

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Indeks keandalan SAIDI, SAIFI dan CAIDI merupakan beberapa indeks keandalan yang dapat digunakan untuk mengetahui tingkat kandalan pada suatu sistem distribusi tenaga listrik. Artinya bahwa, suatu sistem distribusi dapat dikatakan andal apabila indeks SAIFI, SAIDI dan CAIDI memenuhi standar yang berlaku yakni standar SPLN 68-2: 1986 dan standar IEEE 1366-2003. Mengenai hal tersebut, terdapat beberapa penelitian yang membahas mengenai indeks keandalan SAIFI, SAIDI dan CAIDI antara lain sebagai berikut:

1. Berdasarkan penelitian Siti Saodah pada Seminar Nasional Aplikasi Sains dan Teknologi yang berjudul *Evaluasi Keandalan Sistem Distribusi Tenaga Listrik Berdasarkan SAIFI dan SAIDI* yang dilaksanakan pada tahun 2008 menyatakan bahwa di PT. PLN (Persero) APJ Cimahi-UPJ Prima nilai keandalan berdasarkan penyebab pemadamannya, nilai frekuensi pemadaman ( $SAIFI_{SUTM} = 5,063$  pemadaman/pelanggan/tahun) dan lama gangguan ( $SAIDI_{SUTM} = 3,604$  jam/gangguan/tahun) sehingga nilai indeks  $SAIFI_{SUTM}$  dikatakan kurang handal dan indeks  $SAIDI_{SUTM}$  dikatakan handal berdasarkan standar  $SAIFI \leq 2,4$  pemadaman/pelanggan/tahun dan  $SAIDI \leq 12,672$  jam/pelanggan/tahun.
2. Kemudian berdasarkan penelitian Aditya Teguh Prabowo, Bambang Winardi dan Susatyo Handoko pada jurnal yang berjudul *Analisis Keandalan Sistem Distribusi 20 KV Pada Penyulang Pekalongan 8 dan 11* yang terbit pada bulan Desember 2013 menyatakan bahwa nilai SAIFI, SAIDI dan CAIDI pada penyulang PKN 8 dengan panjang penyulang 11,65 km adalah 2,7468 kali/tahun, 9,3642 jam/tahun, dan 3,4092 jam/pelanggan. Sedangkan nilai SAIFI, SAIDI dan CAIDI pada penyulang 11 dengan panjang penyulang 8,9 km adalah 2,218 kali/tahun, 8,26 jam/tahun dan 3,7176 jam/pelanggan sehingga semakin jauh letak tempat

dari sumber suplai tenaga listrik maka nilai indeks keandalannya akan semakin rendah.

3. Sedangkan berdasarkan penelitian Nita Nurdiana pada jurnal yang berjudul *Studi Keandalan Sistem Distribusi 20 KV Gardu Induk Talang Ratu Palembang* yang terbit pada bulan Januari 2017 menyatakan bahwa nilai indeks SAIFI untuk penyulang Jambi Gardu Induk Talang Ratu adalah 2,791 gangguan/pelanggan/tahun dan masih memenuhi standar yang ditetapkan yakni 3 kali/pelanggan/tahun. Sedangkan nilai indeks SAIDI penyulang Jambi Gardu Induk Talang Ratu adalah 8,372 jam/pelanggan/tahun jauh di atas standar yang ingin dicapai oleh PT. PLN (Persero) yaitu 1,67 jam/pelanggan/tahun.

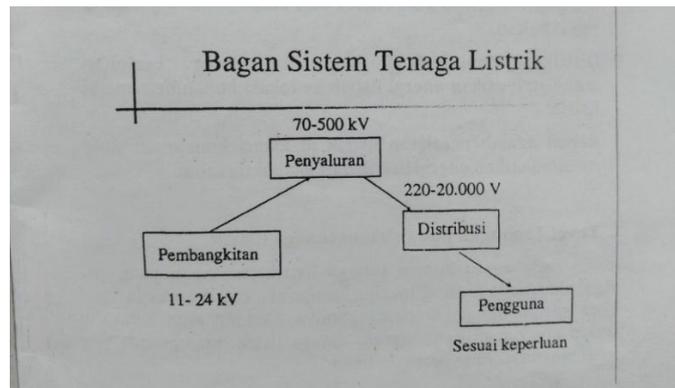
## **2.2 Landasan Teori**

### **2.2.1 Sistem Tenaga Listrik**

Menurut Suropto (2014), sistem tenaga listrik adalah suatu sistem yang terdiri dari beberapa komponen yang saling berhubungan dan bekerja sama untuk melayani kebutuhan tenaga listrik bagi pelanggan sesuai kebutuhan. Fungsi masing-masing komponen secara garis besar adalah sebagai berikut:

1. Pembangkitan merupakan komponen yang berfungsi membangkitkan tenaga listrik, yaitu mengubah energi yang berasal dari sumber energi lain misalnya: air, batu bara, panas bumi, minyak bumi, dan lain-lain menjadi energi listrik.
2. Transmisi merupakan komponen yang berfungsi menyalurkan daya atau energi dari pusat pembangkitan ke pusat beban.
3. Distribusi merupakan komponen yang berfungsi mendistribusikan energi listrik ke lokasi konsumen energi listrik.
4. Beban adalah peralatan listrik di lokasi konsumen yang memanfaatkan energi listrik dari sistem tersebut.

Contoh gambar skema sistem tenaga listrik ditunjukkan pada gambar 2.1 di bawah ini.

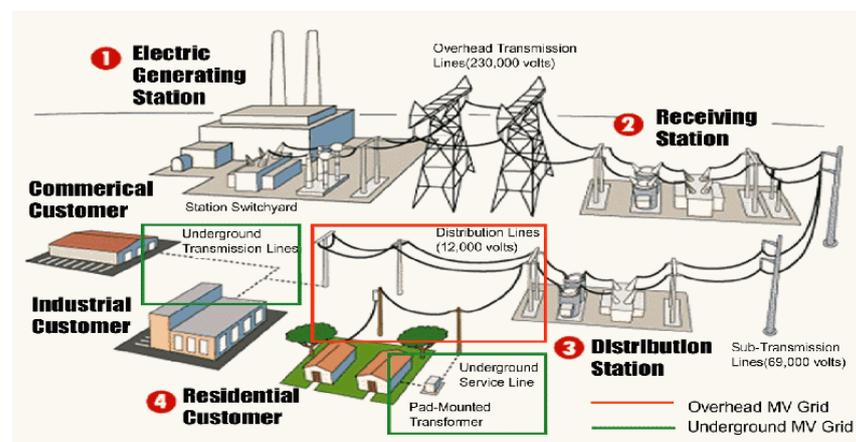


**Gambar 2.1** Skema Sistem Tenaga Listrik  
(Sumber: Suropto, 2014)

### 2.2.1.1 Komponen Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan kumpulan dari komponen-komponen atau alat-alat listrik seperti generator, transformator, saluran transmisi, saluran distribusi, dan beban, yang dihubung-hubungkan dan membentuk suatu sistem.

Siklus energi listrik pada sistem tenaga listrik dapat dijelaskan sebagai berikut. Pada pusat pembangkit, sumber daya energi primer seperti bahan bakar fosil (minyak, gas alam, dan batubara), hidro, panas bumi, dan 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, 2016).



**Gambar 2.2** Komponen Sistem Tenaga Listrik  
(Sumber: Syahputra, 2016)

### **2.2.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik**

Menurut Nashirul Haq (2016), Sistem jaringan distribusi dapat dibedakan menjadi 2 sistem jaringan distribusi primer dan sistem jaringan distribusi sekunder. Kedua sistem tersebut dibedakan berdasarkan tegangan kerjanya. Pada umumnya tegangan kerja pada sistem jaringan distribusi primer adalah 20 kV, sedangkan tegangan kerja pada sistem jaringan distribusi sekunder 380 V atau 220 V. Untuk menyalurkan tenaga listrik secara kontinyu dan handal, diperlukan pemilihan sistem distribusi yang tepat. Kriteria pemilihan ini berdasarkan pada beberapa faktor, antara lain:

1. Faktor ekonomis
2. Faktor tempat
3. Kelayakan

Pemilihan sistem jaringan harus memenuhi kriteria persyaratan yaitu:

1. Keandalan yang tinggi
2. Kontinuitas pelayanan
3. Biaya investasi yang rendah
4. Fluktuasi frekuensi dan tegangan rendah

#### **2.2.2.1 Sistem Pendistribusian Tenaga Listrik**

Menurut Suswanto (2009), sistem jaringan tenaga listrik adalah penyaluran energi listrik dari pembangkit tenaga listrik (*power station*) hingga sampai kepada konsumen (pemakai) pada tingkat tegangan yang diperlukan. Sistem tenaga listrik ini terdiri dari unit pembangkit, unit transmisi dan unit distribusi.

Sistem pendistribusian tenaga listrik dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu sistem pendistribusian langsung dan sistem pendistribusian tak langsung.

##### **1. Sistem Pendistribusian Langsung**

Sistem pendistribusian langsung merupakan sistem penyaluran tenaga listrik yang dilakukan secara langsung dari Pusat Pembangkit Tenaga Listrik, dan tidak melalui jaringan transmisi terlebih dahulu. Sistem pendistribusian langsung ini digunakan jika Pusat Pembangkit

Tenaga Listrik berada tidak jauh dari pusat-pusat beban, biasanya terletak daerah pelayanan beban atau dipinggiran kota.

