang mengatur tegangan, baik tegangan rendah atau tegangan menengah dan trafo. (Joko et al, 2010:1-3)

2.1.2 Sistem Distribusi Listrik

Sistem distribusi listrik termasuk ke dalam bagian sistem penyaluran energi listrik antara *bulk power source* dan *customers service switch*. Sistem distribusi meliputi beberapa perangkat sebagai berikut (Syahputra, 2021) :

1. Gardu induk distribusi
2. Sistem subtransmisi
3. Penyulang primer atau penyulang distribusi
4. Untai sekunder
5. Transformator distribusi
6. *Service drops* atau pelayanan pelanggan

Namun, terdapat beberapa *engineer* sistem distribusi yang cenderung mengartikan sistem distribusi sebagai sistem perlengkapan elektrik antara gardu induk dan pelanggan (Syahputra, 2021). Gambar 2.2 memperlihatkan diagram satu garis dari sistem distribusi yang khas.



Gambar 2.2 Diagram Satu Garis Sistem Distribusi.

Sebuah sistem bisnis penyaluran energi listrik dikatakan lengkap apabila mempunyai empat unsur dasar, yakni:

1. Adanya unsur pembangkit tenaga listrik. Listrik yang diperoleh dari pusat pembangkit tenaga merupakan daya listrik yang mempunyai tegangan menengah atau TM.

2. Adanya sistem transmisi, lengkap dengan gardu induk karena jarak biasanya jauh, sehingga dibutuhkan pemakaian tegangan tinggi (TT) atau tegangan ekstra tinggi (TET). Hal tersebut bertujuan supaya energi listrik yang tersalurkan kepada pelanggan masih besar meskipun sudah terkena *losses*.
3. Adanya saluran distribusi, secara umum mencakup saluran distribusi primer dengan tegangan menengah (TM) dan saluran distribusi sekunder dengan tegangan rendah (TR) yang berfungsi untuk menyalurkan energi listrik kepada pengguna.
4. Adanya unsur penggunaan, meliputi instalasi pemakaian tenaga listrik. Instalasi rumah tangga biasanya memakai listrik dengan tegangan rendah. Sementara itu, pemakaian besar umumnya memakai listrik tegangan menengah atau tegangan tinggi sesuai dengan keperluan akan energi listrik.

Dalam rangka menetapkan desain sistem distribusi tenaga listrik, Abdul Kadir (2000) mengatakan bahwa ada tiga hal yang harus dipertimbangkan, yakni:

- a. Jenis sistem kelistrikan: arus bolak-balik (ac) atau arus searah (dc). Apabila arus ac, maka harus dipertimbangkan satu fase atau multi fase.
- b. Jenis sistem penyediaan: radial, jaringan atau interkoneksi (*loop*)
- c. Jenis konstruksi: kabel tanah atau saluran udara.

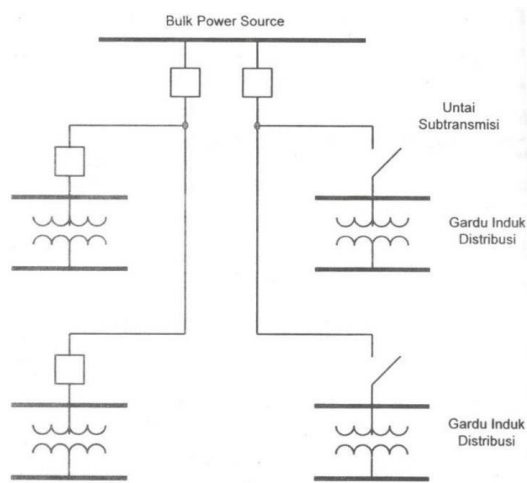
Selain itu, ada faktor pertimbangan yang harus dipikirkan saat menetapkan desain sistem distribusi. Faktor pertama, yakni keamanan, memperhatikan faktor tersebut bertujuan supaya energi listrik tersalurkan kepada pemakai dengan risiko bahaya yang sekecil mungkin, baik risiko terhadap perangkat penyalur atau risiko pada manusia. Selanjutnya, faktor yang harus menjadi bahan perhatian adalah penyediaan tenaga listrik harus dilakukan dengan stabil, teratur, dan tidak

bergejolak, artinya ketersediaan energi listrik diharapkan selalu dalam kondisi stabil dan bisa dinikmati para konsumen secara berkelanjutan. Faktor ketiga, yakni masalah ekonomi. Artinya, energi listrik harus disalurkan kepada konsumen dengan harga yang terjangkau.

2.1.3 Subtransmisi

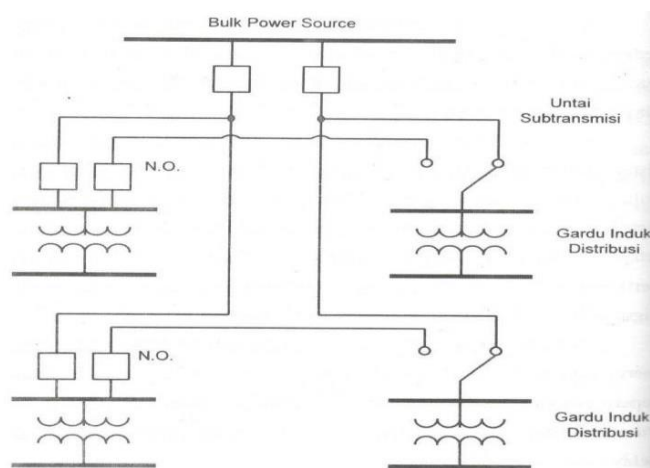
Sistem subtransmisi listrik adalah bagian penting dari infrastruktur penyediaan energi listrik yang menghubungkan antara pembangkit listrik dengan jaringan distribusi listrik yang lebih kecil. Sistem subtransmisi terdiri dari beberapa komponen utama, termasuk saluran transmisi yang lebih besar, gardu induk, trafo *step-down*, peralatan proteksi, dan peralatan pengukuran. Komponen-komponen ini bekerja sama untuk mentransmisikan listrik dengan efisien dari pembangkit listrik ke jaringan distribusi.

Subtransmisi termasuk ke dalam bagian sistem transmisi yang mempunyai fungsi untuk mengirimkan daya dari *bulk power sources* menuju gardu induk yang terdapat di lokasi tertentu sebagaimana pada gardu induk sistem transmisi. Konstruksi sistem subtransmisi berupa kabel bawah tanah atau saluran udara. Tegangan pada sistem subtransmisi umumnya memakai tegangan tinggi (70 kV - 150 kV), ataupun tegangan ekstra tinggi (500 kV). Secara umum sistem subtransmisi memakai level tegangan 69 kV, 115 kV, dan 138 kV. Penerapan dan pemakaian level tegangan tinggi bermaksud supaya arus yang mengalir menjadi lebih kecil. Hal tersebut bertujuan efisiensi dan faktor ekonomis sebab saluran penghantar yang dipakai menjadi lebih efisien.

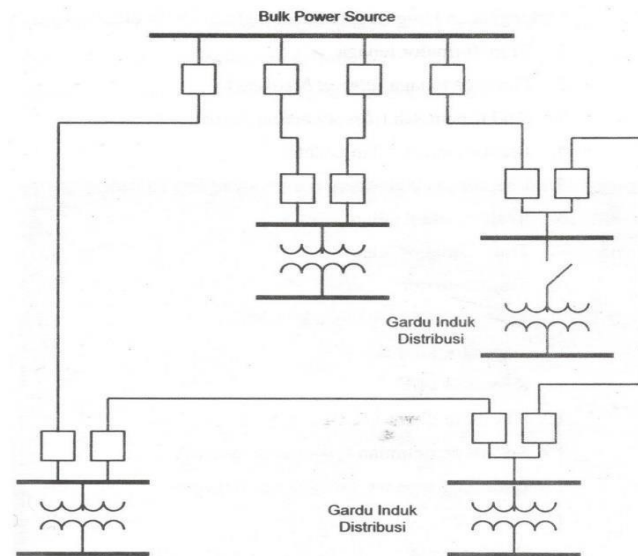


Gambar 2.3 *Single Line Diagram* Subtransmisi Sederhana Tipe Radial
(Sumber : Diktat Sistem Tenaga Listrik Universitas Sumatera Utara)

Sistem subtransmisi mempunyai desain dan penampang yang beragam, mulai dari sistem subtransmisi tipe radial yang sederhana sampai penampang subtransmisi yang lebih kompleks dan luas. Terdapat faktor utama yang menjadi pertimbangan dalam menentukan desain sistem subtransmisi, yakni faktor biaya/ekonomi dan keandalannya.



Gambar 2.4 *Single Line Diagram* Subtransmisi Tipe Radial yang Dimodifikasi
(Sumber : Diktat Sistem Tenaga Listrik Universitas Sumatera Utara)



Gambar 2.5 *Single Line Diagram* Subtransmisi Tipe Radial Kompleks yang Dimodifikasi

(Sumber : Diktat Sistem Tenaga Listrik Universitas Sumatera Utara)

2.1.4 Gardu Induk Sistem Distribusi

Gardu induk distribusi sering kali disebut sebagai "gardu induk". Desain gardu induk distribusi sudah distandarisi oleh industri perlengkapan elektrik berdasarkan pengalaman terdahulu. Namun, proses standarisasi masih terus berjalan dari waktu ke waktu, untuk beradaptasi dengan kondisi terkini. Berikut merupakan perlengkapan yang ada di dalam sebuah gardu induk, yakni:

1. Transformator tenaga
2. *Circuit breakers* atau pemutus tenaga
3. Isolator dan bus-bus stasiun
4. *Disconnecting switch* atau saklar pemisah
5. *Current-limiting reactors* atau reaktor pembatas arus

6. Transformator arus
7. *Shunt reactors* atau reaktor *shunt*
8. Transformator tegangan kapasitor
9. Transformator tegangan
10. Kapasitor kopling
11. Kapasitor *shunt*
12. Kapasitor seri
13. *Grounding system* atau sistem pembumian
14. *Lightning arrester* dan/atau celah (*gaps*)
15. Rele proteksi
16. *Line traps*
17. Baterai
18. Peralatan pendukung lain.

