

ANALISIS INDEKS KEANDALAN PADA JARINGAN DISTRIBUSI 20 KV PENYULANG KA.1 , KU.1 DAN TW.1 DI PT. PLN (Persero) UP3 LUBUK PAKAM

R. Harahap, Hasbie Farizi, Surya Tarmizi Kasim, Syafruddin HS.

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara,

Jl. Dr. T. Mansyur No. 9, Medan, 20155, Sumatera Utara, Indonesia

harahaprj@yahoo.com ; hasbie044@gmail.com;

surya_et@yahoo.com; syafruddinhs@gmail.com

Abstrak

Pada penelitian ini akan membahas mengenai analisis keandalan jaringan distribusi 20kV dengan menggunakan metode RIA dan FMEA untuk menghitung indeks keandalan SAIDI, SAIFI, CAIDI, CAIFI dan MAIFI berdasarkan laju kegagalan, lama perbaikan dan durasi kegagalan. Hasil perhitungan akan dibandingkan dengan standar SPLN 68-2:1986 dan IEEE std. 1366-2003. Serta menghitung nilai ekonomi, akibat daya yang tidak tersalurkan dengan menggunakan indeks ENS. Berdasarkan hasil analisis metode RIA dan FMEA indeks keandalan SAIFI dan SAIDI penyulang KA.1 dan TW.1 dikatakan andal karena tidak melebihi standar SPLN 68-2:1986 dengan nilai SAIFI 3,2 kali/tahun dan SAIDI 21,9 jam /tahun. Penyulang KU.1 nilai indeks keandalan SAIDI dikatakan andal karena tidak melebihi standar SPLN No. 68-2:1986 dengan nilai 21,9 jam/tahun sedangkan indeks keandalan SAIFI belum dapat dikatakan andal karena melebihi standar SPLN No.68-2:1986 dengan nilai 3,2 kali/tahun. Untuk penyulang KA.1, KU.1 dan TW.1 metode RIA belum dapat dikatakan andal karena nilai indeks keandalan SAIFI dan SAIDI melebihi standar IEEE std. 1366- 2003. Untuk metode FMEA dikatakan andal karena tidak melebihi standar IEEE std. 1366-2003 dengan nilai SAIFI 1,45 kali/tahun dan SAIDI 2,3 jam/tahun. Nilai ekonomi penyulang KA.1, KU.1 dan TW.1 akibat dari energi listrik yang tidak tersalurkan, untuk penyulang KA.1 sebesar Rp 56.348.843,- lalu untuk penyulang KU.1 sebesar Rp 246.827.461 dan untuk penyulang TW.1 sebesar Rp 67.994.852,-.

Kata Kunci : Keandalan, RIA, FMEA, Nilai Ekonomi.

I. PENDAHULUAN

Dalam sebuah sistem ketenagalistrikan, fungsi utama dari sistem distribusi adalah untuk menyalurkan energi listrik secara andal dan terus menerus dari jaringan transmisi kepada pelanggan. Tenaga listrik yang merupakan komponen penting dalam kehidupan masyarakat untuk memenuhi berbagai kebutuhan serta dalam rangka peningkatan kualitas hidup masyarakat, tentu penting untuk terus dilakukannya peningkatan kualitas mutu kelistrikan oleh penyedia jasa yang bersangkutan. Dalam hal ini, PT. PLN (Persero) merupakan satu-satunya perusahaan milik negara yang bertanggung jawab atas jasa penyediaan listrik sampai penyaluran energi listrik kepada konsumen [1].

Faktor keandalan perlu menjadi perhatian dalam mengoperasikan sistem jaringan distribusi. Gangguan yang banyak terjadi pada jaringan distribusi saat ini tentu saja dapat mempengaruhi keandalan dalam penyaluran energi listrik.. Indeks-indeks keandalan yang sering dipakai dalam suatu sistem distribusi adalah SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*), SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*), CAIDI (*Customer Average Interruption Duration Index*), CAIFI (*Customer Average Interruption Frequency Index*), serta MAIFI (*Momentary Average Interruption Frequency Index*). Dalam penelitian ini penulis menggunakan metode RIA (*Reliability Index*

Assesment) dan Metode FMEA (*Failure Mode Effect Analysis*) untuk mendapatkan indeks keandalan sistem tenaga listrik. Indeks keandalan akan diperhitungkan untuk mendapatkan keandalan sistem berdasarkan SPLN 68-2 : 1986 [7] dan Standar IEEE Std.1366-2003 [8]. Penelitian ini juga akan membahas mengenai nilai ekonomi yaitu *Energy Not Supply* (ENS) berupa nilai rupiah dari energi listrik yang tidak tersalurkan saat terjadi gangguan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Struktur tenaga listrik atau sistem tenaga listrik merupakan sistem yang sangat besar dan kompleks karena terdiri atas komponen peralatan atau mesin listrik seperti generator, transformator, beban dan alat-alat pengaman dan pengaturan yang saling dihubungkan membentuk suatu sistem yang digunakan untuk membangkitkan, menyalurkan, dan menggunakan energi listrik. Namun secara mendasar sistem tenaga listrik dapat dikelompokkan atas 3 bagian utama yaitu :

1. Sistem Pembangkitan
2. Sistem Transmisi
3. Sistem Distribusi

Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Jaringan Distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*Bulk Power Source*) sampai ke konsumen. Jadi fungsi distribusi tenaga listrik adalah:

- Pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan).
- Merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, karena catu daya pada pusat-pusat beban (pelanggan) dilayani langsung melalui jaringan distribusi.

Tegangan sistem distribusi terbagi dua, yaitu: distribusi primer (20kV) dan distribusi sekunder (380/220V). Jaringan distribusi primer dengan tegangan 20kV sering disebut Sistem Distribusi Tegangan Menengah dan jaringan distribusi sekunder dengan tegangan 380/220V sering disebut Jaringan Tegangan Rendah [9]

1.1 Keandalan Sistem Distribusi

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. Sistem distribusi harus dipertimbangkan dari segi keandalan ataupun pemodelan keandalan dibandingkan sistem pembangkit. Hal ini dikarenakan biaya investasi yang besar pada sistem pembangkit dan kegagalan pada pembangkit dapat menyebabkan dampak bencana yang sangat luas untuk kehidupan manusia dan lingkungannya. Terdapat tiga parameter dasar dalam keandalan yang biasa digunakan untuk mengevaluasi sistem distribusi radial yaitu angka kegagalan rata-rata (λ_s), waktu pemadaman rata-rata (r_s) dan waktu pemadaman tahunan (U_s) [10].

