

BAB 2

TEORI PENUNJANG

2.1 Sistem Distribusi Tenaga listrik

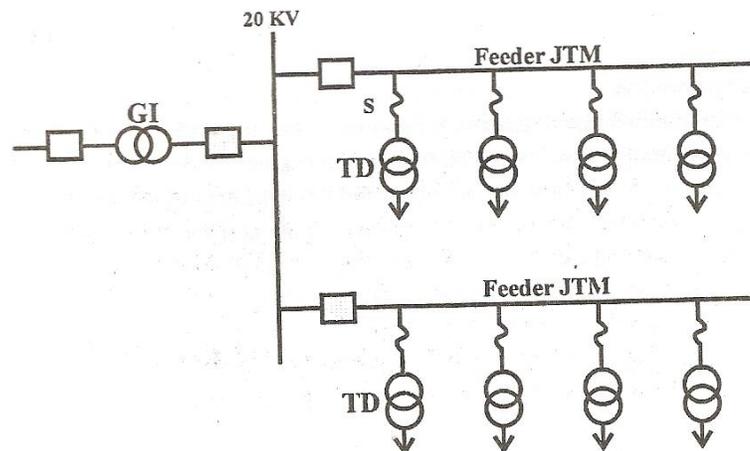
Sistem distribusi bertugas mengirim tenaga listrik dari pusat listrik ke pelanggan. Kemampuan untuk melayani pelanggannya sangat tergantung kepada peralatan, konfigurasi, sistem keamanan dan pengontrolan jaringan distribusi tenaga listrik yang dimilikinya.

Keandalan dapat didefinisikan sebagai suatu kemampuan dari suatu komponen, subsistem atau sistem untuk dapat melaksanakan fungsi yang telah ditetapkan pada kondisi pengoperasian dan lingkungan tertentu untuk periode waktu tertentu. Sistem distribusi akan disebut andal bila mampu memberikan tenaga listrik setiap saat sesuai dengan standar yang telah ditentukan, sedangkan sebaliknya sistem distribusi akan disebut tidak andal bila masih sering adanya pemadaman.

Jenis jaringan distribusi menurut susunan rangkaiannya adalah

2.1.1 Sistem Radial

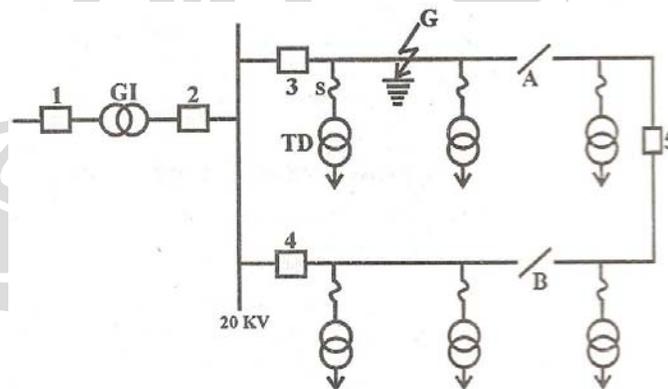
Sistem ini [1] memiliki bentuk yang paling sederhana dari semua jenis sistem jaringan distribusi. Sistem ini penyalurannya secara radial dari sumber tenaga listrik sampai ke titik beban atau ke pelanggan yang menggunakannya namun memiliki probabilitas terjadinya pemadaman sangat besar, karena secara susunan peralatan memungkinkan pemadaman pada salah satu peralatan berimbas kepada peralatan yang lain. Oleh karena itu sistem jenis ini biasanya diterapkan pada kawasan yang kerapatan bebannya rendah dan tidak memerlukan tingkat keandalan yang tinggi.



Gambar 2.1. Bentuk Umum Sistem Radial

2.1.2 Sistem Ring

Sistem jaringan distribusi [1] yang konfigurasinya menyerupai bentuk Cincin (Ring). Sistem ini memiliki saluran cadangan karena titik bebannya disuplai dari dua penyulang yang berbeda, sehingga bila salah satu penyulang mengalami gangguan maka titik beban tetap dapat menerima suplai dari penyulang yang lain.

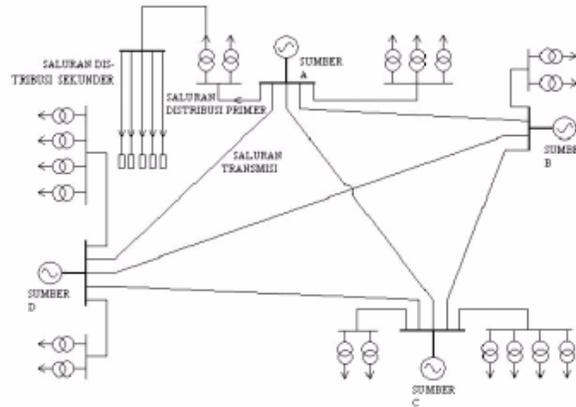


Gambar 2.2. Sistem Ring

2.1.3 Sistem Mesh

Sistem jaringan distribusi yang konfigurasinya memiliki banyak pilihan saluran dan sumber. akibatnya titik bebannya akan disuplai oleh banyak saluran penyulang dan sumber yang berbeda, sehingga sistem ini akan memiliki kontinuitas

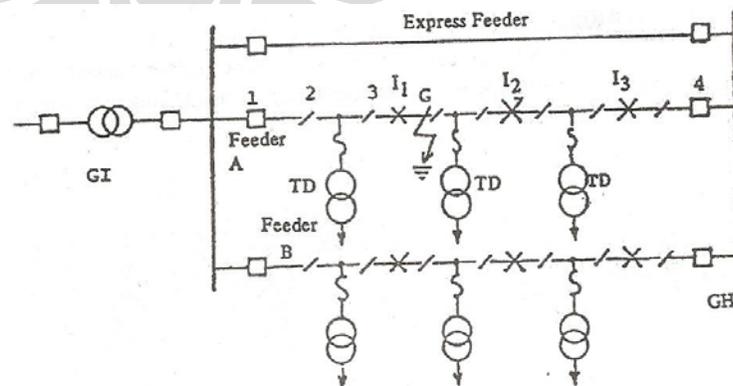
penyaluran tenaga listrik paling andal, akan tetapi memerlukan biaya investasi yang besar.



Gambar 2.3. Sistem Mesh

2.1.4 Sistem Spindel

Ciri khas Sistem jaringan distribusi ini [1] 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 potensial ekonomis yang tinggi.



Gambar 2.4. Sistem Spindel

2.2 Keandalan dan Ketersediaan

Keandalan dapat didefinisikan sebagai suatu kemampuan dari suatu komponen, subsistem atau sistem untuk dapat melaksanakan fungsi yang telah ditetapkan pada kondisi pengoperasian dan lingkungan tertentu untuk periode waktu tertentu [2].