Transformator tenaga adalah peralatan utama dan yang paling penting dalam gardu induk distribusi. Kapasitas sebuah gardu induk terletak pada kapasitas daya terpasang pada transformator tenaga yang dipakai. Selain itu, gardu induk mempunyai peralatan penting lainnya, yakni transformator tegangan, transformator arus, saklar pemisah (DS), pemutus tenaga (CB), dan lainnya. Transformator tegangan dan transformator arus dipakai untuk kebutuhan proteksi dan alat-alat ukur.



Gambar 2.6 Transformator Tenaga
(Sumber : Diktat Sistem Tenaga Listrik Universitas Sumatera Utara)



Gambar 2.7 Transformator Arus Bertegangan Tinggi (72,5 kV – 550 kV) yang
Menggunakan Media Isolasi Gas
(Sumber : Diktat Sistem Tenaga Listrik Universitas Sumatera Utara)



Gambar 2.8 Transformator Tenaga Berisolasi Gas (300 MVA, 275 kV) Untuk Gardu Induk Bawah Tanah.

(Sumber : Diktat Sistem Tenaga Listrik Universitas Sumatera Utara)

Berdasarkan konstruksinya, maka gardu induk diklasifikasikan menjadi 3 macam, yakni:

1. Gardu Induk Pasangan Luar

Jenis gardu induk ini sering kali disebut sebagai gardu induk konvensional. Pada gardu induk ini peralatan listrik ditempatkan di lokasi yang terbuka atau outdoor, hanya *relay*, panel kontrol, dan sumber listrik DC yang berada di dalam gedung. Konstruksi tipe ini mempunyai kelebihan berupa murah biaya pemasangan dan pengisolasian sebab memakai isolasi udara. Tetapi, seperti peralatan listrik *outdoor* lainnya, kekurangan dari jenis gardu induk ini adalah rentan terhadap cuaca dan pengaruh alam lainnya, misalnya sambaran petir bisa menyebabkan tegangan lebih pada komponen gardu induk.

2. Gardu Induk Pasangan Dalam

Gardu induk jenis ini memasang berbagai komponen penyusunnya di dalam ruangan atau *indoor*. Isolasi yang dipakai, yakni isolasi GIS (*Gas Insulated Switchyard*). Kelebihan dari tipe ini adalah perawatannya lebih sedikit sebab tidak terpengaruh oleh kondisi alam dan cuaca. Sementara itu, kekurangannya adalah biaya pemasangan dan konstruksi mahal.

3. Gardu Induk Pasangan Gabungan

Pada gardu jenis ini, komponen yang diletakkan di *outdoor* hanya transformator, sementara yang lain diletakkan di dalam ruangan.

4. Gardu Induk Bawah Tanah

Gardu induk jenis ini hampir serupa dengan gardu induk tipe konstruksi pasangan dalam, yang menjadi pembeda adalah lokasinya di bawah tanah. Pemasangan konstruksi seperti ini dilakukan jika tidak ada area atau lahan yang bisa mencakup konstruksi lain.

2.1.5 Penyulang Distribusi Primer

Bagian di antara gardu induk distribusi dan transformator distribusi, disebut dengan jaringan tegangan menengah atau sistem distribusi primer (20 kV) yang mempunyai fungsi untuk menyalurkan energi listrik ke pusat beban. Saluran distribusi bisa berupa saluran bawah tanah ataupun saluran udara, disesuaikan dengan kondisi lingkungan dan kebutuhan dari beban.

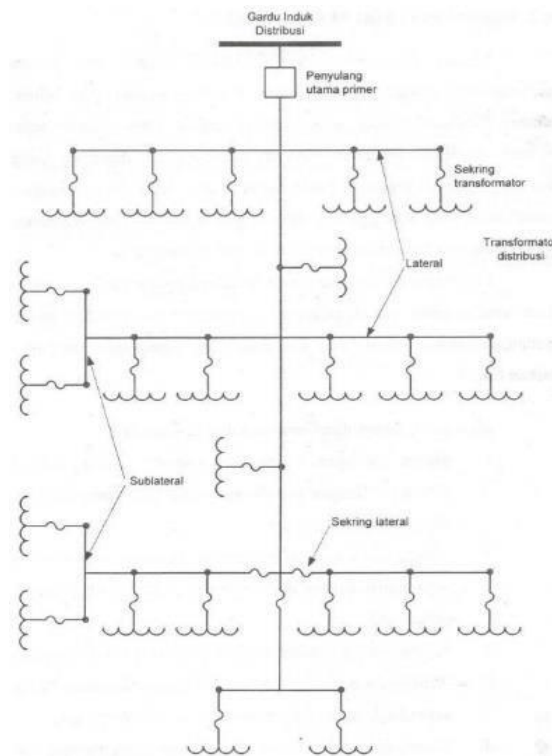
Suatu penyulang (*feeder*) mempunyai fungsi sebagai komponen *output* dari proses pengubahan level tenaga di gardu induk. Jumlah *feeder* dalam setiap gardu induk berbeda-beda. Komponen *feeder* tersusun atas penyulang utama,

berupa untai tiga fasa empat kawat, dan percabangan. Biasanya untai fasa tunggal atau tiga fasa yang ditambatkan pada penyulang utama. Selain dua komponen tersebut, terdapat komponen *sublateral* yang biasanya dipakai di area pedesaan dan perumahan perkotaan. *Sublateral* mempunyai wujud untai fasa tunggal dan terdiri dari satu konduktor netral dan konduktor fasa.

Sebuah *feeder* dalam sistem distribusi primer, dapat diputuskan dengan memakai perangkat *recloser*, yakni komponen berfungsi sebagai pemutus rangkaian yang bisa bekerja secara cepat jika terdapat gangguan. Hal tersebut dilakukan melalui koordinasi seluruh *recloser* dan sekring. Pesan tersebut dapat membuat nilai keandalan dari seluruh sistem mengalami penurunan. Pesan dapat terjadi dalam kurun beberapa detik atau bahkan bisa sampai berjam-jam. Hal tersebut mendapatkan pengaruh dari penyebab atau sumber terjadinya gangguan dan waktu yang dibutuhkan untuk proses perbaikan. Oleh sebab itu, demi menjaga kualitas penyaluran energi listrik, maka dibutuhkan pemeliharaan secara berkala, terkhusus untuk menghindari gangguan teknis. Hal ini berlaku pada bagian penyulang supaya nilai keandalan terjaga dengan baik.

Kondisi kualitas tegangan yang buruk dalam sebuah sistem distribusi, terkhusus saat ada lonjakan beban bisa diperbaiki dengan memakai kapasitor *shunt*, yang tersusun paralel dan terletak sedekat mungkin dengan pusat beban untuk memperbaiki tegangan pelayanan yang kurang baik. Selain itu, kapasitor *shunt* juga dipakai untuk memperbaiki faktor daya. Faktor daya yang sudah diperbaiki menyebabkan kinerja sistem distribusi menjadi lebih maksimal, dan kerugian sistem distribusi dapat diminimalisir.

Ada beberapa konfigurasi dalam sistem distribusi, yakni tipe *loop*, tipe radial, dan *network* atau jaringan interkoneksi. Penyulang sistem distribusi tipe radial adalah konfigurasi yang sederhana dengan biaya paling ekonomis jika dibandingkan dengan konfigurasi tipe lain. Gambar 2.9 memperlihatkan proses penyaluran yang dimulai dari penyulang utama, kemudian bercabang menuju ke beberapa *lateral* utama. Berikutnya, dari *lateral* utama menuju ke *sublateral* untuk menyuplai transformator distribusi.



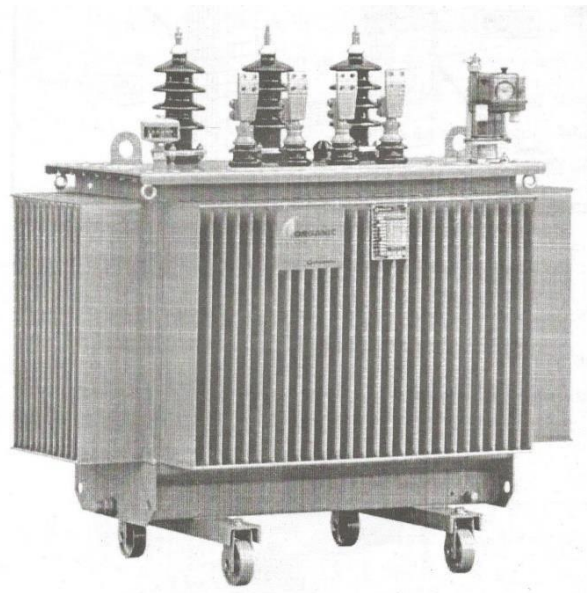
Gambar 2.9 *Single Line Diagram* Sistem Distribusi Primer Tipe Radial
(Wicaksono and Suhardi, 2019)

2.1.6 Transformator Distribusi

Transformator distribusi mempunyai fungsi seperti transformator pada umumnya, namun transformator ini dipakai sebagai *changer tap down level*

tegangan sistem primer atau tegangan menengah (2,4 kV s.d. 34,5 kV) menjadi level tegangan pelayanan (120 V s.d. 600 V). Transformator distribusi pada saluran distribusi udara yang dipakai terbagi menjadi tiga golongan, yakni transformator konvensional, *completely self protecting* atau transformator swa-proteksi lengkap dan *completely self-protecting banking* atau transformator banking sekunder swa-proteksi lengkap (Suhadi , 2008).

Keandalan transformator distribusi adalah sesuatu yang paling krusial, sebab transformator distribusi ini adalah komponen penting dari sistem distribusi, sebab transformator inilah yang menyediakan daya dari sistem distribusi kepada konsumen. Di Indonesia, sistem distribusi 20 kV dan transformator distribusi dipakai untuk menurunkan tegangan dari 20 kV menjadi tegangan 380 V (fase ke fase) atau 220 V (fase ke netral). Secara umum, transformator distribusi dilengkapi dengan berbagai peralatan pendukung seperti pes tegangan, *arester*, *tap changer*, dan *protective link*. Umumnya, trafo distribusi diletakkan di *over head* atau tiang distribusi, sehingga disebut sebagai trafo tipe *pole*.



