

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Berdasarkan topik tugas akhir yang diambil, terdapat beberapa referensi dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya guna menentukan batasan-batasan masalah yang berkaitan erat dengan topik yang sedang diambil. Referensi ini kemudian akan digunakan untuk mempertimbangkan permasalahan-permasalahan apa saja yang berhubungan dengan topik yang diambil. Adapun beberapa referensi tinjauan pustaka yang digunakan sebagai acuan adalah sebagai berikut :

1. Skripsi yang dilakukan Affandi (2015), yang berjudul “Analisis Keandalan Sistem Distribusi Tenaga Listrik di Gardu Induk Indramayu”. Pada skripsi ini menganalisa tingkat keandalan SAIDI dan SAIFI pada penyulang Gardu Induk Indramayu. Berdasarkan hasil perhitungan, nilai SAIDI dan SAIFI penyulang pada Gardu Induk Indramayu di kategorikan handal Bila ditinjau dari standar keandalan SPLN no. 59: 1985, karena nilai SAIDI maupun SAIFI masih di bawah batas nilai toleransi yang di tentukan yakni SAIFI 3,21 kali/pelanggan/tahun dan SAIDI 21,094 jam/pelanggan/tahun.
2. Penelitian yang dilakukan Wicaksono (2012), dalam *paper* tugas akhirnya di jurusan Teknik Elektro, ITS yang berjudul “Analisis Keandalan Sistem Distribusi di PT. PLN (Persero) APJ Kudus Menggunakan *Software* Etap

dan Metode *Section Technique*” untuk menghitung indeks SAIFI, SAIDI dan CAIDI. Hasil yang didapat dari perhitungan menggunakan metode *Section Technique* pada penyulang KDS 2 berupa indeks SAIFI = 2.4982 kali/tahun, SAIDI = 7.6766 jam/pertahun, dan CAIDI = 3.072852 jam/tahun. Sedangkan hasil yang didapat dari *running Software* ETAP berupa indeks SAIFI = 2.9235 kali/tahun, SAIDI = 7.8902 jam/tahun, dan CAIDI = 2.699 jam/tahun.

3. Penelitian yang dilakukan oleh Prabowo (2012), dalam jurnalnya tentang analisis keandalan distribusi 20 kV pada pabrik semen Tuban dengan menggunakan metode RIA (*Reliability Index Assessment*) yang dibandingkan dengan hasil perhitungan program analisis kelistrikan. Berdasar hasil perhitungan dengan metode RIA (*Reliability Index Assessment*) pada penyulang diperoleh indeks SAIFI = 0.0765 kali/tahun, SAIDI = 7.7625 jam/tahun, dan CAIDI = 68.297 jam/tahun, sedangkan hasil perhitungan menggunakan program analisis kelistrikan diperoleh SAIFI = 0.158 kali/tahun, SAIDI = 10.791 jam/tahun, dan CAIDI = 68.297 jam/tahun dan diperoleh kesimpulan bahwa perbedaan nilai indeks keandalan tidak signifikan antara program analisis kelistrikan dengan metode RIA.

Berdasar penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, perbedaan pada penelitian ini, yaitu penelitian ini akan dilakukan pada jaringan distribusi 20 kV Penyulang KTN 4 dan akan dianalisa menggunakan metode RIA dimana dalam melakukan analisa sistem akan diasumsikan dalam kondisi *perfect switching* dan

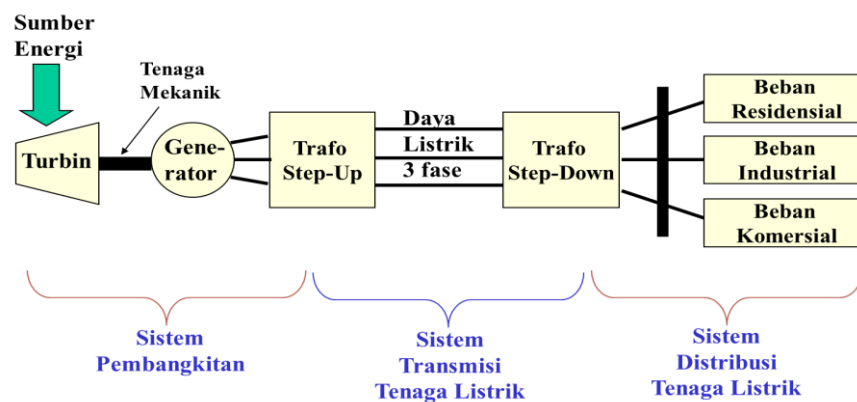
imperfect sitching. Selain itu juga akan dianalisa menggunakan analisis kelistrikan berdasar gangguan yang terjadi dalam satu tahun dan akan dianalisa juga nilai indeks keandalan yang berorientasi pada beban dan energi, yaitu ENS dan AENS.

2.2 Landasan Teori

Adapun teori-teori penunjang yang digunakan penulis untuk mengerjakan Tugas Akhir ini, antara lain:

2.2.1 Sistem Tenaga Listrik

Secara umum definisi sistem tenaga listrik merupakan kumpulan dari berbagai peralatan listrik yang meliputi sistem pembangkitan, sistem transmisi, dan sistem distribusi, yang saling berhubungan dan bekerja sama satu sama lain sehingga menghasilkan tenaga listrik untuk kemudian digunakan oleh pelanggan (Syahputra, 2010). Siklus aliran energi listrik pada sistem tenaga listrik dijelaskan pada gambar 1.1 sebagai berikut.



Gambar 2.1 Tiga komponen utama dalam Penyaluran Tenaga Listrik

(Sumber: Syahputra, 2010)

Pada pusat pembangkit, sumber daya energi primer seperti bahan bakar fosil (minyak, gas alam, dan batubara), hidro, panas bumi, dan nuklir diubah menjadi energi listrik. Generator sinkron mengubah energi mekanis yang dihasilkan pada poros turbin menjadi energi listrik tiga fasa. Melalui transformator *step-up*, energi listrik ini kemudian dikirimkan melalui saluran transmisi bertegangan tinggi menuju pusat-pusat beban (Syahputra, 2010).

Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik besar dengan tegangan antara 11 kV sampai 24 kV dinaikkan tegangannya oleh gardu induk dengan transformator penaik tegangan menjadi 70 kV, 154 kV, 220 kV atau 500 kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi (Suhadi, 2008).

Tujuan menaikkan tegangan ialah untuk memperkecil kerugian daya listrik pada saluran transmisi, dimana dalam hal ini kerugian daya adalah sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir ($I^2.R$). Dengan daya yang sama bila nilai tegangannya diperbesar, maka arus yang mengalir semakin kecil sehingga kerugian daya juga akan kecil pula. Dari saluran transmisi, tegangan diturunkan lagi menjadi 20 kV dengan transformator penurun tegangan pada gardu induk distribusi, kemudian dengan sistem tegangan tersebut penyaluran tenaga listrik dilakukan oleh saluran distribusi primer. Dari saluran distribusi primer inilah gardu-gardu distribusi mengambil tegangan untuk diturunkan tegangannya dengan trafo distribusi menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220/380Volt. Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke konsumen-konsumen. Dengan ini

jelas bahwa sistem distribusi merupakan bagian yang penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan (Suhadi, 2008).

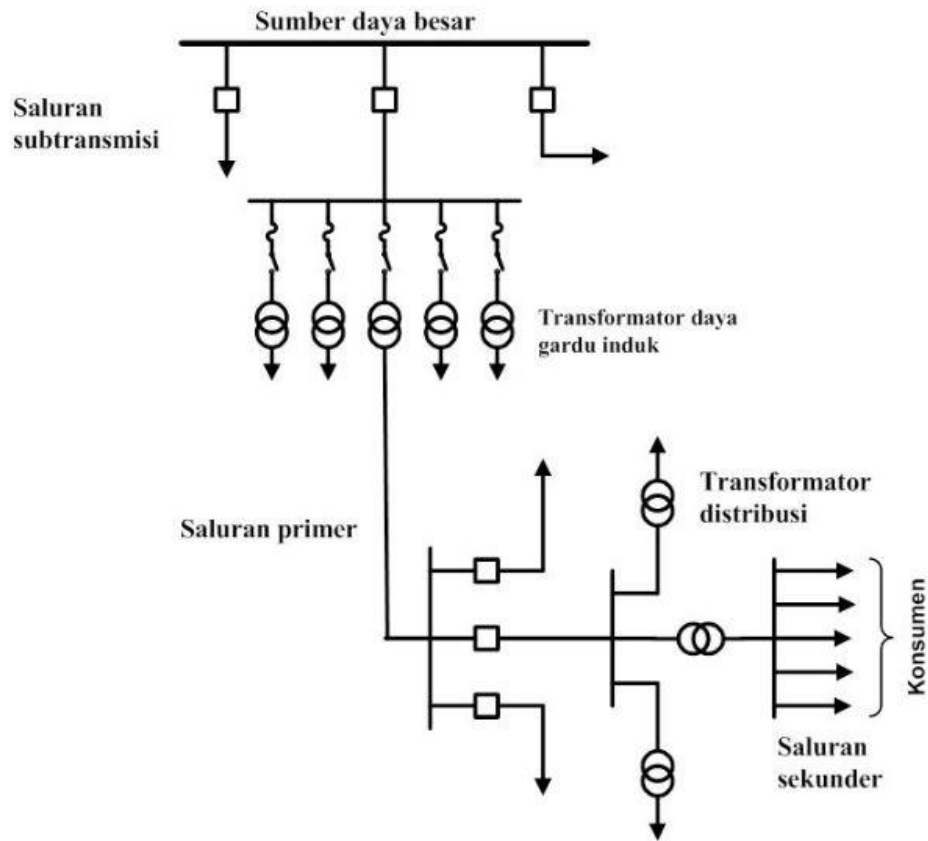
2.2.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Dalam definisi secara umum, sistem distribusi adalah bagian dari sistem perlengkapan elektrik antara sumber daya besar (*bulk power source, BPS*) dan peralatan hubung pelanggan (*customer service switches*). Berdasar definisi ini maka sistem distribusi meliputi komponen-komponen berikut:

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

Akan tetapi beberapa engineer mendefinisikan sistem distribusi sebagai bagian dari sistem perlengkapan elektrik antara gardu induk dan pelanggan.

Gambar 2.2 menunjukkan diagram satu garis dari sistem distribusi yang khas. Rangkaian subtransmisi mengirimkan energi dari sumber daya besar ke gardu induk distribusi. Tegangan subtransmisi berkisar antara 12,47 kV sampai dengan 245 kV (Syahputra, 2010).



Gambar 2.2 Diagram satu garis sistem distribusi

(sumber: Utomo, Ray. *Perancangan Subtransmisi dan Gardu Induk Distribusi*. Diambil dari slideplayer.info/slide/2021470)

Setelah energi listrik sampai pada gardu induk distribusi, kemudian diturunkan tegangannya menggunakan transformator *step-down* menjadi tegangan menengah yang juga disebut sebagai tegangan distribusi primer. Kecenderungan pada saat ini tegangan distribusi primer PLN yang berkembang adalah tegangan 20 kV. Setelah energi listrik disalurkan melalui jaringan distribusi primer atau Jaringan Tegangan Menengah (JTM), maka energi listrik kemudian diturunkan lagi tegangannya dalam gardu-gardu distribusi (transformator distribusi) menjadi tegangan rendah, yaitu tegangan 380/220 Volt, dan selanjutnya disalurkan melalui

saluran sekunder atau Jaringan Tegangan Rendah (JTR) ke pelanggan PLN (Syahputra, 2010).

2.2.3 Gardu Induk Distribusi

Gardu induk (GI) merupakan suatu instalasi listrik yang terdiri dari beberapa peralatan listrik dan berfungsi untuk:

1. Transformasi tenaga listrik tegangan tinggi yang satu ke tegangan tinggi yang lainnya atau ke tegangan menengah.
2. Pengukuran, pengawasan operasi, serta pengaturan pengamanan dari sistem tenaga listrik.
3. Pengaturan daya ke gardu-gardu induk lain melalui tegangan tinggi dan gardu-gardu induk distribusi melalui *feeder* tegangan menengah. (Tanzil, 2007).

