

**PENILAIAN KEANDALAN DAN EKONOMIS PENYULANG TEGANGAN
MENENGAH DENGAN FAILURE MODE EFFECT ANALYSIS**

Surya Hardi¹, Tri Annisya¹, Riza Ria Wirasari², Rena Arifah², M. Fahmi Syawali Rizki²

¹Prodi Teknik Elektro Fakultas Teknik

Universitas Sumatera Utara

Jl. Almamater Kampus USU Medan 20155

²Prodi Teknik Elektro Fakultas Teknik

Universitas Al Washliyah Medan

Jl. Sisingamangaraja Km 5.5 No.10 Medan. Telp/fax : 061-7851881

*Email : surya.hardi@usu.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menghitung indeks keandalan dengan metode Failure Modes Effect Analysis (FMEA) serta kerugian ekonomi. Pada penelitian ini dilakukan analisis prioritas gangguan dengan menggunakan diagram pareto untuk mengidentifikasi permasalahan yang dominan sehingga dapat mengetahui prioritas dari penyelesaian masalah. Penilaian keandalan sistem distribusi 20 kV pada penyulang BG-2 PT.PLN (Persero) ULP Binjai Kota menggunakan FMEA dengan indikator indeks keandalan seperti System Average Interruption Duration Index (SAIFI), Costumer Average Interruption Frequency Index (SAIDI), Costumer Interruption Duration Index (CAIDI), Energy Not Supplied (ENS) dan Average Energy not Supplied (AENS). Hasil diperoleh memperlihatkan, gangguan terbesar disebabkan oleh alat pengukur dan pengaman (APP) sebanyak 43 kali dengan presentase gangguan sebesar 48%. Indeks keandalan untuk SAIFI sebesar 8,42 kali/tahun, untuk SAIDI sebesar 25,33 jam/tahun dan CAIDI sebesar 3 jam/gangguan. Nilai SAIFI dan SAIDI belum mencapai standard yang telah ditetapkan oleh PT. PLN (Persero) dan standard IEEE, sementara untuk nilai CAIDI sudah mencapai standard PLN tetapi belum memenuhi standard IEEE. Perhitungan nilai energi yang tidak terjual (ENS) sebesar 66.541,885 kWh dan AENS sebesar 5,854 kWh/pelanggan. Kerugian PLN diakibatkan gangguan yang terjadi pada penyulang BG-2 pada tahun 2020 diasumsikan sebesar Rp.89.964.629,-

Kata Kunci: Keandalan, Diagram Pareto, FMEA, Kerugian Ekonomi

ABSTRACT

This study aims to calculate the reability indicators uses Failure Modes Effect Analysis (FMEA) and economic lost . In this study, priority analysis of disturbances was carried out using a pareto diagram to identify the dominant problems so as to determine the priority of problem solving. Assessment of the reliability of the 20 kV distribution system on BG-2 feeders PT.PLN (Persero) ULP Binjai Kota uses FMEA with reliability index indicators such as the System Average Interruption Duration Index (SAIFI), Customer Average Interruption Frequency Index (SAIDI), Customer Interruption Duration Index (CAIDI), Energy Not Supplied (ENS) and Average Energy not Supplied (AENS). The results obtained show that the biggest disturbance is caused by measuring and safety devices (APP) is 43 times with a disturbance percentage of 48%. The reliability index for SAIFI is 8.42 times/year, for SAIDI is 25.33 hours/year and CAIDI is 3 hours/interruption. SAIFI and SAIDI scores have not reached the standard set by PT. PLN (Persero) and IEEE standards, while CAIDI values have reached PLN standards but have not met IEEE standards. Calculation of unsustainable energy value (ENS) of 66,541.885 kWh and AENS of 5.854 kWh/customer. PLN's losses due to disturbances that occur in BG-2 feeders in 2020 are assumed to be Rp.89,964,629,-

Keywords: Reliability, Pareto diagram, FMEA method, Economic lost.

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus meningkat sesuai dengan laju pertumbuhan ekonomi dan penambahan penduduk. Sebagai perusahaan utama pemasok listrik di Indonesia PT. PLN (Persero) memandang perlu peningkatan kualitas dan keandalan listrik di semua wilayah pelayannya guna memenuhi kebutuhan masyarakat.

Kondisi kelistrikan saat ini yang masih terjadi pemadaman yang diakibatkan oleh gangguan pada komponen peralatan, APP (alat pengukur dan pengaman). Perlunya dilakukan penilaian keandalan pendistribusian tenaga listrik ke pelanggan dan untuk meningkatkan kualitas daya yang baik serta mengantisipasi masalah gangguan yang ditimbulkan.

Studi terdahulu mengenai keandalan sistem distribusi telah diteliti dengan berbagai metode. Penelitian tingkat keandalan sistem distribusi 20 kV telah diteliti dengan menggunakan Diagram Pareto untuk menentukan indeks keandalan SAIDI dan SAIFI (Ariska, 2019). Beberapa peneliti lain juga mengembangkan beberapa metode untuk menguji keandalan sistem distribusi seperti menggunakan sistem SCADA (Eneh *et al.*, 2019), Metode *Reability Index Assesment* (RIA) (Rizal dan Tasmono, 2020) dan menggunakan metode gabungan dari Metode *Section Technique* dan *Reability Index Assesment* (RIA) (Jufrizel dan Hidayatullah, 2017).