- Laju Kegagalan (λ)

Laju kegagalan adalah nilai rata-rata dari jumlah kesalahan persatuan waktu pada selang waktu pengamatan waktu tertentu (T), dan dinyatakan dalam satuan kegagalan per tahun. Pada suatu pengamatan, nilai laju kegagalan dinyatakan sebagai berikut [12]:

$$\lambda = \frac{f}{T} \quad (1)$$

λ = Angka Kegagalan (kegagalan/tahun)

f = Banyaknya kegagalan yang terjadi pada waktu T

T = Selang waktu pengamatan (tahun)

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

- Laju Perbaikan (r)

Laju perbaikan adalah waktu yang dibutuhkan suatu alat yang gagal atau keluar untuk beroperasi kembali dengan cara diganti atau

diperbaiki, dengan satuan jam. Dalam perhitungannya untuk mendapatkan waktu kegagalan rata-rata yang dialami oleh sebuah alat, [12] maka :

$$r = \frac{U}{\lambda} \quad (2)$$

U = Waktu kegagalan per tahun (Jam/tahun).

λ = Angka kegagalan per tahun (Gangguan/tahun)

r = Waktu kegagalan (Jam)

- Laju Perbaikan per Tahun (U)

Laju perbaikan per tahun adalah banyaknya waktu perbaikan rata-rata per tahun pada suatu alat. Diperoleh dengan cara mengalikan angka kegagalan dan waktu keluar alat tersebut, [12] maka :

$$U = \sum_{i=1}^n \lambda_i r_i \quad (3)$$

U = Waktu kegagalan per tahun (Jam/tahun).

λ = Angka kegagalan per tahun (Gangguan/tahun)

r = Waktu kegagalan (Jam)

1.2 Indeks Keandalan Distribusi

Secara kelistrikan, indeks merupakan suatu angka yang dibuat sedemikian rupa berdasarkan data-data penunjang untuk dijadikan sebagai perbandingan dari keandalan pada suatu sistem ataupun peralatan, yaitu angka kegagalan rata-rata lamanya gangguan dan waktu kegagalan tahunan. Indeks keandalan yang dipakai pada sistem distribusi dijelaskan dalam uraian berikut ini [10].

- System Average Interruption Frequency Index (SAIFI)*

SAIFI merupakan suatu indeks yang menyatakan banyaknya gangguan (pemadaman) yang terjadi dalam selang waktu tertentu (1 tahun) pada pelanggan dalam suatu sistem secara keseluruhan. Untuk menghitung indeks ini, digunakan persamaan 4 [10] :

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i N_i}{N} \quad (4)$$

Keterangan

λ_i : Jumlah kegagalan rata-rata (kegagalan/tahun)

N_i : Jumlah pelanggan yang dilayani pada titik beban- i

N : Jumlah pelanggan yang dilayani

Biasanya SAIFI diukur dalam unit interupsi per pelanggan dalam jangka satu tahun. Perhitungan ini membutuhkan data-data jumlah pelanggan yang mengalami pemadaman dan frekuensi pemadaman yang terjadi dalam jangka pertahun.

- System Average Interruption Duration Index (SAIDI)*

SAIDI merupakan suatu indeks yang menyatakan lamanya gangguan (pemadaman) yang terjadi dalam selang waktu tertentu (1 tahun) pada pelanggan dalam suatu sistem secara keseluruhan. Untuk memperoleh nilai SAIDI dapat dilihat pada persamaan 5 [10]

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^n U_i N_i}{N} \quad (5)$$

Keterangan :

U_i : Waktu pemadaman pelanggan dalam periode tertentu (jam/tahun)

N_i :Jumlah pelanggan yang dilayani pada titik beban-
i

N : Jumlah pelanggan yang dilayani

Biasanya SAIDI umum digunakan sebagai indikator keandalan daya listrikoleh utilitas. SAIDI diukur dalam unit waktu, (menit atau jam) diatas jangka setahun. Perhitungan ini membutuhkan data-data tentang waktu pemadaman padasetiap gangguan.

3. Costumer Avarage Interruption Duration Index (CAIDI)

CAIDI merupakan suatu indeks yang menginformasikan tentang durasipemadaman rata-rata konsumen untuk setiap gangguan yang terjadi. Untukmenghitung indeks ini digunakan persamaan 6[10].

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI} \quad (6)$$

4. Costumer Avarage Interruption Frequency Index (CAIFI)

CAIFI merupakan suatu indeks yang menyatakan banyaknya gangguanyang terjadi dalam selang waktu tertentu (1 tahun) pada pelanggan dalam ruanglingkup yang lebih kecil. Untuk menghitung indeks ini, menggunakan persamaan7[10].

$$CAIFI = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i N_i}{\sum_{i=1}^n U_i N_i} \quad (7)$$

Keterangan :

λ_i : Angka kegagalan rata-rata

N_i : Jumlah pelanggan yang dilayani pada titik beban-
i

U_i : Waktu pemadaman pelanggan dalam periode tertentu (jam/tahun)

5. Momentary Average Interuption Frequency Index(MAIFI)

MAIFI merupakan suatu indeks yang menginformasikan frekuensi pemadaman rata-rata untuk setiap konsumen dalam kurun waktu setahun pada suatu area yang dievaluasi yang disebabkan oleh momentary interruption, cara menghitungnya yaitu total frekuensi pemadaman dari konsumen karena momentary interruption dalam setahun dibagi dengan jumlah total konsumen yang dilayani. Untuk

menghitung indeks ini dapat digunakan persamaan 8[14]

$$MAIFI = \frac{\sum_{m=1}^n \lambda_m N_m}{N} \quad (8)$$

Keterangan :

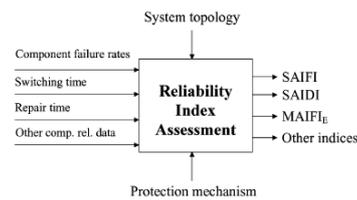
λ_m : Laju kegagalan saluran *momentary interruption*

N_m :Jumlah pelanggan dalam saluran yang terkena *momentary interruption*

N : Total pelanggan pada system

1.3 Metode RIA

Metode RIA (*Reliability Index Assessment*) adalah sebuahpendekatan yang digunakan untuk memprediksi gangguan padasistem distribusi berdasarkan topologi sistem dan data-data mengenaicomponent reliability. Secara fungsional RIA mendata kegagalanyang terjadi pada peralatan secara komprehensif, lalumengidentifikasi kegagalan tersebut, dan menganalisis modekegagalan tersebut[15].Metode ini juga memperhitungkan faktor gangguan sesaat, dimana faktor gangguan sesaat tidak diperhitungkan oleh metode FMEA dan *section technique*.