Probabilitas, yang merupakan komponen pokok keandalan, merupakan input numerik bagi pengkajian keandalan suatu sistem yang juga merupakan indeks kuantitatif untuk menilai kelayakan suatu sistem. Pada beberapa kajian yang melibatkan disiplin ilmu keandalan, probabilitas bukan merupakan satu-satunya indeks, ada beberapa indeks lain yang dapat dipakai untuk menilai keandalan suatu sistem yang sedang dikaji [3].

Ketersediaan didefinisikan sebagai suatu kemampuan dari suatu komponen, subsistem atau sistem (dengan berbagai kombinasi aspek-aspek keandalannya, kemampu-rawatan dan dukungan pemeliharaan) untuk melakukan fungsi yang diperlukan pada suatu periode waktu tertentu [2].

Ketersediaan rata-rata (A) dari suatu komponen, subsistem atau sistem dapat didefinisikan sebagai.

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (2.1)$$

Dimana :

A : Ketersediaan rata-rata (jam/tahun)

MTTF : *Mean time to failure* (jam)

MTTR : *Mean time to repair* (jam)

2.2.1. Laju kegagalan λ

Laju kegagalan λ adalah banyaknya jumlah kegagalan yang terjadi selama selang waktu pengamatan. Dengan kata lain laju kegagalan λ adalah nilai rata-rata dari jumlah total kegagalan per satuan waktu selama selang waktu pengamatan (T) dan jumlah peralatan yang diamati. Biasanya satuan laju kegagalan λ adalah kegagalan per tahun, sehingga besarnya λ adalah [4]

$$\lambda = \frac{f}{T} \quad (2.2)$$

Dimana :

λ : Estimasi terbaik dari laju kegagalan (kegagalan/tahun)

f : Jumlah kegagalan (kegagalan)

T : Waktu pengamatan dalam tahun (tahun)

Grafik yang biasa digunakan untuk menggambarkan laju kegagalan peralatan biasanya adalah kurva *bathtub* [5], yang digambarkan pada gambar di bawah ini. Kurva *bathtub* terdiri atas tiga selang waktu yaitu :

1. Selang Waktu *Infant Mortality*

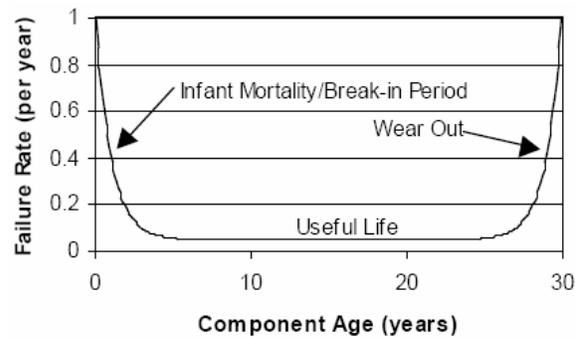
Pada selang waktu ini dimulai dengan nilai laju kegagalan yang tinggi lalu kemudian terjadi penurunan nilai laju kegagalan yang tajam. Besarnya kemungkinan nilai laju kegagalan ini disebabkan karena adanya cacat produksi pada peralatan tersebut, adanya kerusakan pada saat pengangkutan, adanya kerusakan pada saat instalasi atau pelaksanaan instalasi yang kurang benar

2. Selang waktu *Useful Life*

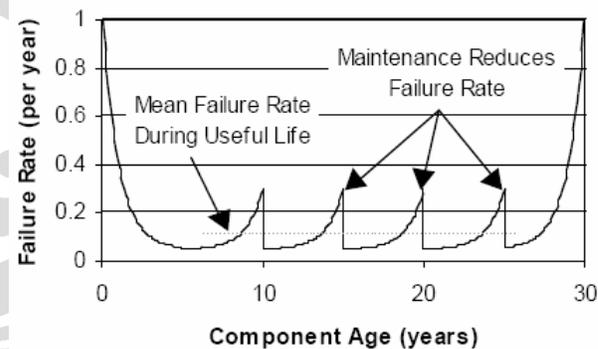
Karakteristik peralatan pada selang waktu ini memiliki nilai laju kegagalan yang mendekati konstan sehingga peralatan tersebut siap untuk dipasang dan dipergunakan

3. Selang Waktu *Wear Out*

Karakteristik peralatan pada selang waktu ini yang sebelumnya mendekati konstan akan mengalami peningkatan nilai laju kegagalan secara eksponensial sampai kemudian peralatan tersebut rusak dan harus diganti dengan peralatan yang baru.

Gambar 2.5. Kurva *Bathtub*

Kenaikan nilai laju kegagalan yang tajam pada selang waktu *Wear Out* ini dapat diturunkan dengan adanya pemeliharaan secara preventif, seperti yang terlihat pada kurva *sawtooth bathtub* pada gambar dibawah ini. Dengan adanya pemeliharaan maka nilai laju kegagalan pada peralatan tersebut akan turun lalu mendekati konstan sehingga memasuki periode selang waktu *useful life* kembali.

Gambar 2.6. Kurva *Sawtooth Bathtub*

2.2.2 Fungsi Distribusi Eksponensial

Ciri-ciri dari fungsi distribusi ini adalah laju kegagalannya yang konstan, dimana fungsi densitas probabilitas adalah :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.3)$$

Sedangkan fungsi keandalannya adalah :

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(u)du = e^{-\lambda t} \quad (2.4)$$

Dengan demikian fungsi ketakandalannya dapat ditulis sebagai berikut :

$$Q(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.5)$$

Waktu rata-rata kegagalan dari peralatan itu adalah :

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt = \frac{1}{\lambda} \quad (2.6)$$

Keandalan Sistem jaringan distribusi tenaga listrik biasanya melakukan perhitungan nilai indeks keandalan titik bebannya dan indeks keandalan sistem. Indeks kegagalan pada titik beban yang dihitung terdiri dari laju kegagalan peralatan λ (kegagalan/tahun), waktu keluar (outage time) r (jam/kegagalan) dan rata-rata ketidaktersediaan (unavailability) tahunan U (jam/tahun).