Gambar 2.10 Transformator Distribusi
(Sumber : Diktat Sistem Tenaga Listrik Universitas Sumatera Utara)

2.1.7 Sistem Pengaman Jaringan Distribusi

Sistem pengaman mempunyai fungsi untuk melindungi, membatasi, dan mencegah jaringan dan peralatan sistem distribusi dari berbagai jenis gangguan, baik gangguan yang sifatnya sementara atau permanen, sehingga kualitas dan keandalan penyaluran daya listrik terjamin dengan baik.

Merujuk pemakaian dan prinsip kerja, maka pengaman jaringan distribusi terbagi menjadi (Wicaksono dan Suhardi, 2019) :

a. Penutup Balik Otomatis (*Recloser*)

Recloser adalah pengaman yang dipakai pada sistem jaringan distribusi yang bekerja apabila terdapat gangguan. Cara kerja *recloser* yakni dengan membuka secara otomatis dan terhubung lagi secara otomatis jika gangguan sudah hilang. Selain itu, *recloser* juga berfungsi sebagai isolasi atau pembatas daerah yang terkena gangguan supaya tidak terhubung ke daerah lain yang masih bekerja dengan

baik. Waktu operasi *recloser* dapat diatur sesuai dengan keperluan, yakni *delay* (lambat) dan *fast* (cepat).

Recloser yang dilengkapi dengan fungsi buka dan tutup otomatis sangat berguna untuk menghilangkan gangguan yang berkepanjangan pada sistem yang disebabkan oleh adanya gangguan sesaat atau adanya *transient over current*. Jika *recloser* mendeteksi arus gangguan di daerah pengamannya, maka *recloser* akan memutuskan arus (membuka kontaktor), selanjutnya dengan waktu tunda yang ditentukan secara otomatis akan menutup kembali kontak. Apabila masih terdapat gangguan, maka *recloser* akan bekerja membuka dan menutup berturut-turut sampai 3 atau 4 kali langsung mengunci (Luis et al. 2018). *Recloser* umumnya terpasang di sisi awal/pertama datangnya tegangan dari gardu induk. Hal tersebut dikarenakan *recloser* sebagai koordinator pengaman yang bisa dikoordinasikan dengan peralatan pengaman lain seperti *sectionalizer* atau *fuse cut out*.

b. Saklar Beban / *Load Break Switch* (LBS)

LBS atau saklar pemutus beban adalah saklar yang berfungsi untuk memutuskan arus tiga fasa saat dalam kondisi berbeban. Sistem LBS dikontrol dengan *remote* atau dalam kata lain dikontrol dari jarak jauh. LBS memutuskan hubungan jaringan dengan memakai gas SF-6.

Saklar Beban/*Load Break Switch* (LBS) adalah saklar yang mempunyai fungsi untuk menghubungkan satu penyulang dengan penyulang lain dalam kondisi berbeban pada jaringan distribusi bertipe lingkaran terbuka (*open ring*). Biasanya, alat

ini dipasang di atas tiang jaringan dengan tuas berada di bawah dan berfungsi sebagai pembatas lokasi gangguan (Wicaksono dan Suhardi, 2019).

c. *Fuse Cut Out (FCO/CO)*

Pelebur (*Fuse Cut Out*) merupakan komponen pemutus daya listrik yang dilengkapi elemen pemutus yang akan melebur apabila dialiri arus lebih pada jaringan. Alat tersebut berfungsi untuk memutuskan aliran listrik apabila terjadi gangguan arus lebih. Pemasangan *fuse cut out* biasanya dipasang pada jaringan percabangan dengan tujuan agar ketika terjadi gangguan pada jaringan percabangan tersebut *fuse cut out* yang berfungsi sebagai pengaman dapat melokalisir meluasnya daerah yang mengalami pemadaman (Wicaksono dan Suhardi, 2019).

d. *Rele Arus Lebih (Over Current Relay, OCR)*

Rele arus lebih adalah pengaman utama sistem distribusi tegangan menengah terhadap gangguan hubung singkat antar fasa. Rele arus lebih merupakan rele yang bekerja berlandaskan adanya kenaikan arus yang melebihi nilai *setting* pengaman tertentu dalam waktu tertentu. Merujuk karakteristik waktu kerja, maka rele arus lebih terbagi menjadi tiga, yakni:

- 1) Instant atau tanpa penundaan waktu
- 2) Dengan penundaan waktu:
 - a. *Definite time* OCR atau dengan penundaan waktu tertentu
 - b. *Inverse time* OCR atau dengan penundaan waktu berbanding terbalik
- 3) Kombinasi *definite time* dan instant (Suhadi & Wrihatnolo, 2008).

e. Saklar Seksi Otomatis (*Sectionalizer*, SSO)

Saklar seksi otomatis (SSO, *Sectionalizer*) merupakan alat pemutus yang mempunyai fungsi untuk mengurangi luas area yang padam karena adanya gangguan. *Sectionalizer* membagi jaringan distribusi ke dalam *section-section*, dengan demikian jika terjadi gangguan pada salah satu *section*, maka luas daerah yang padam bisa diperkecil. SSO terbagi menjadi dua jenis, yakni pengindera arus yang disebut *Automatic Sectionalizer* dan pengindera tegangan yang disebut *Automatic Vacuum Switch (AVS)*.

Cara kerja *sectionalizer*, yakni dengan melakukan deteksi tegangan pada *section* kerjanya. Saat tegangan tidak ada, maka *sectionalizer* akan membuka, sedangkan apabila terdapat tegangan, maka *sectionalizer* akan menutup. *Sectionalizer* dapat dioperasikan dengan manual untuk memutus arus beban.

f. Rele Arus Gangguan Tanah (*Ground Fault Relay*)

Ground fault relay adalah pengaman utama terhadap gangguan hubung singkat fasa ke tanah untuk sistem yang ditanahkan langsung atau melalui tahanan rendah.

g. Pemisah (PMS)/*Disconnecting Switch* (DS)

Pemisah (PMS)/*Disconnecting Switch* (DS) merupakan saklar yang mempunyai fungsi untuk menghubungkan atau memutuskan jaringan listrik dalam kondisi tidak bertegangan atau tidak berbeban. Alat tersebut umumnya dipakai untuk pemeliharaan jaringan listrik yang dilaksanakan PLN. Secara umum, DS

tidak bisa memutuskan arus. Namun, DS bisa memutuskan arus yang kecil. Proses membuka atau menutup DS harus dilakukan sesudah membuka CB.

h. *Lightning Arrester* (LA)

Lightning arrester sebagai pengaman peralatan listrik dari gangguan arus lebih yang diakibatkan sambaran petir. LA mempunyai fungsi sebagai konduktor yang memiliki tahanan rendah, dengan demikian arus tinggi akan dialirkan ke tanah untuk dinetralisir. Sesudah gangguan hilang, maka *arrester* akan kembali menjadi isolator.

2.1.8 Untai Penghantar Jaringan Tegangan Menengah (Primer)

Pada jaringan distribusi primer (tegangan menengah), untai kabel atau saluran yang dipakai harus sesuai dengan lokasi pemasangan kabel sebab setiap lokasi mempunyai kondisi dan karakteristik yang berbeda. Satuan baku yang dipakai pada kawat atau jaringan kabel adalah kilometer sirkuit (kms). Penggunaan satuan kms bermaksud supaya perhitungan panjang *line* menjadi lebih tepat sebab hanya panjang untai saja yang dihitung. Affandi (2015) mengatakan bahwa untai kabel jaringan distribusi primer terbagi menjadi tiga kelompok, yakni:

a. Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) 6 kV – 20 kV

Jenis kabel/penghantar yang digunakan yakni kabel tanpa isolasi (telanjang) seperti kabel dengan bahan kawat AAAC (*All Aluminium Alloy Conductor*), ACSR (*Alluminium Conductor Steel Reinforced*), dan lainnya.

b. Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah (SKUTM) 6 kV – 20 kV

Pada jenis lokasi ini, jenis kabel yang dipakai yakni kabel dengan isolasi, contohnya kabel MVTIC (*Medium Voltage Twisted Insulated Cable*) dan AAACS, yakni jenis kabel berbahan *aluminium alloy* dengan pembungkus lapisan PVC.

c. Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM) 6 kV – 20 kV

Apabila lokasi berada di dalam tanah, maka kabel yang dipakai yakni kabel tanam yang memakai isolasi XLPE (*Crosslink Polyethelene*), PVC (*Poly Venyl Chloride*), dan lainnya.

Penggunaan kabel saluran udara mempunyai kelebihan yakni proses pemasangan yang lebih cepat dan biayanya juga lebih murah. Namun, kabel jenis ini rentan terpengaruh dan terganggu oleh kondisi alam dan cuaca. Banyaknya kabel yang melintang menyebabkan akan terlihat buruk untuk dipandang dan mengganggu. Kabel saluran udara cocok jika dipakai untuk menyalurkan energi listrik di daerah yang jauh.