Gambar 1. Input dan Output dari Metode RIA

Dari gambar 1 dapat dilihat bahwa syarat-syarat dari metodeRIA adalah Single Line Diagram,besertadata beban, saluran, dan trafo,Data jumlah pelanggan padasetiap titik beban.

Sebelum melakukan analisis keandalan pada sebuah sistem, harus menentukan terlebih dahulu komponen-komponen dari *reliability data* yang akan digunakan, yaitu sebagai berikut [16]:

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

Pada metode RIA ada indeks keandalan yang dihitung, meliputi laju kegagalan. berikut merupakan persamaan menghitung laju kegagalan menggunakan metode RIA (Reliability Index Assesment). Persamaan 9 [16].

$$\lambda_i = (\text{suistained } \lambda + \text{momentary } \lambda) \times \text{panjang saluran} \quad (9)$$

Keterangan :

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

λ_s : *Suistained failure rate* ; ini adalah frekuensi dari *fault* yang membutuhkan kru untuk memperbaikinya .

λ_m : *Momentary failure rate* ; Ini adalah frekuensi dari *fault* yang akan hilang dengan sendirinya .

Panjang saluran ; panjang saluran antar trafo (km)
Sementara,pada persamaan 10

$$\mu_i = (\lambda_i \times r) \quad (10)$$

Keterangan :

μ_i : Durasi kegagalan (jam/tahun)

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

R : *Repair time* (jam)

Persamaan tersebut dapat di input ke dalam rumus SAIDI dan SAIFI.

1.4 Failure Mode Effect Analysis (FMEA)

FMEA (*Failure Modes and Effect Analysis*) merupakan suatu bentuk pendekatan yang melibatkan analisa *bottom-up*, bertujuan mengidentifikasi mode-mode kegagalan penyebab kegagalan, serta dampak kegagalan yang ditimbulkan oleh tiap-tiap komponen terhadap sistem. Dengan kata lain, FMEA mempertimbangkan kegagalan sistem sebagai hasil dari kegagalan komponen-komponen penyusun sistem tersebut[17]

Untuk melakukan analisis keandalan, perlu diketahui nilai atau perhitungan analisa keandalan berupa MTTF, MTTR yang perlu diketahui sebelum dilakukannya proses perhitungan analisa keandalan dalam metode ini.[18]

1. MTTF (*Mean Time to Failure*)

Merupakan rumus yang digunakan untuk mengetahui waktu rata-rata kegagalan yang terjadi selama beroperasinya:

$$MTTF = \frac{T1+T2+T3+\dots +Tn}{n} \quad (11)$$

Dimana : T=waktu operasi
n = Jumlah kegagalan

2. MTTR (*Mean Time to Repair*)

Merupakan rumus yang digunakan untuk mengetahui waktu melakukan perbaikan terhadap terjadinya kegagalan yang terjadi selama beroperasinya:

$$MTTR = \frac{L1+L2+L3+\dots +Ln}{n} \quad (12)$$

Dimana : L= waktu perbaikan
n = jumlah perbaikan

3. Laju kegagalan

Frekuensi suatu sistem/komponen yang mengalami kegagalan kerja, dengan dilambangkan λ (lambda), selama sistem bekerja laju kegagalan tergantung pada hal tersebut. Dapat dirumuskan:

$$\lambda = \frac{1}{MTTF} \quad (13)$$

Dimana : λ = laju kegagalan

MTTF= Waktu rata-rata kegagalan

4. Laju perbaikan

Laju perbaikan atau downtime rate adalah frekuensi lamanya suatu sistem / komponen. Rumus laju perbaikan:

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (14)$$

Dimana : μ = Laju perbaikan

MTTR= waktu rata-rata perbaikan

Nilai laju kegagalan dan perbaikan yang telah didapatkan melalui Persamaan 13 dan 14 dapat dimasukkan kedalam persamaan SAIFI dan SAIDI.

1.5 Nilai Ekonomi

Nilai ekonomi merupakan salah satu hal penting yang harus dipertimbangkan dalam sebuah system distribusi jaringan tenaga listrik terutama bagi pihak yang menyediakan tenaga listrik yaitu PT.PLN (Persero).Ada beberapa indeks tambahan yang umumnya digunakan untuk mengevaluasi keandalan suatu system distribusi, indeks ini berorientasi pada beban serta energy.Beberapa diantaranya dapat dilihat pada persamaan 15 dan 16 [18]

1. ENS (*Energy Not Supplied*)

ENS adalah indeks keandalan yang menyatakan jumlah energi yang tidak disalurkan oleh sistem selama terjadinya gangguan pemadaman. Didalamnya juga termasuk banyaknya KWh yang hilang akibat adanya pemadaman listrik.[20]

$$ENS = \sum[Gangguan(KW) \times Durasi (h)] \quad (15)$$

Keterangan :

ENS : Energi tak tersalurkan (Kwh)

Gangguan : Jumlah daya yang mengalami gangguan (kW)

Durasi : lamanya gangguan terjadi (h)

Untuk rumus mencari jumlah daya yang mengalami gangguan dapat dilihat pada persamaan 17.[20]

$$Gangguan = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos\phi \quad (17)$$

Keterangan :

Gangguan : Jumlah daya yang mengalami gangguan

V : Tegangan Menengah Fasa ke fasa 20 (kV) = 20.000 V

I : Arus yang terjadi saat gangguan (A)

Cos φ: 0.8 (rata-rata cos phi pada masing-masing penyulang)

2. AENS (*Average Energy Not Supplied*)

AENS adalah indeks rata-rata energi yang tidak dapat disalurkan akibat terjadinya pemadaman. AENS dinyatakan dengan perbandingan antara jumlah energi yang hilang saat terjadi pemadaman dengan jumlah pelanggan yang masih dialiri energi listrik.

$$AENS = \frac{ENS}{N} \quad (18)$$

Keterangan :

ENS : Jumlah energy yang tidak tersalurkan oleh system

N : Jumlah pelanggan yang dilayani

2.8 Nilai Rupiah

Tarif dasar listrik adalah tarif yang dikenakan oleh pemerintah untuk konsumen listrik. Pada penelitian ini TDL (Tarif Dasar Listrik) digunakan untuk mendapatkan nilai ekonomi berupak kerugian rupiah yang dialami pihak PLN disebabkan oleh gangguan dalam sistem distribusi. Karena dengan adanya energi tak tersalurkan maka ada Kwh yang tidak dapat dijual kekonsumen, sehingga nilai rupiah yang seharusnya dijadikan pendapatan menjadi nilai rupiah yang merugikan. Golongan Tarif Dasar Listrik yang digunakan dalam persamaan ini mengacu pada Peraturan Menteri ESDM No. 28 Tahun 2016 Tentang Tarif Tenaga Listrik yang disediakan oleh PT.PLN dengan golongan I-3/TM sebesar Rp 1.115,- Cara yang digunakan dalam menentukan nilai nominal kerugian rupiah pada penelitian ini hampir sama dengan menghitung tarif pemakaian listrik pada umumnya, namun dalam penelitian ini Kwh yang dihitung adalah Kwh yang tidak dapat dijual yaitu nilai energi tak tersalurkan (ENS) [21]

$$\text{Nilai Rupiah ENS} = ENS \times TDL \quad (19)$$

Keterangan :

ENS : Energi tak tersalurkan

TDL : Tarif Dasar Listrik Gol I-3 /TM

II. METODE PENELITIAN

2.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan pada jaringan distribusi 20 kV yaitu pada PT.PLN (Persero) UP3 Lubuk Pakam. Penelitian dilaksanakan selama 1 bulan setelah proposal penelitian selesai disetujui.