2.2.3.1 Klasifikasi Gardu Induk

Menurut konstruksinya gardu induk dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Gardu Induk Pasangan Luar (*Outdoor*)

Peralatan listrik tegangan tinggi pada gardu induk ini ditempatkan di luar bangunan atau di tempat terbuka (*switchyard*). Peralatan lain seperti *HV cell*, panel kontrol dan rele-rele, serta sumber DC ditempatkan di dalam gedung. Gardu induk ini biasanya disebut gardu induk konvensional.

Kelebihan gardu induk *outdoor*, yaitu:

- a.) Konstruksinya lebih murah dibanding dengan gardu induk *indoor*.
- b.) Isolasi antara peralatan dan antara busbar menggunakan media udara terbuka sehingga mengurangi biaya untuk media isolasi.

Kelemahan gardu induk *outdoor*, yaitu:

- a.) Membutuhkan area tanah yang luas.
- b.) Lebih rentan terhadap hujan dan debu (kondisi cuaca) sehingga peralatan mudah kotor dan jadwal pemeliharaan harus lebih sering dilakukan.
- c.) Memungkinkan untuk mengalami *over voltage* akibat sambaran petir.

2. Gardu induk Pasangan Dalam (*Indoor*)

Pada gardu induk *indoor* instalasi peralatan listrik ditempatkan di dalam gedung atau di tempat tertutup. Pada gardu induk *indoor* menggunakan media isolasi gas dan disebut *Gas Insulated Switchyard (GIS)*.

Kelebihan gardu induk *indoor* adalah:

- a.) Membutuhkan area yang kecil.
- b.) Lebih aman terhadap petir dan pengaruh cuaca lainnya.
- c.) Biaya perawatan yang lebih sedikit.

Kelemahan gardu induk *indoor* adalah:

- a.) Konstruksinya lebih mahal.

3. Gardu Induk Pasangan Gabungan

Pada gardu induk ini mempunyai ciri khas hanya transformatornya saja yang diletakkan di luar, sedangkan peralatan lainnya berada di dalam gedung.

4. Gardu Induk Dalam Tanah

Gardu induk dalam tanah mempunyai ciri khas mirip dengan gardu induk pasangan dalam, hanya saja tempatnya di dalam tanah. (Tanzil, 2007).

2.2.3.2 Peralatan Gardu Induk

Peralatan dalam sebuah gardu induk bergantung pada tipe gardu induk, fungsi serta tingkat proteksi yang diinginkan. Secara umum, sebuah gardu induk memiliki peralatan utama sebagai berikut:

1. Transformator Daya



Gambar 2.3 Transformator Daya

(sumber: Syahputra, 2015)

Transformator ini berfungsi menyalurkan besaran daya tertentu dengan mengubah besaran tegangannya. Transformator daya yang digunakan di gardu induk ada yang berupa satu transformator 3 fasa ataupun tiga transformator 1 fasa. Jika transformator 3 fasa dibanding dengan tiga transformator 1 fasa yang kapasitasnya sama, didapati bahwa berat transformator 3 fasa kira-kira sebesar 80% dari berat tiga transformator 1 fasa. Transformator 3 fasa juga lebih menguntungkan dalam hal pondasi, *wiring*, dan ruang yang diperlukan. Kelebihan menggunakan transformator 1 fasa yaitu apabila diperlukan transformator cadangan, maka untuk transformator 1 fasa cukup ditambah satu transformator 1 fasa saja sehingga menjadi empat transformator 1 fasa, sehingga sangat ekonomis. Namun, jika dalam suatu gardu induk terdapat banyak transformator, maka transformator 3 fasa lebih menguntungkan.

2. *Circuit Breaker* (CB)



Gambar 2.4 SF6 *Circuit Breaker*

(sumber: Rifqi, 2010)

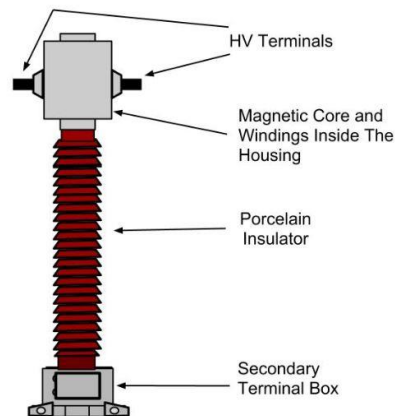
CB merupakan alat yang dapat membuka atau menutup rangkaian baik pada kondisi kerja normal maupun pada saat terjadi kegagalan. Pada kondisi kerja normal CB dapat dioperasikan secara manual ataupun dengan menggunakan remote kontrol, sebaliknya pada saat terjadi kegagalan CB akan bekerja secara otomatis. Pada CB dilengkapi dengan media untuk memadamkan busur api (*arc*), seperti dengan media udara, gas, minyak dan lain sebagainya.

3. Saklar Pemisah (*Disconnecting Switch*, DS)

DS berfungsi memisahkan rangkaian listrik dalam keadaan tidak berbeban. Pada umumnya DS tidak dapat memutuskan arus. Meskipun ia dapat memutuskan arus yang kecil, dalam membuka atau menutup DS harus dilakukan setelah membuka CB terlebih dahulu. Untuk menjamin agar kesalahan urutan operasi tidak terjadi, maka harus ada keadaan saling mengunci (*interlock*) antara CB dan DS. Di dalam rangkaian kontrolnya, rangkaian *interlock* akan mencegah bekerjanya DS apabila CB masih dalam keadaan menutup.

4. Trafo Ukur

Trafo ukur terdiri dari trafo arus (*current transformer*) dan trafo tegangan (*potential transformer*). Trafo arus berfungsi mengubah besaran arus pada sistem ke besaran yang lebih kecil untuk keperluan pengukuran arus, kWh meter, dan rele proteksi. Trafo tegangan berfungsi mengubah besaran tegangan dari tegangan tinggi ke rendah untuk keperluan penunjukan nilai tegangan pada voltmeter, serta untuk pengukuran energi.



Gambar 2.5 *Current Transformer*

(*sumber: www.skm-eleksys.com/2012/06/current-transformer.html?m=1*)

5. *Lightning Arrester*

Lightning arrester merupakan kunci dalam koordinasi isolasi suatu sistem tenaga listrik. Bila terjadi surja atau petir, maka *arrester* berfungsi melepaskan muatan listrik ke sistem pentanahan, serta mengurangi tegangan lebih yang akan mengenai peralatan di dalam gardu induk.



Gambar 2.6 *Arrester*

(*sumber: www.powerqualityworld.com/2011/05/surge-arresters.html?m=1*)

6. Trafo pemakaian sendiri

Trafo pemakaian sendiri berfungsi untuk memenuhi kebutuhan energi listrik dalam gardu induk itu sendiri, misalnya untuk penerangan, *air conditioning*, serta keperluan pengoperasian peralatan listrik lainnya.

7. HV Cell 20 kV (*Cubicle*)

Di dalam *HV Cell* 20 kV terdapat sekumpulan *cell incoming* (penyulang masuk), *cell outgoing* (penyulang keluar), *cell PMT* kopel, *cell spare*, dan lain-lain. *HV Cell* 20 kV berfungsi sebagai pusat beban untuk jaringan distribusi 20 kV, di mana sisi sekunder dari trafo 150/20 kV mengisi *cell incoming* yang berada dalam ruang *HV Cell* 20 kV, kemudian mengalirkan arus di sepanjang bus (rel tegangan menengah) pada *cell-cell outgoing* penyulang. Selanjutnya, dari penyulang-penyulang inilah suplai daya listrik akan didistribusikan kepada konsumen dalam wilayah sesuai dengan yang *dihandle* oleh masing-masing penyulang.

Selain peralatan utama, di dalam gardu induk juga terdapat peralatan kontrol yang terdiri dari:

a. Panel kontrol utama

Panel kontrol utama berfungsi mengontrol dan memonitor operasi gardu induk dan merupakan pusat pengendali suatu gardu induk. Panel kontrol dibagi menjadi panel instrumen dan panel operasi. Pada panel instrumen terpasang instrumen, seperti *amperemeter* dan kWh meter, serta penunjuk gangguan, dari sini

keadaan operasi dapat diawasi. Sedangkan pada panel operasi terpasang saklar operasi dari CB dan DS serta lampu penunjuk posisi saklar.

b. Panel rele

Pada panel rele terpasang rele pengaman, seperti *over current relay (OCR)* dan *directional ground relay*. Kerja rele dikoordinasikan dengan CB, sehingga apabila terjadi gangguan (misalnya karena hubung singkat), rele segera memerintahkan CB untuk trip. Dengan demikian gangguan tidak akan meluas dan mengakibatkan kerusakan pada peralatan.

Di samping peralatan utama dan peralatan kontrol, dalam gardu induk juga terdapat peralatan bantu (*auxiliary*), seperti alat pendingin, baterai, kompresor, alat penerangan dan sebagainya. Karena dalam operasinya gardu induk berhubungan dengan pusat pembagi beban, maka diperlukan juga peralatan komunikasi (Tanzil, 2007).

2.2.4 Klasifikasi Jaringan Distribusi

Klasifikasi jaringan distribusi berdasar level tegangan dan letak jaringan terhadap posisi gardu distribusi dibedakan menjadi dua, yaitu (Syahputra, 2010):

1. Jaringan Distribusi Primer atau Jaringan Tegangan Menengah (JTM).
2. Jaringan Distribusi Sekunder atau Jaringan Tegangan Rendah (JTR).

Jaringan distribusi primer (JTM) merupakan suatu jaringan yang letaknya sebelum gardu distribusi, berfungsi menyalurkan tenaga listrik bertegangan

menengah (misalnya 6 kV atau 20 kV). Hantarannya dapat berupa kabel dalam tanah atau saluran udara yang menghubungkan gardu induk (sekunder trafo) dengan gardu distribusi atau gardu hubung (sisi primer trafo distribusi).

Jaringan distribusi sekunder (JTR) merupakan suatu jaringan yang letaknya setelah gardu distribusi, berfungsi menyalurkan tenaga listrik bertegangan rendah (misalnya 220 V/380 V). Hantaran berupa kabel tanah atau kawat udara yang menghubungkan dari gardu distribusi (sisi sekunder trafo distribusi) ke konsumen.

Sedangkan gardu distribusi sendiri adalah suatu sarana, dimana terdapat transformator *step down* yang menurunkan tegangan dari tegangan menengah menjadi tegangan rendah sesuai kebutuhan konsumen. (Syahputra, 2010).

2.2.4.1 Saluran Jaringan Distribusi Primer

Pada sistem jaringan distribusi primer saluran yang digunakan untuk menyalurkan daya listrik pada masing-masing beban disebut penyulang (*Feeder*). Pada umumnya setiap penyulang diberi nama sesuai dengan daerah beban yang dilayani. Hal ini bertujuan untuk memudahkan dalam mengingat dan menandai jalur-jalur yang dilayani oleh penyulang tersebut. Sistem penyaluran daya listrik pada jaringan distribusi primer dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu (Affandi, 2015):

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

Jenis penghantar yang dipakai adalah kabel telanjang (tanpa isolasi) seperti kawat AAAC (*All Aluminium Alloy Conductor*), ACSR (*Aluminium Conductor Steel Reinforced*), dll.

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

Jenis penghantar yang dipakai adalah kawat berisolasi seperti MVTIC (*Medium Voltage Twisted Insulated Cable*) dan AAACS (Kabel *Aluminium Alloy* dengan pembungkus lapisan PVC).

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

Jenis penghantar yang dipakai adalah kabel tanam berisolasi PVC (*Poly Vinyl Chloride*), XLPE (*Crosslink Polyethelene*), dll. (Affandi, 2015).

Jaringan distribusi umumnya menggunakan saluran udara dengan kawat telanjang yang dipasang pada tiang dengan isolator, karena dari sisi biaya pembangunannya lebih murah dan perawatannya lebih sederhana. Hanya saja jenis jaringan ini dapat mengganggu pemandangan, karena banyak bentangan kawat yang melintas di sepanjang jaringan. Kelemahan yang lain dari sistem ini adalah kurang aman terhadap gangguan cuaca dan terganggu oleh pepohonan yang tumbuh di sekitar jaringan.