2.2.3 Sistem Seri

Pada sistem jaringan distribusi tenaga listrik berbentuk radial yang terdiri atas : saluran, pemisah, isolator, busbar, gardu distribusi dan lain-lain antara peralatan satu dengan yang lain dihubungkan secara seri. Dan para pelanggan dihubungkan pada tiap titik-titik bebannya. Secara sederhana susunan seri antar peralatan dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 2.7. Sistem Seri

Pada sistem seri maka semua peralatan - peralatan yang ada didalam sistem itu harus bekerja atau berfungsi seluruhnya agar sistem tersebut dapat berjalan atau tidak gagal. Atau dengan kata lain bila ada satu peralatan saja yang tidak bekerja, maka akan mengakibatkan sistem tersebut menjadi gagal. Oleh karena itu sistem yang

memiliki susunan seri sering disebut sebagai sistem tidak berlebihan (*non-redundant system*)

Misalkan sistem yang ditunjukkan pada gambar 2.7 adalah sebuah sistem yang terdiri dari peralatan A dan peralatan B. Dua peralatan tersebut terhubung secara seri, Jika λ_A adalah laju kegagalan peralatan A dan λ_B laju kegagalan peralatan B, maka :

$$\lambda_{SYS} = \lambda_A + \lambda_B \quad (2.7)$$

$$U_{SYS} = \lambda_A \cdot r_A + \lambda_B \cdot r_B \quad (2.8)$$

$$r_{SYS} = \frac{U_{SYS}}{\lambda_{SYS}} = \frac{\lambda_A r_A + \lambda_B r_B}{\lambda_A + \lambda_B} \quad (2.9)$$

Dalam format umum :

$$\lambda_{SYS} = \sum_i \lambda_i \quad (2.10)$$

$$U_{SYS} = \sum_i \lambda_i \cdot r_i \quad (2.11)$$

$$r_{SYS} = \frac{U_{SYS}}{\lambda_{SYS}} \quad (2.12)$$

Keterangan :

λ_A = Laju kegagalan peralatan A (kegagalan/tahun)

λ_B = Laju kegagalan peralatan B (kegagalan/tahun)

r_A = Waktu keluar (*outage time*) peralatan A (jam/kegagalan)

r_B = Waktu keluar (*outage time*) peralatan B (jam/kegagalan)

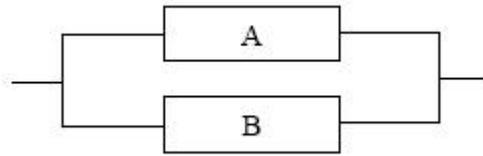
λ_{SYS} = Laju kegagalan sistem (kegagalan/tahun)

r_{SYS} = Waktu keluar (*outage time*) sistem (jam/kegagalan)

U_{SYS} = Rata-rata ketaktersediaan (*unavailability*) sistem (jam / tahun)

2.2.4 Sistem Paralel

Secara sederhana susunan paralel antar 2 peralatan dapat dilihat pada gambar 2.8 sebagai berikut :



Gambar 2.8. Sistem Paralel

Suatu sistem yang dimodelkan dengan susunan paralel mengakibatkan jika semua peralatan - peralatan yang ada didalam sistem itu gagal berfungsi maka akan mengakibatkan sistem itu menjadi gagal menjalankan fungsinya, namun jika hanya satu atau tidak semua peralatan yang ada didalam sistem itu gagal berfungsi maka tidak akan mengakibatkan sistem menjadi gagal. Sistem yang memiliki konfigurasi paralel sering disebut sebagai sistem yang berlebihan (*fully redundant system*)

Bila dua peralatan disusun secara paralel maka persamaannya akan menjadi :

$$\lambda_{\text{SYS}} = \frac{\lambda_A \cdot \lambda_B (r_A + r_B)}{1 + (\lambda_A \cdot r_A) + (1 + \lambda_B r_B)} \quad (2.13)$$

$$\lambda_{\text{SYS}} = \lambda_A \cdot \lambda_B (r_A + r_B) \quad \text{ketika } \lambda_i \cdot r_i \ll 1 \quad (2.14)$$

$$r_{\text{SYS}} = \frac{r_A \cdot r_B}{r_A + r_B} \quad (2.15)$$

$$U_{\text{SYS}} = \lambda_{\text{SYS}} \cdot r_{\text{SYS}} = \lambda_A \cdot \lambda_B \cdot r_A \cdot r_B \quad (2.16)$$

Bila tiga peralatan disusun secara paralel maka persamaannya akan menjadi :

$$\lambda_{\text{SYS}} = \lambda_A \cdot \lambda_B \cdot \lambda_C (r_A r_B + r_B r_C + r_A r_C) \quad (2.17)$$

$$r_{\text{SYS}} = \frac{r_A \cdot r_B \cdot r_C}{r_A r_B + r_B r_C + r_A r_C} \quad (2.18)$$

$$U_{\text{SYS}} = \lambda_{\text{SYS}} \cdot r_{\text{SYS}} = \lambda_A \cdot \lambda_B \cdot \lambda_C \cdot r_A \cdot r_B \cdot r_C \quad (2.19)$$

Keterangan :

λ_A = Laju kegagalan peralatan A (kegagalan/tahun)

λ_B = Laju kegagalan peralatan B (kegagalan/tahun)

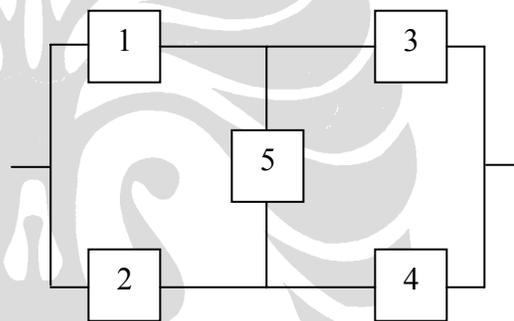
λ_C = Laju kegagalan peralatan C (kegagalan/tahun)

r_A = Waktu keluar (*outage time*) peralatan A (jam/kegagalan)

- r_B = Waktu keluar (*outage time*) peralatan B (jam/kegagalan)
 r_C = Waktu keluar (*outage time*) peralatan C (jam/kegagalan)
 λ_{SYS} = Laju kegagalan sistem (kegagalan/tahun)
 r_{SYS} = Waktu keluar (*outage time*) sistem (jam/kegagalan)
 U_{SYS} = Rata-rata ketaktersediaan (*unavailability*) sistem (jam / tahun)

2.2.5 Sistem Kompleks

Ada beberapa susunan model yang pengevaluasian keandalannya tidak dapat diselesaikan hanya dengan mengandalkan teknik pengevaluasian susunan seri atau paralel saja. Contoh yang sering dipakai untuk susunan yang kompleks adalah susunan jembatan seperti yang terlihat pada gambar 2.9.



Gambar 2.9. Sistem Kompleks

Salah satu metode untuk mengevaluasi susunan model kompleks adalah metode minimal *cut set* [3], yang dijelaskan sebagai berikut :

Sebuah *cut set* adalah sekumpulan dari peralatan yang bila peralatan-peralatan itu mengalami kegagalan, maka akan menyebabkan seluruh sistem akan mengalami kegagalan pula.