2.2 Data yang Diperlukan

Adapun data-data yang diperlukan dalam pelaksanaan penelitian ini adalah :

1. Single Line Diagram PT.PLN (Persero) UP3 Lubuk Pakam
2. Data Jumlah pelanggan untuk tiap titik beban
3. Data panjang saluran pada *feeder* PT.PLN (Persero) UP3 Lubuk Pakam
4. Data realisasi dan target kinerja keandalan PT.PLN (Persero)

5. Data gangguan pada *feeder* di PT. PLN (Persero) UP3 Lubuk Pakam selama tahun 2020
6. Data laju kegagalan rata-rata
7. Data lama pemadaman dan lainnya
8. Data energy yang tidak tersalurkan selama satu tahun

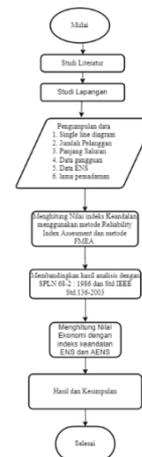
2.3 Variabel yang diamati

Variabel yang diamati pada penelitian ini adalah :

1. SAIDI (System Average Interruption Duration Index)
2. SAIFI (System Average Interruption Frequency Index)
3. CAIFI (Customer Average Interruption Frequency Index)
4. CAIDI (Customer Interruption Duration Index)
5. MAIFI (Momentary Average Interruption Frequency Index)
6. ENS (Energy Not Supplied)
7. AENS (Average Energy Not Supplied)

2.4 Prosedur Penelitian

Dalam melakukan penelitian, flowchart dapat dilihat pada Gambar 2



Gambar 2. Flowchart Penelitian

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data Penelitian

3.1.1 Penyulang KA.1

Penyulang KA.1 merupakan jaringan distribusi primer atau jaringan tegangan menengah 20 kV yang terdapat di PT.PLN UP3 Lubuk Pakam, penyulang tersebut di suplai dari Trafo Daya yang berasal dari Gardu Induk Kuala Namu dengan daya 30 MVA, panjang penyulang tersebut yaitu 34,7 kms, dengan jumlah trafo 77 buah dan melayani 8542 pelanggan, dengan 4 main feeder dan 10 lateral dan dibagi menjadi 3 section jaringan dengan dibatasi dengan LBS (*Load Break Switch*) dengan berbatasan langsung dengan beberapa penyulang

yang ada pada PT.PLN UP3 Lubuk Pakam.Penyulang ini menggunakan konfigurasi struktur Jaringan Loop, pada sistem konfigurasi struktur jaringan loop pasokan energi listrik berasal dari beberapa gardu induk, jadi sistem penyulang saling membantu apabila terjadi gangguan atau black out[9].

3.1.2 Penyulang KU.1

Penyulang KU.1 merupakan jaringan distribusi primer atau jaringan tegangan menengah 20 kV yang terdapat di PT.PLN UP3 Lubuk Pakam, penyulang tersebut di suplai dari Trafo Daya yang berasal dari Gardu Induk Kuala Namu dengan daya 30 MVA, panjang penyulang tersebut yaitu 113,2 kms, dengan jumlah trafo 209 buah dan melayani 16330 pelanggan,dan dibagi menjadi 5 section jaringan dengan dibatasi dengan LBS (*Load Break Switch*) dan berbatasan langsung dengan beberapa penyulang yang ada pada PT.PLN UP3 Lubuk Pakam.Penyulang ini menggunakan konfigurasi struktur Jaringan Loop, pada sistem konfigurasi struktur jaringan loop pasokan energi listrik berasal dari beberapa gardu induk, jadi sistem penyulang saling membantu apabila terjadi gangguan atau black out[9]

3.1.3 Penyulang TW.1

Penyulang TW.1 merupakan jaringan distribusi primer atau jaringan tegangan menengah 20 kV yang terdapat di PT.PLN UP3 Lubuk Pakam, penyulang tersebut di suplai dari Trafo Daya yang berasal dari Gardu Induk Tanjung Morawa dengan daya 60 MVA, panjang penyulang tersebut yaitu 30,2 kms, dengan jumlah trafo 113 buah dan melayani 7972 pelanggan,dan dibagi menjadi 5 section jaringan dengan dibatasi dengan LBS (*Load Break Switch*) dan berbatasan langsung dengan beberapa penyulang yang ada pada PT.PLN UP3 Lubuk Pakam. Penyulang ini menggunakan konfigurasi struktur Jaringan Loop.

3.2 Analisis Keandalan Metode RIA

Tahapan pertama yaitu dengan menghitung jarak antar trafo (*line*), dengan membagi penyulang KA.1 menjadi tiga section, yaitu *section 1*, *section 2* dan *section 3*.

Tahapan berikutnya, yaitu menghitung nilai λ_i dengan menjumlahkan nilai *sustained* λ dengan *momentary* λ lalu hasilnya dikalikan dengan panjang saluran.Lalu menghitung nilai μ dengan perkalian antara nilai r sesuai SPLN 68-2:1986 dan nilai λ_i . Dan untuk nilai λ_m cara menghitungnya dengan perkalian antara nilai *momentary* λ dengan panjang saluran.