Pada penelitian Ansori, *et al.*, (2020) yang menggunakan metode *Failures Modes Effect Analysis* (FMEA) dibahas indeks keandalan SAIDI, SAIFI, Indeks keandalan dibandingkan sebagai SPLN, dan tidak membahas aspek ekonomi dari rugi energi yang tidak tersalurkan ke Pelanggan.

Penelitian ini bertujuan menentukan nilai keandalan dan ekonomis penyulang 20 kV dengan mengambil contoh salah satu penyulang BG-2 PT.PLN (Persero) ULP Binjai Kota menggunakan metode *Failures Modes Effect Analysis*. FMEA menerapkan suatu metode dengan menentukan mode kegagalan, penyebab kegagalan dan efek dari kegagalan. Hal ini

membantu untuk mendeteksi risiko yang teridentifikasi pada proses, mode kegagalan potensial dan efeknya. Perbandingan indeks kegagalan dari setiap peralatan utama sistem distribusi disajikan berdasarkan SPLN 68-2: 1986 (SPLN, 1986) dan Standar IEEE Std.136-2003 (IEEE 1366, 2019) digunakan sebagai tolak ukur tingkat keandalan Penyulang.

Tinjauan Pustaka

1. Sistem Distribusi

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk samapai ke konsumen. Klasifikasi sistem distribusi menurut nilai tegangannya terbagi atas sistem distribusi primer dan sistem distribusi sekunder. Menurut jenis konduktornya sistem distribusi terbagi atas saluran udara, saluran bawah tanah dan saluran bawah laut. Berdasarkan susunan konfigurasinya sistem distribusi dikelompokkan ke dalam konfigurasi radial, loop, spindle dan tie line.

2. Keandalan Sistem Distribusi

Keandalan merupakan tingkat keberhasilan kinerja suatu sistem untuk dapat memberikan hasil yang lebih baik pada periode waktu dan dalam kondisi operasi tertentu. Untuk dapat menentukan tingkat keandalan dari suatu sistem, perlu dilakukannya pemeriksaan terhadap tingkat keberhasilan kinerja dari sistem yang ditinjau pada periode tertentu kemudian membandingkan dengan standar yang telah ditetapkan sebelumnya.

Keandalan pada sistem dapat dihitung melalui sejauh mana penyaluran listrik dapat berorasi secara terus menerus ke konsumen tanpa terjadinya gangguan. Untuk meminimalisir frekuensi gangguan yang terjadi perlunya dilakukan tindakan preventif yaitu dengan melakukan pemeliharaan jaringan secara berkala.

3. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Indeks Keandalan

Indeks keandalan dalam suatu sistem distribusi dipengaruhi oleh beberapa faktor, sesuai standar IEEE P1366 (2019) antara lain:

1. Pemadaman atau terputusnya suplai daya ke

satu atau konsumen yang diakibatkan dari salah satu atau lebih komponen mendapat gangguan.

2. Keluar (*Outage*) merupakan 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*) merupakan periode dari saat permulaan komponen mengalami outage sampai saat dapat dioperasikan kembali sesuai dengan fungsinya.
4. Lama pemadaman (*Interruption Duration*) adalah waktu dari saat permulaan terjadinya pemadaman sampai saat menyala kembali.
5. Jumlah total konsumen terlayani (*Total Number of Costumer Served*) yaitu jumlah total konsumen yang terlayani sesuai dengan periode laporan terakhir.
6. Periode laporan merupakan laporan diasumsikan dalam satu tahun.

4. Indeks Keandalan Sistem Distribusi

Indeks keandalan sebuah sistem distribusi diperlukan untuk menghitung tingkat keandalan pada masing- masing titik beban dapat berupa:

a. SAIDI

SAIDI (System Average Interruption Duration Index)) adalah indeks yang biasanya digunakan untuk mengetahui waktu pemadaman pada pelanggan untuk memberikan informasi mengenai waktu rata-rata konsumen yang mengalami pemadaman (PT PLN, 2010). Indeks ini dapat dihitung dengan cara :

$$SAIDI = \frac{\Sigma \text{Durasi pemadaman pelanggan}}{\Sigma \text{Total Jumlah Pelangga yang dilayani}}$$

atau

$$SAIDI = \frac{\Sigma U_i N_i}{\Sigma N_i} \dots \dots \dots \text{Persamaan (1)}$$

Keterangan:

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

N_i : Jumlah pelanggan yang dilayani pada titik beban-i

b. SAIFI

SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) merupakan indeks yang memberikan informasi mengenai frekuensi rata-rata dari pemadaman setiap pelanggan pada area yang telah ditetapkan dalam satu tahun.

$$SAIFI = \frac{\Sigma \text{Jumlah total pemadaman}}{\Sigma \text{Total Jumlah Pelanggan yang dilayani}}$$

atau

$$SAIFI = \frac{\Sigma \lambda_i N_i}{\Sigma N_i} \dots \dots \dots \text{Persamaan (2)}$$