Sebuah *cut set* dikatakan sebagai minimal *cut set* bila salah satu peralatan yang terdapat di dalam minimal *cut set* itu mengalami kegagalan, maka akan menyebabkan seluruh sistem akan mengalami kegagalan pula, tetapi bila salah satu peralatan yang terdapat di dalam minimal *cut set* bekerja, maka tidak mengakibatkan sistem menjadi gagal.

Minimal *cut set* dari blok diagram keandalannya untuk contoh sistem kompleks adalah $\{1,2\}$, $\{3,4\}$, $\{1,4,5\}$, dan $\{2,3,5\}$. Mengingat semua peralatan yang terdapat di dalam minimal *cut set* ini harus gagal semuanya maka probabilitas kegagalan untuk semua peralatan yang ada di dalam minimal *cut set* dapat diekspresikan dalam bentuk blok diagram keandalan dengan susunan paralel. Suatu sistem akan mengalami kegagalan jika tiap-tiap *cut set* mengalami kegagalan, maka semua *cut set* akan dihubungkan dalam susunan seri dalam blok diagram keandalan untuk mengekspresikannya.

Minimal *cut set* nya :

$$C_1 = \{1,2\}, C_2 = \{3,4\}, C_3 = \{1,4,5\}, \text{ dan } C_4 = \{2,3,5\}$$

Sedangkan ekspresi ketakandalan sistemnya adalah :

$$\begin{aligned} Q_s &= P(C_1 \cup C_2 \cup C_3 \cup C_4) = P(C_1) + P(C_2) + P(C_3) + P(C_4) - \\ &P(C_1 \cap C_2) - P(C_1 \cap C_3) - P(C_1 \cap C_4) - P(C_2 \cap C_3) - \\ &P(C_2 \cap C_4) - P(C_3 \cap C_4) + P(C_1 \cap C_2 \cap C_3) + P(C_1 \cap C_2 \cap C_4) \\ &+ P(C_1 \cap C_3 \cap C_4) + P(C_2 \cap C_3 \cap C_4) + P(C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap C_4) \end{aligned}$$

dimana :

$$P(C_1) = Q_1 Q_2 \quad P(C_3) = Q_1 Q_4 Q_5$$

$$P(C_2) = Q_3 Q_4 \quad P(C_4) = Q_2 Q_3 Q_5$$

$$P(C_1 \cap C_2) = P(C_1) P(C_2) = Q_1 Q_2 Q_3 Q_4$$

$$P(C_1 \cap C_4) = P(C_1) P(C_4) = Q_1 Q_2 Q_4 Q_5$$

$$P(C_2 \cap C_3) = P(C_2) P(C_3) = Q_1 Q_3 Q_4 Q_5$$

$$P(C_2 \cap C_4) = P(C_2) P(C_4) = Q_2 Q_3 Q_4 Q_5$$

$$P(C_3 \cap C_4) = P(C_3) P(C_4) = Q_1 Q_2 Q_3 Q_4 Q_5$$

$$P(C_1 \cap C_2 \cap C_3) = P(C_1 \cap C_2 \cap C_4) = P(C_1 \cap C_3 \cap C_4)$$

$$= P(C_2 \cap C_3 \cap C_4) = P(C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap C_4)$$

$$= Q_1 Q_2 Q_3 Q_4 Q_5$$

Sehingga ketakandalan sistemnya adalah :

$$\begin{aligned} Q_s &= Q_1 Q_2 + Q_3 Q_4 + Q_1 Q_4 Q_5 + Q_2 Q_3 Q_5 - Q_1 Q_2 Q_3 Q_4 - Q_1 Q_2 Q_4 Q_5 \\ &- Q_1 Q_3 Q_4 Q_5 - Q_2 Q_3 Q_4 Q_5 + 2Q_1 Q_2 Q_3 Q_4 Q_5 \end{aligned}$$

2.2.6 Indeks Keandalan Sistem Distribusi

Indeks keandalan yang akan dievaluasi biasanya menggunakan konsep klasik yang akan menghitung : laju kegagalan rata-rata, durasi pemadaman rata-rata dan ketaktersediaan tahunan rata-rata atau waktu pemadaman tahunan rata-rata. Indeks keandalan merupakan suatu indikator keandalan yang dinyatakan dalam suatu besaran *probabilitas*. Sejumlah indeks sudah dikembangkan untuk menyediakan suatu kerangka untuk mengevaluasi keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Indeks keandalan sistem tersebut antara lain [6]:

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

Indeks ini didefinisikan sebagai nilai rata-rata dari banyaknya kegagalan yang terjadi pada sistem.

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i} \quad (2.20)$$

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

Indeks ini didefinisikan sebagai nilai rata-rata dari lamanya kegagalan yang terjadi pada sistem

$$SAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i} \quad (2.21)$$

Dengan :

λ_i : Laju kegagalan pada titik beban ke i (kegagalan/tahun)

N_i : Jumlah konsumen pada titik beban ke i

U_i : Ketidakterersediaan tahunan pada titik beban ke i (jam / tahun)

2.3 Biaya akibat Pemadaman

2.3.1. Tingkat Mutu Pelayanan (TMP)

Sesuai dengan Keputusan Direktur Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi Nomor 114-12/39/600.2/2002 tanggal 2 Mei 2002 tentang Indikator Mutu Pelayanan

Penyediaan Tenaga Listrik untuk umum yang disediakan oleh PT. PLN (Persero), maka PLN wajib untuk menetapkan tingkat mutu pelayanan yang diberikan dalam setiap periode waktu tertentu, sekurang-kurangnya 1 (satu) kali dalam 1 (satu) tahun dan mencakup area pelayanan tertentu, sekurang-kurangnya berisi indikator pelayanan sebagai berikut :

- a. Tegangan tinggi di titik pemakaian dinyatakan dalam kV
- b. Tegangan menengah di titik pemakaian dinyatakan dalam kV
- c. Tegangan rendah di titik pemakaian dinyatakan dalam volt
- d. Frekuensi di titik pemakaian dinyatakan dalam cps
- e. Lama gangguan per pelanggan dinyatakan dalam jam/bulan
- f. Jumlah gangguan per pelanggan dinyatakan dalam kali/bulan
- g. Kecepatan pelayanan sambungan baru TM dinyatakan dalam hari kerja
- h. Kecepatan pelayanan sambungan baru TR dinyatakan dalam hari kerja
- i. Kecepatan pelayanan perubahan daya TM dinyatakan dalam hari kerja
- j. Kecepatan pelayanan perubahan daya TR dinyatakan dalam hari kerja
- k. Kecepatan menanggapi pengaduan gangguan dinyatakan dalam jam
- l. Kesalahan pembacaan kWh meter dinyatakan dalam kali/tahun/ pelanggan
- m. Waktu koreksi kesalahan rekening dinyatakan dalam hari kerja

Sedangkan Pinalti atau sanksi bila ternyata PT. PLN (Persero) tidak mampu memenuhi target TMP diatur dalam Keputusan Direktur Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi Nomor 30-12/40/600.3/2004 tanggal 27 Januari 2004. Di surat tersebut disampaikan bahwa :

Dalam hal realisasi lama gangguan dan atau jumlah gangguan, dan atau tingkat kesalahan pembacaan kWh meter, jumlahnya melebihi 10 % di atas tingkat mutu pelayanan yang diumumkan, maka PT PLN (Persero) wajib memberikan pengurangan tagihan listrik kepada konsumen sebesar 10 % dari biaya beban konsumen yang akan diperhitungkan pada tagihan listrik bulan berikutnya

2.3.2 Biaya Kehilangan Pendapatan Pelanggan

Salah satu parameter penting yang diperlukan untuk mengevaluasi indeks yang berorientasi kepada beban dan energi adalah beban rata-rata pada tiap titik beban.