- Menghitung nilai λ_i , μ , dan λ_m pada tiap *section* pada penyulang KA.1

Dalam menghitung nilai indeks kegagalan peralatan tiap *section* dapat menggunakan persamaan 9 dan 10.Maka diambil satu contoh perhitungan pada *section 1* dihitung per peralatan yang ada pada

section 1 , T1 merupakan Trafo pada L1 (*line 1*) untuk contoh perhitungannya yaitu

$$\begin{aligned} \lambda_i T_1 &= 0.005 \text{ (fault/year)} \\ r T_1 &= 10 \text{ (hour/year)} \\ \mu T_1 &= \lambda_i T_1 \times r T_1 \\ &= 0.005 \times 10 \\ \mu T_1 &= 0.05 \text{ (hour/year)} \\ \text{sustained } \lambda_{L1} &= 0.2 \text{ (fault/year)} \\ \text{momentary } \lambda_{L1} &= 0.003 \text{ (fault/year)} \\ r &= 3 \text{ (hour/year)} \\ \lambda_i L_1 &= (\text{sustained } \lambda + \text{momentary } \lambda) \times \text{panjang saluran line 1} \\ &= (0.2 + 0.003) \times 0.18 \\ \lambda_i L_1 &= 0.03654 \text{ (fault/year)} \\ \mu L_1 &= \lambda_i \times r \\ &= 0.03654 \times 3 \\ \mu L_1 &= 0.10962 \text{ (hour/year)} \\ \lambda_m L_1 &= \text{momentary } \lambda \times \text{panjang saluran L1} \\ &= 0.003 \times 0.18 \\ \lambda_m L_1 &= 0.00054 \text{ (fault/year)} \end{aligned}$$

Setelah melakukan perhitungan keandalan peralatan masing-masing *section* pada penyulang KA.1, maka akan didapatkan nilai λ_i , μ , dan λ_m untuk masing – masing *section* dari penjumlahan keseluruhan nilai indeks kegagalan peralatan pada penyulang KA.1. Untuk nilai λ_i , μ , dan λ_m terdapat pada Tabel 1 Data nilai indeks kegagalan peralatan penyulang KA.1 .

Tabel 1. Data nilai indeks kegagalan peralatan penyulang KA.1

| Indeks Keandalan | Section 1 | Section 2 | Section 3 |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|
| λ_i (fault/year) | 1.03825 | 1.91089 | 1.37497 |
| μ_i (hour/year) | 3.63275 | 6.84567 | 5.23791 |
| λ_m (fault/year) | 0.01425 | 0.02589 | 0.01797 |

Tahap selanjutnya yaitu, menghitung indeks keandalan SAIDI, SAIFI, CAIDI, CAIFI , dan MAIFI. Dalam menghitung indeks tersebut data yang dibutuhkan yaitu, jumlah pelanggan pada tiap titik beban trafo, dan jumlah keseluruhan pelanggan pada penyulang KA.1

Dalam menghitung nilai SAIFI, SAIDI, CAIDI, CAIFI dan MAIFI pada penyulang KA.1. Diambil satu contoh perhitungannya pada *Load Point 1*,

- Untuk nilai SAIFI yaitu dengan mengalikan λ_{LP1} dengan N_{LP1} (jumlah pelanggan pada *Load Point 1*) lalu dibagi dengan jumlah pelanggan pada penyulang tersebut.
- Untuk nilai SAIDI yaitu dengan mengalikan nilai μ_{LP1} dengan N_{LP1} lalu dibagi dengan jumlah pelanggan pada penyulang tersebut.
- Untuk nilai CAIFI yaitu dengan mengalikan λ_{LP1} dengan N_{LP1} lalu dibagi dengan perkalian antara μ_{LP1} dengan jumlah pelanggan pada penyulang tersebut.
- Untuk nilai MAIFI yaitu dengan mengalikan λ_{mLP1} dengan N_{LP1} lalu dibagi dengan jumlah pelanggan pada penyulang tersebut.

Berikut perhitungan indeks keandalan pada penyulang KA.1 *section 1 LP1*.

$$\begin{aligned}
 \text{SAIFI LP1} &= \frac{\lambda_{LP1} \times N_{LP1}}{\sum N} \\
 &= \frac{1.03825 \times 6}{8542} \\
 \text{SAIFI LP1} &= \mathbf{0.000729 \text{ kali/tahun}} \\
 \text{SAIDI LP1} &= \frac{\mu_{LP1} \times N_{LP1}}{\sum N} \\
 &= \frac{3.63275 \times 6}{8542} \\
 \text{SAIDI LP1} &= \mathbf{0.002552 \text{ jam/tahun}} \\
 \text{MAIFI LP1} &= \frac{\lambda_{mLP1} \times N_{LP1}}{\sum N} \\
 &= \frac{0.01425 \times 6}{8542} \\
 \text{MAIFI LP1} &= \mathbf{9.3743 \times 10^{-9} \text{ kali/tahun}} \\
 \text{CAIFI LP1} &= \frac{\lambda_{LP1} \times N_{LP1}}{\mu_{LP1} \times \sum N} \\
 &= \frac{1.03825 \times 6}{3.63275 \times 8542} \\
 \text{CAIFI LP1} &= \mathbf{0.000201 \text{ kali/tahun}}
 \end{aligned}$$

Setelah melakukan perhitungan tiap titik beban pada masing-masing *section* di penyulang KA.1, maka didapatkan jumlah keseluruhan nilai masing-masing indeks keandalan pada tiap *section* di penyulang KA.1, jumlah keseluruhan nilai tersebut dapat dilihat pada Tabel 2

Tabel 2. Nilai SAIFI,SAIDI,CAIDI,CAIFI dan MAIFI penyulang KA.1

| Sec. | SAIFI | SAIDI | MAIFI | CAIFI | CAIDI |
|------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 01 | 0.101248 | 0.354259 | 0.00138 | 0.027871 | 3.498916 |
| 02 | 0.929684 | 3.346119 | 0.012563 | 0.134821 | 3.599199 |
| 03 | 0.573682 | 2.185426 | 0.007498 | 0.109525 | 3.809472 |
| JLH | 1.604615 | 5.885805 | 0.02144 | 0.272217 | 10.90759 |

Setelah melakukan langkah langkah tersebut maka Nilai keandalan metode RIA dapat dilihat pada Tabel 3

Tabel 3. Nilai SAIFI,SAIDI,CAIDI,CAIFI dan MAIFI penyulang KA.1, KU.1 dan TW 1

| | SAIFI | SAIDI | MAIFI | CAIFI | CAIDI |
|------|----------|----------|----------|----------|----------|
| KA.1 | 1.604615 | 5.885805 | 0.02144 | 0.272217 | 10.90759 |
| TW.1 | 2.198818 | 8.108126 | 0.048675 | 0.444504 | 11.18804 |
| KU.1 | 4.181862 | 14.22834 | 0.058248 | 0.292581 | 17.18561 |