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

N_i = Jumlah pelanggan yang dilayani pada titik beban-i

c. CAIDI

CAIDI (Costumer Interruption Duration Indeks) merupakan suatu indeks yang menyatakan tentang durasi pemadaman rata-rata konsumen untuk setiap gangguan yang terjadi. Untuk menghitung indeks ini digunakan persamaan :

$$CAIDI = \frac{\Sigma \text{Durasi pelanggan mengalami gangguan}}{\Sigma \text{Jumlah pelanggan yang terkena gangguan}}$$

atau

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI} \dots \dots \dots \text{Persamaan (3)}$$

d. Energy Not Supplied

Energy Not Supplied (ENS) adalah indeks keandalan yang didefinisikan sebagai penjumlahan energi yang hilang akibat adanya gangguan terhadap pasokan daya selama periode satu tahun (SPLN 59, 1985). Secara sistematis dapat dituliskan sebagai berikut :

$$ENS = \Sigma [\text{Gangguan (kw)} \times \text{Durasi (h)}]$$

$$ENS = \Sigma [\text{Gangguan} \times \text{Durasi}] \dots \text{Persamaan (4)}$$

e. Average Energy not Supplied

Average Energy not Supplied (AENS) adalah indeks rata-rata energi yang tidak disalurkan akibat terjadinya pemadaman. AENS dinyatakan perbandingan jumlah energi yang hilang pada saat terjadi gangguan pemadaman dengan jumlah pelanggan yang dilayani (SPLN 59, 1985). Secara sistematis dapat dituliskan sebagai berikut :

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

atau

$$AENS = \frac{ENS}{\Sigma N} (kWh / Pelanggan) \dots \text{Persamaan (5)}$$

Dimana:

N : Jumlah pelanggan yang dilayani

Besarnya energi yang tidak tersalurkan dapat dihitung dengan persamaan,

$$\text{Daya 3 fasa (P)} = S_{3\phi} \times \cos \phi \dots \text{Persamaan (6)}$$

$$S_{3\phi} = \text{daya semu 3 fasa (VA)}$$

$\cos \phi$ = faktor Daya

Energi (E) adalah Daya (P) dikali dengan Durasi (hour).

5. Failure Mode Effect Analysis

FMEA adalah merupakan prosedur terstruktur untuk mengetahui dan mencegah bentuk kegagalan. FMEA digunakan untuk mengidentifikasi penyebab dari masalah kualitas, mode kegagalan didalamnya termasuk kegagalan desain. FMEA dapat digunakan untuk mengidentifikasi kemungkinan-kemungkinan terjadinya mode kegagalan dari setiap komponen serta mengidentifikasi penyebab-penyebab kegagalan dari setiap komponen (Kiran, 2017).

Dalam penggunaan FMEA untuk menganalisis keandalan dalam sistem distribusi tenaga listrik yang didasarkan dari kegagalan dari peralatan-peralatan listrik akan mempengaruhi operasi sistem. Beberapa hal yang dibutuhkan untuk analisis keandalan sistem distribusi dengan menggunakan metode FMEA:

1. Konfigurasi dari penyulang (feeder) sistem distribusi 20kV.
2. Data pada setiap peralatan yang ada pada jaringan seperti laju kegagalan, repair time dan switching time serta data pendukung lainnya pada peralatan.
3. Data konsumen yang meliputi jumlah pelanggan pada setiap titikbeban.
4. Penjumlahan laju kegagalan dan durasi gangguan rata-rata yang berpengaruh pada setiap load point akibat dari kegagalan, dimana nilai laju kegagalan dan durasi gangguan rata-rata sebagai dasar untuk menghitung indeks SAIDI, SAIFI, CAIDI, , ENS dan AENS.

6. Diagram Pareto

Diagram Pareto pertama kali dikenalkan oleh ahli ekonomi asal Italia bernama Vilfredo Federico Damaso Pareto pada akhir abad ke-19, dipopularkan oleh Joseph M Juran seorang ahli manajemen mutu yang lebih bersifat universal. Juran berpendapat bahwa konsep 80/20 dari diagram pareto dapat diterapkan dalam seluruh aspek kehidupan manusia seperti dari sosial-budaya, sosial-ekonomi, sosial-politik dan lain-lain (Kiran, 2017).

Diagram Pareto digunakan untuk mengidentifikasi permasalahan yang terbesar dan paling berpengaruh terhadap sistem yang terjadi. Untuk mengetahui masalah mana yang dominan sehingga dapat mengetahui prioritas dari penyelesaian masalah. Fungsi utama dari Diagram Pareto adalah mengidentifikasi permasalahan utama untuk peningkatan kualitas dari masalah terbesar sampai terkecil Digambarkan sebagai diagram batang dimana permasalahan tertinggi ditempatkan pada sisi paling kiri dan seterusnya sampai permasalahan yang paling rendah terjadi ditempatkan pada sisi paling kanan kemudian menghitung frekuensi kumulatif dan presentase kumulatif dari total kejadian.