Kabel saluran bawah tanah mempunyai kekurangan diantaranya adalah waktu dan biaya pemasangan lebih mahal jika dibandingkan dengan saluran udara. Jika terjadi gangguan, maka gangguan tersebut akan sukar ditemukan dan diperbaiki. Kabel saluran bawah tanah juga mempunyai kelebihan, yakni lebih tahan dan tidak mudah terpengaruh oleh cuaca dan kondisi alam di lingkungan sekitar. Pemasangan isolasi memengaruhi tekanan yang diterima di bawah tanah, sehingga penggunaanya lebih awet. Jika dilihat dari estetika, kabel bawah tanah

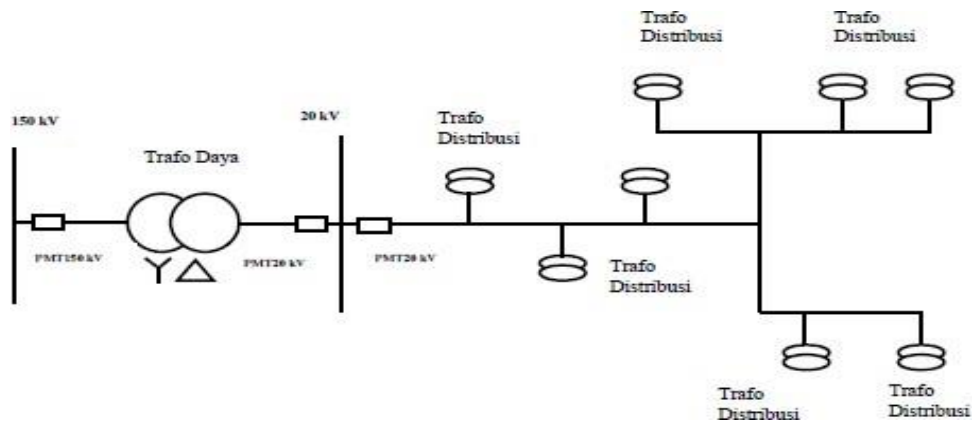
lebih baik jika dibanding dengan saluran udara, sebab kabel tertanam di dalam tanah sehingga tidak mengganggu pandangan (Suripto).

2.1.9 Jaringan Distribusi Primer

Jaringan distribusi primer adalah sistem awal dari seluruh sistem distribusi listrik dari Gardu Induk (GI) menuju ke konsumen untuk sistem pendistribusian langsung. Sementara itu, untuk sistem pendistribusian tak langsung adalah tahap selanjutnya dari jaringan transmisi dalam usaha menyalurkan tenaga listrik ke konsumen. Jaringan ini mempunyai tegangan sistem 20 kV. Di daerah kota, tegangan di atas 20 kV tidak disarankan, sebab pada tegangan 30 kV akan terjadi gejala korona yang mengganggu frekuensi.

Pelayanan sistem distribusi bersifat sangat kompleks dan luas, sebab konsumen yang dilayani mempunyai karakteristik dan lokasi yang berbeda. Karakteristik dalam konteks ini, yakni terdapat konsumen sektor industri dan perumahan. Sistem konstruksi saluran distribusi meliputi saluran bawah tanah dan saluran udara. Pemilihan konstruksi dilandaskan pada pertimbangan berikut: alasan teknis seperti persyaratan teknis, alasan estetika, alasan ekonomis, dan alasan pelayanan yakni keberlanjutan pelayanan sesuai jenis konsumen. Ada tiga jenis dasar sistem jaringan distribusi primer, yakni:

1. Sistem Radial

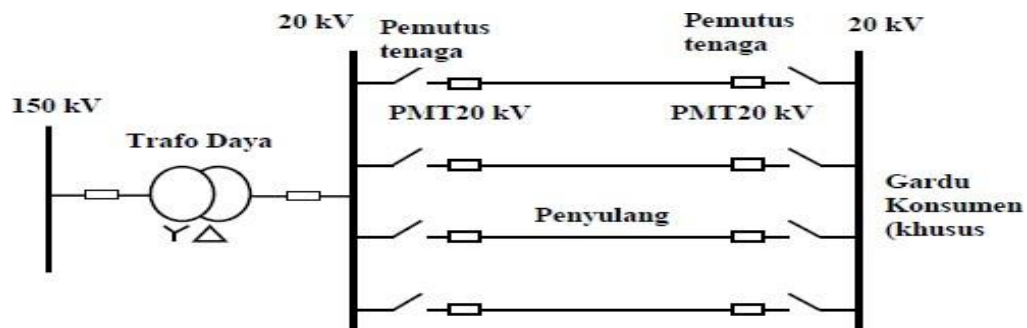


Gambar 2.11 Konfigurasi Jaringan Radial

Sistem distribusi dengan tipe radial adalah sistem distribusi paling ekonomis dan sederhana. Sistem radial memakai beberapa penyulang untuk memasok gardu distribusi secara radial. Gardu distribusi adalah tempat untuk memasang transformator distribusi. Transformator bisa diletakkan di atas tiang atau dalam bangunan beton. Keuntungan sistem ini, yakni tidak rumit dan lebih murah jika dibanding dengan sistem lainnya.

Selain keandalan, sebuah sistem juga mempunyai kelemahan. Adapun kelemahan yang dimiliki sistem ini adalah mempunyai keandalan yang lebih rendah jika dibandingkan dengan sistem distribusi lain. Hal tersebut dikarenakan sistem ini hanya memakai satu jalur utama untuk memasok gardu distribusi. Jika jalur utama yang dipakai mengalami gangguan, maka otomatis akan memengaruhi seluruh gardu yang disuplai. Kerugian lain, yakni terjadinya drop tegangan pada gardu distribusi yang terletak di paling ujung. Hal tersebut dipengaruhi jarak dari sumber ke ujung saluran. Semakin jauh saluran maka kualitas tegangan akan semakin menurun.

2. Sistem Hantaran Penghubung (*Tie Line*)

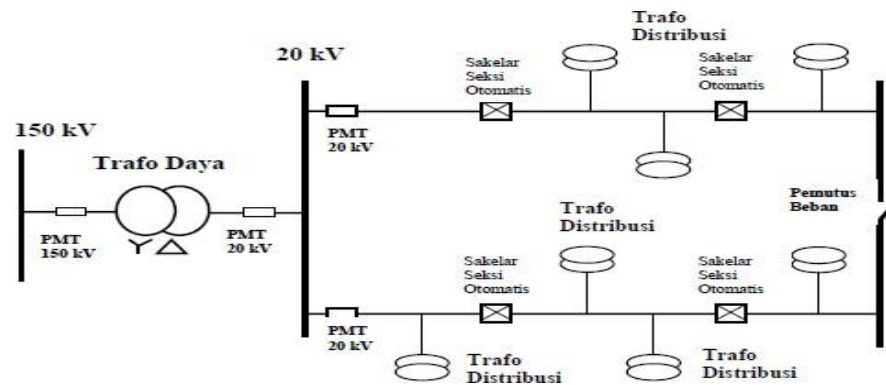


Gambar 2.12 Jaringan Distribusi *Tie Line*

Sistem ini memakai dua penyulang sekaligus atau lebih. *Automatic Transfer Switch* yang ada pada gardu konsumen khusus ditambahkan pada sistem, hal ini berfungsi agar saat ada gangguan pada salah satu penyulang, maka sistem penyaluran listrik akan dipindah ke penyulang lain, sembari menunggu perbaikan pada penyulang yang mengalami gangguan.

3. Sistem *loop*

Sistem *loop* adalah perpaduan dari dua buah sistem radial. Sistem *loop* memiliki sistem operasi yang sama dengan sistem radial. Tetapi keandalan sistem ini lebih baik jika dibandingkan dengan sistem radial biasa. Hal tersebut disebabkan oleh jumlah penyulang pada sistem *loop* yang lebih dari satu buah penyulang yang dipasok dari beberapa gardu induk, sehingga jika terdapat gangguan di salah satu penyulang, maka penyulang lain akan melakukan *back up* sambil menunggu proses perbaikan pada penyulang yang mengalami kerusakan. Sistem *loop* adalah sistem saluran distribusi yang banyak dipakai, sebab konfigurasi dan sifatnya lebih baik dibandingkan sistem distribusi lain.

Gambar 2.13 Sistem Distribusi Tipe *Loop*

2.1.10 Jaringan Distribusi Sekunder

Jaringan distribusi sekunder adalah jaringan distribusi listrik tegangan rendah (TR), yang berhubungan secara langsung dengan konsumen. Pada jaringan ini, dilakukan penyaluran langsung daya listrik menuju konsumen, sehingga bagian sekunder adalah bagian akhir dari seluruh sistem penyaluran energi listrik yang bersumber dari pembangkit hingga sampai kepada konsumen sebagai pengguna listrik, baik konsumen fasilitas umum, industri, atau perumahan.

Jaringan distribusi sekunder memakai tegangan 130/230 V dan 130/400 V untuk sistem lama, dan memakai 380/220 V untuk sistem baru. Tegangan 220 V adalah besarnya tegangan antara fasa dengan netral. Sementara itu, 380 V adalah tegangan antara fasa. Jaringan ini memakai untai 4 pengawatan, yakni tiga fasa dan satu netral. Kawat netral ditempatkan di posisi teratas. Hal tersebut bertujuan agar apabila terjadi sentuhan benda pada saluran, maka resiko keselamatan dapat diminimalisir sebab benda tersebut tertahan di kawat netral terlebih dahulu sebelum menyentuh fasa. Hal tersebut juga meminimalisir risiko kerusakan yang menyebabkan pemadaman.

Pada jaringan distribusi sekunder sering kali terjadi gangguan, terkhusus gangguan non teknis. Gangguan tersebut bisa berupa binatang, ranting, dan benda milik warga yang secara tidak sengaja menyentuh untai kabel dan mengakibatkan gangguan. Indonesia adalah negara tropis yang mengalami musim penghujan setiap tahunnya, di mana pada musim penghujan terjadi peningkatan intensitas gangguan non teknis. Oleh sebab itu, benda-benda yang memiliki kemungkinan menyebabkan gangguan harus dihindarkan dan dijauhkan dari sistem jaringan distribusi sekunder, supaya pasokan listrik berjalan dengan baik dan mempunyai nilai keandalan yang tinggi.

2.1.11 Tegangan Distribusi

Besarnya tegangan yang dipakai sistem jaringan distribusi terbagi menjadi beberapa jenis, yakni:

a. Tegangan Menengah (TM)

Tegangan menengah yakni tegangan yang mempunyai rentang 1 kV - 30 kV. Indonesia memakai besaran tegangan menengah (TM), yakni sebesar 20 kV. Tegangan ini dipakai dalam penyaluran energi listrik dari Gardu Induk (GI) menuju ke gardu - gardu distribusi. Konsumen tegangan menengah seperti pada industri, menyalurkan langsung energi listrik langsung dari Gardu Induk (GI) tanpa melalui gardu induk distribusi, dan umumnya memakai transformator sendiri. Berbeda dengan konsumen tegangan rendah yang harus melalui gardu induk distribusi terlebih dahulu.

b. Tegangan Rendah (TR)

Tegangan rendah yakni rentang tegangan dengan nilai di bawah 1 kV yang dipakai pada penyaluran daya dari gardu distribusi melalui transformator distribusi kepada konsumen tegangan rendah. Penyaluran listrik tegangan rendah memakai sistem tiga fasa dengan empat kawat yang dilengkapi netral. Indonesia memakai tegangan antar fasa 380 V dan tegangan antara fasa dengan netral sebesar 220 V.