3.3 Analisis Metode FMEA

Dalam menganalisis keandalan dengan metode FMEA langkah pertama yang dilakukan adalah dengan mendapatkan data pemadaman dan data frekuensi pemadaman. Lalu melakukan perhitungan dasar terhadap data yang didapat. Setelah mendapatkan data jumlah gangguan dan durasi padam lalu menghitung laju kegagalan dan laju perbaikan berdasarkan gangguan yang terjadi pada penyulang tersebut dalam waktu 1 tahun, karena laju kegagalan dan laju perbaikan berdasarkan gangguan, maka menggunakan perhitungan MTTF (*Mean Time to Failure*) dan MTTR (*Mean Time to Repair*). Dalam menghitung MTTF dan MTTR maka diambil satu contoh perhitungan yaitu untuk penyulang TW.1 sebagai berikut

$$\begin{aligned}
 \text{MTTF}_{TW.1} &= \frac{\text{jumlah h waktu total operasi sistem}}{\text{jumlah h gangguan}} \\
 &= \frac{365 - (2,7 \times 24)}{6} \\
 \text{MTTF}_{TW.1} &= 60,81458 \text{ hari/tahun} \\
 \text{MTTR}_{TW.1} &= \frac{\text{total waktu perbaikan}}{\text{jumlah h gangguan}} \\
 &= \frac{2,7}{6} \\
 \text{MTTR}_{TW.1} &= 0,45 \text{ jam/tahun}
 \end{aligned}$$

Setelah mendapatkan nilai MTTF dan MTTR pada ketiga penyulang tersebut lalu dimasukkan kedalam persamaan untuk menghitung laju kegagalan dan laju perbaikan Maka diambil contoh perhitungan yaitu pada penyulang TW.1 sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \lambda_{TW.1} &= \frac{1}{\text{MTTF}} \\
 &= \frac{1}{60,81458} \\
 \lambda_{TW.1} &= 0,016443 \text{ fault/year} \\
 \mu_{TW.1} &= \frac{1}{\text{MTTR}} \\
 &= \frac{1}{0,45} \\
 \mu_{TW.1} &= 2,22222 \text{ hour/year}
 \end{aligned}$$

Adapun hasil perhitungannya dapat dilihat pada Tabel 3

Tabel 4. Laju kegagalan dan perbaikan penyulang KA.1, KU.1 dan TW.1

| Penyulang | Λ | μ |
|-----------|-----------|----------|
| TW .1 | 0.016443 | 2.222222 |
| KU.1 | 0.041115 | 3.75 |
| KA.1 | 0.019183 | 2.978723 |

Setelah mendapatkan nilai laju kegagalan dan laju perbaikan tiap penyulang, maka langkah selanjutnya yaitu menghitung nilai indeks keandalan SAIDI, SAIFI, CAIDI, dan CAIFI dengan memasukkan nilai laju kegagalan dan perbaikan dengan menggunakan persamaan 2.4, 2.6, 2.8 dan 2.9. Maka diambil contoh perhitungannya yaitu pada penyulang TW.1 sebagai berikut

$$SAIFI_{TW.1} = \frac{\lambda_{tw} \times N_i}{\sum N} = \frac{0,016443424 \times 3484}{7972} = 0.007186 \text{ kali/tahun}$$

$$SAIDI_{LP1} = \frac{\mu_{tw} \times N_i}{\sum N} = \frac{2,22222 \times 3484}{7972} = 0.971177 \text{ jam/tahun}$$

$$CAIFI_{TW.1} = \frac{\lambda_{tw} \times N_i}{\mu_{tw} \times \sum N} = \frac{0,016443424 \times 3484}{2,22222 \times 7972} = 0.03234 \text{ kali/tahun}$$

$$CAIDI_{TW.1} = \frac{SAIDI}{SAIFI} = \frac{0,9711777}{0,007186} = 135,145 \text{ jam/tahun}$$

Untuk hasil perhitungannya terdapat pada Tabel 5.

Tabel 5. SAIFI,SAIDI,CAIDI,CAIFI penyulang KA.1, KU.1 dan TW.1

| | SAIFI | SAIDI | CAIDI | CAIFI |
|------|----------|----------|----------|----------|
| TW.1 | 0.007186 | 0.971177 | 135.1435 | 0.003234 |
| KU.1 | 0.012975 | 1.205144 | 92.88393 | 0.003523 |
| KA.1 | 0.011179 | 1.735903 | 155.2775 | 0.003753 |

3.4 Perbandingan Nilai Indeks Keandalan Metode RIA dan FMEA dengan standar SPLN dan IEEE

Membandingkan nilai SAIFI dan SAIDI dengan standar SPLN 68-2:1986 dan IEEE std.1336-2003. perbandingan indeks keandalan dapat dilihat pada Tabel 5 untuk penyulang KA.1, Tabel 6 untuk penyulang KU.1 dan Tabel 7 untuk penyulang TW.1.

Tabel 6. Perbandingan indeks keandalan untuk penyulang KA.1

| Indeks Keandalan | RIA | FMEA | SPLN 68-2:1986 | IEEE std. 1336-2003 |
|--------------------|----------|-------------|----------------|---------------------|
| SAIFI (kali/tahun) | 1.604615 | 0.011179362 | 3.2 | 1.45 |
| SAIDI (Jam/Tahun) | 5.885805 | 1.735903197 | 21 | 2.3 |

Berdasarkan Tabel 6 penyulang KA.1 untuk nilai SAIFI menggunakan metode RIA sudah sesuai dengan standar SPLN 68-2 : 1986 tetapi belum sesuai dengan standar IEEE, untuk nilai SAIFI menggunakan metode FMEA sudah sesuai standar SPLN 68-2 : 1986 dan standar IEEE. Dan untuk nilai SAIDI menggunakan metode RIA sudah sesuai standar SPLN 68-2 : 1986 tetapi belum sesuai dengan standar IEEE, untuk nilai SAIDI menggunakan metode FMEA sudah sesuai standar SPLN 68-2 : 1986 dan standar IEEE.

Tabel 7. Perbandingan indeks keandalan untuk penyulang KU.1

| Indeks Keandalan | RIA | FMEA | SPLN 68-2:1986 | IEEE std. 1336-2003 |
|--------------------|-------------|-------------|----------------|---------------------|
| SAIFI (kali/tahun) | 4.181862054 | 0.01297473 | 3.2 | 1.45 |
| SAIDI (Jam/Tahun) | 14.22834244 | 1.205143907 | 21 | 2.3 |

Berdasarkan Tabel 7 penyulang KU.1 untuk nilai SAIFI menggunakan metode RIA belum sesuai dengan standar SPLN 68-2 : 1986 dan standar IEEE, untuk nilai SAIFI menggunakan metode FMEA sudah sesuai standar SPLN 68-2 : 1986 dan standar IEEE. Dan untuk nilai SAIDI menggunakan metode RIA sudah sesuai standar SPLN 68-2 : 1986 tetapi belum sesuai dengan standar IEEE, untuk nilai SAIDI menggunakan metode FMEA sudah sesuai standar SPLN 68-2 : 1986 dan standar IEEE.