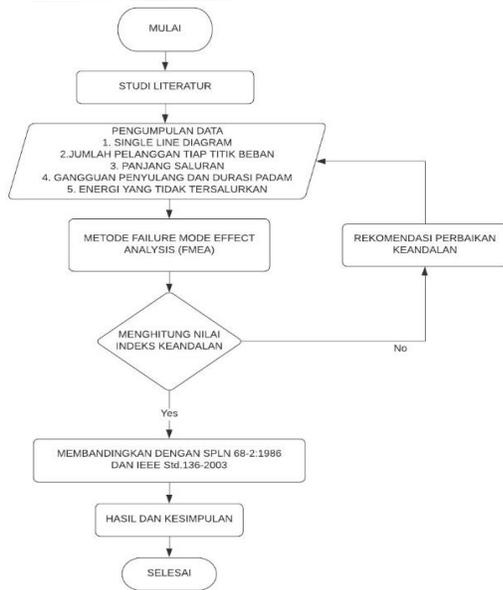
METODOLOGI PENELITIAN

1. Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan dengan menggunakan data penyulang distribusi 20kV yaitu di PT. PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan Binjai Kota. Data jumlah pelanggan untuk tiap titik beban, panjang penyulang. Laporan gangguan dan durasi pemadaman, data energi yang tidak tersalurkan selama satu tahun. Hasil dari perhitungan indeks keandalan yang diperoleh dibandingkan dengan indeks keandalan menurut SPLN 68-2, 1986 dan Standard IEEE Std. 136-2003. Perhitungan nilai ekonomi berupa kerugian rupiah yang disebabkan energi yang tidak tersalurkan.

2. Prosedur Penelitian

Proses pelaksanaan penelitian, diagram alirnya disajikan seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir proses penelitian

3. Data Penelitian

PT. PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan Binjai Kota memiliki 9 penyulang dengan total 69.504 pelanggan dan panjang saluran keseluruhan penyulang adalah 162,45kms. Penelitian ini memfokuskan pada Penyulang BG-2, dengan jumlah pelanggan pada sebanyak 11.367 pelanggan dengan panjang saluran 43,1 kms dengan total daya 9410 kVA. Penelitian ini memfokuskan Penyulang BG-2 PT. PLN (Persero) ULP Binjai Kota, diagram satu garisnya dapat dilihat pada Gambar 2.

HASIL DAN PEMBAHASAN

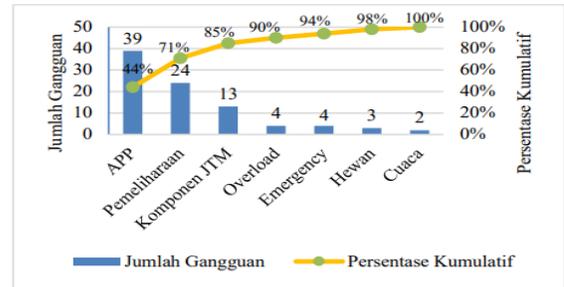
1. Prioritas Gangguan Menggunakan Diagram Pareto

Jenis penyebab gangguan yang diidentifikasi pada Penyulang BG-2 selama satu tahun (2020), seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Gangguan yang terjadi pada Penyulang BG-2

Gangguan Pemadaman	Jumlah Gangguan	Frekuensi Kumulatif	Persentase Kumulatif
APP	43	43	48%
Pemeliharaan	24	67	75%
Komponen JTM	13	80	90%
Emergency	4	84	94%
Hewan	3	87	98%
Cuaca	2	89	100%

Dari Tabel 1, secara grafis digambarkan melalui Diagram Pareto dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Pareto Berdasarkan Gangguan Pada Penyulang

Gambar 3 menjelaskan bahwa gangguan terbanyak di tahun 2020 disebabkan oleh gangguan pada APP dengan total sebanyak 39 kali selama satu tahun dengan persentase sebesar 44%. Gangguan disebabkan oleh hubung singkat dan beban lebih. Gangguan ini dapat diatasi dengan manuver beban dengan mengalihkan beban dari satu penyulang ke penyulang lain yang bersifat sementara. Dapat juga dilakukan dengan pemeriksaan rutin secara berkala. Durasi Gangguan Pemadaman selama Tahun 2020 pada penyulang BG-2 dapat dilihat pada Tabel 2 disusun berdasarkan persentase kumulatif mulai terkecil hingga terbesar, sedangkan untuk Diagram Pareto seperti dalam Gambar 4.

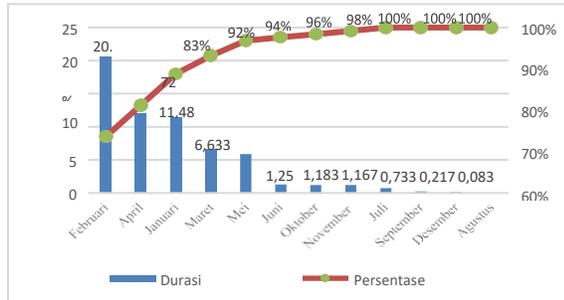
Tabel 2. Durasi Pemadaman Penyulang BG-2 Tahun 2020

Bulan	Durasi Pemadaman (jam)	Frekuensi Kumulatif	Persentase Kumulatif
Februari	20,6	20,6	34%
April	11,97	32,567	53%
Januari	11,48	44,05	72%
Maret	6,63	50,683	83%
Mei	5,85	56,533	92%
Juni	1,25	57,783	94%
Oktober	1,183	58,966	96%
November	1,167	60,133	98%
Juli	0,733	60,866	100%
September	0,217	61,083	100%
Desember	0,083	61,166	100%
Agustus	0	61,166	100%

Tabel 2 menjelaskan bahwa durasi gangguan pemadaman terbesar pada tahun 2020 terjadi di bulan Februari dimana durasinya 20,6

jam dengan persentase sebesar 34%.