## 2. Sistem Pendistribusian Tak Langsung

Sistem pendistribusian tak langsung merupakan sistem penyaluran tenaga listrik yang dilakukan jika Pusat Pembangkit Tenaga Listrik jauh dari pusat-pusat beban, sehingga untuk penyaluran tenaga listrik memerlukan jaringan transmisi sebagai jaringan perantara sebelum dihubungkan dengan jaringan distribusi yang langsung menyalurkan tenaga listrik ke konsumen.

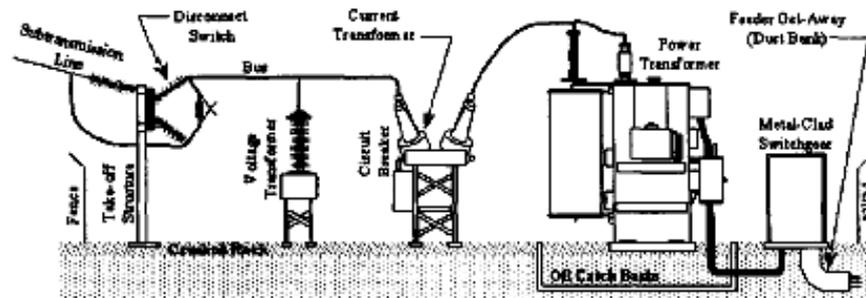
### 2.2.2.2 Struktur Jaringan Distribusi

Menurut Suswanto (2009), sistem distribusi tenaga listrik terdiri dari beberapa bagian, yaitu:

#### a. Gardu Induk atau Pusat Pembangkit Tenaga Listrik

Pada bagian ini jika sistem pendistribusian tenaga listrik dilakukan secara langsung, maka bagian pertama dari sistem distribusi tenaga listrik adalah Pusat Pembangkit Tenaga Listrik. Untuk menyalurkan tenaga listrik ke pusat-pusat beban (konsumen) dilakukan dengan jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder.

Jika sistem pendistribusian tenaga listrik dilakukan secara tak langsung, maka bagian pertama dari sistem pendistribusian tenaga listrik adalah Gardu Induk yang berfungsi menurunkan tegangan dari jaringan transmisi dan menyalurkan tenaga listrik melalui jaringan distribusi primer. Contoh gambar gardu induk ditunjukkan pada gambar 2.3 di bawah ini.

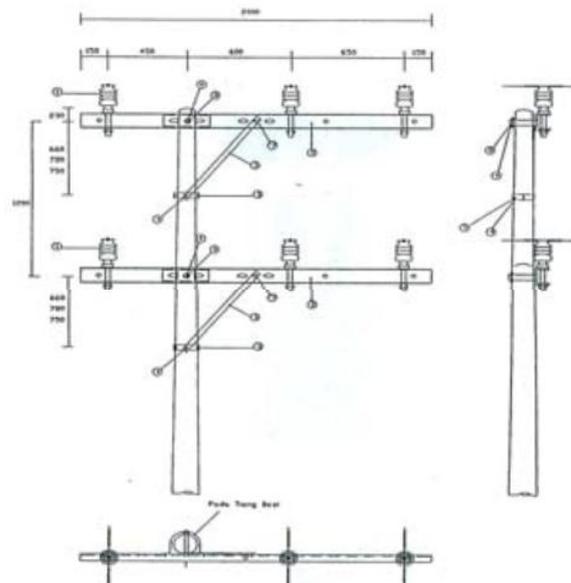


**Gambar 2.3** Gardu Induk

(Sumber: Suswanto, 2009)

b. Jaringan Distribusi Primer

Jaringan distribusi primer atau jaringan distribusi tegangan tinggi (JDTT) memiliki tegangan sistem sebesar 20 kV. Untuk wilayah kota tegangan di atas 20 kV tidak diperkenankan, mengingat pada tegangan 30 kV akan terjadi gejala-gejala korona yang dapat mengganggu frekuensi radio, TV, telekomunikasi, dan telepon. Contoh gambar jaringan distribusi primer ditunjukkan pada gambar 2.4 di bawah ini.



**Gambar 2.4** Jaringan Distribusi Primer

(Sumber: Suswanto, 2009)

Menurut Nashirul Haq (2016), pada sistem penyaluran daya listrik sistem distribusi primer dapat dibedakan menjadi 3 (tiga), yaitu:

a. Saluran Udara Tegangan menengah (SUTM) 6-20 kV

Jenis penghantar yang dipakai adalah kawat telanjang (tanpa isolasi) seperti kawat AAAC (*All Aluminium Alloy Conductor*), ASCR (*Alluminium Steel Conductor Re-inforced*), dan lain-lain. Saluran udara menggunakan kabel telanjang (tanpa isolasi) sehingga memiliki tingkat keandalan yang lebih rendah dibandingkan dengan saluran yang menggunakan kabel. Hal tersebut dikarenakan saluran udara terpengaruh terhadap cuaca. Sehingga apabila pada saluran udara terjadi gangguan yang diakibatkan oleh cuaca buruk (pohon tumbang) maka akan menyebabkan terjadinya gangguan hubung singkat yang mengakibatkan terganggunya penyaluran energi listrik atau berhentinya proses penyaluran energi listrik (padam). Contoh gambar saluran udara tegangan menengah ditujukan pada gambar 2.5 di bawah ini.



**Gambar 2.5** Saluran Udara Tegangan Menengah

(Sumber: <https://rakassably.wordpress.com/2012/03/07/jaringan-listrik-disekitar-kita>)

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

Jenis penghantar kawat yang digunakan memiliki isolasi seperti MVPTIC (*Medium Voltage Twisted Insulated Cable*) dan AAACS (kabel pembungkus *Alluminium Alloy* dengan

pembungkus lapisan PVC). Saluran kabel yang menggunakan isolasi memiliki tingkat keandalan yang lebih tinggi dibandingkan dengan saluran udara yang menggunakan kabel telanjang (tanpa isolasi). Hal tersebut dikarenakan saluran kabel tidak terpengaruh terhadap cuaca. Sehingga apabila pada saluran kabel terjadi gangguan yang diakibatkan oleh cuaca buruk (pohon tumbang), maka tidak akan menyebabkan gangguan hubung singkat, karena pada saluran kabel terdapat isolasi yang melindungi dan mencegah gangguan baik gangguan antar fasa maupun gangguan fasa ke tanah. Contoh gambar saluran kabel udara tegangan menengah ditunjukkan pada gambar 2.6 di bawah ini.



**Gambar 2.6** Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah  
(Sumber: <http://slideplayer.info/slide/11861959>)

c. Saluran Kabel Tanah Tegangan menengah (SKTM) 6-20 kV

Jenis penghantar ini adalah kabel tanam berisolasi PVC (*Poly Vinyl Chloride*). Saluran kabel tanah memiliki tingkat keandalan yang lebih tinggi dibandingkan dengan saluran udara. Hal tersebut dikarenakan saluran kabel tanah tidak terpengaruh terhadap cuaca, sehingga penyaluran energi listrik dapat berlangsung secara kontinu atau terus-menerus dan lebih baik dibandingkan saluran udara. Namun apabila terjadi gangguan, proses perbaikan dan perawatan pada saluran kabel tanah lebih sulit dilakukan dibandingkan dengan saluran udara karena

letaknya di dalam tanah. Contoh gambar saluran kabel tegangan menengah ditunjukkan pada gambar 2.7 di bawah ini.

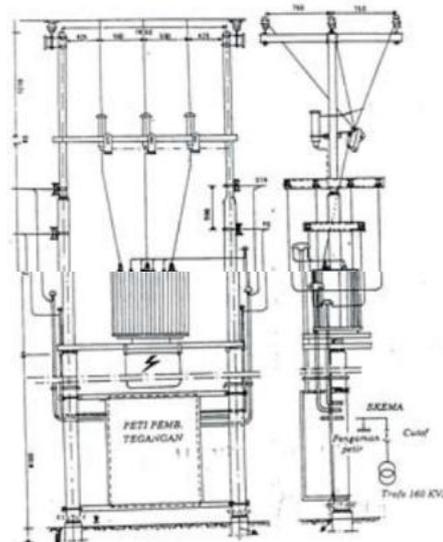


**Gambar 2.7** Saluran Kabel Tegangan Menengah

(Sumber: <https://yantekbansel.wordpress.com/2012/06/05/konfigurasi-saluran-kabel-tegangan-menengah-sktm>)

c. Gardu Pembagi/Gardu Distribusi

Berfungsi merubah tegangan listrik dari jaringan distribusi primer menjadi tegangan terpakai yang digunakan untuk konsumen dan disebut sebagai jaringan distribusi sekunder. Contoh gambar gardu distribusi jenis tiang ditunjukkan pada gambar 2.8 di bawah ini.



**Gambar 2.8** Gardu Distribusi Jenis Tiang

(Sumber: Suswanto, 2009)



SUTR adalah bagian hilir dari sistem tenaga listrik pada tegangan distribusi, yang langsung mensuplai kebutuhan listrik tegangan rendah ke konsumen. Radius operasi jaringan distribusi tegangan rendah dibatasi oleh:

- 1) Susut tegangan yang disyaratkan
- 2) Luas penghantar jaringan.
- 3) Susut tegangan yang diizinkan adalah +5% dan -10%, dengan radius pelayanan berkisar sampai 350 meter.
- 4) Distribusi pelanggan sepanjang jalur pada jaringan distribusi.
- 5) Sifat daerah pelayanan (desa, kota) dan lain-lain.

Contoh gambar saluran udara tegangan rendah ditujukan pada gambar 2.10 di bawah ini.