Berbeda dengan jaringan bawah tanah, yang mempunyai kelebihan tidak mengganggu pemandangan dan lebih aman terhadap gangguan cuaca. Hanya saja bila terjadi kerusakan, penanganannya lebih rumit. Jaringan bawah tanah harus menggunakan penghantar berisolasi, sehingga biaya pembangunannya lebih mahal. Jaringan bawah tanah biasanya digunakan pada daerah yang menuntut estetika yang tinggi dan jarak yang relatif pendek.

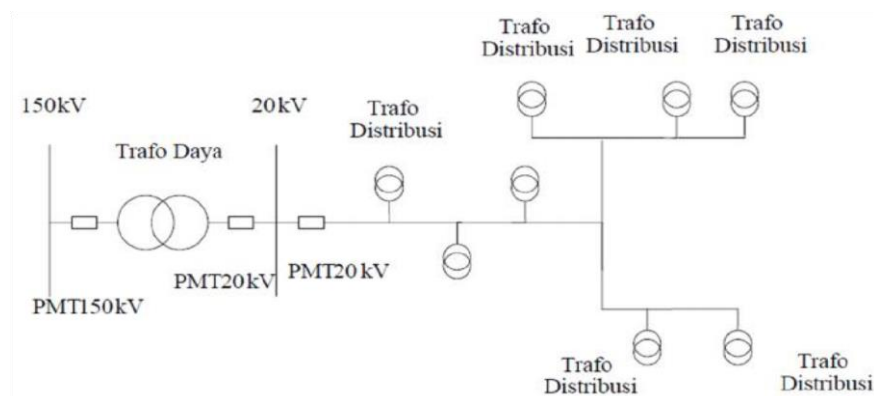
2.2.4.2 Konfigurasi Jaringan Distribusi Primer

Ada berbagai bentuk/tipe jaringan distribusi primer, yaitu (Tanzil, 2007):

1. Sisten Jaringan Distribusi *Radial*

Tipe ini merupakan bentuk yang paling sederhana dan banyak digunakan, tetapi hanya memiliki satu sumber dan tidak ada alternatif sumber lain (*alternative source*). Kondisi demikian menyebabkan terjadinya pemadaman total pada seluruh beban apabila terjadi gangguan pada sumber, karena tidak ada sumber lain yang berfungsi sebagai *back up*. Oleh karena itu, tipe ini cocok diterapkan pada beban kelas rumah tangga dan listrik pedesaan pada umumnya yang tidak menuntut kontinuitas penyaluran daya dengan tingkat keandalan yang tinggi.

Peralatan pendukung terutama pengaman pada bentuk radial ini biasanya berupa *fuse*, *recloser*, *sectionalizer*, atau pemutus beban lainnya, yang berfungsi melokalisir daerah pemadaman pada saat terjadi gangguan (Tanzil, 2007). Sistem distribusi bentuk radial dapat dilihat pada gambar 2.7 berikut ini.



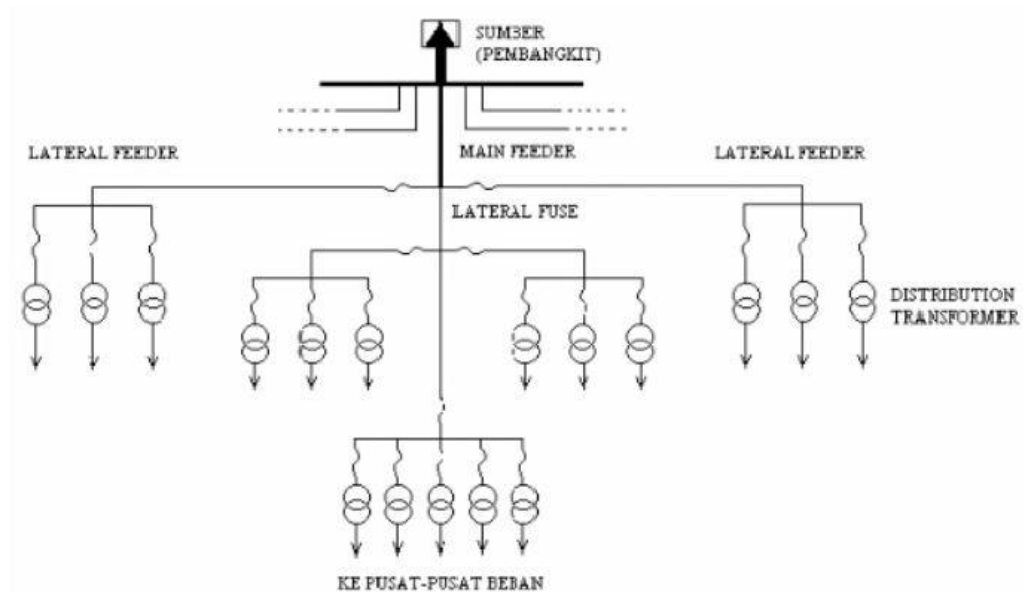
Gambar 2.7 Sistem Distribusi Primer Tipe Radial

(sumber : Kurniawan, 2016)

Dalam perkembangannya bentuk ini mengalami beberapa modifikasi, yaitu:

a. Bentuk radial pohon

Bentuk ini mirip dengan bentuk radial murni. Bentuk radial pohon terdiri atas satu saluran utama yang bercabang-cabang menuju ke setiap titik beban, dan setiap titik beban hanya dilayani oleh satu cabang saluran. Sistem distribusi bentuk radial pohon dapat dilihat pada gambar 2.8 berikut.



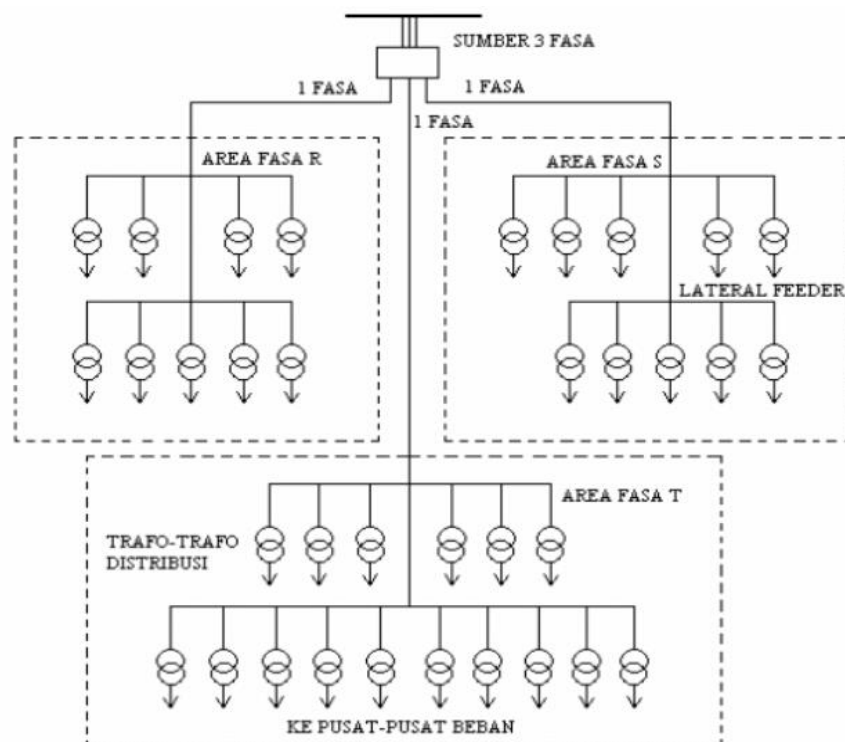
Gambar 2.8 Sistem distribusi radial pohon

(Sumber: Tanzil, 2007)

b. Bentuk radial daerah fase

Bentuk ini berlaku untuk sistem tiga fase, dimana terdapat tiga saluran utama, dan masing-masing saluran utama menyalurkan suplai listrik satu fase kepada pelanggan yang terdapat dalam satu daerah. Kelemahan dari tipe ini yaitu

tidak dapat memenuhi kebutuhan pelanggan akan fasilitas suplai 3 fasa, selain itu bila ternyata kapasitas beban dari masing-masing daerah beban tidak sama atau berbeda jauh, maka akan terjadi pembebanan yang tidak simetris terhadap sumbernya. Oleh karena itu, tipe ini cocok diterapkan pada daerah-daerah beban yang sudah jenuh dan tidak lagi mengharapkan adanya penambahan beban. Sistem distribusi radial daerah fasa dapat dilihat pada gambar 2.9 berikut ini.



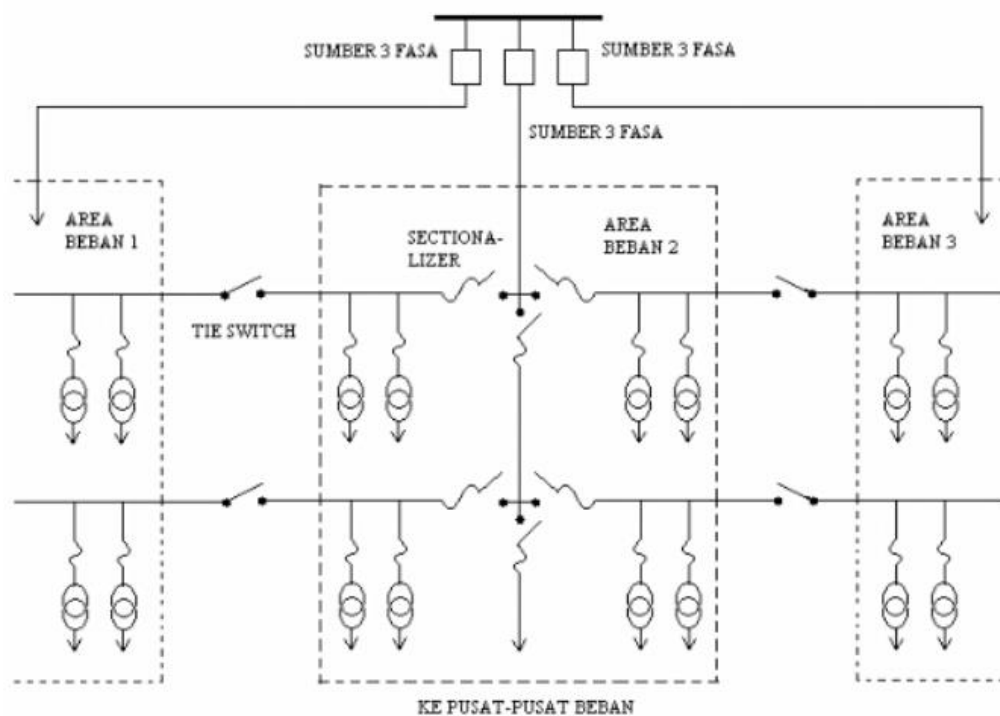
Gambar 2.9 Sistem distribusi radial daerah fasa

(Sumber: Tanzil, 2007)

c. Bentuk radial dengan *tie* dan *switch* pemisah

Bentuk ini merupakan modifikasi dari bentuk radial, yang membagi kelompok beban menjadi beberapa area beban. Di antara area-area beban ini

dipasang *tie* dan *switch* pemisah, yang berfungsi sebagai penghubung pada saat diperlukan adanya pemulihan pelayanan yang cepat bagi pelanggan ketika terjadi gangguan. Caranya dengan menghubungkan area terganggu ke area yang tidak terganggu melewati *feeder-feeder* terdekat. Sedangkan beban yang *feedernya* terganggu, dilokalisir agar tidak harus terjadi pemadaman total. Sistem distribusi radial dengan *tie* dan *switch* pemisah dapat dilihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Sistem distribusi radial dengan *tie* dan *switch* pemisah