Diagram pareto berdasarkan durasi Gangguan pemadaman Penyulang BG-2 ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Pareto Berdasarkan Durasi Pemadaman Pada Penyulang

2. Indeks Keandalan Menggunakan FMEA

Penentuan indeks keandalan dengan menggunakan metode FMEA yaitu menentukan indeks keandalan SAIDI, SAIFI, CAIDI, dan CAIFI. Langkah pertama yaitu dengan menghitung jarak antar transformator (line) dari penyulang BG-2. Jarak antar transformator dapat dilihat pada Tabel 2 dari Panjang saluran Penyulang BG.2. Kemudian menghitung nilai λ (laju kegagalan) yang didapat dari hasil perkalian antara panjang saluran dan laju kegagalan tiap saluran per komponen sesuai dengan SPLN 68-2:1986 (IEEE, 2019).

Berdasarkan SPLN, nilai laju kegagalan (λ) PMT, Transformator dan Penyulang masing-masing berturut 0,004; 0,005 dan 0,2 sedangkan nilai waktu perbaikan (μ) adalah masing-masing 10; 10; dan 3. Perhitungan nilai laju kegagalan (λ) dan nilai waktu perbaikan (μ) per tahun dari penyulang BG-2 dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Perhitungan Nilai Laju Kegagalan (λ) dan Durasi kegagalan (μ)

Jenis Alat	L (KMS)	λ gangguan/tahun	μ jam/tahun
PMT	-	0,004	0,04
Trafo	-	0,005	0,05
L1	9,14	1,828	5,484
L2	0,42	0,084	0,252
L3	0,56	0,112	0,336
L4	0,78	0,156	0,468
L5	0,24	0,048	0,144
L6	0,11	0,022	0,066
L7	1,79	0,358	1,074
L8	0,51	0,102	0,306

J Jenis Alat	L (KMS)	λ gangguan/tahun	μ jam/tahun
L9	0,31	0,062	0,186
L10	4,15	0,83	2,49
L11	0,88	0,176	0,528
L12	0,09	0,018	0,054
L13	0,39	0,078	0,234
L14	0,34	0,068	0,204
L15	0,44	0,088	0,264
L16	0,05	0,01	0,03
L17	0,13	0,026	0,078
L18	0,01	0,002	0,006
L19	0,04	0,008	0,024
L20	0,01	0,002	0,006
L21	0,01	0,002	0,006
L22	0,05	0,01	0,03
L23	0,15	0,03	0,09
L24	0,07	0,014	0,042
L25	0,16	0,032	0,096
L26	0,18	0,036	0,108
L27	0,47	0,094	0,282
L28	0,62	0,124	0,372
L29	0,21	0,042	0,126
L30	0,28	0,056	0,168
L31	0,29	0,058	0,174
L32	0,73	0,146	0,438
L33	0,84	0,168	0,504
L34	0,25	0,05	0,15
L35	0,15	0,03	0,09
L36	0,37	0,074	0,222
L37	0,08	0,016	0,048
L38	0,21	0,042	0,126
L39	0,34	0,068	0,204
L40	0,12	0,024	0,072
L41	0,57	0,114	0,342
L42	0,11	0,022	0,066
L43	0,3	0,06	0,18
L44	0,6	0,12	0,36
L45	0,46	0,092	0,276
L46	0,83	0,166	0,498
L47	0,08	0,016	0,048
L48	0,31	0,062	0,186
L49	0,11	0,022	0,066
L50	0,01	0,002	0,006
L51	0,38	0,076	0,228
L52	0,25	0,05	0,15
L53	0,54	0,108	0,324
L54	0,05	0,01	0,03
L55	0,57	0,114	0,342
L56	0,35	0,07	0,21
L57	0,41	0,082	0,246
L58	0,55	0,11	0,33
L59	0,48	0,096	0,288
L60	0,53	0,106	0,318
L61	0,77	0,154	0,462
L62	0,1	0,02	0,06
L63	0,23	0,046	0,138
L64	0,82	0,164	0,492

J Jenis Alat	L (KMS)	λ gangguan/tahun	μ jam/tahun
L65	0,09	0,018	0,054
L66	0,34	0,068	0,204
L67	0,57	0,114	0,342
L68	0,64	0,128	0,384
L69	0,34	0,068	0,204
L70	0,76	0,152	0,456
L71	0,21	0,042	0,126
L72	0,15	0,03	0,09
L73	0,09	0,018	0,054
L74	0,39	0,078	0,234
L75	0,07	0,014	0,042
L76	0,2	0,04	0,12
L77	0,04	0,008	0,024
L78	0,98	0,196	0,588
L79	0,89	0,178	0,534
L80	0,04	0,008	0,024
L81	0,57	0,114	0,342
L82	0,25	0,05	0,15
L83	0,07	0,014	0,042
Total	8,423	8,423	25,332

Keterangan: L Panjang penyulang (Kms)

Perhitungan SAIFI diperoleh dari perhitungan perkalian antara failure rate (λ) dengan jumlah pelanggan per titik beban (N) dibagi dengan jumlah pelanggan per penyulang. SAIDI yaitu diperoleh dengan perhitungan perkalian antara durasi kegagalan (μ) dengan jumlah pelanggan per titik beban dibagi total pelanggan per penyulang.