**Gambar 2.10** Saluran Udara Tegangan Rendah  
(Sumber: <http://hastaindonesia.com/bisnis>)

b. Saluran Kabel Tegangan Rendah (SKTR)

Transmisi SKTR memiliki fungsi yang sama dengan transmisi SUTR. Perbedaannya adalah SKTR ditanam di dalam tanah. Saluran kabel tanah memiliki tingkat keandalan yang lebih tinggi dibandingkan dengan saluran udara. Hal tersebut dikarenakan saluran kabel tanah tidak terpengaruh terhadap cuaca, sehingga penyaluran energi listrik dapat berlangsung secara kontinyu atau terus-menerus dan lebih baik dibandingkan saluran udara. Namun apabila terjadi gangguan, proses perbaikan

dan perawatan pada saluran kabel tanah lebih sulit dilakukan dibandingkan dengan saluran udara karena letaknya di dalam tanah. Contoh gambar saluran kabel tegangan rendah ditunjukkan pada gambar 2.11 di bawah ini.



**Gambar 2.11** Saluran Kabel Tegangan Rendah

(Sumber: <http://market.bisnis.com/read/20170523/192/656307/ekspansi-pabrik-kbli-benamkan-dana-rp112-miliar>)

### 2.2.2.3 Klasifikasi Jaringan Distribusi

Menurut Baskara (2017), suatu jaringan distribusi dapat diklasifikasikan menjadi beberapa macam antara lain:

#### 1. Berdasarkan Sistem Penyaluran

Berdasarkan sistem penyalurannya, jaringan distribusi dapat dibedakan menjadi 2 (dua) macam, yaitu:

##### a. Saluran Udara (*overhead lines*)

Saluran udara merupakan sistem tenaga listrik melalui kawat penghantar yang ditopang pada tiang listrik. Keuntungan dari saluran udara yaitu:

- 1) Lebih fleksibel dan leluasa dalam upaya untuk perluasan beban.
- 2) Dapat digunakan untuk penyaluran tenaga listrik pada tegangan di atas 66 kV.
- 3) Lebih mudah dalam pemasangannya.
- 4) Bila terjadi gangguan hubung singkat, mudah diatasi dan dideteksi.

Sedangkan kerugian dari saluran udara yaitu:

- 1) Mudah terpengaruh oleh cuaca buruk, bahaya petir, badai, tetimpa pohon, dan sebagainya.
- 2) Untuk wilayah yang penuh dengan bangunan yang tinggi, sukar untuk menempatkan saluran.
- 3) Masalah induktansi dan kapasitansi yang terjadi akan mengakibatkan drop tegangan lebih tinggi.
- 4) Biaya pemeliharaan lebih mahal, karena perlu jadwal pengecatan dan penggantian material listrik bila terjadi kerusakan.

b. Saluran Bawah Tanah (*underground cable*)

Saluran bawah tanah merupakan sistem penyaluran tenaga listrik melalui kabel-kabel yang ditanamkan di dalam tanah. Keuntungan dari saluran bawah tanah yaitu:

- 1) Tidak terpengaruh oleh cuaca buruk, bahaya petir, tertimpa pohon, dan sebagainya.
- 2) Tidak mengganggu pandangan bila adanya bangunan yang tinggi.
- 3) Dari segi keindahan, saluran bawah tanah lebih sempurna dan indah dipandang.
- 4) Mempunyai batas umur pakai dua kali lipat dari saluran udara.
- 5) Biaya pemeliharaan lebih murah karena tidak perlu adanya pengecatan.
- 6) Drop tegangan lebih rendah karena masalah induktansi bisa diabaikan.

Sedangkan kerugian dari saluran bawah tanah yaitu:

- 1) Biaya investasi pembangunan lebih mahal dibandingkan dengan saluran udara.

- 2) Saat terjadi hubung singkat, usaha pencarian titik gangguan lebih sulit.
- 3) Tidak dapat menghindari bila terjadi banjir, desakan akar pohon dan ketidakstabilan tanah.
- 4) Perlu pertimbangan-pertimbangan teknis yang lebih mendalam di dalam perencanaan, khususnya untuk kondisi tanah yang dilalui.

#### **2.2.2.4 Persyaratan Sistem Distribusi Tenaga Listrik**

Menurut Suswanto (2009), dalam usaha meningkatkan kualitas, keterandalan, dan pelayanan tenaga listrik ke konsumen, maka diperlukan persyaratan sistem distribusi tenaga listrik yang memenuhi alasan-alasan teknis, ekonomis, dan sosial sehingga dapat memenuhi standar kualitas dari sistem pendistribusian tenaga listrik tersebut.

Adapun syarat-syarat sistem distribusi tenaga listrik tersebut adalah:

1. Faktor Keterandalan Sistem
  - a. Kontinuitas penyaluran tenaga listrik ke konsumen harus terjamin selama 24 jam terus-menerus. Persyaratan ini cukup berat, selain harus tersedianya tenaga listrik pada Pusat Pembangkit Tenaga Listrik dengan jumlah yang cukup besar, juga kualitas sistem distribusi tenaga listrik harus dapat diandalkan, karena digunakan secara terus-menerus. Untuk hal tersebut diperlukan beberapa cadangan, yaitu cadangan siap, cadangan panas, dan cadangan diam.
    - 1) Cadangan siap yaitu suatu cadangan yang didapat dari suatu pembangkit yang tidak dibebani secara penuh dan dioperasikan sinkron dengan pembangkit lain guna menanggulangi kekurangan daya listrik.
    - 2) Cadangan panas adalah cadangan yang disesuaikan dari pusat pembangkit tenaga termis dengan ketel-ketel yang

selalu dipanasi atau dari PLTA yang memiliki kapasitas air yang setiap saat mampu untuk menggerakannya.

- 3) Cadangan diam adalah cadangan dari pusat-pusat pembangkit tenaga listrik yang tidak dioperasikan tetapi disediakan untuk setiap saat guna menanggulangi kekurangan daya listrik.
    - b. Setiap gangguan yang terjadi dengan mudah dilacak dan diisolir sehingga pemadaman tidak perlu terjadi. Untuk itu diperlukan alat-alat pengaman dan alat pemutus tegangan (*air break switch*) pada setiap wilayah beban.
    - c. Sistem proteksi dan pengaman jaringan harus tetap dapat bekerja dengan baik dan cepat.
2. Faktor Kualitas Sistem
- a. Kualitas tegangan listrik yang sampai ke titik beban harus memenuhi persyaratan minimal untuk setiap kondisi dan sifat-sifat beban. Oleh karena itu diperlukan stabilitas tegangan (*voltage regulator*) yang bekerja secara otomatis untuk menjamin kualitas tegangan sampai ke konsumen stabil.
  - b. Tegangan jatuh atau tegangan drop dibatasi pada harga 10% dari tegangan nominal sistem untuk setiap wilayah beban. Untuk itu untuk daerah beban yang terlalu padat diberikan beberapa *voltage regulator* untuk menstabilkan tegangan.
  - c. Kualitas peralatan listrik yang terpasang pada jaringan dapat menahan tegangan lebih (*over voltage*) dalam waktu singkat.
3. Faktor Keselamatan Sistem dan Publik
- a. Keselamatan penduduk dengan adanya jaringan tenaga listrik harus terjamin dengan baik. Artinya, untuk daerah padat penduduknya diperlukan rambu-rambu pengaman dan peringatan agar penduduk dapat mengetahui bahaya listrik. Selain itu untuk daerah yang sering mengalami gangguan perlu dipasang alat

pengaman untuk dapat meredam gangguan tersebut secara cepat dan terpadu.

- b. Keselamatan alat dan perlengkapan jaringan yang dipakai hendaknya memiliki kualitas yang baik dan dapat meredam secara cepat bila terjadi gangguan pada sistem jaringan. Untuk itu diperlukan jadwal pengontrolan alat dan perlengkapan jaringan secara terjadwal dengan baik dan berkesinambungan.

#### 4. Faktor Pemeliharaan Sistem

- a. Kontinuitas pemeliharaan sistem perlu dijadwalkan secara berkesinambungan sesuai dengan perencanaan awal yang telah ditetapkan agar kualitas sistem tetap terjaga dengan baik.
- b. Pengadaan material listrik yang dibutuhkan hendaknya sesuai dengan jenis/spesifikasi yang dipakai, sehingga bisa dihasilkan kualitas sistem yang lebih baik dan murah.

#### 5. Faktor Perencanaan Sistem

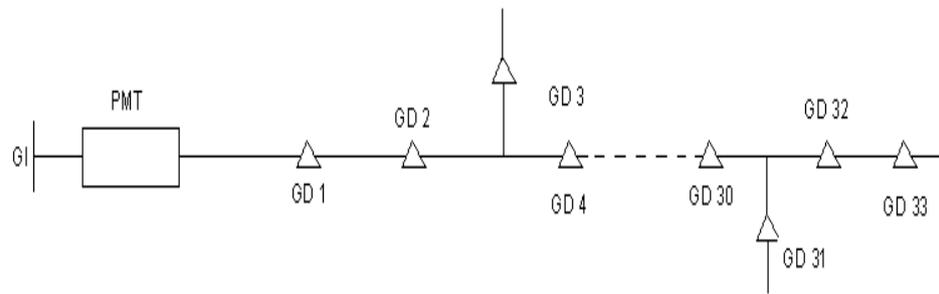
Perancangan jaringan distribusi harus dirancang semaksimal mungkin, untuk perkembangan dikemudian hari.