2.1.12 Beban Sistem Distribusi

Beban listrik merupakan besarnya atau banyaknya daya listrik yang diperlukan oleh berbagai peralatan yang terhubung pada sistem tenaga listrik untuk menjalankan tugas tertentu. Berdasarkan tegangan dan daya yang diperlukan, maka karakteristik beban diklasifikasikan menjadi 3 kategori yakni (Willis, 2004):

- a. *Constant power*, yakni kebutuhan daya selalu konstan, berapapun besarnya tegangan yang dipakai. Misalnya : motor listrik, saat terjadi *drop* tegangan, maka dari beban akan menyerap arus lebih besar yang bertujuan supaya daya yang dibutuhkan tetap stabil.
- b. *Constant Impedance*, yakni kebutuhan beban selalu menyesuaikan dengan tegangan yang dipakai. Misalnya : lampu pijar, saat terjadi *drop* tegangan maka besarnya arus yang diserap akan lebih kecil, dengan demikian kebutuhan daya mengalami penurunan.
- c. *Constant Current*, yakni kebutuhan daya akan setara dengan tegangan yang dipakai. Misalnya : peralatan las, jika terjadi jatuh tegangan maka daya yang dibutuhkan juga mengalami penurunan.

Beban dari pelanggan, baik pelanggan kelompok atau individu dapat memengaruhi keadaan jaringan distribusi listrik. Peralatan rumah tangga seperti lampu, televisi, dan lainnya bisa sewaktu-waktu dinyalakan dan dimatikan. Kondisi tersebut memberi dampak terhadap karakteristik dan kondisi beban jaringan distribusi listrik secara menyeluruh. Terdapat beberapa istilah yang dipakai dalam analisis jaringan distribusi tenaga listrik, yakni (Kersting, 2002 : 291):

a. *Demand*

Beban rata-rata dalam satuan kW, kVA, kVar, atau A selama kurun waktu yang sudah ditetapkan (jam atau menit). Misalnya: 200 kW dalam interval waktu selama 30 menit.

b. *Maximum Demand*

Beban maksimal selama interval waktu yang sudah ditetapkan, mencakup waktu, durasi, dan unit. Misalnya : beban tertinggi 200 kW dalam rentang waktu satu bulan, interval waktu pengukuran selama 30 menit.

c. *Average Demand*

Rerata besarnya beban dalam periode waktu tertentu (tahun, bulan, minggu, atau hari). *Average demand* dihitung berdasarkan beban rata-rata dalam interval waktu tertentu (jam atau menit). Misalnya : rerata beban 200 kW pada periode satu bulan, dengan interval pengukuran 30 menit.

d. *Load Faktor*

Rasio perbandingan antara *maximum demand* dengan *average demand*.

2.1.13 Gangguan Sistem Distribusi

Gangguan pada jaringan distribusi banyak yang terjadi pada Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM). Hal tersebut disebabkan karena SUTM umumnya tidak memakai isolasi pengaman, sehingga rentan terhadap gangguan cuaca dan pengaruh alam. Tingginya frekuensi gangguan menyebabkan terjadinya keandalan dan kualitas penyaluran listrik yang rendah.

a Jenis Gangguan

Gangguan pada sistem distribusi berasal dari berbagai sumber. Terdapat gangguan yang bersumber dari dalam sistem atau disebut dengan gangguan teknis. Selain itu, terdapat juga gangguan yang bersumber dari gangguan non teknis atau luar sistem.

1) Gangguan teknis, meliputi :

- a) Pemasangan komponen yang kurang tepat
- b) Arus lebih dan tegangan lebih
- c) Peralatan yang dimakan usia

2) Gangguan non-teknis, meliputi :

- a) Kondisi alam dan cuaca (hujan, kilat, dan sambaran petir)
- b) Kerusakan komponen yang disebabkan gangguan binatang

Merujuk sifatnya, maka gangguan pada sistem distribusi dikelompokkan menjadi:

1) Gangguan Temporer

Gangguan temporer mempunyai durasi sebentar sebab dapat hilang dengan sendirinya. Pembenahan gangguan dilakukan melalui *autorecloser*, yakni dengan melakukan pesan pada bagian yang menjadi pusat gangguan, selanjutnya menutup kembali secara otomatis. Selain ditutup secara otomatis, penutupan jaringan terganggu juga bisa dilakukan secara manual melalui operator. Jika gangguan temporer sering terjadi dan *recloser* tidak bekerja secara baik, maka gangguan temporer tersebut dapat menjadi gangguan permanen.

2) Gangguan Permanen

Gangguan permanen mempunyai sifat tetap dan penghilangan gangguan membutuhkan waktu yang lama. Langkah yang dilakukan untuk mengantisipasi gangguan permanen, yakni dengan melakukan perawatan secara berkala dan melengkapi sistem dengan *relay* yang bisa bekerja sesuai fungsi dan daerah pengamanannya.

b. Penyebab Gangguan pada Sistem Distribusi

Umumnya, gangguan terjadi karena kegagalan isolasi di antara kawat penghantar fasa atau penghantar fasa dengan tanah, sehingga kawat penghantar menyentuh kawat penghantar lain atau kawat penghantar menyentuh tanah. Gangguan yang terjadi pada SUTM (Saluran Udara Tegangan Menengah) biasanya terjadi karena (Fatoni, 2016):

- 1) Alam (pohon, petir, angin, panas, dan hujan)
- 2) Manusia

3) Kerusakan saluran dan alat

4) Benda asing dan binatang

c. Akibat-akibat yang Ditimbulkan oleh Gangguan

Berikut merupakan beberapa akibat yang ditimbulkan gangguan, yakni (Nomalasari, 2010):

- 1) Menginterupsi kontinuitas pelayanan daya kepada para konsumen, apabila gangguan itu sampai menyebabkan terputusnya suatu rangkaian atau menyebabkan keluarnya suatu unit pembangkit.
- 2) Penurunan tegangan yang cukup besar menyebabkan rendahnya kualitas tenaga listrik dan merintanginya kerja normal pada peralatan listrik baik PLN maupun konsumen.
- 3) Pengurangan stabilitas sistem dan menyebabkan jatuhnya generator.
- 4) Merusak peralatan pada daerah terjadinya gangguan.

2.1.14 Keandalan Sistem Distribusi

Keandalan adalah kemampuan suatu sistem untuk bekerja secara optimal, dalam durasi waktu tertentu dan dalam berbagai macam kondisi. Keandalan suatu sistem distribusi listrik, erat kaitannya dengan pesan aliran listrik yang disebabkan karena terjadinya suatu gangguan. Nilai keandalan sistem distribusi yaitu berbanding terbalik dengan jumlah pesan beban. Nilai keandalan sistem distribusi dapat dikatakan rendah ketika jumlah pesan jumlahnya tinggi, dan begitu pula sebaliknya. Perlu diketahui keandalan dari suatu sistem dalam hal pelayanan konsumen untuk dapat mengetahui dan kualitas penyediaan pasokan energi listrik

Menurut sudut pandang kelistrikan, keandalan memiliki pengertian sebagai kemampuan dari suatu sistem atau unit untuk bekerja secara maksimal dalam keadaan dan durasi waktu tertentu. Biasanya, para *engineer* dapat menentukan kualitas keandalan dari suatu jaringan distribusi listrik dengan perhitungan durasi rata – rata seringnya terjadi gangguan (*interruptions*) yang sering terjadi pada jaringan distribusi listrik yang menuju ke beban (*customer*) yang kita ketahui sebagai teknik perhitungan SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) dan SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*).

Keandalan yang tinggi dari suatu sistem distribusi energi listrik tentu menjadi dambaan segala pihak. Karena apabila nilai keandalannya rendah, tentu akan merugikan baik pihak konsumen maupun produsen listrik. Apalagi bagi pengguna listrik daya besar seperti pada industri, tentu apabila terjadi gangguan dan listrik padam maka akan berpengaruh pada jumlah produksi suatu barang dan kemungkinan juga terjadi kerusakan alat - alat produksi. Maka dari itu, perlu dilakukan penelitian dan pengambilan data – data yang diperlukan guna mengetahui level keandalan dari suatu sistem distribusi, dan untuk upaya perbaikan kualitas jaringan serta pencegahan terjadinya gangguan.

Tingkat keberlangsungan pasokan listrik dari suatu sistem penyaluran dapat diketahui dari indeks durasi yang dibutuhkan untuk listrik dapat tersalurkan kembali setelah terjadi pesan aliran yang diakibatkan karena suatu gangguan (SPLN 52, 1983). Beberapa tingkatan tersebut yaitu :

- 1) Tingkat 1 : Durasi pemadaman dapat berjam-jam lamanya, yaitu waktu yang dibutuhkan untuk mencari dan menganalisa, serta proses perbaikan pada bagian yang mengalami gangguan.
- 2) Tingkat 2 : Durasi pemadaman beberapa jam, yaitu durasi yang dibutuhkan untuk proses karantina kerusakan, dan waktu untuk pemindahan sumber suplai listrik yang diambilkan dari sumber lain.
- 3) Tingkat 3 : Proses pemadaman memakan waktu beberapa menit, yaitu proses manipulasi yang dilakukan oleh petugas yang berjaga di gardu dalam melakukan pendeteksian gangguan dan pelaksanaan manipulasi dari jarak jauh menggunakan bantuan DCC (*Distributed Control Center*).
- 4) Tingkat 4 : Proses pemadaman memakan waktu beberapa detik. Waktu dibutuhkan untuk pengamanan dan manipulasi yang dilaksanakan secara otomatis dari DCC (*Distributed Control Center*).
- 5) Tingkat 5 : Tanpa memadamkan aliran listrik. Yaitu ketika terjadinya gangguan, namun jaringannya telah dilengkapi dengan instalasi cadangan secara terpisah dan otomatis secara penuh menggunakan DCC.