Beban rata-rata L_a didefinisikan sebagai [6] :

$$L_a = L_p \cdot f \quad (2.22)$$

Dimana :

L_p = *Peak Load Demand*

f = *Load factor*

atau

$$L_a = \frac{\text{Total Energy demanded in period of interest}}{\text{period of interest}} = \frac{E_d}{t} \quad (2.23)$$

E_d dan t ditunjukkan pada *load duration curve* dan t biasanya satu tahun kalender

Energy Not Supplied (ENS) total didefinisikan sebagai :

$$ENS = \sum L_{a(i)} \cdot U_i \quad (2.24)$$

Dimana :

$L_{a(i)}$ adalah *load connected* rata-rata pada titik beban ke i

U_i adalah Ketidaktersediaan tahunan pada titik beban ke i

Biaya kehilangan pendapatan pelanggan didefinisikan sebagai :

$$\begin{aligned} ENSC_i &= ENS \cdot \text{Tarif} \\ &= k_r \cdot ENS \cdot \text{Tarif}_r + k_{in} \cdot ENS \cdot \text{Tarif}_{in} + \\ &\quad k_b \cdot ENS \cdot \text{Tarif}_b + k_s \cdot ENS \cdot \text{Tarif}_s \end{aligned} \quad (2.25)$$

Dimana :

ENS_i = *Energy not supplied* pada Titik beban ke i

Tarif = Tarif pelanggan per kWh

Tarif_r = Tarif pelanggan rumah tangga per kWh

Tarif_b = Tarif pelanggan bisnis per kWh

Tarif_{in} = Tarif pelanggan industri per kWh

Tarif_s = Tarif pelanggan sosial per kWh

K_r = Prosentasi pelanggan rumah tangga pada titik beban ke i

K_b = Prosentasi pelanggan bisnis pada titik beban ke i

k_{in} = Prosentasi pelanggan industri pada titik beban ke i

k_s = Prosentasi pelanggan sosial pada titik beban ke i

2.4 Pemeliharaan

Pemeliharaan merupakan salah satu fungsi yang penting untuk menjaga stabilitas dan kontinuitas penyaluran tenaga listrik. Pemeliharaan yang baik akan menjamin dan menjaga kualitas dari penyaluran tenaga listrik dan menghindari terjadinya pemadaman.

Kegiatan pemeliharaan dapat didefinisikan sebagai suatu kegiatan yang diperlukan untuk menjaga peralatan-peralatan berada dalam kondisi pengoperasian yang terbaik. Pemeliharaan merupakan gabungan dari kombinasi manajemen, engineering, keuangan dan kegiatan lainnya yang diterapkan bagi suatu peralatan fisik untuk mendapatkan biaya yang ekonomis dengan kualitas yang terjamin.

2.4.1 Tujuan Pemeliharaan

Kegiatan pemeliharaan memiliki beberapa tujuan, yaitu : memperpanjang usia manfaat peralatan, menjamin ketersediaan yang optimal dari peralatan-peralatan, menjamin keselamatan setiap orang yang menggunakan fasilitas dan peralatan.

2.4.2 Jenis-jenis Pemeliharaan

Adapun jenis-jenis pemeliharaan [5] yang ada saat ini adalah pemeliharaan run-to-failure, pemeliharaan periodik, pemeliharaan condition based dan pemeliharaan *reliability centered* (RCM).

a. Pemeliharaan *Run-to-Failure*

Adalah strategi pemeliharaan yang paling sederhana, karena sesudah peralatan dipasang maka tidak perlu dilakukan pemeriksaan atau pemeliharaan sampai kerusakan terjadi, hal ini terjadi pada peralatan yang tidak terlalu kritikal dan yang memerlukan pemeliharaan yang minimal.

b. Pemeliharaan Periodik

Adalah strategi pemeliharaan berdasarkan interval waktu, seperti melakukan penggantian peralatan sesuai perkiraan waktu umur, atau melakukan aktivitas pemeriksaan peralatan secara periodik. Pemeliharaan jenis ini sering disebut sebagai pemeliharaan preventif berbasis waktu

Interval waktu yang dipakai biasanya berdasarkan rekomendasi dari pabrikan peralatan tersebut. Hanya saja banyak tipe dari peralatan tidak dapat dilakukan pemeliharaan sampai peralatan tersebut memasuki masa penurunan yang kritis, hal ini terjadi karena bila dilakukan pemeliharaan sebelum masa kritis tersebut dapat mengakibatkan kerusakan pada peralatan tersebut.

Selain itu pemeliharaan periodik ini juga memiliki kelemahan yaitu tidak melihat kondisi peralatan tersebut apakah masih bagus atau tidak tapi bila sudah waktunya diganti maka akan dilakukan pergantian.

c. Pemeliharaan Berbasis kondisi

Pemeliharaan berbasis kondisi hanya melakukan pantauan atau monitoring kondisi atau kinerja suatu peralatan secara rutin sehingga kegagalan suatu kondisi dapat terdeteksi secara dini. Pelaksanaan Pemeliharaan hanya dilakukan bila peralatan yang dipantau memiliki tanda-tanda penurunan kondisi menuju kerusakan. Pemeliharaan jenis ini sering disebut sebagai pemeliharaan preventif berbasis kondisi.

Banyak teknik dilakukan untuk melakukan pantauan atau monitoring kondisi atau kinerja suatu peralatan antara lain menggunakan : pantauan secara visual, pantauan akustik, *infrared thermography*, *partial discharge*.