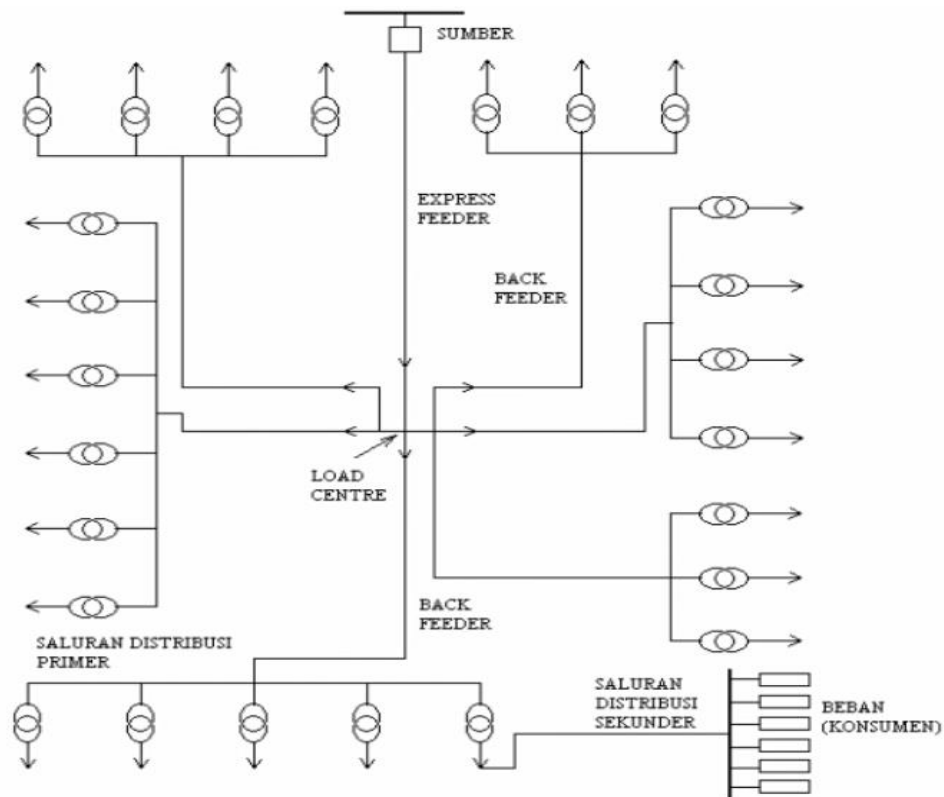
(Sumber: Tanzil, 2007)

d. Bentuk radial pusat beban

Tipe ini pada dasarnya adalah tipe radial murni, tetapi titik sumbernya tidak terletak di titik pusat beban. Antara titik sumber dengan suatu titik yang dianggap

sebagai pusat beban dihubungkan oleh *feeder* utama yang disebut *express feeder*.

Sistem distribusi bentuk radial pusat beban dapat dilihat pada gambar 2.11.



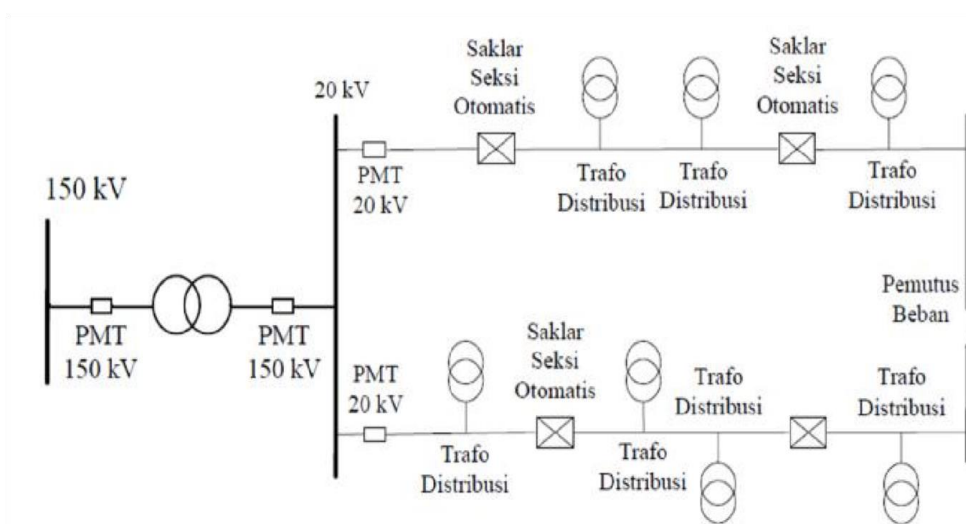
Gambar 2.11 Sistem distribusi radial pusat beban

(Sumber: Tanzil, 2007)

2. Sistem Jaringan Distribusi *Ring*

Tipe ini merupakan rangkaian tertutup (*close loop*) berbentuk *ring* (cincin), yang memungkinkan titi-titik beban dapat dilayani dari dua jalur saluran, sehingga kontinuitas pelayanan daya lebih baik dari tipe radial. Tipe ini cocok diterapkan pada daerah-daerah dengan tingkat kerapatan beban yang cukup besar, seperti kawasan industri dan komersial, yang memerlukan kontinuitas pelayanan daya dengan tingkat kendalan yang tinggi. Jika penyulang operasi mengalami gangguan,

dapat dipasok dari penyulang cadangan secara efektif dalam waktu yang sangat singkat dengan menggunakan fasilitas *Automatic Change Over Switch (ACOS)* (Tanzil, 2007). Sistem distribusi tipe ring dapat dilihat pada gambar 2.12 berikut.



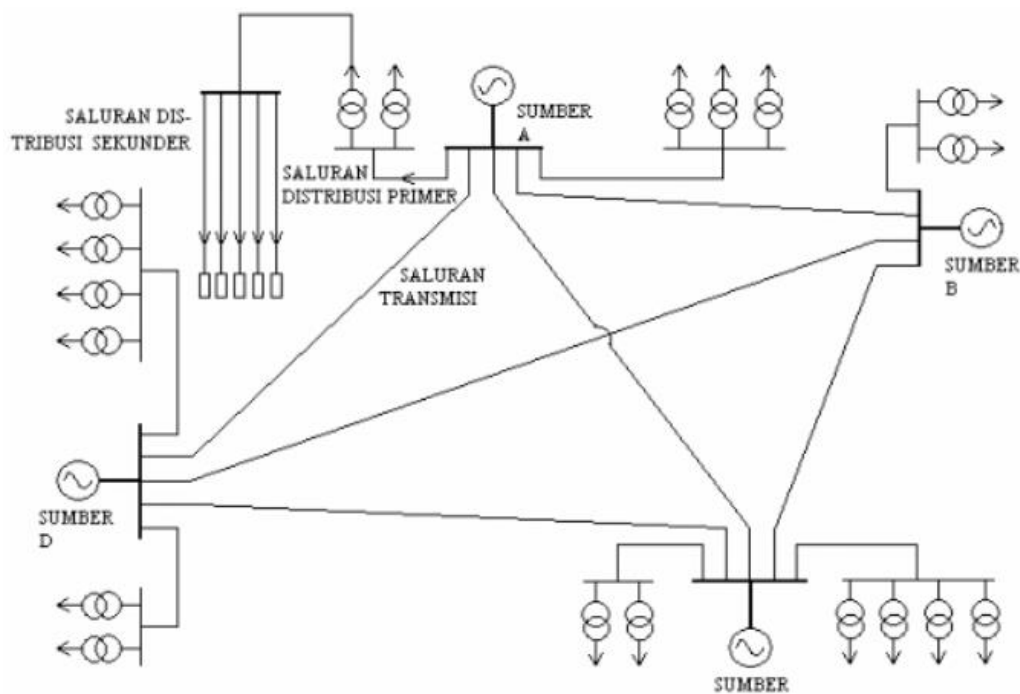
Gambar 2.12 Sistem Jaringan Distribusi Primer Tipe Lingkar (*Loop/ring*)

(sumber : Kurniawan, 2016)

3. Sistem jaringan distribusi *Mesh*

Tipe ini menyediakan lebih banyak lagi saluran pilihan bila terjadi gangguan pada salah satu saluran. Fasilitas pilihan lebih dari satu tidak hanya pada salurannya saja, tetapi juga pada sumbernya, di mana sumber yang tersedia lebih dari satu. Di sinilah perbedaan mendasar antara tipe *ring* dan tipe *mesh*. Apabila pada tipe *ring* tersedia saluran ganda, namun hanya memiliki satu sumber, maka pada tipe *mesh* baik saluran maupun sumber tersedia lebih dari satu. Sistem ini disebut juga sistem interkoneksi, karena disuplai oleh beberapa sumber yang saling berhubungan dan membentuk *mesh* (jaring). Tipe ini memiliki tingkat keandalan

yang sangat baik, cocok digunakan pada kelas beban yang memiliki nilai ekonomis tinggi, atau kelas beban yang sifatnya vital (tidak boleh terganggu kontinuitasnya), seperti pusat sarana komunikasi, instalasi militer dan rumah sakit, dll (Tanzil, 2007). Sistem distribusi tipe *mesh* dapat dilihat pada gambar 2.13 berikut ini.



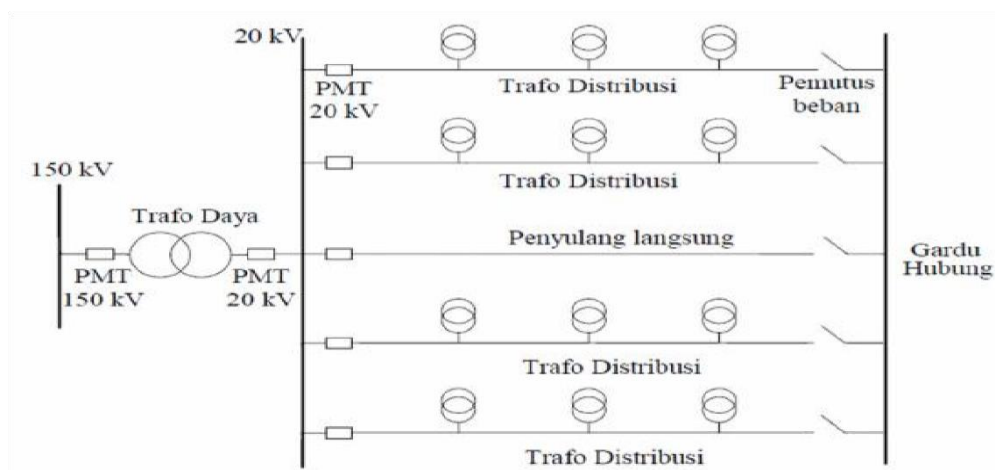
Gambar 2.13 Sistem distribusi *mesh*

(Sumber: Tanzil, 2007)

4. Sistem jaringan distribusi *spindle*

Tipe ini memanfaatkan dua komponen pendukung utama, yaitu gardu induk dan gardu hubung, merupakan pola khusus yang ditandai dengan ciri adanya sejumlah kabel keluar dari suatu gardu induk yang disebut dengan *outgoing* menuju ke arah suatu titik temu yang disebut gardu hubung. Pada tipe *spindle* tidak terdapat

percabangan, sehingga semua saluran dipasang sedemikian rupa agar dapat mencapai gardu hubung secara langsung. Selain saluran utama, juga terdapat sebuah saluran cadangan yang biasa disebut saluran *express*, yang berfungsi sebagai cadangan bila terjadi gangguan pada saluran utama (Tanzil, 2007). Sistem distribusi tipe *spindle* dapat dilihat pada gambar 2.14 berikut ini.



Gambar 2.14 Sistem Jaringan Distribusi Primer Tipe *Spindle*

(sumber : kurniawan, 2016)

2.2.5 Transformator Distribusi

Trafo distribusi merupakan bagian penting dari jaringan distribusi, yaitu untuk menyesuaikan level tegangan agar sesuai dengan keperluan pelanggan. Trafo distribusi biasanya menggunakan pendingin minyak. Kumparan trafo dimasukkan dalam tabung yang berisi minyak pendingin.

Dalam pemakaiannya perlu dipasang peralatan pengaman agar trafo tidak mudah rusak akibat gangguan yang terjadi pada jaringan, baik itu hubung singkat,

arus beban lebih maupun gangguan petir. Untuk melindungi dari gangguan petir digunakan *arrester*, yang satu ujungnya dihubungkan dengan kawat tegangan menengah dan ujung lainnya dihubungkan ke tanah. Prinsip kerjanya, pada saat normal *arrester* bekerja sebagai isolator. Kemudian pada saat terjadi tegangan lebih akibat petir, maka *arrester* berubah watak menjadi konduktor yang baik, sehingga tegangan lebih yang terjadi dapat dinetralkan ke tanah. Setelah tegangan lebih petir hilang, maka *arrester* kembali normal sebagai isolator.

Untuk melindungi dari arus lebih digunakan sekering lebur, yang akan memutuskan rangkaian bila terjadi arus lebih, baik akibat beban yang berlebih ataupun terjadi hubung singkat pada jaringan tegangan rendahnya. (Suripto).