Keandalan sebuah sistem dipengaruhi oleh berbagai faktor, berikut ini adalah faktor yang dapat mempengaruhi keandalan suatu sistem (Wicaksono dan Suhardi, 2019) :

1) Probabilitas

Probabilitas atau peluang yang digunakan sebagai penentu besaran kuantitas dari suatu keandalan. Baik atau buruknya kualitas suatu peralatan dapat ditentukan dari *historis*-nya di masa lampau. Begitu pula beban sistem

tersebut, dapat diperkirakan melalui *history* di masa lalu ditambah perkiraan pertumbuhan beban di masa depan.

2) Unjuk Kerja

Kinerja (*performance*) dari suatu peralatan merupakan suatu parameter keberhasilan atau kegagalan dari suatu peralatan dalam menjalankan fungsinya. Hal ini ditentukan dari standar-standar yang telah ditentukan.

3) Selang Waktu Pengamatan

Selang waktu pengamatan adalah akumulasi jumlah waktu yang diperlukan untuk memantau kinerja suatu peralatan. Umumnya waktu yang dibutuhkan untuk pengamatan adalah setahun.

4) Kondisi Operasi

Kondisi operasi merupakan kondisi di mana sebuah peralatan beroperasi. Kondisi operasi sebuah peralatan sangat mempengaruhi keberhasilan kerja peralatan tersebut.

2.1.15 Istilah-istilah Dalam Keandalan Distribusi

Ada beberapa istilah yang penting berkaitan dengan keandalan sistem distribusi (Wicaksono & Suhardi, 2019) :

a. Pemadaman (*Outage*)

Kondisi di mana peralatan gagal menjalankan fungsinya karena berbagai faktor yang mempengaruhi peralatan secara langsung.

b. Pemadaman Paksa (*Forced Outage*)

Pemadaman yang dilakukan karena faktor manusia, baik kesalahan yang disengaja ataupun tidak disengaja.

c. Pemadaman Terjadwal (*Scheduled Outage*)

Pemadaman yang disengaja atau dengan kata lain fungsi peralatan sengaja dimatikan, biasanya saat terjadi perawatan berkala.

d. Gangguan (*Interruption*)

Pesan daya listrik pada satu atau lebih pelanggan dikarenakan gangguan (*outage*).

e. Gangguan Paksa (*Forced Interruption/ λ*)

Gangguan paksa adalah gangguan yang disebabkan oleh kondisi darurat yang berhubungan langsung dengan peralatan yang mengakibatkan komponen/peralatan harus dipisahkan dari sistem oleh suatu sistem proteksi otomatis atau manual oleh manusia. Biasanya dihitung dalam kurun waktu setahun dan dinyatakan dengan *failure/year*.

f. Waktu Pemadaman (*outage time/ τ*)

Periode waktu yang dibutuhkan untuk mengganti/memperbaiki peralatan yang mengalami *failure*. Dinyatakan dalam satuan *hours/failure*.

g. Waktu Pemadaman Tahunan (*annual outage time/ U*)

Rentang waktu padamnya aliran listrik selama setahun. Umumnya dinyatakan dalam *hours/year*.

2.1.16 Komponen Perhitungan Keandalan

Indeks keandalan sistem distribusi digunakan untuk menakar keandalan masing-masing titik beban/*load point*. Berikut ini merupakan indeks-indeks yang digunakan untuk mengetahui tingkat keandalan (Gusti Putu dkk. 2015):

a. Laju Kegagalan (λ)

Laju Kegagalan (λ) adalah harga rata-rata dari jumlah kegagalan (d) per satuan waktu pada suatu selang waktu pengamatan (T). Laju kegagalan ini dihitung dengan satuan kegagalan per tahun. Untuk selang waktu pengamatan diperoleh :

$$\lambda = \frac{d}{T} \dots \dots \dots (2.1)$$

Di mana :

λ = laju kegagalan konstan (kegagalan/tahun)

d = banyaknya kegagalan yang terjadi selama selang waktu pengamatan

T = jumlah selang waktu pengamatan (tahun)

Berdasarkan penyebab terjadinya kegagalan, laju kegagalan dapat dibagi menjadi 2 jenis, yakni (Wicaksono & Suhardi, 2019):

- 1) *Sustained failure rate* yang merupakan nilai laju kegagalan yang diakibatkan oleh gangguan yang memiliki interval waktu yang cukup lama di dalam periode perbaikannya.
- 2) *Momentary failure rate* merupakan nilai laju kegagalan yang disebabkan oleh gangguan sesaat yang dialami oleh suatu komponen.

b. Frekuensi Gangguan (*Failure Rate*)

Frekuensi gangguan (*failure rate*) untuk setiap *load point* (λ LP) merupakan penjumlahan dari semua laju kegagalan (semua peralatan) yang berpengaruh terhadap *load point* (λ LP), dengan perhitungan sebagai berikut :

$$\lambda \text{ LP} = \text{Failure rate Peralatan} \times \text{Panjang Saluran Udara}$$

$$\text{Atau } \lambda \text{ LP} = \sum_{i=K} \lambda_i \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana : λ_i = laju kegagalan untuk peralatan K

K = semua peralatan yang berpengaruh terhadap *load point*

c. Durasi Gangguan

Durasi / lamanya gangguan pada λ LP yang terjadi selama satu tahun rata – rata, dengan rumusan sebagai berikut :

$$U \text{ LP} = \text{Failure rate Peralatan} \times \text{Repair / Switching Time peralatan}$$

$$\text{Atau } U \text{ LP} = \sum_{i=K} U_i = \sum_{i=K} \lambda_i \times r_j \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana : r_j = waktu perbaikan (*repairing time* atau *switching time*)

d. Durasi Perbaikan Rata-Rata /*Outage Time/ Repair Time* (r)

Durasi keluaran rata-rata (r) adalah waktu rata-rata yang diperlukan oleh sistem untuk melakukan perbaikan selama terjadinya gangguan. Parameter ini merupakan jumlah waktu diperlukan dalam perbaikan komponen dari awal terjadinya pemadaman hingga komponen tersebut bekerja secara normal kembali selama satu tahun. Secara matematis dituliskan sebagai berikut (Wicaksono & Suhardi, 2019):

$$R_{\text{komponen}} = \frac{\text{lama gangguan (jam) dalam periode tertentu}}{\text{jumlah gangguan dalam periode tertentu}} \text{ (jam/thn)} \dots\dots (2.4)$$

$$r_i = \frac{\text{Rperbaiki komponen}}{\text{Total Komponen } i} \dots\dots\dots(2.5)$$

di mana : r_i = *repair time* komponen i

e. Rata-Rata Gangguan

Parameter ini merupakan nilai dari rata-rata dari jumlah gangguan persatuan waktu dalam satu tahun. Adapun Persamaan untuk mencari rata-rata gangguan.

$$\text{Rata-rata gangguan} = \frac{\text{Jumlah kejadian gangguan dalam periode tertentu}}{\text{Selang waktu pengamatan}} \dots\dots(2.6)$$

f. Angka Keluaran Komponen Saluran Udara (λ)

Merupakan keadaan di mana suatu komponen tidak dapat berfungsi dengan semestinya sehingga menyebabkan pemadaman.

$$\lambda \text{ saluran} = \frac{\text{Gangguan saluran rata-rata per tahun}}{\text{Total panjang saluran udara}} \dots\dots\dots(2.7)$$

g. Angka Keluaran Peralatan

$$\lambda \text{ peralatan} = \frac{\text{Kegagalan rata-rata peralatan per tahun}}{\text{Total peralatan}} \dots\dots\dots(2.8)$$

2.1.17 Kondisi Perfect Switching dan Imperfect Switching

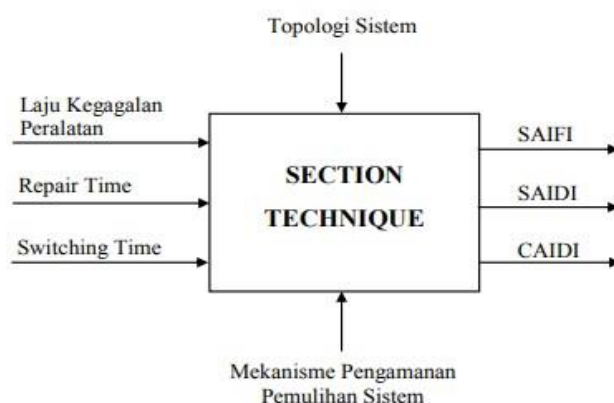
Kondisi *perfect switching* yaitu ketika peralatan sistem distribusi khususnya peralatan yang berperan dalam proses *switching*, seperti *circuit breaker*, *sectionalizer*, dan *tie switch* dianggap bekerja secara sempurna, sehingga indeks kegagalan dari peralatan tersebut dapat diabaikan dan yang diperhitungkan hanya indeks kegagalan dari saluran saja (Syafirin, Khairuly, 2016) sedangkan kondisi

imperfect switching adalah kondisi di mana indeks kegagalan dari setiap peralatan sistem distribusi memberikan dampak terhadap indeks keandalan sistem secara menyeluruh.

2.1.18 Metode Section Technique

Section Technique adalah sebuah metode yang tersusun atas beberapa perhitungan terstruktur yang digunakan untuk menganalisa suatu sistem. Pengaruh dari gangguan peralatan akan dianalisa, kemudian dilakukan pengamatan apa yang terjadi bagi sebuah sistem secara keseluruhan. Selanjutnya, tiap – tiap kegagalan dari peralatan akan dianalisa dari semua titik beban (*load point*).

Jufrizel dan Rahmat (Jurnal SNTIKI 9, 18-19, Mei 2017 : 3) menyebutkan, pada penggunaan Metode *Section Technique*, kegagalan dari suatu sistem diasumsikan bahwa hal tersebut bukan merupakan suatu kegagalan yang saling berhubungan, dengan kata lain kegagalan alat akan dianalisa secara terpisah. Hal tersebut dapat mengurangi kompleksitas perhitungan apabila pengamatan dilakukan secara keseluruhan sistem. Maka agar lebih sederhana, perhitungan dilakukan secara terpisah per bagian.