Ada kalanya kegagalan pada suatu peralatan dapat terjadi pada interval antar pantauan, oleh karena itu pada peralatan yang kritis dilakukan pantauan secara *real time*

d. Pemeliharaan *Reliability Centered* (RCM)

Adalah suatu framework yang digunakan untuk menentukan pemeliharaan yang diperlukan berdasarkan kondisi peralatan, tingkat kekritisan peralatan, dan biaya. Tujuan utama dari pelaksanaan RCM adalah mengurangi biaya pemeliharaan dengan fokus pada pemeliharaan peralatan yang paling penting. Oleh karena itu RCM melakukan proses keseimbangan antara pemeliharaan preventif dan pemeliharaan korektif sehingga didapat biaya yang lebih efektif yang diperlukan dalam perencanaan pemeliharaan. Salah satu langkah kerja RCM adalah melakukan proses identifikasi mode gangguan dengan memanfaatkan *failure mode and effect analysis* (FMEA) untuk mendapatkan rincian gangguan yang mungkin terjadi, penyebab gangguan, dan dampak yang timbul dengan adanya gangguan tersebut.

2.5. Metode Prioritas pemeliharaan peralatan

2.5.1 Metode *Component Criticality in Customer Delivery Systems*

Oleh tim dari perusahaan listrik *The Hydro One Inc*, Toronto Kanada [7], yang disampaikan pada *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems* tahun 2004. Berdasarkan analisis nilai kritis dan pengaruh tiap-tiap peralatan pada *Customer Delivery Systems* terhadap nilai keandalan keseluruhan sistem tersebut.

Kehilangan dari kontinuitas penyaluran energi ke titik beban biasanya diukur sebagai berapa kali (frekuensi) dan lamanya (*Duration*) pemadaman terjadi dan mempengaruhi pada titik beban tersebut. Pemadaman tersebut terjadi karena satu atau lebih dari peralatan-peralatan mengalami kegagalan atau kerusakan sehingga tidak dapat melaksanakan fungsinya dengan baik, padahal unjuk kerja dari tiap peralatan memiliki kontribusi terhadap keandalan sistem secara keseluruhan. Kontribusi dari tiap peralatan tersebut dapat tinggi atau rendah tergantung dari konektivitas dari peralatan-peralatan atau posisi peralatan di dalam sistem dan unjuk kerja keandalan dari tiap-tiap peralatan tersebut. Satu faktor mungkin tidak cukup untuk menentukan nilai kritis tiap peralatan terhadap sistem yang diberikan. Sebagai

contoh dalam sistem berbentuk radial sederhana, tiap peralatan adalah penting terhadap sistem, cukup dilihat hanya berdasarkan faktor konektivitas dari peralatan-peralatan pada sistem radial sederhana yang disusun secara seri sehingga tinggi rendahnya kontribusi tiap peralatan secara jelas dapat terlihat. Tapi dalam konteks yang lain misalkan sebuah sistem yang memiliki *redundancy* (peralatan-peralatan disusun secara seri dan paralel) tidak semua peralatan-peralatan tersebut memiliki nilai kritis bila hanya dilihat berdasarkan faktor konektivitasnya, oleh karena itu dalam menganalisis perlu dilihat dari kedua faktor secara bersama-sama yaitu faktor konektivitas dan faktor unjuk kerjanya.

Dalam melakukan analisis untuk menghitung keandalan sistem pada titik beban, metode ini dibantu oleh software in-house yaitu software AREP (*Area Reliability Evaluation Program*), yang bekerja berdasarkan pendekatan minimum cut set. Dengan melakukan perubahan pada nilai unjuk kerja tiap peralatan sebagai masukan ke software AREP, maka dari keluaran software AREP tersebut akan dilihat perubahan nilai keandalan pada titik bebannya, dari nilai perubahan tersebut akan dapat terlihat berapa besar tinggi rendahnya kontribusi dari tiap-tiap peralatan.

Adapun langkah-langkah dari metode ini adalah sebagai berikut :

1. Tentukan data-data dari keandalan peralatan-peralatan pada customer delivery system yang diperlukan untuk analisis. Ini termasuk pemadaman karena adanya pemeliharaan atau yang direncanakan. Data-data keandalan peralatan dalam bentuk indikasi frekuensi dan lamanya pemadaman.
2. Pilih sebuah titik beban dan jalankan aplikasi AREP untuk menghitung indikasi keandalan pada titik beban yang dipilih tadi dengan menggunakan data-data yang telah didefinisikan pada langkah 1. Langkah ini yang disebut sebagai nilai *base atau reference case*.
3. Pilih sebuah peralatan dan ubah nilai laju kegagalannya menjadi bernilai nol (yang diasumsikan sebagai peralatan sempurna) sedangkan peralatan yang lain tidak mengalami perubahan nilai pada datanya lalu jalankan aplikasi AREP dengan menggunakan data-data dimana nilai salah satu peralatannya telah dirubah. Langkah ini yang disebut sebagai nilai *new case*.

4. Evaluasi perubahan relatifnya dalam bentuk frekuensi dan ketaktersediaan pada titik beban antara hasil keluaran software AREP pada langkah 2 dan langkah 3 berdasarkan perubahan pada nilai laju kegagalan peralatan yang dipilih. Besarnya nilai perubahan relatifnya adalah sebagai berikut :

$$\text{Perubahan Indeks Keandalan} = \frac{(\text{Base case value} - \text{New case value})}{\text{Base case value}} \quad (2.26)$$

5. Ulangi langkah 3 dan langkah 4 untuk peralatan yang lain
 6. Ulangi langkah 2 sampai langkah 5 untuk titik beban yang lain
 7. Gunakan hasil-hasil dari langkah-langkah di atas untuk menghitung nilai total perubahan indikasi frekuensi dan ketaktersediaan sistem, sebagai hasil dari mengubah nilai laju kegagalan peralatan-peralatan. Dengan formula nilai total perubahannya adalah sebagai berikut :

$$\text{Total perubahan indeks frekuensi sistem} = \sum_{j=1}^n \Delta F_{ij} \quad (2.27)$$

$$\text{Total perubahan indeks ketaktersediaan sistem} = \sum_{j=1}^n \Delta U_{ij} \quad (2.28)$$

Dimana :

ΔF_{ij} : Perubahan dalam indeks frekuensi untuk titik beban j oleh peralatan i (f/Thn)

ΔU_{ij} : Perubahan dalam indeks ketaktersediaan untuk titik beban j oleh peralatan i (jam/Thn)

n : jumlah titik beban pada sistem

8. Dengan menggunakan hasil pada langkah 7 kemudian dilakukan proses rangking pada peralatan-peralatan, berdasarkan nilai perubahan pada indikasi frekuensi dan ketaktersediaan pada seluruh titik beban.

Yang memiliki nilai paling besar akan menduduki rangking paling atas.