Berdasar kapasitas trafonya trafo distribusi dibagi menjadi beberapa tipe, diantaranya:

1. Tipe tembok : di atas 555 KVA sampai 1 MVA
2. Tipe dua tiang : di atas 200 KVA sampai 555 KVA
3. Tipe satu tiang : dengan kapasitas 200 KVA atau lebih kecil

Pemilihan kapasitas trafo disesuaikan dengan jumlah beban yang dilayani, baik itu beban pada saat trafo dipasang maupun perkiraan penambahan beban di lokasi tersebut. Demikian pula sistem jaringan tegangan rendahnya menggunakan satu fasa atau tiga fasa. Trafo yang berkapasitas relatif kecil biasanya relatif ringan sehingga cukup dipasang pada satu tiang yang digunakan untuk menyangga kawat penghantar jaringan distribusi. Sedang untuk trafo yang berkapasitas besar tidak

lagi dipasang pada tiang jaringan distribusi, tetapi dipasang dalam bangunan. (Suripto).

2.2.6 Gangguan pada Sistem Distribusi

Hubungan singkat (*short circuits*) dan kondisi abnormal lainnya sering terjadi pada sistem tenaga listrik. Arus besar yang diakibatkan hubung singkat dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan jika rele proteksi dan pemutus tenaga (CB) tidak tersedia untuk proteksi tiap seksi sistem tenaga.

Hubung singkat (*short circuits*) biasanya dikatakan sebagai “gangguan” oleh para Engineer. Istilah “gangguan (*faults*)” dapat berarti “kerusakan (*defect*)”. Beberapa kerusakan, selain hubung singkat, juga dikatakan sebagai gangguan, contohnya kegagalan konduksi suatu konduktor.

Jika sebuah gangguan terjadi pada komponen sistem tenaga, piranti proteksi yang bekerja otomatis dibutuhkan untuk mengisolasi elemen terganggu secepat mungkin, guna menjaga bagian sistem yang sehat dapat bekerja normal. Jika gangguan hubung singkat terjadi dalam waktu yang lama, maka dapat menyebabkan kerusakan terutama pada bagian-bagian penting sistem. Arus gangguan hubung singkat yang sangat besar dapat menyebabkan kebakaran.

Skema proteksi meliputi pemutus tenaga (*circuit breakers*, CB) dan rele proteksi untuk mengisolasi bagian sistem yang terganggu terhadap bagian yang sehat. CB dapat memutuskan hubungan elemen sistem terganggu dan tergantung

pada kerja rele proteksi. Rele proteksi berfungsi mendeteksi dan melokalisir gangguan dan memerintahkan CB untuk memutuskan elemen terganggu.

Rele proteksi tidak mengantisipasi atau mencegah terjadinya gangguan, tetapi beroperasi hanya setelah gangguan terjadi. Biaya perlengkapan proteksi umumnya mencapai sekitar 5% dari total biaya sistem tenaga listrik. Sebagian besar gangguan pada saluran transmisi dan distribusi disebabkan oleh tegangan lebih karena petir atau surja hubung, atau karena gangguan eksternal berupa benda yang dapat menimpa saluran. Tegangan lebih karena petir atau surja hubung menyebabkan *flashover* pada permukaan isolator sehingga menyebabkan hubung singkat. (Syahputra, 2010).

Akibat-akibat yang ditimbulkan oleh Gangguan: (Disyon, 2008).

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

2.2.6.1 Penyebab Gangguan pada SUTM maupun SKTM

Ada beberapa hal yang menyebabkan terjadinya gangguan pada saluran distribusi diantaranya, yaitu (Normalasari, 2010):

1. Pada SUTM (Saluran Udara Tegangan Menengah), penyebab gangguan yang sering terjadi, yaitu:
 - a. Gangguan alam (seperti: petir, pohon, angin, hujan, panas, dll);
 - b. Kegagalan atau kerusakan peralatan dan saluran;
 - c. Manusia;
 - d. Binatang dan benda-benda asing, dan lain-lain.

2. Pada SKTM (Saluran Kabel Tegangan Menengah), penyebab gangguan yang sering terjadi, yaitu:
 - a. Gangguan dari luar (*External Fault*), yaitu gangguan-gangguan mekanis karena pekerjaan galian saluran air dan lain-lain. Kendaraan yang lewat di atasnya, impuls petir lewat saluran udara, binatang dan deformasi tanah.
 - b. Gangguan dari dalam (*Internal Fault*), yaitu tegangan dan arus abnormal, pemasangan yang kurang baik, penuaan dan beban lebih.

2.2.6.2 Klasifikasi Gangguan.

Jenis-jenis gangguan yang terjadi dalam sistem tenaga listrik diantaranya sebagai berikut:

1. Gangguan Simetris, yaitu gangguan hub singkat 3 fase, baik 3 fase ke tanah atau tanpa ke tanah.
2. Gangguan Taksimetris, yaitu terdiri dari:
 - a. Gangguan satu fase ke tanah
 - b. Gangguan dua fase ke tanah
 - c. Gangguan fase ke fase
 - d. Gangguan hubung terbuka (*open circuited phases*)
 - e. Gangguan kumparan (*winding faults*)
3. Gangguan Simultan, yaitu dua atau lebih gangguan yang terjadi secara simultan pada sistem tenaga listrik. Pada gangguan simultan, dapat terjadi jenis gangguan yang sama atau berbeda secara bersamaan. (Syahputra, 2010)

Berdasar lamanya gangguan yang terjadi, gangguan dibedakan menjadi dua, yaitu:

- a. Gangguan Permanen (*sustained interruption*),
Gangguan ini ditandai dengan bekerjanya kembali PMT untuk memutus daya listrik. Gangguan permanen baru dapat diatasi setelah penyebab gangguannya dihilangkan.
- b. Gangguan Temporer (*Momentary interruption*)
Gangguan ini ditandai dengan normalnya kerja PMT setelah dimasukkan kembali. Pada gangguan temporer dapat diatasi setelah penyebab gangguan hilang dengan sendirinya setelah PMT trip. (Disyon, 2008).

2.2.7 Sistem Pengaman Jaringan Distribusi

Sistem pengaman bertujuan untuk mencegah, membatasi atau melindungi jaringan dan peralatan terhadap bahaya kerusakan yang disebabkan karena gangguan, baik gangguan yang bersifat temporer maupun permanen, sehingga kualitas dan keandalan penyaluran daya listrik dapat terjamin dengan baik.

Jenis pengaman yang digunakan pada jaringan tegangan menengah antara lain: (Suhadi, 2008. p.349).

1. Pengaman lebur (*Fuse Cut Out, FCO*)
2. Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*)
3. Rele Arus Gangguan Tanah (*Ground Fault Relay*)
4. Rele Arus Gangguan Tanah Berarah (*Directional Ground Fault Relay*)
5. Rele penutup balik (*Reclosing Relay*)
6. Penutup Balik Otomatis (PBO, *Automatic Circuit Recloser*)
7. Saklar Seksi Otomatis (SSO, *Sectionalizer*)
8. Saklar Beban (SB)/*Load Break Switch (LBS)*
9. *Arrester*.

2.2.7.1 Pengaman lebur (*Fuse Cut Out, FCO*)

Pengaman lebur (*Fuse Cut Out*) adalah suatu alat pemutus aliran daya listrik pada jaringan bila terjadi gangguan arus lebih. Alat ini dilengkapi dengan *fuse link* yang terdiri dari elemen lebur. Bagian inilah yang akan langsung melebur jika dialiri arus lebih pada jaringan. Besarnya *fuse link* yang digunakan tergantung dari

perhitungan jumlah beban (arus) maksimum yang dapat mengalir pada jaringan yang diamankan (Suhadi, 2008).



Gambar 2.15 *Fuse Cut Out*

(sumber: Rifqi, 2010)

2.2.7.2 Rele Arus Lebih (*Over Current Relay, OCR*)

Rele arus lebih merupakan pengaman utama sistem distribusi tegangan menengah terhadap gangguan hubung singkat antar fasa. Rele arus lebih adalah suatu rele yang bekerja berdasarkan adanya kenaikan arus yang melebihi nilai *setting* pengaman tertentu dalam waktu tertentu. Berdasarkan karakteristik waktu kerja rele, rele arus lebih dibagi menjadi 3, yaitu:

1. Tanpa penundaan waktu (*instant*)
2. Dengan penundaan waktu:
 - a. Dengan penundaan waktu tertentu (*definite time OCR*)
 - b. Dengan penundaan waktu berbanding terbalik (*inverse time OCR*)
3. Kombinasi *instant* dan *definite time*. (Suhadi, 2008).

2.2.7.3 Rele Arus Gangguan Tanah (*Ground Fault Relay*)

Rele arus gangguan tanah (*ground fault relay*) merupakan pengaman utama terhadap gangguan hubung singkat fasa ke tanah untuk sistem yang ditanahkan langsung atau melalui tahanan rendah (Suhadi, 2008).

2.2.7.4 Rele Arus Gangguan Tanah Berarah (*Directional Ground Fault Relay*)

Relai arus gangguan tanah berarah (*directional ground fault relay*) adalah pengaman utama terhadap hubung singkat fasa ke tanah untuk sistem yang ditanahkan melalui tahanan tinggi. (Suhadi, 2008).

2.2.7.5 Rele Penutup Balik (*Reclosing Relay*)

Relai penutup balik (*reclosing relay*) adalah pengaman pelengkap untuk membebaskan gangguan yang bersifat temporer untuk keandalan sistem (Suhadi, 2008).

2.2.7.6 Penutup Balik Otomatis (PBO, *Automatic Circuit Recloser*)

Penutup balik otomatis (PBO) digunakan sebagai pelengkap untuk pengaman terhadap gangguan *temporer* dan membatasi luas daerah yang padam akibat gangguan. PBO menurut media peredam busur apinya dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu dengan media minyak, *vacum*, dan SF6. Sedangkan menurut peralatan

pengendalinya dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu PBO Hidraulik (kontrol hidraulik) dan PBO Terkontrol Elektrik

Urutan operasi PBO, yaitu sebagai berikut:

1. Pada saat terjadi gangguan, arus yang mengalir melalui PBO sangat besar sehingga menyebabkan kontak PBO terbuka (*trip*) dalam operasi cepat (*fast trip*).
2. Kontak PBO akan menutup kembali setelah melewati waktu *reclose* sesuai *setting*. Tujuan memberi selang waktu ini adalah untuk memberikan waktu pada penyebab gangguan agar hilang, terutama gangguan yang bersifat temporer.
3. Jika gangguan bersifat permanen, PBO akan membuka dan menutup balik sesuai dengan *settingnya* dan akan *lock-out* (terkunci).
4. Setelah gangguan dihilangkan oleh petugas, baru PBO dapat dimasukkan ke sistem. (Suhadi, 2008).

2.2.7.7 Saklar Seksi Otomatis (SSO, *Sectionalizer*)

Saklar seksi otomatis (SSO, *Sectionalizer*) adalah alat pemutus untuk mengurangi luas daerah yang padam karena gangguan. *Sectionalizer* membagi jaringan distribusi kedalam *section-section*, sehingga apabila terjadi gangguan pada salah satu *section*, luas daerah yang padam dapat diperkecil. Ada dua jenis SSO, yaitu dengan pengindera arus yang disebut *Automatic Sectionalizer* dan pengindera tegangan yang disebut *Automatic Vacuum Switch (AVS)*.

Sectionalizer bekerja dengan melakukan deteksi tegangan pada *section* kerjanya. Ketika tidak ada tegangan, *sectinalizer* akan membuka, sebaliknya jika mendeteksi adanya tegangan, maka *sectionalizer* akan menutup. *Sectionalizer* juga dapat dioperasikan secara manual untuk memutus arus beban.

Agar SSO berfungsi dengan baik, maka harus dikoordinasikan dengan PBO (*recloser*) yang ada di sisi hulu. Apabila SSO tidak dikoordinasikan dengan PBO, maka SSO hanya akan berfungsi sebagai saklar biasa (Suhadi, 2008).