Gambar 2.14 Topologi Sistem

Dalam perhitungan menggunakan Metode *Section Technique*, hasil keandalan akan didapat dengan melakukan perhitungan indeks *load point* serta beberapa data sistem secara keseluruhan. Setelah didapatkan indeks *load point* di atas, maka akan dapat dilakukan perhitungan dengan tujuan mengetahui keandalan dari sebuah rangkaian peralatan secara individual. Setelah mendapat hasil nilai keandalan, diharapkan dilakukan evaluasi dari gangguan – gangguan yang dapat mempengaruhi kinerja sistem distribusi agar kejadian serupa dapat diminimalisir di kemudian hari. Adapun *output* dari Metode *Section Technique* ini beserta rumusnya yaitu :

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

Nilai frekuensi rata – rata pemadaman listrik per pelanggan dapat dihitung dengan rumus di bawah. Setelah didapatkan hasilnya, nilai itulah yang disebut sebagai indeks keandalan SAIFI. Rumusnya adalah :

$$SAIFI = \sum \left(\frac{N_{LP} \times \lambda_{LP}}{N} \right) \text{ (kali/pelanggan/tahun)} \dots \dots \dots (2.9)$$

Di mana : N_{LP} = Jumlah konsumen pada *load point*

λ_{LP} = Frekuensi gangguan peralatan pada *load point*

N = Jumlah konsumen pada *section*

Penjelasan mudahnya, nilai indeks keandalan SAIFI merupakan besarnya *failure rate* (λ) dari sebuah sistem distribusi keseluruhan yang ditinjau dari sisi jumlah pelanggan yang terlayani.

2. SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*)

Nilai indeks keandalan SAIDI merupakan hasil perhitungan untuk mengetahui rata - rata durasi atau lamanya waktu pemadaman yang dialami oleh pelanggan. Rumus perhitungan SAIDI adalah :

$$SAIDI = \sum \left(\frac{N_{LP} \times U_{LP}}{N} \right) \text{ (jam /pelanggan/ tahun)} \dots \dots \dots (2.10)$$

Di mana : U_{LP} = Durasi gangguan peralatan pada *load point*

N_{LP} = Jumlah konsumen pada *load point*

N = Jumlah konsumen pada *section*

3. CAIDI (*Customer Average Interruption Duration Index*)

Nilai indeks frekuensi gangguan rata-rata bagi konsumen yang mengalami gangguan sepanjang tahun. Rumus perhitungannya :

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI} \text{ (jam / tahun)} \dots \dots \dots (2.11)$$

2.1.19 Standar SPLN 68-2 : 1986 dan SPLN No. 59 : 1985

Nilai indeks keandalan SAIFI dan SAIDI yang dijadikan standar untuk mengetahui nilai keandalan suatu sistem distribusi sudah sesuai standar atau belum yakni menurut SPLN 68-2 : 1986 , ditunjukkan pada Tabel 2.1 di bawah :

Tabel 2.1 Standar Indeks Keandalan SPLN 68-2:1986

Standar Indeks Keandalan	Standar Nilai		
	SAIFI Kali/plgn/tahun	SAIDI Jam/plgn/tahun	CAIDI Jam/tahun
SPLN 68-2 : 1986	3,2	21,09	5,33

Adapun penggunaan SPLN No.59 : 1985 bertujuan untuk menyamakan standarisasi serta sebagai pegangan atau parameter yang jelas dalam penentuan tingkat keandalan suatu jaringan distribusi, juga sebagai patokan dalam penentuan proyeksi kedepan bagi PT. PLN (Persero). Berikut data standarisasi menurut SPLN No.59 : 1985 untuk jaringan distribusi (SUTM) :

Tabel 2.2 Nilai Indeks Keandalan Saluran Udara (SUTM)
(Sumber : SPLN No. 59 : 1985)

Saluran Udara	
<i>Sustained failure rate (λ /km/yr)</i>	0,2
<i>r (repaire time) (jam)</i>	3
<i>rs (switch time) (jam)</i>	0,15

Tabel 2.3 Indeks Kegagalan Peralatan
(Sumber: SPLN No.59 : 1985)

Komponen	<i>Failure rate</i>	<i>Repair time</i> (jam)	<i>Switch time</i> (jam)
Trafo Distribusi	0,005/unit/tahun	10	0,15
<i>Circuit Breaker</i>	0,004/unit/tahun	10	0,15
<i>Sectionalizer</i>	0,003/unit/tahun	10	0,15
<i>Recloser</i>	0,005/unit/tahun	10	0,15
<i>Load Break Switch</i>	0,003/unit/tahun	10	0,15
<i>Fuse Cut Out</i>	-	-	0,15

2.1.20 Software ETAP (*Electrical Transient Analysis Program*)

ETAP atau *Electrical Transient Analysis Program* adalah aplikasi yang digunakan untuk melakukan analisis dan pengujian pada sistem tenaga listrik. Dalam sistem tenaga listrik yang diuji meliputi sistem pembangkitan, sistem transmisi, dan sistem distribusi. ETAP mampu memodelkan *single line diagram* untuk melakukan berbagai analisis, seperti aliran daya, hubung singkat, keandalan jaringan, koordinasi proteksi dll. Standar yang digunakan pada ETAP ada 2, yaitu standar IEC (*International Electrotechnical Commission*) dan standar ANSI (*American National Standards Institute*) (Manual Book ETAP 19.0.1). Adapun fitur dari ETAP yang akan dipakai dalam validasi hasil indeks keandalan Metode *Section Technique* adalah *Distribution Reliability Assessment Analysis*.

Distribution Reliability Assessment merupakan fitur yang terdapat dalam aplikasi ETAP untuk melakukan perhitungan keandalan suatu sistem terutama sistem/jaringan distribusi.

a. Fitur pada *Distribution Reliability Assessment Analysis*:

- 1) Keandalan sistem
- 2) Indeks berorientasi pelanggan
- 3) Indeks energi (biaya)
- 4) Analisis sensitivitas

b. Hasil Laporan/*Report* :

- 1) Tampilan grafis dari hasil keandalan I
- 2) Indeks keandalan titik beban/bus

- 3) Indeks keandalan sistem
- 4) Analisis sensitivitas EENS & ECOST

c. Indeks Berorientasi Pelanggan:

- 1) *System Average Interruption Frequency Index* – SAIFI
- 2) *System Average Interruption Duration Index* - SAIDI

d. Indeks Keandalan Sistem Distribusi:

Berdasarkan (Manual Book ETAP 19.0.1) keandalan sistem distribusi biasanya diukur dalam beberapa indeks yang didefinisikan di bawah ini:

1) Laju Kegagalan Peralatan

$$\lambda = \lambda_A + \lambda_P \dots\dots\dots(2.11)$$

Di mana : λ_A = tingkat kegagalan aktif/permanen,

λ_P = tingkat kegagalan pasif/sementara.

2) Tingkat kegagalan rata-rata pada Titik Beban i, λ_i (f/yr)

$$\lambda_i = \sum_{j \in N_e} \lambda_{e,j} \dots\dots\dots(2.12)$$

Di mana : $\lambda_{e,j}$ = tingkat kegagalan rata-rata elemen j,

N_e = jumlah total elemen yang kesalahannya akan mengganggu titik beban i.

3) Durasi pemadaman tahunan pada Titik Beban i, U_i (hr/yr)

$$U^i = \sum_{j \in N_e} \lambda_{e,j} \times r_{ij} \dots\dots\dots(2.13)$$

Di mana :

r_{ij} = durasi kegagalan pada titik beban i karena elemen mengalami kegagalan.

4) Rata-rata durasi pemadaman pada Titik Beban i, r_i (hr)

$$r_i = U_i / \lambda_i \dots\dots\dots(2.14)$$

5) *System Average Interruption Frequency Index*, SAIFI (f/costumer/yr)

$$SAIFI = (\sum \lambda_i \times N_i) / \sum N_i \dots\dots\dots(2.15)$$

N_i = jumlah pelanggan pada titik beban i,

$\sum$ = penjumlahan untuk semua titik beban.

6) *System Average Interruption Duration Index*, SAIDI (hr/costumer/yr)

$$SAIDI = (\sum U_i \times N_i) / \sum N_i \dots\dots\dots(2.16)$$

e. Data Komponen

Data untuk setiap komponen peralatan pada *Distribution System Reliability*

Analysis diantaranya:

1) *Bus Data*

a) *Active failure rate*

b) *Repair time*

2) *Switching time Replacement tim2-Winding & 3-Winding Transformers*

- a) *Active failure rate*
- b) *Passive failure rate*
- c) *Repair time*
- d) *Switching time*

3) *Replacement Time Cable/Transmission Line*

- a) *Length*
- b) *Active failure rate*
- c) *Passive failure rate*
- d) *Repair time*
- e) *Switching time*
- f) *Replacement time*

4) *Power Grid (Utility)*

- a) *Active failure rate*
- b) *Repair time*
- c) *Switching time*
- d) *Replacement time*

5) *Static & Lumped Load Data*

- a) *Active failure rate*
- b) *Passive failure rate*
- c) *Repair time*
- d) *Switching time*

2.1.21 Upaya Perbaikan atau Peningkatan Keandalan

Perbaikan keandalan merupakan suatu cara yang dapat digunakan untuk meningkatkan indeks keandalan dari suatu sistem. Dalam memperbaiki suatu indeks keandalan dapat dilakukan dengan rekonfigurasi jaringan.