CAIFI diperoleh dari perhitungan antara perkalian failure rate (λ) dengan jumlah pelanggan pada titik beban dibagi dengan perkalian antara durasi kegagalan (μ) dengan jumlah pelanggan per penyulang.

CAIDI merupakan hasil perbandingan antara nilai SAIDI dan SAIFI.

Perhitungan SAIFI, SAIDI dan CAIDI, dengan nilai laju kegagalan (λ) = 8,42 dan durasi kegagalan (μ) = 25,33. Sebagai contoh perhitungan indeks keandalan dilakukan pada titik beban 1 (LP1) menggunakan Pers. (1), Pers. (2) dan Pers. 3.

Indeks keandalan SAIFI,

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i}$$

$$SAIFI = \frac{8,42 \times 125}{11367}$$

SAIFI = 0,093 kali/tahun

Indeks keandalan SAIDI,

$$SAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i}$$

$$SAIDI = \frac{25,33 \times 124}{11367}$$

SAIDI = 0,2786 jam/tahun

Kemudian didapatkan nilai CAIDI dengan membandingkan nilai SAIDI dengan SAIFI. Sebagai contoh perhitungan indeks keandalan CAIDI pada titik beban 1 pada Gambar 3.

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI}$$

$$CAIDI = \frac{0,2786}{0,0926}$$

CAIDI = 3,008

Selanjutnya indeks keandalan SAIFI, SAIDI, CAIDI, perhitungan untuk titik beban-titik beban yang lain, disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai indeks keandalan SAIFI, SAIDI dan CAIDI

LP	N Pelanggan	SAIFI kali/tahun	SAIDI jam/tahun	CAIDI jam/gangguan
LP1	125	0,093	0,2786	3,005
LP2	270	0,2	0,6017	3,005
LP3	338	0,25	0,7532	3,005
LP4	68	0,05	0,1515	3,005
LP5	129	0,096	0,2875	3,005
LP6	1	0,0007	0,0022	3,005
LP7	68	0,05	0,1515	3,005
LP8	70	0,052	0,156	3,005
LP9	135	0,1	0,3008	3,005
LP10	68	0,05	0,1515	3,005
LP11	68	0,05	0,1515	3,005
LP12	216	0,16	0,4813	3,005
LP13	135	0,1	0,3008	3,005
LP14	338	0,25	0,7532	3,005
LP15	135	0,1	0,3008	3,005
LP16	1	7,00E-04	0,0022	3,005
LP17	216	0,16	0,4813	3,005
LP18	338	0,2504	0,75319	3,008
LP19	135	0,1	0,30083	3,008
LP20	135	0,1	0,30083	3,008
LP21	68	0,0504	0,15153	3,008
LP22	216	0,16	0,48133	3,008
LP23	120	0,0889	0,26741	3,008
LP24	215	0,1593	0,4791	3,008
LP25	270	0,2	0,60166	3,008
LP26	110	0,0815	0,24512	3,008
LP27	68	0,0504	0,15153	3,008
LP28	270	0,2	0,60166	3,008
LP29	135	0,1	0,30083	3,008
LP30	338	0,2504	0,75319	3,008
LP31	135	0,1	0,30083	3,008
LP32	130	0,0963	0,28969	3,008
LP33	135	0,1	0,30083	3,008