2.2.7.8 Load Break Switch (LBS)/ Saklar Beban (SB)



Gambar 2.16 *Load Break Switch*

(sumber: elektro-unimal.blogspot.co.id/2011/12/load-break-switch-lbs.html?m=1)

Load Break Switch (LBS) adalah suatu saklar yang umumnya diletakkan di atas tiang jaringan namun tuas penggeraknya berada di bawah dan berfungsi sebagai pembatas/pengisolir lokasi gangguan. Pada umumnya alat ini dipasang dekat dengan pusat-pusat beban. Alat ini juga berfungsi sebagai saklar hubung antara satu penyulang dengan penyulang lainnya dalam keadaan darurat pada

sistem operasi jaringan distribusi primer tipe lingkaran terbuka (*Open Loop/ring*). (Suhadi, 2008).

2.2.7.9 Arrester

Arrester adalah suatu alat pengaman bagi peralatan listrik terhadap gangguan tegangan lebih yang disebabkan oleh petir. Alat ini berfungsi untuk meneruskan arus petir ke sistem pentanahan sehingga tidak menimbulkan tegangan lebih yang merusak aliran daya sistem frekuensi 50 Hz. Agar tidak mengganggu aliran sistem, maka pada saat terjadi gangguan *arrester* berfungsi sebagai konduktor yang mempunyai tahanan rendah. Akibatnya *arrester* dapat meneruskan arus yang tinggi ke tanah untuk dinetralisir dan setelah gangguan hilang, *arrester* kembali berfungsi normal sebagai isolator. Pada umumnya *arrester* dipasang pada jaringan, transformator distribusi, *cubicle* dan Gardu Induk (Tanzil, 2007).

2.2.8 Keandalan Kontinuitas Penyaluran

Tingkat keandalan kontinuitas pelayanan bagi pemanfaat tenaga listrik adalah berapa lama padam yang terjadi dan berapa banyak waktu yang diperlukan untuk memulihkan penyaluran kembali tenaga listrik. Secara ideal tingkat keandalan kontinuitas pelayanan dibagi atas 5 tingkat (Wibowo, 2010):

Tingkat 1: pemadaman dalam orde berapa jam. Umumnya terjadi pada sistem saluran udara dengan konfigurasi radial.

Tingkat 2: pemadaman dalam orde kurang dari 1 jam. Mengisolasi penyebab gangguan dan pemulihan penyaluran kurang dari 1 jam. Umumnya pada sistem dengan pasokan penyulang cadangan atau sistem *loop*.

Tingkat 3: pemadaman dalam orde beberapa menit. Umumnya pada sistem yang mempunyai sistem SCADA.

Tingkat 4: pemadaman dalam orde detik. Umumnya pada sistem dengan fasilitas *automatic switching* pada sistem *fork*.

Tingkat 5: sistem tanpa pemadaman. Keadaan dimana selalu ada pasokan tenaga listrik, misalnya pada sistem *spotload*, transformer yang bekerja paralel.

Keputusan untuk mendesain sistem jaringan berdasarkan tingkat keandalan penyaluran tersebut adalah faktor utama yang mendasari memilih suatu bentuk konfigurasi sistem jaringan distribusi dengan memperhatikan aspek pelayanan teknis, jenis pelanggan dan biaya. Pada prinsipnya jika tidak memperhatikan bentuk konfigurasi jaringan, desain suatu sistem jaringan adalah sisi hulu mempunyai tingkat kontinuitas yang lebih tinggi dari sisi hilir.

Lama waktu pemulihan penyaluran dapat dipersingkat dengan mengurangi akibat dari penyebab gangguan, misalnya dengan pemakaian PBO, SSO, penghantar berisolasi, *tree guard* atau menambah sistem SCADA (Wibowo, 2010).

Dalam membicarakan keandalan, terlebih dahulu harus diketahui kesalahan atau gangguan yang menyebabkan kegagalan peralatan untuk bekerja sesuai dengan fungsi yang diharapkan.

Adapun konsep keandalan meliputi sebagai berikut (Tanzil, 2007):

- a. Kegagalan, yaitu: berakhirnya kemampuan suatu peralatan untuk melaksanakan suatu fungsi yang diperlukan.
- b. Penyebab kegagalan, yaitu: keadaan lingkungan selama desain, pembuatan atau yang akan menuntun kepada kegagalan.
- c. Mode kegagalan, yaitu: akibat yang diamati untuk mengetahui kegagalan, misalnya suatu keadaan rangkaian terbuka atau hubungan singkat.
- d. Mekanisme kegagalan, yaitu: proses fisik, kimia atau proses lain yang menghasilkan kegagalan.

Kata kegagalan adalah istilah yang menunjukkan berakhirnya untuk kerja yang diperlukan. Hal ini berlaku untuk bagian-bagian peralatan dalam segala keadaan lingkungan. Gangguan listrik pada jaringan sistem distribusi dinyatakan sebagai kerusakan dari peralatan yang mengakibatkan sebagian atau seluruh pelayanan listrik terganggu. Besaran yang dapat digunakan untuk menentukan nilai keandalan suatu sistem tenaga listrik adalah besarnya laju kegagalan/kecepatan kegagalan (*failures rate*) yang dinyatakan dengan simbol λ (Tanzil, 2007).

2.2.9 Keandalan Sistem Distribusi

Definisi keandalan (*reliability*) secara umum merupakan kemampuan sistem dapat berfungsi dengan baik untuk jangka waktu tertentu. Ukuran keandalan dapat dinyatakan sebagai seberapa sering sistem mengalami pemadaman, berapa lama pemadaman terjadi dan berapa cepat waktu yang dibutuhkan untuk

memulihkan kondisi dari pemadaman yang terjadi. Sistem yang mempunyai keandalan yang tinggi akan mampu memberikan tenaga listrik setiap saat dibutuhkan, sedangkan sistem yang mempunyai keandalan rendah akan menyebabkan sering terjadinya pemadaman (Thayib, 2011).

Ketersediaan (*availability*) didefinisikan sebagai kemungkinan suatu sistem berfungsi menurut kebutuhan pada waktu tertentu saat digunakan dalam kondisi beroperasi (Thayib, 2011).

Aplikasi dari konsep keandalan sistem distribusi berbeda dengan aplikasi sistem pembangkitan dan sistem transmisi. Pada sistem distribusi lebih berorientasi pada titik beban pelanggan dari pada orientasi pada wujud sistem, dan sistem distribusi lokal lebih dipertimbangkan dari pada sistem terintegrasi yang secara luas yang mencakup fasilitas pembangkitan dan transmisi. Keandalan sistem pembangkitan dan transmisi lebih mempertimbangkan probabilitas hilangnya beban (*loss of load*), dengan sedikit memperhatikan komponen sistem. Sedangkan keandalan distribusi melihat ke semua aspek dari teknik, seperti desain, perencanaan dan pengoperasian (Tanzil, 2007).

Keandalan sistem distribusi sangat dipengaruhi oleh gangguan yang terjadi pada sistem yang menyebabkan terjadinya pemutusan beban atau *outage*, sehingga berdampak pada kontinuitas ketersediaan pelayanan tenaga listrik ke pelanggan. Tingkat keandalan pada sistem distribusi listrik dapat dilihat dari frekuensi terjadinya pemutusan beban (*outage*), berapa lama pemutusan terjadi dan waktu yang dibutuhkan untuk pemulihan sistem dari pemutusan yang terjadi (*restoration*).

Tingkat pemutusan yang terjadi ini berbanding terbalik dengan keandalan sistem. Frekuensi pemutusan beban yang tinggi akan mengakibatkan keandalan sistem yang rendah (Ifanda, 2014).

Ada 2 cara untuk memperbaiki keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Cara pertama adalah dengan mengurangi frekuensi terjadinya gangguan dan cara kedua adalah dengan mengurangi durasi gangguan. Untuk mengurangi frekuensi terjadinya gangguan, dilakukan tindakan preventif yakni dengan adanya pemeliharaan jaringan secara berkala. Hal ini berguna untuk menjamin performa sistem secara menyeluruh. Sedangkan untuk mengurangi durasi gangguan, disadari pentingnya otomatisasi sistem distribusi untuk memastikan pemulihan pasokan tenaga listrik secara cepat bagi konsumen dan sekaligus memperbaiki tingkat keandalan sistem.

Otomatisasi sistem distribusi dilakukan dengan menggunakan sejumlah peralatan *keypoint*, *keypoint* di sini berupa *sectionalizer* atau Saklar Seksi Otomatis (SSO). *Sectionalizer* membagi jaringan distribusi ke dalam *section-section*, dan akan bekerja melakukan operasi *switching* (*switching operation*) jika terjadi gangguan pada sistem. Ada 2 macam operasi *switching* yang dapat dilakukan, yaitu yang pertama operasi *switching* yang bertujuan untuk melokalisir/memisahkan *section* yang terganggu agar tidak mempengaruhi *section* lain yang tidak terganggu. Dan yang kedua adalah operasi *switching* yang bertujuan untuk memutuskan jaringan dari gangguan, sekaligus menghubungkan jaringan yang terputus dengan

alternatif sumber listrik lain apabila ada yang memungkinkan, sehingga tidak perlu terjadi pemadaman (Tanzil, 2007).

Ada beberapa istilah yang penting berkaitan dengan keandalan sistem distribusi (Tanzil, 2007):

- a. *Outage*, didefinisikan sebagai keadaan dimana suatu komponen tidak dapat melakukan fungsinya disebabkan hal-hal yang secara langsung berhubungan dengan komponen tersebut. *Outage* dapat atau tidak dapat mengakibatkan pemadaman bergantung pada konfigurasi sistem.
- b. *Forced outage*, yaitu *outage* yang disebabkan oleh keadaan darurat yang secara langsung berhubungan dengan suatu komponen, di mana agar komponen tersebut perlu dilepaskan dari sistem dengan segera. Atau *outage* yang disebabkan oleh kesalahan dalam pengoperasian peralatan ataupun karena kesalahan manusia.
- c. *Scheduled outage*, yaitu *outage* yang dihasilkan ketika suatu komponen dengan sengaja dilepas dari sistem pada waktu-waktu yang telah ditentukan, biasanya untuk tujuan perbaikan atau pemeliharaan berkala.
- d. *Interruption*, yaitu pemutusan kerja (pemadaman) pada satu atau lebih konsumen atau fasilitas sebagai akibat dari *outage* yang terjadi pada satu atau lebih komponen.
- e. *Forced interruption*, yaitu pemadaman yang disebabkan oleh *forced outage*.
- f. *Scheduled interruption*, yaitu pemadaman yang disebabkan oleh *scheduled outage*.

- g. *Failure rate* (λ), yaitu jumlah rata-rata kegagalan yang terjadi pada sebuah komponen dalam kurun waktu tertentu, umumnya waktu dinyatakan dalam *year* dan *failure rate* dinyatakan dalam *failure/year*.
- h. *Outage time* (r), yaitu waktu yang digunakan untuk memperbaiki atau mengganti bagian dari peralatan akibat terjadi kegagalan, atau periode dari saat permulaan peralatan mengalami kegagalan sampai saat peralatan dioperasikan kembali sebagaimana mestinya (*outage time* umum dinyatakan dalam *hour/failure*).
- i. *Annual outage time* (U), yaitu lama terputusnya pasokan listrik rata-rata dalam kurun waktu tertentu (umumnya *annual outage time* dinyatakan dalam *hours/year*)

2.2.10 Komponen Perhitungan Keandalan

Adapun indeks dasar yang digunakan untuk menghitung tingkat keandalan sistem tenaga listrik adalah laju kegagalan rata-rata/ angka keluar sistem (λ), waktu keluaran rata-rata (r), dan ketidaktersediaan tahunan rata-rata atau waktu keluar tahunan rata-rata (U) (Thayib, 2011).

1. Laju kegagalan/*Failure Rate* (λ)

Kegagalan komponen adalah keadaan suatu komponen atau sistem yang tidak dapat melaksanakan fungsinya akibat satu atau beberapa kejadian yang berhubungan secara langsung dengan komponen atau sistem tersebut. Banyaknya

kegagalan yang terjadi selama selang waktu t_1 sampai t_2 disebut laju kegagalan (*failure rate*).