Rekonfigurasi jaringan ini bertujuan mendapatkan solusi optimal dengan membandingkan indeks-indeks keandalan sistem (SAIFI, SAIDI, dan CAIDI) melalui penambahan komponen yang dapat melokalisir adanya gangguan salah satunya yaitu penambahan *sectionalizer* (SSO) dan penambahan *fuse cut out* (FCO). Penggunaan *fuse cut out* (FCO) dan *sectionalizer* (SSO) karena kedua komponen ini yang paling umum digunakan terutama pada jaringan distribusi 20 kV.

a. Optimasi Penempatan SSO

Optimasi dimaksudkan untuk menentukan letak SSO pada penyulang dengan tujuan mendapatkan titik terbaik dalam peletakan/penempatan SSO sehingga mendapatkan hasil yang optimal dalam melakukan proteksi di wilayah kerjanya terhadap gangguan.

b. *Fuse Cut Out* (FCO)

Penggunaan *fuse cut out* untuk melokalisir gangguan berdasarkan upaya perbaikan keandalan maka fungsi *fuse cut out* sendiri dapat melokalisir gangguan tanda adanya *switching time* pada titik beban sekitar, sehingga dalam perhitungan masing-masing titik beban akan didapatkan λ yang lebih kecil. Jika λ (laju kegagalan) semakin kecil maka frekuensi dari pemadaman juga akan turun.

c. *Fitness*

Fitness merupakan nilai patokan dari hasil SAIDI dan SAIFI, di mana nilai *fitness* juga diperlukan dalam sistem keandalan. Dalam perhitungannya *fitness* lebih tepatnya peluang keandalan di mana *fitness* yang lebih

besar meningkatkan peluang keandalan. Secara sistematis *Fitness* ditulis seperti pada Persamaan 2.17 , Persamaan 2.18, dan Persamaan 2.19 di bawah :

$$Fitness_{LP\ i} = \frac{1}{SAIFI_{LP\ i} \times SAIDI_{LP\ i}} \dots\dots\dots (2.17)$$

$$SAIFI_{LP\ i} = \frac{SAIFI_{Section\ n} \times N_{LP\ i}}{N} \dots\dots\dots (2.18)$$

$$SAIDI_{LP\ i} = \frac{SAIDI_{Section\ n} \times N_{LP\ i}}{N} \dots\dots\dots (2.19)$$

Di mana : N_{LP} = Jumlah konsumen pada *load point*

N = Jumlah konsumen dari semua *section*

$SAIFI_{section\ n}$ = Total SAIFI di *section n*

$SAIDI_{section\ n}$ = Total SAIDI di *section n*

2.2 Penelitian Terkait

Penelitian terdahulu adalah penelitian yang pernah dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Di mana isi dari penelitian terdahulu ini bisa menjadi alasan, tolak ukur bahkan perbandingan penelitian guna menemukan dan memecahkan masalah yang baru ditemui. Pada tabel di bawah ada beberapa jurnal terkait dengan topik penelitian yang penulis lakukan.

Tabel 2.4 Penelitian Terkait

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
1	Analisis Keandalan Sistem Distribusi Menggunakan Program	Henki Projo Wijaksono, I.G.N Satriyadi Hemanda,	Surabaya, September 2012	Pada jurnal ini peneliti bertujuan untuk mengetahui keandalan sistem distribusi 20 kV pada penyulang yang dianalisis. Metode yang digunakan yaitu metode <i>Section Technique</i> , langkah-langkah yang

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
	Analisis Kelistrikan Transien dan Metode <i>Section Technique</i>	Ontoseno Penangsang		dilakukan antara lain pengumpulan data, pengolahan data, serta menganalisis keandalan sistem distribusi 20 kV. Hasil yang didapat dari perhitungan menggunakan metode <i>Section Technique</i> adalah nilai indeks keandalan sistem penyulang berupa indeks SAIFI = 2.4982 kali/tahun, SAIDI = 7.6766 jam/pertahun, dan CAIDI = 3.072852 jam/tahun. Kemudian hasil perhitungan tersebut dibandingkan dengan <i>running</i> program analisis kelistrikan transien, dan didapatkan hasil nilai indeks keandalan sistem penyulang berupa indeks SAIFI = 2.9235 kali/tahun, SAIDI = 7.8902 jam/pertahun, dan CAIDI = 2.699 jam/tahun. Untuk meningkatkan nilai keandalan yaitu dengan mengurangi frekuensi terjadinya gangguan dan dilakukan pemeliharaan jaringan secara preventif dan mengoptimalkan kondisi <i>tie switch</i> pada jaringan distribusi.
2	Analisa Keandalan Sistem Distribusi 20 kV Menggunakan Metode <i>Section Technique</i> dan	Jufrizel MT, Rahmat Hidayatullah	Pekanbaru, 18-19 Mei 2017	Pada jurnal ini peneliti yang bertujuan untuk membandingkan dua metode. Berdasarkan hasil dari penelitian tersebut diketahui indeks metode <i>Section Technique</i> pada penyulang Adi Sucipto menunjukan nilai indeks SAIFI sebesar 6.917 kali/tahun, SAIDI sebesar 19.585 jam/tahun dan nilai CAIDI sebesar

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
	RIA- <i>Section Technique</i> pada Penyulang Adi Sucipto Pekanbaru			2.870 jam/tahun, sedangkan metode gabungan (RIA - <i>Section Technique</i>) didapat nilai SAIFI 7.366jam/tahun, nilai SAIDI sebesar 22.090 kali/tahun dan nilai CAIDI sebesar 2.998 jam/tahun. Hasil perhitungan dari kedua metode tersebut ternyata metode gabungan yang lebih didapat hasil peningkatan nilai indeks, dan berdasarkan hasil analisa bahwa penyulang Adi Sucipto dikatakan kurang handal yang tidak memenuhi standar PLN.
3	Analisa Keandalan Sistem Distribusi Berdasarkan Metode <i>Section Technique</i> pada PT.PLN (PERSERO) AREA PONTIANAK	Prikno Sinaga Hardiansyah . Purwoharjono	Pontianak, Agustus 2019	Pada sistem tenaga listrik salah satu persoalan yang sering dihadapi ialah sistem pendistribusian terhadap pelanggan, dimana dalam hal ini indeks keandalan suatu penyulang sangat penting dalam menentukan kinerja sistem. Indeks keandalan yang harus dihitung ialah SAIFI (<i>System Average Interruption Frequency Index</i>) dan SAIDI (<i>System Average Interruption Duration Index</i>). Untuk mengetahui tingkat keandalan sistem distribusi yang dianalisa salah satu caranya dengan metode <i>Section Technique</i> , yaitu dengan memecah sistem menjadi beberapa bagian kemudian menganalisa setiap bagian, sehingga didapat hasil yang optimal. Diketahui panjang jaringan 36,8 Kms, 103 GI, dan 8.777 pelanggan. Dari data tersebut didapatlah perhitungan laju kegagalan setiap <i>section</i> , dan

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
				perhitungan indeks keandalan setiap <i>section</i>. Untuk mendapatkan keandalan penyulang Raya 7 maka setiap indeks keandalan setiap <i>section</i> dijumlahkan, maka didapatlah nilai SAIFI 8,0160000003 gangguan/tahun dan SAIDI 17,32488734 jam/tahun. Dari hasil perhitungan indeks keandalan tersebut kemudian dianalisa berdasarkan standar SPLN 682:1986. Untuk SAIFI melebihi standar yaitu 3,2 kali/tahun dan untuk SAIDI 17,32488734 jam/tahun dibawah standar yaitu 21 jam/tahun dan masih andal. Berdasarkan analisa dapat disimpulkan penyulang Raya 7 tidak andal, hal ini terbukti pada tahun 2017 penyulang Raya 7 mengalami 69 gangguan, dan perlu dilakukan upaya perbaikan indeks keandalan secara terstruktur dengan mereduksi laju kegagalan berdasarkan gangguan pada penyulang Raya 7.
4	Analisis Keandalan Penyulang Pajajaran 20 kV Menggunakan Metode <i>Section Technique</i>	Dian Eka Putra, M. Nur Hadiyanto	Palembang 2019	Pada penelitian ini penyulang Pajajaran 20 kV sebagai salah satu penyulang yang menyuplai energi listrik ke Jakabaring Sport City (JSC). Keandalan distribusi tegangan 20 kV mempengaruhi perhelatan ASEAN GAMES ke XVIII di Jakabaring Sport City (JSC). Penelitian ini menggunakan Metode <i>Section Technique</i> untuk mengetahui

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
	Untuk Asian Games XVIII Di Palembang			indikator yang dinyatakan dalam besaran probabilitas. Hasil dari perhitungan menggunakan Metode <i>Section Technique</i> pada Sistem <i>Average Interruption duration Index</i> (SAIDI) diperoleh nilai 2,5707 jam/pel dan Metode <i>Section Technique</i> yaitu Sistem <i>Average Interruption Frequency Index</i> (SAIFI) diperoleh nilai 2,6933 kali/pelanggan.
5.	Analisis Keandalan Sistem Distribusi 20 kV ULP Sungguminasa Penyulang Pallangga Menggunakan Metode <i>Section Technique</i> dan <i>Reliability Index Assessment</i> (RIA)	Latifah Indrayani Hidayat	Makassar, 2022	Pada jurnal ini peneliti mencari nilai indeks keandalan SAIFI dan SAIDI dengan beberapa metode seperti <i>Section Technique</i> dan <i>Reliability Index Assessment</i> (RIA). Maksud dari penggabungan metode <i>Section Technique</i> dengan RIA yaitu menggabungkan parameter <i>sustained failure rate</i> dengan parameter <i>momentary failure rate</i> pada perhitungan laju kegagalannya. Penggabungan ini diharapkan bisa menutupi kekurangan pada metode RIA yang hanya memperhatikan parameter <i>momentary failure rate</i> . Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai indeks keandalan penyulang Pallangga yang memiliki 6544 jumlah pelanggan dengan variasi beban berupa beban industri dan beban rumah tangga. Hasil perhitungan nilai SAIFI penyulang Pallangga adalah sebesar 1,77 kegagalan/tahun dan nilai SAIDI sebesar 5,636 jam/tahun untuk

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
				Metode <i>Section Technique</i>. Sedangkan untuk metode gabungan didapatkan nilai SAIFI sebesar 1,893 kegagalan/pelanggan/tahun dan nilai SAIDI sebesar 6,156 jam/pelanggan/tahun. Berdasarkan hasil akhir tiap metode yang digunakan, dapat diketahui bahwa nilai keandalan penyulang Pallangga masih memenuhi standar PLN atau penyulang ini masih terbilang andal.