Tabel 8. Perbandingan indeks keandalan untuk penyulang TW.1

| Indeks Keandalan | RIA | FMEA | SPLN | IEEE |
|--------------------|-------------|-------------|------|------|
| SAIFI (kali/tahun) | 2.198818493 | 0.007186263 | 3.2 | 1.45 |
| SAIDI (Jam/Tahun) | 8.108125825 | 0.971176897 | 21 | 2.3 |

Berdasarkan Tabel 8 penyulang TW.1 untuk nilai SAIFI menggunakan metode RIA sudah sesuai dengan standar SPLN 68-2 : 1986 tetapi belum sesuai dengan standar IEEE, untuk nilai SAIFI menggunakan metode FMEA sudah sesuai standar SPLN 68-2 : 1986 dan standar IEEE. Dan untuk nilai SAIDI menggunakan metode RIA sudah sesuai standar SPLN 68-2 : 1986 tetapi belum sesuai dengan standar IEEE, untuk nilai SAIDI menggunakan metode FMEA sudah sesuai standar SPLN 68-2 : 1986 dan standar IEEE.

3.5 Analisis Ekonomi

Dalam melakukan analisis nilai ekonomi ada beberapa data yang dibutuhkan yaitu berupa data daya yang tidak tersalurkan selama terjadi gangguan dan durasi gangguan penyulang tersebut. Setelah data tersebut sudah di lengkapi, dengan menggunakan persamaan indeks keandalan yang berorientasi pada energy yang tidak tersalurkan,

Sebelum melakukan perhitungan dengan persamaan ENS , maka akan dilakukan perhitungan dengan menggunakan rumus perhitungan daya pada persamaan. Maka diambil perhitungan untuk penyulang KA.1 berikut ini

Diketahui :V =20 kV = 20.000 V

I = 776 A

Cos φ = 0,8

Daya KA.1 = $\sqrt{3} \times V \times I \times \cos\phi$
 = $\sqrt{3} \times 20000 \times 776 \times 0.8$

Daya KA.1 = **21505,14 Kw**

Setelah menghitung daya gangguang masing-masing penyulang, selanjutnya melakukan perhitungan dengan persamaan ENS(*Energy Not Supplied*) dan juga AENS(*Average Energy Not Supplied*) yaitu

$ENS_{KA.1} = \sum[Gangguan(KW) \times Durasi (h)]$
 = $\sum[21505,14 \times 2,35]$

$ENS_{KA.1} = 50537,079 \text{ kWh}$

$AENS_{KA.1} = \frac{ENS}{\sum N}$
 = $\frac{50537,079}{8542}$

$AENS_{KA.1} = 5,9163 \text{ kWh/pelanggan}$

Setelah menghitung nilai ENS (*Energy Not Supplied*) dan AENS (*Average Energy Not Supplied*) maka selanjutnya menghitung nilai ekonomi berupa kerugian dari energi yang tidak tersalurkan akibat pemadaman listrik yaitu ENS berdasarkan rumus .pada tahap ini , nilai energy tak tersalurkan (ENS) di kalkulasikan dengan tarif dasar listrik yang telah di tetapkan PT.PLN pada tahun 2020.Untuk perhitungannya yaitu,

$N. \text{Rupiah } ENS_{KA.1} = ENS \times \text{Tarif Dasar Listrik}$

= 50537,079 × Rp 1115

$N. \text{Rupiah } ENS_{KA.1} = Rp 56.348.843 ,-$

Nilai kerugian yang di hitung adalah kerugian PT.PLN dalam waktu satu tahun. Untuk nilai ENS, AENS dan nilai ekonomi dapat dilihat pada Tabel 4.50

Tabel 9. Nilai ENS, AENS dan nilai ekonomi penyulang KA.1, KU.1 dan TW.1

| | ENS (kWh) | AENS (kWh/pelanggan) | Nilai Ekonomi (Rp) |
|------|-----------|----------------------|--------------------|
| KA.1 | 50537,079 | 5,9163 | 56.348.843 ,- |
| KU.1 | 221369,92 | 13,5560 | 246.827.461 ,- |
| TW.1 | 60981,93 | 7,6495 | 67.994.852 ,- |

Berdasarkan Tabel 9 kerugian PT.PLN dalam waktu satu tahun akibat dari daya yang tidak tersalurkan paling besar pada penyulang KU.1 dengan energy tidak tersalurkan sebesar 221369,92 kWh dengan kerugian sebesar Rp 246.827.461 ,- dan kerugian paling kecil pada penyulang KA.1 dengan energy tidak tersalurkan sebesar 50537,079 kWh dengan kerugian sebesar Rp 56.348.843 ,-.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis yang telah dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan antara lain :

1. Perhitungan indeks keandalan jaringan distribusi 20 kV penyulang KA.1, KU.1 dan TW.1 dengan menggunakan metode RIA , penyulang KA.1 nilai indeks yang diperoleh SAIFI sebesar 1,604 kali/tahun, SAIDI sebesar 5,885 jam/tahun, CAIDI sebesar 10,907 jam/tahun, CAIFI sebesar 0,2722 kali/tahun dan MAIFI sebesar 0,0214 kali/tahun. Penyulang KU.1 nilai indeks yang diperoleh SAIFI sebesar 4,181 kali/tahun, SAIDI sebesar 14,228 jam/tahun, CAIDI sebesar 17,1856 jam/tahun, CAIFI sebesar 0,292 kali/tahun dan MAIFI sebesar 0,0582 kali/tahun. Penyulang TW.1 nilai indeks yang diperoleh SAIFI sebesar 2,198 kali/tahun, SAIDI sebesar 8,108 jam/tahun, CAIDI sebesar 11,188 jam/tahun, CAIFI sebesar 0,4445 kali/tahun dan MAIFI sebesar 0,0486 kali/tahun. Metode FMEA, penyulang KA.1 nilai indeks yang diperoleh SAIFI sebesar 0,01117 kali/tahun, SAIDI sebesar 1,735 jam/tahun, CAIDI sebesar 155,27 jam/tahun, dan CAIFI sebesar 0,0037 kali/tahun. Penyulang KU.1 nilai indeks yang diperoleh SAIFI sebesar 0,0129 kali/tahun, SAIDI sebesar 1,205 jam/tahun, CAIDI sebesar 92,8839 jam/tahun, CAIFI sebesar 0,0035 kali/tahun. Penyulang TW.1 nilai indeks yang diperoleh SAIFI sebesar 0,00718 kali/tahun, SAIDI sebesar 0,9711 jam/tahun, CAIDI sebesar 135,14 jam/tahun, CAIFI sebesar 0,0032 kali/tahun.