### **2.2.2.5 Konfigurasi Jaringan Distribusi**

Berdasarkan konfigurasi jaringan, sistem jaringan distribusi dapat dikelompokkan menjadi 3 (tiga) macam, yaitu:

#### 1. Sistem Jaringan Distribusi Radial

Sistem radial memiliki bentuk yang paling sederhana dari semua jenis sistem jaringan distribusi. Sistem ini penyalurannya secara radial dari sumber tenaga listrik sampai ke titik beban atau ke pelanggan memiliki probabilitas terjadinya pemadaman sangat besar, terutama untuk mensuplai daerah beban yang mempunyai kerapatan beban (*load density*) yang rendah atau yang medium (sedang), karena secara susunan peralatan memungkinkan pemadaman pada salah satu peralatan berimbas kepada peralatan yang lain. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.12 berikut ini.



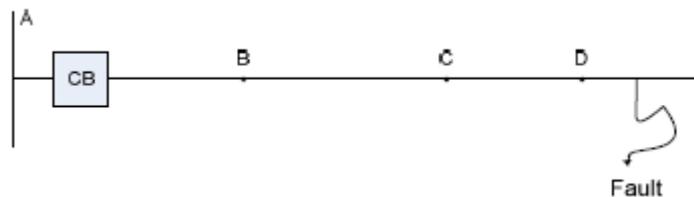
**Gambar 2.12** Sistem Jaringan Distribusi Radial

(Sumber: Syahputra, 2016)

Bila ditinjau dari segi keandalannya, dapat dibedakan atas dua keadaan, yaitu:

- a. Sistem radial tanpa *reclosing* dan *sectionalizing* secara otomatis

Sistem radial tanpa *reclosing* dan *sectionalizing* memiliki kontinuitas dan keandalan yang kurang baik, yakni bila terjadi gangguan baik di titik B, C dan D atau sepanjang *feeder*, walaupun gangguan tersebut sifatnya permanen atau temporer dapat menyebabkan pemadaman (*outage*) terhadap seluruh beban yang disuplai oleh *feeder* tersebut.



**Gambar 2.13** Sistem radial tanpa *recloser* dan *sectionalizer*

(Sumber: Perdana, 2009)

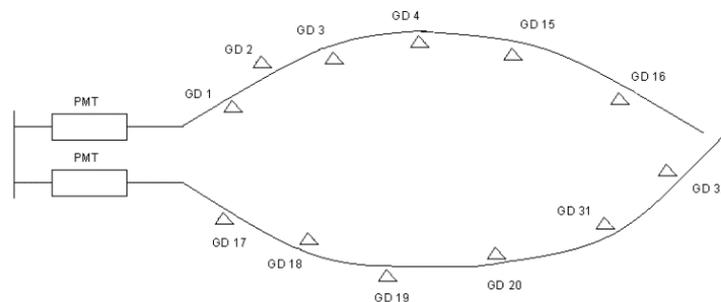
- b. Sistem radial dengan menggunakan sistem *reclosing* dan *sectionalizing* secara otomatis

Sistem radial yang menggunakan *recloser* dan *sectionalizing* memiliki kontinuitas dan keandalan yang cukup tinggi, yakni bila terjadi gangguan pada bagian *feeder* misalnya terjadi di ujung saluran, maka pemadaman total tidak akan terjadi, melainkan sebagian saja. Hal tersebut karena bagian *feeder* yang

mengalami gangguan akan dilepas oleh sectionalizer yang terdekat dengan gangguan.

### 3. Sistem jaringan distribusi Loop/Ring

Jaringan ini merupakan bentuk tertutup, disebut juga bentuk jaringan ring. Susunan rangkaian saluran membentuk ring, seperti terlihat pada gambar 2.14 yang memungkinkan titik beban terlayani dari dua arah saluran, sehingga kontinuitas pelayanan lebih terjamin serta kualitas dayanya menjadi lebih baik, karena drop tegangan dan rugi daya saluran menjadi lebih kecil. Contoh gambar sistem jaringan distribusi loop ditunjukkan pada gambar 2.14 di bawah ini.



**Gambar 2.14** Sistem Jaringan Distribusi Loop

(Sumber: Syahputra, 2016)

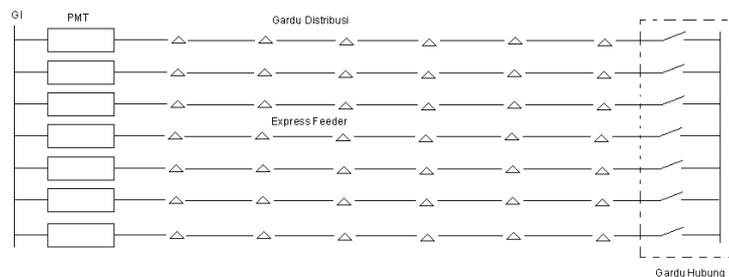
Bentuk dari sistem jaringan distribusi loop ini ada 2 (dua) macam, yaitu:

- a. Bentuk *open loop*, bila dilengkapi dengan *normally open switch* yang terletak pada salah satu bagian gardu distribusi, dalam keadaan normal rangkaian selalu terbuka.
- b. Bentuk *close loop*, bila dilengkapi dengan *normally close switch* yang terletak pada salah satu bagian diantaranya gardu distribusi, dalam keadaan normal rangkaian selalu tertutup.

### 2. Sistem Jaringan Distribusi Spindel

Ciri khas sistem jaringan distribusi ini adalah memanfaatkan peralatan gardu induk dan gardu hubung serta satu penyulang khusus yang tidak terbebani sebagai penyulang cadangan yang disebut

penyulang ekspres. Gardu induk merupakan sumber daya, dan gardu hubung merupakan tempat hubungan ujung-ujung *feeder* penyaluran daya ke beban-beban yang bersumber pada gardu induk. Jaringan spindel ini dikembangkan untuk melayani beban-beban industrial yang memiliki nilai keandalan yang baik dan pelanggan potensial ekonomi yang tinggi. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.15 di bawah ini.

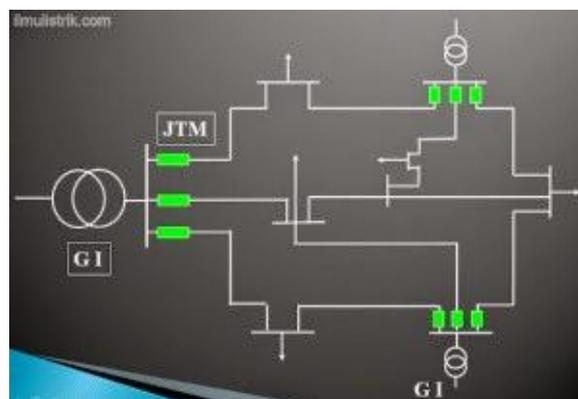


**Gambar 2.15** Sistem Jaringan Distribusi Spindel

(Sumber: Syahputra, 2016)

#### 4. Sistem Jaringan Distribusi Gugus/Mesh

Sistem jaringan distribusi mesh merupakan sistem jaringan yang konfigurasiya memiliki banyak pilihan saluran dan sumber. Akibatnya titik beban disuplai oleh banyak saluran penyulang dan sumber yang berbeda, sehingga sistem ini memiliki kontinuitas penyaluran tenaga listrik paling andal, akan tetapi memerlukan biaya investasi yang besar. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.16 di bawah ini.



**Gambar 2.16** sistem jaringan distribusi mesh

(Sumber: <http://tentanglistrikkita.blogspot.co.id/2014/05/sistem-tenaga-listrik-distribusi.html>)

### 2.2.3 Gardu Induk

Menurut Nashirul Haq (2016), gardu induk di sebut juga gardu unit pusat beban yang merupakan gabungan dari transformer dan rangkaian *switchgear* yang tergabung dalam satu kesatuan melalui sistem kontrol yang saling mendukung untuk keperluan operasional. Gardu Induk juga merupakan sub sistem dari sistem penyaluran (transmisi) tenaga listrik, atau merupakan satu kesatuan dari sistem penyaluran (transmisi). Sebagai sub sistem dari sistem penyaluran (transmisi), gardu induk mempunyai peranan penting, dalam pengoperasiannya tidak dapat dipisahkan dari sistem penyaluran (transmisi) secara keseluruhan. Pengaturan daya ke gardu-gardu induk lainnya melalui tegangan tinggi dan gardu-gardu induk distribusi melalui *feeder* tegangan menengah. Berikut adalah beberapa fungsi utama dari gardu induk:

1. Untuk mengatur aliran daya listrik dari saluran transmisi ke saluran transmisi lainnya yang kemudian didistribusikan ke konsumen.
2. Sebagai tempat kontrol.
3. Sebagai pengaman operasi sistem.
4. Sebagai tempat untuk menurunkan tegangan transmisi menjadi tegangan distribusi

Menurut Suropto (2014), gardu induk merupakan bagian dari sistem tenaga listrik berupa sejumlah peralatan pemutus/penghubung aliran arus dan trafo penaik/penurun tegangan yang dipasang di antara dua komponen sistem tenaga listrik lainnya. Gardu induk berfungsi untuk memutus/menghubungkan aliran arus listrik dan menyesuaikan level tegangan sistem-sistem yang dihubungkan.

Secara garis besar gardu induk pada sistem tenaga listrik dapat dibedakan berdasarkan penggunaannya, yaitu gardu induk pembangkit dan gardu induk distribusi.