Sehingga dapat disimpulkan bahwa laju kegagalan (λ) adalah harga rata-rata dari jumlah kegagalan persatuan waktu pada suatu selang waktu pengamatan (T). Laju kegagalan ini dihitung dengan satuan kegagalan per tahun. Untuk selang waktu pengamatan diperoleh dari:

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{\text{jumlah kegagalan}}{\text{total waktu operasi unit}} \\ &= \frac{N}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (\text{gangguan/tahun}) \dots\dots\dots (2.1)\end{aligned}$$

Metode representasi dimana dua keadaan baik dan dua keadaan gagal untuk durasi operasi atau durasi perbaikan, maka rumus laju kegagalan untuk jumlah n komponen adalah sebagai berikut :

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (\text{gangguan/tahun}) \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana : λ = angka/laju kegagalan konstan (*Failure Rate*)

N = jumlah kegagalan selama selang waktu (*Total number of failure*)

$\sum T_i$ = Jumlah selang waktu pengamatan (Tahun). (Thayib, 2011).

Berdasarkan penyebab terjadinya kegagalan, laju kegagalan dapat dibagi menjadi 2 jenis, yakni (Arigandi, 2015):

- a.) *Sustained failure rate*, yang merupakan nilai laju kegagalan yang diakibatkan oleh gangguan yang memiliki interval waktu yang cukup lama di dalam periode perbaikannya. Jenis laju kegagalan ini yang umum digunakan untuk perhitungan indeks keandalan suatu sistem distribusi.
- b.) *Momentary failure rate*, merupakan nilai laju kegagalan yang disebabkan oleh gangguan sesaat yang dialami oleh suatu komponen.

2. Durasi Perbaikan Rata-rata/*outage time* (r)

Durasi keluaran rata-rata (r) adalah waktu rata-rata yang diperlukan oleh sistem untuk melakukan perbaikan selama terjadinya gangguan (Thayib, 2011).

Secara matematis dituliskan sebagai berikut:

$$r = \frac{\text{lama gangguan (jam) dalam periode tertentu}}{\text{jumlah gangguan dalam periode tertentu}} \text{ (jam/tahun).. (2.3)}$$

3. Durasi Gangguan Tahunan /*Annual Outage Duration* (U)

Annual outage duration (durasi keluaran tahunan) merupakan waktu kegagalan rata-rata yang terjadi pada sistem atau peralatan yang terjadi selama periode tertentu (satu tahun) (Thayib, 2011). Secara matematis dituliskan sebagai berikut:

$$U_i = \lambda_i \cdot r_i \text{ (jam/tahun) (2.4)}$$

Dimana : U_i = *Annual outage duration* (jam/tahun)

λ_i = Laju kegagalan pada titik tertentu (frekuensi/tahun)

r_i = waktu rata-rata perbaikan selama terjadi gangguan (jam)

2.2.11 Indeks Keandalan Sistem Jaringan Distribusi

Indeks keandalan merupakan suatu indikator keandalan yang dinyatakan dalam suatu besaran probabilitas. Sejumlah indeks sudah dikembangkan untuk menyediakan suatu kerangka untuk mengevaluasi keandalan sistem tenaga. Evaluasi keandalan sistem distribusi terdiri dari indeks titik beban dan indeks sistem yang dipakai untuk memperoleh pengertian yang mendalam kedalam keseluruhan capaian.

Untuk menghitung besarnya nilai keandalan biasanya digunakan indeks perkiraan angka keluar (*outage*) dan waktu perbaikan (*repair duration*) dari masing-masing komponen sesuai dengan SPLN 59:1985 seperti pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perkiraan angka keluar komponen sistem distribusi berdasar SPLN 59:

1985

KOMPONEN/ PERALATAN	ANGKA KELUAR (OUTAGE)
Saluran Udara	0.2 /km/tahun
Kabel Saluran Bawah Tanah	0.07 /km/tahun
Pemutus Tenaga	0.004 /km/tahun
Saklar Beban	0.003 /unit/tahun
Saklar Pemisah	0.003 /unit/tahun
Penutup Balik	0.005 /unit/tahun
Penyambung Kabel	0.001 /unit/tahun
Trafo Distribusi	0.005 /unit/tahun
Pelindung Jaringan	0.005 /unit/tahun
Rel Tegangan Rendah (Untuk Sistem Spot Network)	0.001 /unit/tahun

Tabel 2.2 Waktu operasi kerja dan pemulihan pelayanan

NO	OPERASI KERJA	WAKTU / JAM
1	Menerima panggilan adanya pemadaman dan waktu yang dibutuhkan untuk perjalanan ke GI	0.5
2	Menerima panggilan adanya pemadaman dan waktu yang dibutuhkan untuk perjalanan ke alat penutup kembali	1
3	Waktu yang dibutuhkan untuk sampai dari satu gardu ke gardu berikutnya.	0.16
4	Waktu yang dibutuhkan untuk sampai dari satu gardu ke gardu berikutnya untuk sistem <i>spot network</i>	0.2
5	Waktu yang dibutuhkan untuk memeriksa indikator gangguan (hanya untuk sistem <i>spindle</i>)	0.083
6	Waktu yang dibutuhkan untuk membuka / menutup pemutus tenaga atau penutup kembali	0.25
7	Waktu yang dibutuhkan untuk membuka/ menutup saklar beban atau saklar pemisah	0.15
8	Waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki kawat penghantar udara	3
9	Waktu yang dibutuhkan untuk mencari lokasi gangguan pada kabel bawah tanah	5
10	Waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki kabel saluran bawah tanah	10
11	Waktu yang dibutuhkan untuk mengganti/memperbaiki pemutus tenaga, saklar beban, penutup kembali atau saklar pemisah	10
12	Waktu yang dibutuhkan untuk mengganti penyambung kabel (bulusan) untuk kabel berisolasi kertas	15
13	Waktu yang dibutuhkan untuk mengganti trafo distribusi	10
14	Waktu yang dibutuhkan untuk mengganti pelindung jaringan	10
15	Waktu yang dibutuhkan untuk mengganti / memperbaiki bus tegangan rendah	10

Berdasar data angka kegagalan pada SPLN No. 59: 1985 di atas maka dapat diasumsikan nilai angka kegagalan untuk Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) pada tabel 2.3 berikut ini. (Arigandi, 2015).

Tabel 2.3 Data Kegagalan untuk Saluran Udara

Saluran Udara	Angka Keluar
<i>Sustained Failure Rate</i> (λ /km/tahun)	0.2
<i>Momentary Failure Rate</i> (λ /km/tahun)	0.003
Waktu Pemadaman atau <i>Repair Time</i> (jam)	3
Waktu Pemindahan atau <i>Switching Time</i> (jam)	0.15

Beberapa indikator yang digunakan untuk menunjukkan indeks keandalan dari suatu sistem distribusi listrik antara lain: SAIFI (*system average interruption frequency index*), SAIDI (*system average interruption duration index*), CAIDI (*customer average interruption duration index*) (Ifanda, 2014).

Berikut adalah penjelasan parameter-parameter yang digunakan dalam menentukan keandalan sistem jaringan distribusi dan cara perhitungannya.

1. Indeks Berorientasi pada Pelanggan

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

Menginformasikan tentang frekuensi pemadaman rata-rata untuk tiap konsumen dalam kurun waktu setahun pada suatu area yang dievaluasi. Nilainya adalah jumlah gangguan yang terjadi dibagi dengan jumlah pelanggan yang dilayani. Secara matematis dituliskan sebagai berikut (Tanzil, 2007):

$$\text{SAIFI} = \frac{\text{Total jumlah gangguan yang terjadi}}{\text{Total jumlah pelanggan}}$$

$$\text{SAIFI} = \frac{\sum(\lambda_i \cdot N_i)}{\sum N} \quad (\text{failure/year} * \text{costumer}) \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana : λ_i = indeks kegagalan rata-rata per tahun (*failure/year*)

N_i = jumlah konsumen padam

N = jumlah total konsumen

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

Menginformasikan tentang durasi pemadaman rata-rata untuk tiap konsumen dalam kurun waktu setahun pada suatu area yang dievaluasi. Secara matematis dituliskan sebagai berikut (Tanzil, 2007):

$$\text{SAIDI} = \frac{\text{total jumlah waktu gangguan yang dialami pelanggan}}{\text{total jumlah pelanggan}}$$

$$\text{SAIDI} = \frac{\sum(U_i \cdot N_i)}{\sum N} \quad (\text{hours/year} * \text{costumer}) \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana : U_i = durasi pemadaman rata-rata per tahun (*hours/year*)

N_i = jumlah konsumen padam

N = jumlah total konsumen

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

Indeks ini menginformasikan durasi pemadaman rata-rata konsumen untuk setiap gangguan yang terjadi. Nilainya adalah jumlah durasi gangguan dibagi

dengan total jumlah pelanggan. Secara matematis dituliskan sebagai berikut (Tanzil, 2007):

$$\begin{aligned} \text{CAIDI} &= \frac{\text{SAIDI}}{\text{SAIFI}} \text{ (hours/failure)} \\ &= \frac{\sum(U_i \cdot N_i)}{\sum(\lambda_i \cdot N_i)} \dots\dots\dots (2.7) \end{aligned}$$

Dimana : λ_i = indeks kegagalan rata-rata per tahun (*failure/year*)

U_i = durasi pemadaman rata-rata per tahun (*hours/year*)

N_i = jumlah konsumen padam

2. Indeks Berorientasi pada Beban serta Energi

Di samping ketiga parameter keandalan yang umum dipakai diatas, ada pula beberapa indeks tambahan yang sering digunakan untuk mengevaluasi keandalan suatu sistem distribusi, yaitu indeks yang berorientasi pada beban serta energi. Beberapa diantaranya adalah:

a. ENS (*Energi Not Supplied*)

ENS merupakan indeks keandalan yang menyatakan jumlah energi yang tidak dapat disalurkan oleh sistem selama terjadi gangguan pemadaman atau banyaknya MWh yang hilang akibat adanya pemadaman. Secara matematis dituliskan sebagai berikut (Dharmawati, 2012):

$$\text{ENS} = \sum [\text{Gangguan (MW)} \times \text{Durasi (h)}] \dots\dots\dots (2.8)$$

b. AENS (*Average Energy Not Supplied*)

AENS merupakan indeks rata-rata energi yang tidak disalurkan akibat terjadinya pemadaman. AENS dinyatakan dengan perbandingan antara jumlah energi yang hilang saat terjadi pemadaman dengan jumlah pelanggan yang dilayani.

Secara matematis dituliskan sebagai berikut (Dharmawati, 2012):

$$AENS = \frac{\text{Jumlah energi yang tidak tersalurkan oleh sistem}}{\text{Jumlah pelanggan yang dilayani}}$$

$$= \frac{ENS}{\sum N} \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana, N = jumlah pelanggan yang dilayani

2.2.12 Perhitungan Dasar Keandalan Jaringan Distribusi

a. Keandalan Jaringan Distribusi untuk Sistem Seri

Suatu sistem seri dapat didefinisikan sebagai komponen-komponen tertentu yang harus beroperasi semua untuk keberhasilan sistem dalam batas keandalan atau hanya satu kehendak kegagalan untuk gangguan sistem-sistem. Blok diagram komponen-komponen seri ditunjukkan seperti pada gambar 2.7 berikut:



Gambar 2.17 Blok Diagram untuk Sistem Seri

(Sumber: Tanzil, 2007)

Dari gambar tampak sebuah sistem dengan dua komponen yang tersusun seri, dengan *failure rate* λ_1 dan λ_2 dan *outage time* r_1 dan r_2 mempunyai indeks keandalan sebagai berikut (Tanzil, 2007):

$$\text{Failure rate sistem: } \lambda_s = \lambda_1 + \lambda_2 \dots\dots\dots (2.10)$$

$$\text{Outage time sistem: } r_s = \frac{\lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2}{\lambda_1 + \lambda_2} = \frac{\sum \lambda_i r_i}{\sum \lambda_s} \dots\dots\dots (2.11)$$

$$\text{Annual outage time sistem: } U_s = \lambda_s r_s \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana : λ_s = laju kegagalan sistem (seri) (*failure/year*)

λ_1 = laju kegagalan komponen 1 (*failure/year*)

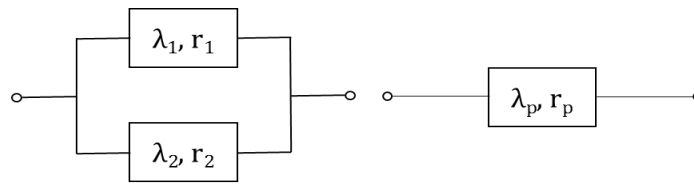
r_s = waktu perbaikan sistem (seri) (*hours/failure*)

r_1 = waktu perbaikan kmponen 1 (*hours/failure*)