Jadi dapat disimpulkan bahwa metode ini langsung menggabungkan antara kontribusi konektivitas dari peralatan-peralatan atau posisi peralatan di dalam sistem dan kontribusi unjuk kerja keandalan dari tiap-tiap peralatan tersebut untuk melihat pengaruh tiap peralatan terhadap keandalan sistem secara keseluruhan. Ada baiknya bila nilai tiap kontribusi dipisah dulu lalu kemudian digabungkan sehingga dapat dilihat berapa besar nilai kontribusi karena faktor konektivitas dari peralatan-peralatan atau posisi peralatan di dalam sistem dan nilai kontribusi karena faktor unjuk kerja keandalan dari peralatan tersebut.

Metode ini juga tidak melibatkan pengaruh jenis pelanggan pada tiap titik beban, padahal tiap jenis pelanggan memiliki pengaruh yang berbeda terutama terhadap pendapatan yang hilang di sisi perusahaan listrik karena adanya pemadaman. Pelanggan komersial atau pelanggan industri tentunya memiliki pengaruh yang lebih besar daripada pelanggan rumah tangga atau pelanggan sosial.

Selain itu tidak disebutkan juga pengaruh dari biaya pemeliharaan yang diperlukan untuk menurunkan angka laju kegagalan atau unjuk kerja keandalan dari peralatan tersebut. Jadi ada kemungkinan yang paling prioritas ternyata membutuhkan biaya pemeliharaan yang besar yang berakibat bila dilakukan proses ranking ulang menjadi bukan paling prioritas lagi.

2.5.2 Metode WASRI

Adapun objektif dari pendekatan ini adalah memperkecil (meminimalkan) nilai dari the *weighted average system reliability index* (WASRI) [8] dengan melakukan sistem ranking pada pelaksanaan pemeliharaan berdasarkan perbandingan manfaat biaya, dimana manfaat yang didapat didefinisikan sebagai usaha dari pemeliharaan bila berhasil melakukan penurunan dari nilai WASRI.

Estimasi penurunan nilai WASRI didapat dari penggunaan hubungan secara linier antara manfaat yang diperoleh dari pelaksanaan pemeliharaan dan perubahan nilai laju kegagalan peralatan yang dipelihara. Sedangkan nilai WASRI didefinisikan sebagai :

$$\text{WASRI} = w_1 \cdot (\text{SAIFI}) + w_2 \cdot (\text{SAIDI}) + w_3 \cdot (\text{MAIFI}_E) \quad (2.29)$$

Dimana :

SAIFI : indeks frekuensi pemadaman rata-rata sistem

SAIDI : indeks lamanya pemadaman rata-rata sistem

MAIFI_E : frekuensi pemadaman rata-rata kejadian momentary

Definisi WASRI diatas mempertimbangkan tiga indikasi keandalan yang populer, tapi dapat diperluas dengan menambah indikasi keandalan yang lain tetapi indikasi tersebut harus memiliki hubungan yang linier dengan laju kegagalan peralatan.

Untuk kesederhanaan, diasumsikan bahwa hasil dari pelaksanaan pemeliharaan mengakibatkan terjadinya perubahan nilai pada laju kegagalan peralatan yang besarnya adalah $\Delta\lambda$. Sehingga sesudah pelaksanaan pemeliharaan maka besarnya nilai laju kegagalan peralatan yang baru adalah nilai laju kegagalan peralatan yang lama dikurangi $\Delta\lambda$. Dalam penambahannya, juga dilibatkan bahwa tiap pelaksanaan pemeliharaan dikaitkan dengan biaya C yang diperlukan.

Jadi besarnya nilai $\Delta\lambda$ akan digunakan sebagai dasar untuk mengidentifikasi manfaat dari penurunan nilai WASRI yang diakibatkan adanya pelaksanaan pemeliharaan yang dilakukan. Kemudian menghitung nilai dari perbandingan manfaat biaya yang digunakan sebagai dasar pelaksanaan prioritas pemeliharaan.

Jadi tujuan dari metodologi ini adalah dapat mengidentifikasi kombinasi dari beberapa pelaksanaan pemeliharaan untuk menghasilkan indeks keandalan yang terbaik tetapi dibatasi oleh nilai anggaran yang ada. Dengan kata lain metodologi ini didesain untuk mencari pelaksanaan pemeliharaan yang paling efektif dari sisi biaya.

Adapun definisi dari pemeliharaan yang efektif secara biaya, E adalah sebagai berikut :

$$E = \frac{\Delta WASRI}{C} \quad (2.30)$$

Dimana :

$\Delta WASRI$ adalah perubahan besarnya nilai WASRI

C adalah besarnya biaya pemeliharaan

$$\text{SAIFI} = \sum \text{SAIFI}_i^C \quad (2.31)$$

$$\text{SAIDI} = \sum \text{SAIDI}_i^C \quad (2.32)$$

$$\text{MAIFI}_E = \sum \text{MAIFI}_E^C \quad (2.33)$$

Dimana :

SAIFI_i^C Kontribusi SAIFI dari peralatan i

SAIDI_i^C Kontribusi SAIDI dari peralatan i

MAIFI_E^C Kontribusi MAIFI_E dari peralatan i
 i peralatan yang dipelihara

$$E = \Delta\lambda \cdot \frac{(w_1.S_i + w_2.D_i + w_3.T_i)}{(N.C)} \quad (2.34)$$

Dimana :

S_i = jumlah pelanggan yang terkena pemadaman

D_i = lamanya pemadaman

T_i = jumlah pelanggan yang terkena pemadaman *temporary*

λ = laju kegagalan

N = jumlah total pelanggan

Adapun cara pelaksanaan prioritas pemeliharaan adalah mencari nilai ranking dari semua pelaksanaan pemeliharaan yang dilakukan berdasarkan keefektifan biayanya. Sedangkan prosedur dan langkah-langkah untuk melaksanakan metodologi ini adalah sebagai berikut :

1. Evaluasi kondisi dari tiap-tiap peralatan dan biaya untuk melaksanakan pemeliharaan
2. Buat daftar semua kemungkinan pelaksanaan pemeliharaan
3. Tentukan nilai S_i , D_i , and T_i untuk tiap-tiap peralatan i
4. Hitung nilai keefektifan biaya E untuk tiap pelaksanaan pemeliharaan, lalu dilakukan ranking.

5. Untuk pelaksanaan pemeliharaan pada peralatan yang sama, pilih yang memiliki ranking paling tinggi, dan hapus pelaksanaan pemeliharaan yang lain.
6. Pilih pelaksanaan pemeliharaan pada daftar ranking dari yang paling tinggi sampai mencapai batas biaya atau target keandalan yang hendak dicapai.