1. Gardu induk pembangkit yaitu gardu induk yang dipasang pada unit pembangkit yang berfungsi menaikkan tegangan dari level tegangan pembangkit ke level tegangan saluran transmisi.
2. Gardu induk distribusi yaitu gardu induk yang dipasang pada ujung penerimaan saluran transmisi yang berfungsi untuk menurunkan

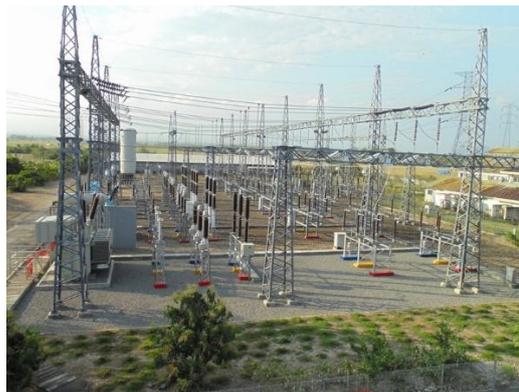
tegangan dari level tegangan saluran transmisi pembangkit ke level tegangan jaringan distribusi.

### 2.2.3.1 Klasifikasi Gardu Induk

Menurut Suripto (2014), klasifikasi gardu induk dapat dibedakan menjadi 5 (lima) antara lain:

1. Gardu induk pasangan luar

Gardu induk pasangan luar biaya pembangunannya relatif lebih murah, karena sebagian besar peralatan diletakkan di luar bangunan gedung, sehingga tidak diperlukan bangunan gedung yang dapat mengcover seluruh peralatan gardu induk. Lahan harus cukup luas agar jarak antara peralatan memenuhi syarat umum, karena biasanya menggunakan konduktor telanjang. Gardu induk jenis ini lebih baik di luar kota yang mana hargalahan masih relatif rendah. Contoh gambar gardu induk pasangan luar ditunjukkan pada gambar 2.17 di bawah ini.



**Gambar 2.17** Gardu Induk Pasangan Luar

(Sumber: <https://scadaku.wordpress.com/2013/11/30/gardu-induk>)

2. Gardu induk pasangan dalam

Gardu induk pasangan dalam biaya pembangunannya lebih mahal, karena memerlukan bangunan gedung yang dapat meliputi seluruh peralatan. Untuk memperkecil jarak antar konduktor, maka memerlukan konduktor yang berisolasi yang harganya relatif lebih mahal. Gardu induk jenis ini biasanya berkapasitas relatif kecil dan lebih cocok untuk

daerah perkotaan yang padat hunian. Gardu induk jenis ini juga mempunyai keuntungan lebih aman terhadap gangguan cuaca dan nampak lebih rapi dibandingkan dengan gardu induk jenis pemasangan luar. Contoh gambar gardu induk pemasangan dalam ditunjukkan pada gambar 2.18 di bawah ini.



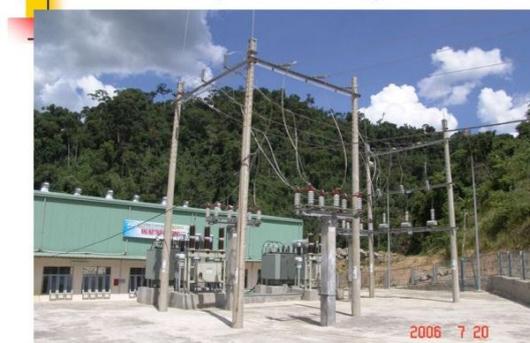
**Gambar 2.18** Gardu Induk Pemasangan Luar

(Sumber: <http://engineering4read.blogspot.co.id/2016/03/implementasi-sederhana-proyek-gardu.html>)

### 3. Gardu induk semi pemasangan luar

Gardu induk semi pemasangan luar dalam proses pembangunannya dengan mempertimbangkan di antara 2 jenis gardu induk sebelumnya, yakni gardu induk pemasangan dalam dan gardu induk pemasangan luar. Contoh gambar gardu induk semi pemasangan luar ditunjukkan pada gambar 2.19 di bawah ini.

#### GI Setengah Pemasangan Luar



**Gambar 2.19** Gardu Induk Setengah Pemasangan Luar

(Sumber: <http://slideplayer.info/slide/525365>)

#### 4. Gardu induk pasangan bawah tanah

Gardu induk pasangan bawah tanah biaya pembangunannya lebih mahal lagi, karena diperlukan bangunan bawah tanah yang harus kedap air. Gardu induk jenis ini biasanya kapasitas yang relatif kecil dan tidak mengganggu pemandangan dan hanya dipasang pada daerah yang sangat padat, sehingga kesulitan untuk mendapatkan lahan.

#### 5. Gardu induk mobil

Gardu induk mobil hanya dipakai untuk kepentingan khusus, misalnya untuk acara-acara tertentu atau untuk kepentingan menggantikan sementara gardu induk yang masih dalam perbaikan.

Menurut Nashirul Haq (2016), berdasarkan tegangannya, gardu induk dapat dibedakan menjadi 2 (dua) macam, yaitu:

1. Gardu induk transmisi yaitu gardu induk yang mendapat daya dari saluran transmisi untuk kemudian menyalurkannya ke daerah beban (industri, kota, dan sebagainya). Gardu induk transmisi yang ada di PLN adalah tegangan tinggi 150 kV dan tegangan tinggi 70 kV.
2. Gardu induk distribusi yaitu gardu induk yang menerima tenaga dari gardu induk transmisi dengan menurunkan tegangannya melalui transformator tenaga menjadi tegangan menengah (20 kV, 12 kV, atau 6 kV) untuk kemudian tegangan tersebut diturunkan kembali menjadi tegangan rendah (127/220 V) atau (220/380 V) sesuai dengan kebutuhan.

#### **2.2.4 Gangguan**

Menurut Hardianto (2017), gangguan adalah penghalang dari suatu sistem yang sedang beroperasi atau suatu keadaan dari sistem penyaluran tenaga listrik yang menyimpang dari kondisi normal. Suatu gangguan di dalam peralatan listrik didefinisikan sebagai terjadinya suatu kerusakan di dalam jaringan listrik yang menyebabkan aliran arus listrik keluar dari saluran yang seharusnya.

Menurut Baskara (2017), pada dasarnya gangguan yang sering terjadi pada sistem distribusi dapat digolongkan menjadi dua macam, yaitu gangguan dari dalam sistem dan gangguan dari luar sistem.

1. Gangguan dari dalam sistem
  - a. Kegagalan dari fungsi peralatan jaringan
  - b. Kerusakan dari peralatan jaringan
  - c. Kerusakan dari peralatan pemutus beban
  - d. Kerusakan dari alat pendeteksi
2. Gangguan dari luar sistem
  - a. Sentuhan daun/pohon pada penghantar yang mengenai pohon
  - b. Manusia
  - c. Sambaran petir
  - d. Cuaca
  - e. Binatang

#### **2.2.4.1 Klasifikasi Gangguan Pada Jaringan Distribusi**

Menurut Baskara (2017), klasifikasi gangguan yang terjadi pada jaringan distribusi dapat dibedakan menjadi beberapa macam, yaitu:

1. Berdasarkan Jenis Gangguannya
  - a. Gangguan dua fasa atau tiga fasa melalui hubungan tanah
  - b. Gangguan fasa ke fasa
  - c. Gangguan dua fasa ke tanah
  - d. Gangguan satu fasa ke tanah atau gangguan tanah.
2. Berdasarkan Lama Gangguannya
  - a. Gangguan permanen

Gangguan yang bersifat temporer ini apabila terjadi gangguan, maka gangguan tersebut tidak akan lama dan dapat normal kembali. Gangguan ini dapat hilang dengan sendirinya atau dengan memutus sesaat bagian yang terganggu dari sumber tegangannya. Kemudian disusul dengan penutupan kembali peralatan hubungannya. Apabila ganggguan temporer sering terjadi

dapat menimbulkan kerusakan pada peralatan dan akhirnya menimbulkan gangguan yang bersifat permanen.

b. Gangguan temporer

Gangguan permanen tidak akan dapat hilang sebelum penyebab gangguan dihilangkan terlebih dahulu. Gangguan yang bersifat permanen dapat disebabkan oleh kerusakan peralatan, sehingga gangguan ini baru hilang setelah kerusakan ini diperbaiki atau karena ada sesuatu yang mengganggu secara permanen. Untuk membebaskannya diperlukan tindakan perbaikan atau menyingkirkan penyebab gangguan tersebut. Terjadinya gangguan ditandai dengan jatuhnya pemutus tenaga, untuk mengatasinya operator memasukkan tenaga secara manual. Contoh gangguan ini yaitu adanya kawat yang putus, terjadinya gangguan hubung singkat, dahan pohon yang menimpa kawat fasa dari saluran udara dan akibat binatang seperti burung dan kelelawar.

#### **2.2.4.2 Gangguan Dalam Jaringan Distribusi**

Menurut Marsudi (2016), jaringan distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang paling dekat dengan pelanggan. Ditinjau dari volume fisiknya, jaringan distribusi pada umumnya lebih panjang dibandingkan dengan jaringan transmisi dan jumlah gangguannya dalam kali per 100 km per tahun juga paling tinggi dibandingkan jumlah gangguan pada saluran transmisi. Jaringan distribusi terdiri dari jaringan tegangan menengah (JTM) dan jaringan tegangan rendah (JTR).