U_s = ketidaktersediaan listrik rata-rata sistem per tahunan (*hours/year*)

c. Keandalan Jaringan Distribusi untuk Sistem Paralel

Definisi sistem paralel yaitu suatu rangkaian komponen, dimana dibutuhkan satu komponen saja yang bekerja untuk menjadikan sistem berhasil dalam hal keandalan atau sistem gagal hanya terjadi bila semua komponen tidak bekerja. Blok diagram untuk sistem paralel dengan dua komponen ditunjukkan pada gambar 2.8 berikut:



Gambar 2.18 Blok Diagram untuk sistem paralel

(Sumber: Tanzil, 2007)

Dari gambar tampak sebuah sistem dengan dua komponen yang tersusun paralel, dengan failure rate λ_1 dan λ_2 , dan outage time r_1 dan r_2 mempunyai indeks keandalan sebagai berikut (Tanzil, 2007):

$$\text{Failure rate system: } \lambda_p = \lambda_1 \cdot \lambda_2 (r_1 + r_2) \dots\dots\dots (2.13)$$

$$\text{Outage time system: } r_p = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} \dots\dots\dots (2.14)$$

$$\text{Annual outage time system: } U_p = \lambda_p \cdot r_p \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana : λ_p = laju kegagalan sistem (paralel) (*failure/year*)

λ_1 = laju kegagalan komponen 1 (*failure/year*)

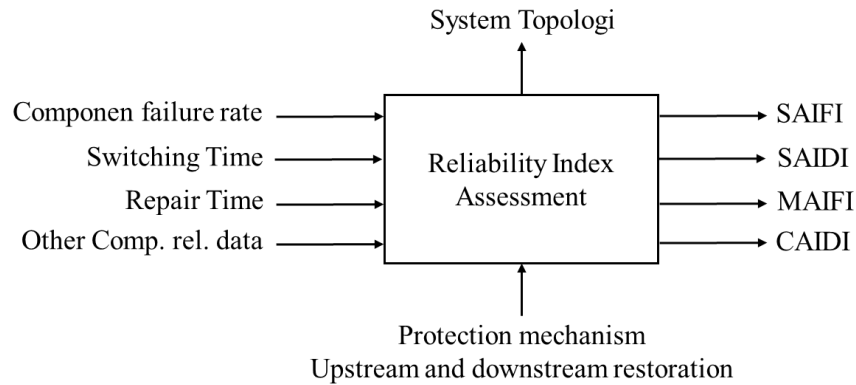
r_p = waktu perbaikan sistem (paralel) (*hours/failure*)

r_1 = waktu perbaikan kmponen 1 (*hours/failure*)

U_p = ketidakersediaan listrik rata-rata sistem per tahunan (*hours/year*)

2.2.13 Metode RIA (*Reliability Index Assessment*)

Metode RIA adalah sebuah pendekatan yang digunakan untuk memprediksi gangguan pada sistem distribusi berdasarkan topologi sistem dan data-data mengenai *component reliability*.



Gambar 2.19 Input dan Output dari RIA

(sumber: Li, 2005)

Sebelum analisa keandalan dilakukan pada sebuah sistem, harus menentukan terlebih dahulu komponen-komponen dari *reliability data* yang akan digunakan, yaitu sebagai berikut (Disyon, 2008):

- a. λ_M : *Momentary failure rate*; ini adalah frekuensi dari *fault* yang akan hilang dengan sendirinya.
- b. λ_S : *Sustained failure rate*; ini adalah frekuensi dari *fault* yang membutuhkan kru untuk memperbaikinya.
- c. MTTR; *Mean Time To Repair*; ini adalah lama waktu yang digunakan oleh kru untuk memperbaiki *component outage* dan mengembalikan sistem ke keadaan operasi normal.
- d. MTTS; *Mean Time To Switch*; ini adalah lama waktu yang akan dipakai setelah terjadi *failure* untuk *sectionalizing switch*.

Pada metode RIA ada indeks keandalan yang dihitung, yaitu SAIFI, SAIDI, MAIFI, dan CAIDI.

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

Secara matematis dituliskan sebagai berikut:

$$SAIFI = \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i \cdot S_i}{n} \dots\dots\dots (2.16)$$

dimana: λ_i = *sustained failure rate* dari komponen i (*failure/year*)

S_i = jumlah konsumen yang mengalami *sustained interruption* karena kegagalan komponen i ;

n = jumlah total konsumen

m = jumlah dari komponen. (Li, 2005).

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

Secara matematis dituliskan sebagai berikut:

$$SAIDI = \sum_{i=1}^m \frac{S_i \cdot D_i}{n} \dots\dots\dots (2.17)$$

dimana: D_i = durasi *sustained interruption* yang dialami konsumen karena kegagalan komponen

S_i = jumlah konsumen yang terganggu

n = jumlah total konsumen

m = jumlah dari komponen. (Brown, 1997).

3. MAIFI (*Momentary Average Interruption Frequency Index*)

Secara matematis dituliskan sebagai berikut:

$$\text{MAIFI} = \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i \cdot T_i}{n} \dots\dots\dots (2.18)$$

dimana: λ_i = *momentary failure rate* dari komponen (*failure/year*);

T_i = jumlah konsumen yang mengalami *momentary interruption* karena kegagalan komponen i ;

n = jumlah total konsumen

m = jumlah dari komponen. (Li, 2005).

SAIFI merupakan indeks keandalan yang digunakan untuk mengkarakteristikan frekuensi pemadaman rata-rata untuk tiap konsumen dalam kurun waktu setahun pada suatu area yang dievaluasi. Indeks ini, bagaimanapun tidak memasukkan *momentary interruptions*. Sejak pertumbuhan yang sangat besar dari beban sensitif elektronika, dampak dari *momentary interruptions* yang dialami oleh konsumen meningkat pula. Maka didefinisikanlah sebuah indeks baru untuk mengkarakteristikan *momentary interruptions*. Indeks ini yaitu MAIFI (*Momentary Average Interruption Frequency Index*) (Brown, 1997).

Momentary Interruption dapat disebabkan oleh dua hal yaitu:

- 1) *Self Clearing Fault*
- 2) *Permanent Fault*

1.) *Momentary Interruption* karena *Self Clearing Fault*

Lebih dari 70% dari fault pada saluran udara dari sistem distribusi bersifat temporer. Untuk alasan ini, recloser digunakan untuk *de-energise* sistem untuk

periode waktu yang singkat untuk membiarkan setiap *fault* hilang dengan sendirinya. Susunan kejadian ketika *Self Clearing Fault* terjadi pada sebuah sistem distribusi adalah sebagai berikut:

1. *Fault* terjadi pada sistem.
2. *Recloser* terbuka. Hal ini mengganggu semua konsumen pada sisi *downstream* dari *recloser*. (Selanjutnya konsumen pada sisi *downstream* akan dianggap sebagai C_1)
3. Setelah beberapa waktu, *recloser* akan tertutup. Jika *fault* telah hilang, maka *recloser* akan tetap tertutup. Jika tidak, *recloser* mungkin akan beroperasi sekali atau beberapa kali lagi sampai *fault* hilang dengan sendirinya.

Pada situasi ini, setiap konsumen pada C_1 akan mengalami *momentary interruption*. Ini adalah kejadian nyata jika lebih dari satu operasi *reclosing* (membuka dan menutup) dibutuhkan untuk menghilangkan *fault*. Contoh, asumsikan bahwa sebuah saluran udara mempunyai *momentary failure rate* sebesar 0,3 *failure per year*. Jika *recloser* terdekat (sisi *upstream* dari saluran udara) mempunyai 100% kesempatan untuk beroperasi selama satu dari *failures* ini, maka semua konsumen (sisi *downstream* dari *recloser*) akan mengalami 0,3 *momentary interruptions* per tahun karena *self clearing fault* pada saluran udara (Brown, 1997).

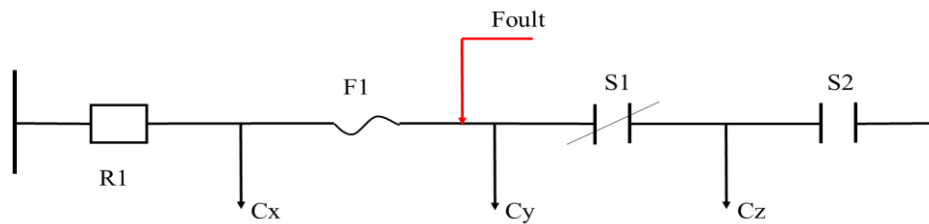
2.) *Momentary interruptions* karena *Permanent Fault*

Ketika *permanent fault* (dalam artian bukan *self clearing fault*) terjadi pada sistem distribusi, tentu konsumen tertentu akan mengalami *sustained interruption*.

Selain itu, konsumen yang lain akan mengalami *momentary interruption*. Untuk menentukan *momentary interruption* yang dialami konsumen karena *permanent fault*, dapat diperhatikan urutan kejadiannya berikut ini:

1. *Fault* terjadi pada sistem
2. *Recloser* terbuka. Hal ini mengganggu semua konsumen pada sisi *downstream* dari *recloser*. (Selanjutnya konsumen pada sisi *downstream* akan dianggap sebagai C_1).
3. *Recloser* akan beroperasi beberapa kali. Setelah jumlah maksimum dari operasi tercapai, *recloser* tetap tertutup untuk membiarkan peralatan *time over current* untuk beroperasi.
4. Peralatan *time over current* (seperti *fuse* atau *circuit breaker*) beroperasi. Ini mengganggu konsumen pada sisi *downstream* dari peralatan. (Selanjutnya konsumen pada sisi *downstream* akan dianggap sebagai C_2).
5. Jika tersedia otomatisasi *switching*, maka dengan cepat akan memulihkan daya pada konsumen tertentu. (Selanjutnya konsumen ini akan disebut sebagai C_3).

Untuk setiap *permanent fault*, sebuah *momentary interruptions* ditunjukkan ke setiap konsumen dalam bentuk $C_1 - C_2 - C_3$. Untuk ilustrasi, perhatikan sistem distribusi sederhana pada gambar dibawah ini. Sistem ini terdiri dari sebuah *recloser* (R1), sebuah *fuse* (F1), dua buah *automated switches* (S1, S2), dan tiga konsumen (C_x, C_y, C_z).



Gambar 2.20 *Simple Distribution System*

(sumber: Brown, 1997)

Jika *permanent fault* terjadi pada lokasi yang ditunjukkan, R1 akan terbuka dan akan *reclosing* beberapa kali dalam berusaha menghilangkan *fault*. Ini akan menyebabkan konsumen Cx, Cy, dan Cz kehilangan pasokan daya: $C_1 = \{Cx, Cy, Cz\}$. Setelah usaha untuk *reclosing* gagal, R1 akan tetap tertutup, membiarkan F1 menghilangkan *fault*. Ini menyebabkan konsumen Cy dan Cz kehilangan pasokan daya: $C_2 = \{Cy, Cz\}$. Perlu diperhatikan bahwa pasokan daya telah kembali untuk konsumen Cx. Terakhir, *automated switching* dengan cepat membuka S1 dan kemudian menutup S2. Hal ini mengembalikan daya untuk konsumen Cz: $C_3 = \{Cz\}$. Dalam situasi seperti ini konsumen mengalami *momentary interruption*.

Jumlah dari *momentary interruption* yang dialami oleh konsumen yaitu MAIFI, dapat dihitung sebagai jumlah *momentary interruption* karena *Self Clearing Fault* ditambah dengan jumlah *momentary interruption* karena *permanent fault* (Brown, 1997).

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

Secara matematis dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{CAIDI} &= \frac{\text{SAIDI}}{\text{SAIFI}} \\ &= \sum_{i=1}^m \frac{S_i \cdot r_i}{n} \dots\dots\dots (2.19) \end{aligned}$$

dimana: r_i = durasi *sustained interruption* yang dialami konsumen karena kegagalan komponen

S_i = jumlah konsumen yang terganggu

n = jumlah total konsumen

m = jumlah dari komponen. (Li, 2005).