LP	N Pelanggan	SAIFI kali/tahun	SAIDI jam/tahun	CAIDI jam/gangguan
LP34	1	0,0007	0,00223	3,008
LP35	216	0,16	0,48133	3,008
LP36	68	0,0504	0,15153	3,008
LP37	180	0,1333	0,40111	3,008
LP38	135	0,1	0,30083	3,008
LP39	216	0,16	0,48133	3,008
LP40	135	0,1	0,30083	3,008
LP41	216	0,16	0,48133	3,008
LP42	135	0,1	0,30083	3,008
LP43	135	0,1	0,30083	3,008
LP44	135	0,1	0,30083	3,008
LP45	216	0,16	0,48133	3,008
LP46	68	0,0504	0,15153	3,008
LP47	216	0,16	0,48133	3,008
LP48	216	0,16	0,48133	3,008
LP49	216	0,16	0,48133	3,008
LP50	270	0,2	0,60166	3,008
LP51	138	0,1022	0,30752	3,008
LP52	216	0,16	0,48133	3,008
LP53	1	0,0007	0,00223	3,008
LP54	130	0,0963	0,28969	3,008
LP55	216	0,16	0,48133	3,008
LP56	68	0,0504	0,15153	3,008
LP57	65	0,0481	0,14484	3,008
LP58	270	0,2	0,60166	3,008
LP59	83	0,0615	0,18496	3,008
LP60	80	0,0593	0,17827	3,008
LP61	338	0,2504	0,75319	3,008
LP62	30	0,0222	0,06685	3,008
LP63	90	0,0667	0,20055	3,008
LP64	80	0,0593	0,17827	3,008
LP65	135	0,1	0,30083	3,008
LP66	135	0,1	0,30083	3,008
LP67	270	0,2	0,60166	3,008
LP68	270	0,2	0,60166	3,008
LP69	135	0,1	0,30083	3,008
LP70	1	0,0007	0,00223	3,008
LP71	1	0,0007	0,00223	3,008
LP72	1	0,0007	0,00223	3,008
LP73	180	0,1333	0,40111	3,008
LP74	55	0,0407	0,12256	3,008
LP75	1	0,0007	0,00223	3,008
LP76	183	0,1356	0,40779	3,008
LP77	1	0,0007	0,00223	3,008
LP78	1	0,0007	0,00223	3,008
LP79	1	0,0007	0,00223	3,008
LP80	1	0,0007	0,00223	3,008
LP81	216	0,16	0,48133	3,008
LP82	1	0,0007	0,00223	3,008
LP83	1	0,0007	0,00223	3,008
Total		11367	25,33	3,008

Tabel 4 menjelaskan nilai indeks SAIFI sebesar 8,42 kali/tahun. Nilai SAIDI sebesar 25,33 jam/tahun, indeks keandalan CAIDI

diperoleh dengan perbandingan antara nilai SAIDI dan SAIFI yaitu sebesar 3,008 jam/gangguan dari total jumlah pelanggan 11367 dengan panjang saluran 162,45 Kms.

a. Perbandingan Nilai Indeks Keandalan FMEA dengan Standar PLN dan IEEE

Dari hasil analisis indeks keandalan menggunakan metode FMEA (*Failure Mode Effect Analysis*) maka hasil dari indeks nilai SAIFI, SAIDI dan CAIDI dibandingkan dengan Standar PLN No. 68-2:1986 dan IEEE Std.136-2003.

Dari Tabel 5 diperoleh hasil nilai SAIFI dan SAIDI menggunakan FMEA belum sesuai dengan Standar PLN 68-2:1986 dan IEEE Std 136-2003, kecuali nilai CAIDI sudah sesuai dengan Standar PLN 68-2:1986 tetapi belum sesuai standar IEEE Std 136-2003. Untuk dapat memenuhi standar PLN 68-2:1986 dan IEEE Std 136-2003 adalah perlu dilakukan pengecekan dan perawatan peralatan pengamanan terhadap komponen dan peralatan pada jaringan distribusi agar dapat mencapai standar yang diinginkan. Untuk gangguan alam dapat dilakukan pengontrolan jalur yang dilalui oleh jaringan distribusi atau pemotongan pohon/dahan.

Dampak dari gangguan yang terjadi pada sistem distribusi yaitu terputusnya pasokan distribusi listrik. Keandalan sistem distribusi dapat dilihat dari kontinuitas dalam penyaluran listrik. Semakin sering dan lama durasi pemadaman maka keandalan yang didapatkan semakin buruk. Sebaliknya, semakin sedikit terjadinya pemadaman maka semakin baik keandalan sistem distribusi tenaga listrik tersebut.

Tabel 5. Perbandingan Indeks Keandalan dengan SPLN dan IEEE

Indeks Keandalan	FMEA	SPLN 68-2: 1986	IEEE Std 136-2003
SAIFI	8,42	3,1 (N)	1,45 (N)
SAIDI	25,33	21,09 (N)	2,3 (N)
CAIDI	3	6,59 (Y)	1,47 (N)

Keterangan:

N = belum memenuhi

Y = memenuhi

b. Indeks Keandalan Berorientasi Pada Beban, Energi dan Nilai Ekonomi

Indeks keandalan berorientasi pada beban dan energi yaitu indeks ENS (*Energy not Supplied*) dan AENS (*Average Energy not Supplied*). ENS menunjukkan besarnya energi yang hilang karena kapasitas tersedia lebih kecil dari permintaan beban maksimal. Berdasarkan data yang diperoleh total durasi pemadaman selama tahun 2020 untuk penyulang BG-2 adalah selama 61,16 jam. Durasi pemadaman di saat LWBP (Lewat waktu beban puncak) selama 55,167 jam. Durasi pemadaman di saat WBP (waktu beban puncak) selama 1,917 jam. Diketahui nilai $\cos \phi$ adalah 0,943.