Kabel tanah yang digunakan pada JTM gangguannya jauh lebih sedikit dibandingkan SUTM tetapi harga kabel tanah jauh lebih mahal dari pada SUTM. Gangguan kabel tanah umumnya disebabkan oleh sebab-sebab sebagai berikut:

1. Terkena cangkul atau alat gali lainnya.
2. Terdesak oleh akar pohon.

3. Pergerakan tanah misalnya karena tanah tidak stabil atau mendapat tekanan mekanis.
4. Pemasangan yang kurang hat-hati sehingga ada bagian kabel yang retak dan kemasukan air.
5. Penyambungan bagian-bagian kabel yang kurang sempurna sehingga ada kontak yang lepas atau kendur.

Gangguan pada SUTR relatif banyak dan penyebabnya yang utama adalah pohon. Sentuhan pohon pada konduktor SUTR dapat menimbulkan gangguan satu fasa, dua fasa maupun tiga fasa ke tanah. Kalau penarikan konduktor fasa dari SUTR kurang tegang, sehingga konduktor SUTR mudah mengayun, maka sentuhan dahan pohon yang disertai angin dapat menimbulkan gangguan antar fasa.

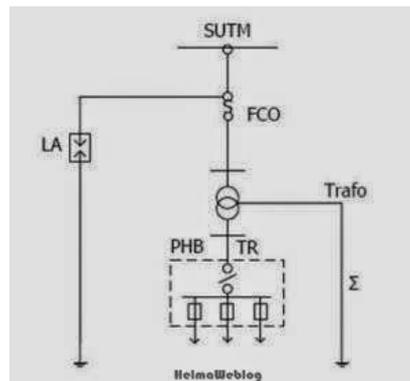
Gangguan fasa ke tanah dan gangguan antar fasa kadang-kadang tidak menyebabkan sekering lebur SUTR bekerja (putus). Hal ini disebabkan karena arus hubung singkat yang terjadi tidak cukup besar untuk dapat memutus penyediaan daya sehingga tidak terasa adanya gangguan, tetapi timbul bahaya karena pohon yang menyentuh konduktor SUTR dapat menjadi bertegangan terutama apabila keadaannya basah misalnya pada waktu hujan. Sebaliknya apabila keadaannya kering, loncatan api (busur listrik) yang timbul dapat membakar pohon tersebut.

#### **2.2.4.3 Gangguan Dalam Gardu Induk**

Menurut Marsudi (2016), gangguan dalam gardu induk merupakan gangguan yang terjadi khususnya yang men-trip PMT Transformer utama dalam GI atau yang menimbulkan gangguan besar dalam GI. Gangguan tersebut di atas umumnya adalah:

1. Gangguan di luar GI seperti di SUTT atau di jaringan distribusi yang ikut trip PMT Transformer sebagai akibat kurang selektifnya kerja rele karena ada kegagalan pada sistem pengaman dari SUTT atau dari jaringan distribusi yang terganggu.

2. Gangguan pada rel tegangan tinggi maupun tegang rel tegangan menengah yang umumnya disebabkan karena adanya binatang yang menimbulkan hubung singkat di rel. gangguan pada rel terutama pada rel tegangan tinggi akan menyebabkan jatuhnya semua saluran transmisi yang mengirim daya rel yang terganggu sehingga akibat gangguan tersebut akan terasa luas.
3. Gangguan pada Transformator dalam GI, hal ini biasanya disebabkan karena ada kerusakan pada transformator, seperti kerusakan *bushing*, kerusakan kontak-kontak *tap changer* atau ada kumparan yang terbakar. Juga bisa disebabkan karena radiator minyak dari transformator telah kotor sehingga pendinginnya kurang sempurna dan menyebabkan rele suhu bekerja menjatuhkan PMT Transformer dalam keadaan beban yang belum jenuh. Ada kalanya gangguan semacam ini disebabkan karena motor kipas pendingin transformator mengalami kerusakan.
4. Gangguan karena petir yang tidak berhasil di *discharge* oleh *lightning arrester* dengan baik sehingga merusak peralatan dalam GI seperti transformator utama, transformator arus atau *lightning arrester* itu sendiri.
5. Gangguan dalam sirkit kontrol yang mengakibatkan jatuhnya salah satu PMT GI. Gangguan semacam ini biasanya disebabkan karena ada kesalahan yang dilakukan petugas rele pada waktu melakukan pengecekan rutin rele dalam GI.
6. Gangguan karen mal *operation* dan rele, khususnya rele differensial dari transformator. Hal ini sering terjadi pada GI baru atau jika ada penambahan transformator baru dalam GI. Sebabnya adalah karena rele differensial masih terlalu peka penyetelannya sehingga memerlukan penyetelan kembali. Contoh gambar instalasi gardu induk ditunjukkan pada gambar 2.20 di bawah ini



**Gambar 2.20** Gambar Instalasi Gardu Induk

(Sumber: <http://seputarbanjarpatroman.blogspot.co.id/2014/07/spesifikasi-gardu-distribusi-tipe-portal.html>)

#### 2.2.4.4 Perhitungan Gangguan

Perhitungan gangguan terdiri dari penentuan besarnya arus yang mengalir di berbagai lokasi pada suatu sistem untuk bermacam-macam jenis gangguan. Data yang diperoleh dari perhitungan ini digunakan juga untuk menentukan penyetelan (*setting*) rele (*relay*) yang mengatur pemutus rangkaian (William, 1983).

#### 2.2.5 Peralatan Proteksi Jaringan Distribusi

Mengingat jaringan distribusi merupakan suatu sistem yang sangat penting untuk dapat mendistribusikan tenaga listrik ke konsumen, maka pada jaringan distribusi perlu adanya peralatan proteksi. Peralatan proteksi tersebut adalah sebagai berikut:

1. Rele proteksi

Rele adalah suatu peralatan yang digunakan untuk mengontrol suatu rangkaian listrik secara tidak langsung dengan memakai perubahan yang terjadi pada rangkaian tersebut atau rangkaian lain.

Rele proteksi adalah suatu rele yang dipakai untuk memperoleh penghubungan atau pemutusan secara otomatis suatu peralatan atau bagian sistem listrik dari sumber daya pada suatu kondisi tertentu yang dapat menyebabkan kerusakan atau bahaya pada peralatan atau sistem tersebut.

## 2. Pemutus Daya (PMT)

Pemutus daya dipasang pada saluran utama pada gardu induk sebagai pengaman utama jaringan dan dilengkapi dengan alat pengaman rele arus lebih, rele gangguan tanah dan rele penutup balik.

## 3. Pemisah (PMS)/*Disconnecting Switch (DS)*

Pemisah (PMS)/*Disconnecting Switch (DS)* adalah suatu saklar yang berfungsi untuk memisahkan atau menghubungkan suatu jaringan pada saat tidak berbeban (tidak dialiri arus). Pada umumnya alat ini akan difungsikan pada saat diadakan pemeliharaan rutin yang dilakukan oleh PLN.

## 4. *Load Break Switch (LBS)*

Saklar pemutus beban (LBS) merupakan saklar pemutus arus tiga fasa untuk penempatan di luar ruas pada tiang pancang, yang dikendalikan secara manual maupun secara otomatis. LBS berfungsi sebagai peralatan hubung yang bekerja membuka dan menutup rangkaian arus listrik, mempunyai kemampuan pemutus arus beban. Selain itu LBS juga berfungsi sebagai pemutus lokal atau penghubung instalasi listrik 20 kV pada saat dilakukan perawatan jaringan distribusi pada daerah tertentu sehingga tidak mengganggu daerah lain yang masih beroperasi.

## 5. Penutup Balik Otomatis (PBO) *Recloser*

PBO *Recloser (Automatic Circuit Recloser)* adalah suatu peralatan yang bekerja secara otomatis untuk dapat mengamankan sistem dari gangguan hubung singkat. *Recloser* terdiri dari bagian-bagian yang dapat merasakan arus lebih, mengatur kelambatan waktu, memutuskan arus gangguan serta menutup kembali secara otomatis guna mengisi kembali (*reenergize*) jaringan.

Cara kerja dari *recloser* adalah sebagai berikut:

- a. Ketika terjadi sebuah gangguan, maka arus yang mengalir melalui *recloser* akan membuka kontak pada *recloser*.

- b. Kontak pada *recloser* akan menutup kembali setelah beberapa detik sesuai setting yang ditentukan. Tujuan dari memberikan selang waktu adalah memberi kesempatan agar gangguan tersebut hilang dari sistem, terutama gangguan yang bersifat temporer.
- c. Apabila yang terjadi adalah gangguan permanen, maka *recloser* akan membuka dan balik sesuai setting yang ditentukan dan kemudian *lock out*.
- d. Setelah gangguan dibebaskan dan diperbaiki oleh petugas, baru dapat dikembalikan pada keadaan normal.

#### 6. Sakelar Seksi Otomatis (SSO) *Sectionalizer*

SSO adalah suatu saklar yang bekerja secara otomatis berdasarkan waktu dan perhitungan arus gangguan yang mengalir pada jaringan. Alat ini berfungsi sebagai pemisah (pembagi) jaringan distribusi. Dalam sistem pengoperasiannya alat ini dilengkapi dengan pendeteksi arus gangguan.

#### 7. *Lightning Arrester*

*Lightning arrester* adalah suatu alat pengaman yang melindungi jaringan dan peralatannya terhadap tegangan lebih abnormal yang terjadi karena sambaran petir (*flash over*) dan karena surja hubung (*switching surge*) di suatu jaringan. Cara kerja *lightning arrester* adalah pada saat keadaan normal, *lightning arrester* berlaku sebagai isolator, bila timbul tegangan surja dan sambaran petir alat ini bersifat sebagai konduktor yang tahanannya relatif rendah, sehingga dapat mengalirkan arus yang tinggi ke tanah. Kemudian setelah sambaran petir dan hubung surja hilang, *lightning arrester* harus dapat dengan cepat kembali menjadi isolator.