Jadi dapat disimpulkan bahwa metode ini juga langsung menggabungkan antara kontribusi konektivitas dari peralatan-peralatan atau posisi peralatan di dalam sistem dan kontribusi unjuk kerja keandalan dari tiap-tiap peralatan tersebut untuk melihat pengaruh tiap peralatan terhadap keandalan sistem secara keseluruhan. Ada baiknya bila nilai tiap kontribusi dipisah dulu lalu kemudian digabungkan sehingga dapat dilihat berapa besar nilai kontribusi karena faktor konektivitas dari peralatan-peralatan atau posisi peralatan di dalam sistem dan nilai kontribusi karena faktor unjuk kerja keandalan dari peralatan tersebut.

Metode ini juga tidak melibatkan pengaruh jenis pelanggan pada tiap titik beban, padahal tiap jenis pelanggan memiliki pengaruh yang berbeda terutama terhadap pendapatan yang hilang di sisi perusahaan listrik karena adanya pemadaman. Pelanggan komersial atau pelanggan industri tentunya memiliki pengaruh yang lebih besar daripada pelanggan rumah tangga atau pelanggan sosial. Hanya saja metode ini sudah memasukkan nilai pengaruh dari biaya pemeliharaan yang diperlukan untuk menurunkan angka laju kegagalan atau unjuk kerja keandalan dari peralatan tersebut.

2.5.3 Metode *Interruption Cost Based Importance Index*

Didasarkan pada indeks *Birnbaum's reliability importance*, I^B [9] yang dimodifikasi agar dapat diterapkan pada sistem jaringan listrik.

a. *Birnbaum's reliability importance* (I^B).

adalah turunan parsial dari nilai keandalan sistem terhadap nilai keandalan individual tiap peralatan. Hal ini menunjukkan nilai sensitivitas dari tiap peralatan dimana perubahan nilai dari keandalan tiap peralatan akan mempengaruhi perubahan nilai keandalan sistem keseluruhan. Peralatan yang

menunjukkan nilai sensitivitas yang terbesar adalah yang paling importance. Dimana nilai I^B adalah :

$$I_i^B = \frac{\partial h(P)}{\partial p_i} \quad (2.35)$$

Dimana :

I^B : adalah *Birnbaum's reliability importance*

h : adalah Keandalan sistem yang tergantung pada semua keandalan tiap peralatan P_i

P_i : adalah keandalan peralatan i

b. *Interruption Cost Based Importance Index (I^H)*.

fokus pada customer interruption cost yang digunakan untuk pengukuran dari unjuk kerja dan keandalan. Nilai customer interruption cost berasal dari biaya inisial dari tiap jenis pelanggan per pemadaman dan biaya yang secara linier tergantung terhadap lamanya pemadaman atau dengan kata lain adalah biaya kehilangan revenue dari pelanggan.

Interruption Cost Based Importance Index atau disingkat indeks penting (*Importance Index*) I^H memanfaatkan total biaya pemadaman daripada menggunakan nilai probabilitas walaupun pada kenyataannya nilai total biaya pemadaman tergantung dari nilai probabilitas dan analisisnya menggunakan nilai laju kegagalan.

Besarnya I^H didefinisikan sebagai [9] :

$$I_i^H = \frac{\partial C_s}{\partial \lambda_i} \quad (2.36)$$

Dimana :

I^H : indeks penting (Rp.Thn/kegagalan)

C_s : Total biaya pemadaman pelanggan pada seluruh titik beban (Rp)

λ_i : Laju kegagalan peralatan i (kegagalan/Thn)

I^H mengindikasikan nilai sensitivitas dari tiap laju kegagalan peralatan terhadap nilai total biaya pemadaman pelanggan, atau dengan kata lain bila peralatan i mengalami kegagalan atau gangguan akan berpengaruh terhadap total biaya pemadaman pelanggan (pada semua titik beban), semakin besar perubahan yang terjadi pada total biaya pemadaman pelanggan semakin besar nilai sensitivitas dari peralatan tersebut dengan kata lain peralatan ini akan memiliki prioritas yang tinggi dalam pemeliharaan.

c. *Maintenance Potential* (I^{MP}).

Pada kenyataannya nilai I^H tidak dipengaruhi oleh nilai Laju kegagalan Peralatan tapi hanya dipengaruhi oleh konektivitas dari peralatan-peralatan atau posisi peralatan di dalam sistem, oleh karena itu perlu diperkenalkan indeks yang disebut potensi pemeliharaan (*Maintenance Potential*), I^{MP} , yang diambil berdasarkan pada faktanya bahwa nilai total biaya pemadaman akan mengalami penurunan nilainya bila dengan mengubah nilai Laju kegagalan salah satu Peralatan dengan nilai nol (peralatan sempurna). Besarnya perbedaan nilai total biaya pemadaman tersebut yang disebut sebagai *Maintenance Potential*.

Besarnya I^{MP} didefinisikan sebagai [9]:

$$I_i^{MP} = I_i^H \cdot \lambda_i \quad (2.37)$$

Dimana :

I^{MP} : potensi pemeliharaan (R)

I^H : indeks penting (R.Thn/kegagalan)

λ_i : Laju kegagalan peralatan i (kegagalan/Thn)

Dengan mengasumsikan bahwa besarnya nilai C_s dan nilai λ_i memiliki hubungan berbanding secara linier, tetapi formula ini tidak berlaku bila memiliki kecenderungan berbanding tidak linier misalkan secara kuadratik atau secara square.

Jadi dapat disimpulkan bahwa metode ini telah melakukan proses pemisahan yang jelas antara kontribusi konektivitas dari peralatan-peralatan atau posisi peralatan di dalam sistem dengan adanya potensi pemeliharaan I^H dan kontribusi unjuk kerja keandalan dari tiap-tiap peralatan tersebut untuk melihat pengaruh tiap peralatan terhadap keandalan sistem secara keseluruhan dengan adanya potensi pemeliharaan I^{MP} , sehingga dapat dilihat berapa besar nilai kontribusi karena faktor konektivitas dari peralatan-peralatan atau posisi peralatan di dalam sistem dan nilai kontribusi karena faktor unjuk kerja keandalan dari peralatan tersebut.

Metode ini ternyata melibatkan pengaruh jenis pelanggan pada tiap titik beban, sehingga pengaruh terutama terhadap pendapatan yang hilang di sisi perusahaan listrik karena adanya pemadaman dengan adanya total biaya pemadaman pelanggan C_s dapat terlihat.

Hanya saja metode ini tidak menyebutkan pengaruh dari biaya pemeliharaan yang diperlukan untuk menurunkan angka laju kegagalan atau unjuk kerja keandalan dari peralatan tersebut. Jadi ada kemungkinan yang paling prioritas ternyata membutuhkan biaya pemeliharaan yang besar yang berakibat bila dilakukan proses ulang pembuatan rangking menjadi bukan paling prioritas lagi.