Untuk menghitung nilai dari ENS dapat digunakan persamaan,

$$\begin{aligned} P \text{ Penyulang (LWBP)} &= S_{3\phi} \times \cos \phi \\ &= 1.207,669 \times 0,943 \\ &= 1.138,832 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P \text{ Penyulang (WBP)} &= S_{3\phi} \times \cos \phi \\ &= 2.057,764 \times 0,942 \\ &= 1.938,414 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ENS_{LWBP} &= \Sigma[\text{Gangguan} \times \text{Durasi}] \\ &= 1138,832 \times 55,167 \\ &= 62.825,945 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ENS_{WBP} &= \Sigma[\text{Gangguan} \times \text{Durasi}] \\ &= 1.938,414 \times 1,917 \\ &= 3.715,940 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$AENS = \frac{ENS}{\Sigma N} (\text{kWh/Pelanggan})$$

$$AENS = \frac{66541,885}{11,367}$$

$$AENS = 5,84 \text{ kWh/pelanggan}$$

Nilai ENS dari penyulang BG-2 sebesar 66.541,885 kWh dan besar AENS sebesar 5,854 kWh/pelanggan. Nilai rupiah yang tidak terjual dengan tarif dasar listrik rata-rata sebesar Rp. 1352/kwh, maka :

$$\begin{aligned} \text{Nilai Rupiah} &= ENS \times \text{Tarif Dasar Listrik} \\ &= 66.541,885 \times \text{Rp } 1.352 \\ &= \text{Rp } 89.964.629,- \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan tersebut diperoleh hasil nilai ekonomi berupa kerugian energi yang tidak tersalurkan selama satu tahun diasumsikan sebesar Rp 89.964.629,- Inilah kerugian energi yang tidak tersalurkan akibat terjadinya

gangguan pemadaman pada penyulang BG-2.

KESIMPULAN

1. Indeks keandalan SAIFI, SAIDI dan CAIDI diperoleh masing-masing adalah 8,42 kali/tahun, untuk SAIDI sebesar 25,33 jam/tahun. CAIDI sebesar 3 jam/gangguan dan
2. Hasil perhitungan indeks keandalan SAIFI dan SAIDI belum memenuhi standar PLN 68-2:1986 dan IEEE Std 136-2003, sedangkan nilai CAIDI sudah memenuhi standar 68-2:1986 tetapi belum sesuai standar IEEE Std 136- 2003.
3. Indeks keandalan berorientasi pada beban dan energi berupa energi yang tidak tersalurkan akibat gangguan yang terjadi, dengan nilai ENS (*Energy not Supplied*) sebesar 66.541,885 kWh dan AENS (*Average Energy not Supplied*) sebesar 5,854 kWh/pelanggan. Nilai ekonomi berupa kerugian rupiah akibat gangguan pada Penyulang BG-2 sebesar Rp. 89.964.629,- dalam setahun.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Shaalan, A.M. 2019. Reliability Evaluation of Power Systems. Available on https://www.researchgate.net/publication/333317581_Reliability_Evaluation_of_Power_Systems.
- Anshori, M.R. Ashar, A.R. dan Sofyan, 2020. Studi Keandalan Sistem Jaringan Distribusi Penyulang 20 Kv Pada PT.PLN (Persero) Rayon Daya Dengan Metode Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) pada Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro dan Informatika (SNTEI), pp. 47-52, Makassar.
- Ariska, A.W. 2019. Audit Keandalan Sistem Jaringan Distribusi 20 KV pada PT. PLN (Persero) Rayon Tanjung Balai, Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Eneh, J.N. Orah, H.O. dan Emeka, A.B. 2019. Improving the Reliability and Security of Active Distribution Networks Using SCADA Systems”, pada IEEE

- PES/IAS Power Africa Conference
Power Economic Energy Innovation
Africa, pp.110-115, Nigeria: IEEE, doi:
10.1109/PowerAfrica.2019.8928647.
- Gonen, T., 2014. Electric Power Distribution
Engineering, 3ed, Boca Raton: CRC
Press Taylor & Francis Group.
- IEEE 1366. 2019. Guide Electric for Electric
Power Distribution Reliability Indices.
John Teixeira, National Grid.
- Jufrizel dan Hidayatullah, R. 2017. Analisa
Keandalan Sistem Distribusi 20KV
Menggunakan Metode Section
Technique dan RIA – Section
Technique pada Penyulang Adi Sucipto
Pekanbaru, pada Seminar Nasional
Teknologi Informasi, Komunikasi dan
Industri (SNTIKI), vol. 9, pp. 417-423,
Pekanbaru.
- Juran, J., Godfrey, A. 2010. Juran's Quality
Handbook, 5th ed, New York: McGraw-
Hill.
- Kiran. 2017. Total Quality Management,
Chapter 26. Failure Modes and Effects
Analysis.
- Lampiran Keputusan Direksi PT. PLN
(Persero) No. 475.K/DIR/2010, 2010.
Kriteria Disain Enjineering Konstruksi
Jaringan Distribusi Tenaga Listrik
Jakarta: PT. PLN (Persero)
- Rijal, M.S. dan Tasmono, H. 2020. Analisa
Keandalan Sistem Distribusi 20 KV PT.
PLN (Persero) ULP Menganti dengan
Metode RIA, Surabaya.
- SPLN 68-2. 1986. Tingkat Jaminan Sistem
Tenaga Listrik Bagian Dua: Sistem
Distribusi, Jakarta: Perusahaan Listrik
Negara. .
- SPLN 59,1985. Lampiran Surat Keputusan
Direksi PLN No. 014/DIR/85,
Keandalan Pada Sistem Distribusi 20
kV dan 6 kV. Jakarta: PT. PLN
(Persero).