#### 8. Sekering (*Fuse Cut Off*)

*fuse cut off* adalah suatu alat pengaman yang melindungi jaringan terhadap arus beban lebih (*over load current*) yang mengalir melebihi dari batas maksimum, yang disebabkan karena hubung singkat (*short circuit*) atau beban lebih (*over load*).

### 2.2.6 Keandalan Sistem Distribusi

Menurut Nashirul Haq (2016), keandalan merupakan tingkat keberhasilan kinerja suatu sistem atau bagian dari sistem, untuk dapat memberikan hasil yang lebih baik pada periode waktu dan dalam kondisi operasi tertentu. Untuk dapat menentukan tingkat keandalan dari suatu sistem, harus diadakan pemeriksaan dengan cara melalui perhitungan maupun analisis terhadap tingkat keberhasilan kinerja atau operasi dari sistem yang ditinjau, pada periode tertentu kemudian membandingkannya dengan standar yang ditetapkan sebelumnya. Untuk mengetahui keandalan dari suatu distribusi diantaranya dapat dilakukan dengan menghitung rata-rata durasi frekuensi gangguan (*interruptions*) yang sering terjadi pada beban (*customer*) atau sering disebut dengan perhitungan SAIDI – SAIFI.

Sistem distribusi tentunya mempunyai nilai keandalan tertentu dan dapat diperoleh dengan menghitung indeks keandalannya. Tingkatan keandalan suatu sistem dapat ditentukan dengan menghitung SAIFI dan SAIDI. Menurut IEEE std 1366-2000, SAIFI adalah menyatakan karakteristik banyak gangguan, sedangkan SAIDI menyatakan karakteristik lama gangguan yang diukur selama periode tertentu (per tahun) (Pulungan, 2012).

### 2.2.7 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Indeks Keandalan Jaringan Distribusi

Menurut Nurdiana (2017), faktor-faktor yang mempengaruhi indeks keandalan dalam suatu sistem distribusi sesuai standar IEEE P1366 antara lain:

1. Pemadaman/*Interruption of Supply*

Terhentinya pelayanan pada satu atau lebih konsumen, akibat dari salah satu atau lebih komponen mendapat gangguan.

2. Keluar/*Outage*

Keadaan dimana suatu komponen tidak dapat berfungsi sebagaimana mestinya, diakibatkan karena beberapa peristiwa yang berhubungan dengan komponen tersebut. Suatu *outage* dapat atau tidak

dapat menyebabkan pemadaman, hal ini masih tergantung pada konfigurasi sistem.

3. Lama keluar/*Outage Duration*

Periode dari saat permulaan komponen mengalami *outage* sampai saat dapat dioperasikan kembali sesuai dengan fungsinya.

4. Lama pemadaman/*Interruption Duration*

Waktu dari saat permulaan terjadinya pemadaman sampai saat menyala kembali. Jumlah total konsumen dari saat permulaan/*Total Number of Costumer Served*. Jumlah total konsumen yang terlayani sesuai dengan periode laporan terakhir.

5. Periode laporan

Periode laporan diasumsikan sebagai satu tahun.

Menurut Perdana (2009), faktor-faktor yang mempengaruhi tingkat keandalan jaringan distribusi adalah:

1. Adanya gangguan pada jaringan

Dalam keadaan demikian diusahakan pengaturan dan pengoperasian jaringan yang tepat sehingga daerah yang padam sekecil mungkin.

2. Kecepatan memperbaiki gangguan dan melakukan pengalihan (maneuver/manipulasi) beban.

Bila terjadi gangguan hendaknya secepat mungkin dikirim petugas ke lapangan untuk mengisolir gangguan dan mengadakan manuver jaringan, sehingga daerah-daerah yang padam sekecil mungkin, kemudian dicari letak gangguan untuk segera diperbaiki.

Selain itu, terdapat beberapa hal yang berpengaruh terhadap keandalan sistem distribusi tenaga listrik antara lain:

1. Konfigurasi jaringan

Tingkat keandalan yang tinggi diperoleh dengan pemilihan jaringan dengan tingkat kontinuitas/kelangsungan pelayanan yang tinggi

yakni lama pemutusan beban yang rendah dan jumlah/frekuensi pemutusan beban karena gangguan yang rendah pula. Konfigurasi jaringan yang memiliki tingkat kandalan paling tinggi adalah konfigurasi mesh sedangkan yang memiliki tingkat keandalan paling rendah adalah konfigurasi radial. Hal tersebut dikarenakan jenis konfigurasi mesh terdiri dari beberapa *feeder* sehingga apabila pada salah satu *feeder* terjadi gangguan maka secara langsung akan disuplai oleh *feeder* yang lainnya.

## 2. Kawat penghantar

Penghantar pada jaringan distribusi berfungsi untuk menghantarkan arus listrik dari suatu bagian ke instalasi atau bagian yang lain. Apabila pemilihan jenis kawat penghantar kurang sesuai maka akan berakibat pada kurang baiknya penyaluran energi listrik ke konsumen yang mengakibatkan kerugian di sisi konsumen. Jaringan distribusi yang menggunakan saluran kabel memiliki tingkat keandalan yang lebih tinggi dibandingkan dengan jaringan yang menggunakan saluran udara (kawat telanjang), hal tersebut dikarenakan saluran kabel tidak terpengaruh terhadap cuaca. Sehingga apabila pada saluran kabel terjadi gangguan yang diakibatkan oleh cuaca buruk (pohon tumbang), maka tidak akan menyebabkan gangguan hubung singkat, karena pada saluran kabel terdapat isolasi yang melindungi dan mencegah gangguan baik gangguan antar fasa maupun gangguan fasa ke tanah.

## 3. Proteksi

Agar suatu sistem distribusi dapat berfungsi dengan baik, gangguan-gangguan yang terjadi pada tiap bagian harus dideteksi dan dipisahkan dari sistem lainnya dalam waktu yang secepatnya. Apabila suatu alat proteksi tidak bekerja dengan cepat dan tepat pada saat terjadi gangguan, maka hal tersebut akan berakibat pada meluasnya lokasi gangguan. Peralatan proteksi yang terdapat pada jaringan distribusi berkaitan dengan keandalan penyaluran energi listrik ke pelanggan. Fungsi beberapa peralatan proteksi beroperasi ketika terjadi gangguan

dan ketika dilaksanakan perbaikan atau perawatan jaringan distribusi. Rele proteksi, penutup balik otomatis (PBO) *recloser*, sakelar seksi otomatis (SSO) *sectionalizer*, *lightning arrester* dan *fuse cut off* beroperasi ketika terjadi gangguan dan dan bekerja secara otomatis. Sedangkan *load break switch* beroperasi ketika dilaksanakan perbaikan atau perawatan jadingan distribusi dan dilakukan secara manual. Semakin banyak proteksi yang digunakan pada jaringan distribusi maka penyaluran energi listrik ke pelanggan akan semakin baik atau keandalan jaringan distribusi akan semakin tinggi, namun hal tersebut akan berakibat pada semakin besarnya biaya operasional yang digunakan dan dibutuhkan sistem koordinasi proteksi yang baik dari sekian banyak peralatan proteki tersebut.

Alat proteksi pemutus balik otomatis (PBO) memiliki tingkat keandalan yang lebih tinggi dalam mengamankan gangguan pada jaringan distribusi dibandingkan dengan sekering (*fuse cut off*), hal tersebut dikarenakan apabila terjadi gangguan temporer dengan intensitas jumlah gangguan sama yakni 1x, maka pada kedua alat proteksi tersebut akan sama-sama aktif dan beroperasi. Namun pada saat gangguan temporer yang sifatnya sementara tersebut hilang, maka pada alat proteksi PBO akan kembali pada kondisi semula secara otomatis dengan setting waktu yang telah ditentukan. Sedangkan pada alat proteksi FCO untuk kembali pada kondisi semula harus dilakukan secara manual tergantung dari tibanya pekerja di lokasi gangguan. Sehingga akan berakibat pada durasi gangguan yang lebih lama dan mengakibatkan kerugian di sisi pelanggan.

#### 4. Panjang saluran

Panjang saluran erat kaitannya dengan letak atau lokasi beban terhadap sumber penyuplai tenaga listrik yang berakibat pada semakin panjang saluran maka frekuensi kegagalan dari suatu penyulang akan semakin tinggi sehingga nilai indeks kandalan sistem akan semakin rendah.

### 2.2.8 Upaya Perbaikan Keandalan Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

Menurut Fatoni (2016), pada umumnya ada dua cara untuk memperbaiki keandalan suatu sistem tenaga listrik, cara pertama adalah mengurangi frekuensi terjadinya gangguan yakni dengan cara melakukan penambahan *fuse* yang secara langsung dapat mengurangi lamda per-*load point*, dan kedua adalah mengurangi durasi gangguan dengan cara melakukan penambahan *sectionalizer* sehingga mengurangi durasi akibat perubahan repair time menjadi waktu *switching time* pada *load point* yang terlokalisir.

### 2.2.9 Indeks Keandalan

Menurut Pulungan (2012), indeks kandalan merupakan suatu indikator keandalan yang dinyatakan dalam suatu besaran probabilitas. Sejumlah indeks yang telah dikembangkan untuk menyediakan suatu kerangka untuk mengevaluasi keandalan jaringan.