2. Perbandingan nilai indeks keandalan metode RIA dan FMEA terlalu signifikan, Hasil perhitungan indeks keandalan SAIFI dan SAIDI penyulang KA.1 dan TW.1 sudah dikatakan andal karena tidak melebihi standar SPLN 68-2:1986 dengan nilai SAIFI 3,2 kali/tahun dan SAIDI 21,9 jam /tahun. Untuk penyulang KU.1 nilai indeks keandalan SAIDI sudah dikatakan andal karena tidak melebihi standar SPLN No. 68-2:1986 dengan nilai 21,9 jam/tahun sedangkan indeks keandalan SAIFI belum dapat dikatakan andal karena melebihi standar SPLN No.68-2:1986 dengan nilai 3,2 kali/tahun. Dan untuk penyulang KA.1, KU.1 dan TW.1 metode RIA belum dapat dikatakan andal karena nilai indeks keandalan SAIFI dan SAIDI melebihi standar IEEE std. 1366-2003 dan untuk metode FMEA sudah dapat dikatakan andal karena tidak melebihi standar IEEE std. 1366-2003 dengan nilai SAIFI 1,45 kali/tahun dan SAIDI 2,3 jam/tahun.
3. Nilai ekonomi penyulang KA.1, KU.1 dan TW.1 akibat dari energi listrik yang tidak tersalurkan kepada pelanggan dalam waktu satu tahun yaitu untuk penyulang KA.1 sebesar Rp 56.348.843 ,-lalu untuk penyulang KU.1 sebesar Rp 246.827.461 ,- dan untuk penyulang TW.1 sebesar Rp 67.994.852 ,-

4.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini adalah :

1. Tingkat keandalan jaringan distribusi dapat ditingkatkan dengan pemasangan dan penempatan recloser yang optimal pada setiap feeder untuk mendapatkan tingkat keandalan yang lebih baik.
2. Diperlukannya pemeliharaan secara rutin baik pemeliharaan preventif ataupun korektif guna meminimalisir gangguan dan sering nya pemadaman listrik agar keandalan dalam penyaluran tenaga listrik dapat menjadi lebih baik.
3. Dalam menganalisis keandalan jaringan distribusi dapat menggunakan metode lain.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. E. Djayanti, "Tinjauan Layanan Pelanggan Pada Unit Pelaksana Pelayanan Pelanggan PT.PLN (Persero) Medan Politeknik Negeri Medan Medan 2019," 2019.
- [2] "Undang-Undang Republik Indonesia No. 30 Tahun 2009 Pasal 28. Tentang Ketenagalistrikan."
- [3] M. Praditama, Fery, Utomo, Teguh, Shidiq, "Analisis Keandalan dan Nilai Ekonomis di Penyulang Pujon PT.PLN (Persero) Area Malang," pp. 1–8.
- [4] A. Mulianda and M. Gapy, "Analisis Keandalan Sistem Jaringan Distribusi PT. PLN (Persero) Banda Aceh Menggunakan Metode Section Technique," *J. Komputer, Inf. Teknol. dan Elektro*, vol. 2, no. 4, pp. 15–20, 2017.
- [5] H. Illahi and L. M. Noveri, "Analisa dan Evaluasi Penggunaan SCADA Pada Keandalan Sistem Distribusi PT . PLN (Persero) Area Pembagi Distribusi Riau dan Kepulauan Riau," pp. 1–8.
- [6] F. A. Nugraha, "Studi Analisis Keandalan Sistem Distribusi PT.PLN (Persero) Surabaya Utara Menggunakan Metode Ria (Reliability Index Assessment) Reability Distribution System PT.PLN (Persero) North Surabaya Using Ria Method (Reliability Index Assessment)," 2016.
- [7] SPLN 68-2, "Tingkat Jaminan Sistem Tenaga Listrik Bagian Dua: Sistem Distribusi," Jakarta: Perusahaan Umum Listrik Negara, 1986.
- [8] D. R. Indices, *IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices*, in *IEEE Std 1366-2012 (Revision of IEEE Std 1366-2003)*, vol., no., pp.1-43, 31 May 2012 doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6209381, vol. 2003, no. May. 2004.
- [9] D. Suswanto, "Teknik dan Sistem Distribusi Tenaga Listrik," *Sist. Distrib. Tenaga List.*, pp. 137–180, 2009.
- [10] R. . Billinton, R., Allan, *Reliability Evaluation of Power Systems*. New York: Plenum Press, 1996.
- [11] Rendra Prambudhi Setyo, "Meningkatkan Keandalan Sistem Distribusi 20 KV Dengan Penambahan Sectionalizer," *Inst. Teknol. Sepuluh Novemb.*, 2008.
- [12] M. S. . Martha Yudistya Perdana¹, Ir. Teguh Utomo, MT.², Dr. Ir. Harry Soekotjo D., "Analisis Keandalan Sistem Distribusi Tenaga Listrik Penyulang Jember Kota dan Kalisat DI PT. PLN APJ JEMBER," pp. 1–9.
- [13] IEEE, *IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices*, vol. 1997, no. May. 2012.
- [14] C. A. Warren, "Distribution Reliability: What Is It?," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, 1996.
- [15] F. Li, "Distributed processing of reliability index assessment and reliability-based network reconfiguration in power distribution systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 1, pp. 230–238, 2005, doi: 10.1109/TPWRS.2004.841231.
- [16] Disyon, *Analisis Keandalan Sistem Distribusi dengan Metode RIA (Reliability Index Assesment) Studi Kasus Sistem Distribusi Jawa Timur Penyulang GI waru*. Surabaya, 2008.

- [17] A. Fatoni, “Analisa Keandalan Sistem Distribusi 20 kV PT.PLN Rayon Lumajang dengan Metode FMEA (Failure Modes and Effects Analysis),” *J. Tek. ITS*, vol. 5, no. 2, pp. 462–467, 2017, doi: 10.12962/j23373539.v5i2.16150.
- [18] T. Gonen, *Electrical Power Distribution System Engineering*. USA: Mc Graw, 1986.
- [19] PT. PLN, *SPLN No.59 : Keandalan pada Sistem Distribusi 20 kV dan 6 kV*. Jakarta: Departemen Pertambangan dan Energi Perusahaan Umum Listrik Negara, 1985.
- [20] M. A.Muhammad Syafar , St., *Penentuan Indeks Keandalan Sistem Distribusi 20 Kv Dengan Metode Fmea (Failure Mode Effect Analysis)*, Vol. 53, No. 9. 2013.
- [21] Ditjeng Marsuidi, *Operasi Sistem Tenaga Listrik Edisi Pertama*. Graha Ilmu Yogyakarta, 2006.