Menurut Sukerayasa (2007), untuk mengevaluasi keandalan jaringan distribusi digunakan teknik analisis menggunakan rumus matematik, yaitu indeks keandalan dasar digunakan laju kegagalan  $\lambda$  (kegagalan/tahun), rata-rata waktu keluar (*outage*)  $r$  (jam/kegagalan) dan rata-rata ketidaktersediaan tahunan  $U$  (jam/tahun), sedangkan indeks berbasis sistem diantaranya adalah SAIFI dan SAIDI. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel 2.1 berikut ini.

**Tabel 2.1** Kategori Indeks Keandalan

(Sumber: Pulungan, 2012)

	SAIFI, No. of Interruption/Year			SAIDI, h of Interruption/Year		
	25%	50%	75%	25%	50%	75%
IEEE Std. 1366-2000	0.90	1.10	1.45	0.89	1.50	2.30
EI (1999) [excludes storm]	0.92	1.32	1.71	1.16	1.74	2.23
EI (1999) [with storms]	1.11	1.33	2.15	1.36	3.00	4.38
CEA (2001) (with storms)	1.03	1.95	3.16	0.73	2.26	3.28

PA Consulting (2001) (with storms)				1.55	3.05	8.35
IP & L Large City Comparison	0.72	0.95	1.15	1.02	1.64	2.41
(Indianapolis Power & Light, 2000)						
Note: 25%, 50% and 75% represent the lower quartile, the median and the upper quartile of utilities surveyed.						

**2.2.9.1 Laju Kegagalan ( $\lambda$ )**

Menurut Nashirul Haq (2016), laju kegagalan adalah banyaknya operasi yang terjadi pada suatu alat dalam suatu periode tertentu. Bila dimisalkan (f) adalah jumlah kegagalan selama selang waktu percobaan dan total waktu percobaannya adalah (T), maka laju kegagalannya adalah:

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

Dimana:

- $\lambda$  = Angka kegagalan
- F = Jumlah kegagalan selama selang waktu percobaan
- T = Jumlah lamanya selang waktu

Menurut Nurdiana (2017), untuk menghitung lama gangguan rata-rata (*Average Outage Time*):

$$Us = \frac{\sum t}{\lambda} \dots\dots\dots (2.2)$$

Nilai laju kegagalan akan berubah sesuai dengan umur dari sistem atau peralatan listrik selama beroperasi.

**2.2.9.2 Laju Perbaikan ( $r$ )**

Menurut Nurdiana (2017), berapa lama waktu yang dibutuhkan suatu alat yang gagal atau keluar untuk beroperasi kembali dengan cara diganti atau diperbaiki dalam satuan jam dikenal sebagai laju perbaikan. Dalam perhitungannya untuk mendapatkan waktu kegagalan rata-rata yang dialami oleh sebuah alat, maka:

$$r = \frac{U}{\lambda} = \frac{\sum i \lambda_i r_i}{\sum i \lambda_i} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana:

- $U$  = Waktu kegagalan per tahun (jam/tahun)
- $\lambda$  = Angka kegagalan per tahun (gangguan/tahun)
- $r$  = Waktu kegagalan (jam)

### 2.2.9.3 Laju Perbaikan per Tahun ( $U$ )

Menurut Nurdiana (2017), untuk mengetahui besarnya laju perbaikan per tahun harus diketahui banyaknya waktu perbaikan rata-rata per tahun pada suatu alat. Diperoleh dengan cara mengalikan angka kegagalan dan waktu keluar alat tersebut, maka:

$$U = \sum \lambda r_i \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana:

- $U$  = Waktu kegagalan per tahun (jam/tahun)
- $\lambda$  = Angka kegagalan per tahun (gangguan/tahun)
- $r$  = Waktu kegagalan (jam)

### 2.2.9.4 SAIFI (*System Average Interruption Index*)

Menurut Nashirul Haq (2016), SAIFI adalah indeks keandalan yang merupakan jumlah dari perkalian frekuensi padam dan pelanggan padam dibagi dengan jumlah pelanggan yang dilayani. Dengan indeks ini gambaran mengenai frekuensi kegagalan rata-rata yang terjadi pada bagian-bagian dari sistem bila dievaluasi sehingga dapat dikelompokkan sesuai dengan tingkat keandalannya. Satuannya adalah pemadaman per pelanggan. Secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$SAIFI = \frac{\text{Perkalian Frekuensi Angka Kegagalan dan Pelanggan Padam}}{\text{Jumlah Pelanggan}}$$

$$SAIFI = \frac{\lambda_i \cdot N_i}{N_t} \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana:

- $\lambda$  = Angka kegagalan rata-rata/frekuensi padam
- $N_i$  = Jumlah konsumen yang terganggu pada beban
- $N_t$  = Jumlah konsumen yang diayani

### 2.2.9.5 SAIDI (*System Average Duration Index*)

Menurut Nashirul Haq (2016), SAIDI adalah indeks keandalan yang merupakan jumlah dari perkalian lama padam dan pelanggan padam dibagi dengan jumlah pelanggan yang dilayani. Dengan indeks ini, gambaran mengenai lama pemadaman rata-rata yang diakibatkan oleh gangguan pada bagian-bagian dari sistem dapat dievaluasi. Secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$SAIDI = \frac{\text{Perkalian Jam Pemadaman dan Pelanggan Padam}}{\text{Jumlah Pelanggan}}$$

$$SAIDI = \frac{U_i \cdot N_i}{N_t} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana:

$U$  = Durasi gangguan

$N_i$  = Jumlah konsumen yang terganggu pada beban

$N_t$  = Jumlah konsumen yang dilayani

Indeks keandalan merupakan suatu indikator keandalan yang dinyatakan dalam suatu besaran probabilitas. Sejumlah indeks telah dikembangkan untuk menyediakan suatu kerangka untuk mengevaluasi keandalan jaringan sistem distribusi.

### 2.2.9.6 CAIDI (*Customer Average Duration Index*)

Menurut Nashirul Haq (2016), indeks ini memberikan informasi lama waktu (durasi) rata-rata setiap pemadaman. Secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$CAIDI = \frac{\text{Jumlah Durasi Gangguan Pelanggan}}{\text{Jumlah Interupsi Pelanggan}} = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i \lambda_i}$$

Indeks ini juga sama dengan perbandingan antara SAIDI dengan SAIFI, yaitu:

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana:

$U_i$  = Durasi gangguan

$N_i$  = Jumlah konsumen yang terganggu pada beban  $i$

$\lambda_i$  = Angka kegagalan rata-rata/frekuensi padam

Besarnya nilai CAIDI ini dapat digambarkan sebagai besar durasi pemadaman ( $r$ ) sistem distribusi keseluruhan ditinjau dari sisi pelanggan. Indeks keandalan merupakan suatu indikator keandalan yang dinyatakan dalam suatu besaran probabilitas. Sejumlah indeks telah dikembangkan untuk menyediakan suatu kerangka untuk mengevaluasi keandalan jaringan sistem distribusi.

#### 2.2.10 Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN)

Menurut Nashirul Haq (2016), SPLN adalah standar perusahaan PT PLN (Persero) yang ditetapkan Direksi bersifat wajib. Dapat berupa peraturan, pedoman, instruksi, cara pengujian dan spesifikasi Teknik. Sejak tahun 1976 sudah lebih dari 264 buah standar berhasil diselesaikan. Diantaranya 61 standar dibidang pembangkitan, 71 standar dibidang transmisi, 99 standar dibidang distribusi dan 33 standar dibidang umum.

Standar ini dimaksudkan untuk menjelaskan dan menetapkan tingkat keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Tujuannya adalah untuk memberikan pegangan yang terarah dalam menilai penampilan dan menentukan tingkat keandalan dari sistem distribusi dan juga sebagai tolak ukur terhadap kemajuan menentukan proyeksi yang akan dicapai PLN.

#### 2.2.11 Standar Nilai Indeks Keandalan SAIFI dan SAIDI

Standar indeks keandalan SPLN 68-2, 1986 dapat dilihat pada tabel 2.2 di bawah ini.

**Tabel 2.2** Standar Indeks Keandalan SPLN No. 68-2: 1986

(Sumber: SPLN No. 68-2: 1986)

<b>Indikator Kerja</b>	<b>Standar Nilai</b>	<b>Satuan</b>
SAIFI	3.2	Kali/pelanggan/tahun
SAIDI	21.09	Jam/pelanggan/tahun

Sedangkan standar indeks keandalan IEEE std 1366-2003 dapat dilihat pada tabel 2.3 di bawah ini.

**Tabel 2.3** Standar Indeks Keandalan IEEE std 1366-2003

(Sumber: IEEE std 1366-2003)

<b>Indikator Kerja</b>	<b>Standar Nilai</b>	<b>Satuan</b>
SAIFI	1.45	Kali/pelanggan/tahun
SAIDI	2.30	Jam/pelanggan/tahun
CAIDI	1.47	Jam/gangguan

Kemudian standar indeks keandalan WCS (*World Class Service*) dan WCC (*World Class Company*) dapat dilihat pada tabel 2.4 di bawah ini.

**Tabel 2.4** Standar Indeks Keandalan WCS (*World Class Service*) dan WCC (*World Class Company*)

<b>Indikator Kerja</b>	<b>Standar Nilai</b>	<b>Satuan</b>
SAIFI	3	Kali/pelanggan/tahun
SAIDI	1.666	Jam/pelanggan/tahun