



Peningkatan Keandalan Sistem Kelistrikan 150 KV Daerah Khusus Berbasis Analisis Risiko dengan Metode *Failure Mode Effect Analysis* (FMEA)

Ferdyan Hijrah Kusuma^{1*}, Rony Seto Wibowo²
Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia
Email: ferdyankusuma@gmail.com*

Abstract

Power system reliability is a critical requirement for supporting the operational continuity of the Special Region, a national strategic area that demands a secure and uninterrupted electricity supply. The current 150-kV configuration supplying the area remains a single radial system, creating high vulnerability to contingencies, particularly along the GI A–GIS corridor. This research analyzes the reliability risks of the 150-kV network while considering the integration of a 50-MWac solar power plant (PLTS). A quantitative Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) is employed, supported by DigSilent PowerFactory simulations to obtain Energy Not Served (ENS), failure rates (λ), and system response to disturbances in voltage and frequency. The results showed that the disruption in the main corridor resulted in the highest ENS of 9.93 MWh and potentially led to a total blackout, with the GIS transformer as a critical point. The mitigation analysis showed that the construction of a 150 kV backup transmission line was the most technically and financially optimal solution, as it was able to meet reliability criteria and significantly reduce risk. This research provides a comprehensive risk evaluation framework to support reliable and sustainable electrical system planning.

Keywords:

Special Region; DigSilent; ENS; FMEA; Reliability.

Kata Kunci:

Daerah Khusus; DigSilent; ENS; FMEA; Risiko Keandalan

Abstrak

Keandalan sistem tenaga listrik merupakan faktor fundamental dalam mendukung operasional Daerah Khusus yang dirancang sebagai kawasan strategis nasional dengan kebutuhan suplai listrik berkelanjutan dan bebas gangguan. Konfigurasi sistem 150 kV yang masih bersifat single radial menuju GIS Daerah Khusus menyebabkan kawasan ini sangat sensitif terhadap gangguan, khususnya pada koridor kritis SUTT 150 kV GI A – GIS. Penelitian ini bertujuan menganalisis risiko keandalan sistem kelistrikan 150 kV. Metode Failure Mode Effect Analysis (FMEA) diterapkan secara kuantitatif dan didukung oleh simulasi sistem tenaga menggunakan DigSilent PowerFactory untuk memperoleh nilai Energy Not Served (ENS), Laju Kegagalan (λ), serta pengaruh gangguan terhadap tegangan dan frekuensi sistem. Hasil menunjukkan bahwa gangguan pada koridor utama menghasilkan ENS tertinggi sebesar 9,93 MWh dan berpotensi menyebabkan pemadaman total, dengan transformator GIS sebagai titik kritis. Analisis mitigasi menunjukkan bahwa pembangunan jalur transmisi cadangan 150 kV merupakan solusi paling optimal secara teknis dan finansial, karena mampu memenuhi kriteria keandalan serta menurunkan risiko secara signifikan. Penelitian ini memberikan kerangka evaluasi risiko yang komprehensif untuk mendukung perencanaan sistem kelistrikan yang andal dan berkelanjutan.

PENDAHULUAN

Daerah Khusus merupakan sebuah Kawasan baru yang ditetapkan Pemerintah sebagai pusat pertumbuhan industri bernilai tambah tinggi. Kawasan ini dirancang untuk menjadi simpul investasi, logistik dan inovasi sehingga tidak hanya berpusat di Pulau Jawa. Daerah Khusus wajib dilengkapi dan didukung dengan infrastruktur kelistrikan yang andal, termasuk pasokan tenaga listrik berkapasitas besar yang berkesinambungan sehingga iklim usaha yang kompetitif tetap berjalan (Afzal et al., 2024). Ini sesuai dengan mandat Undang-undang No. 39 Tahun 2009 tentang Daerah Khusus. Dalam rangka mengikuti kebijakan transisi energi nasional dimana mengedepankan energi baru terbarukan yang lebih ramah lingkungan, Daerah Khusus didukung dengan sumber energi hijau. Salah satunya adanya integrasi Pusat Listrik Tenaga Surya (PLTS).

Dalam mendukung tercapainya cita-cita Daerah Khusus, salah satu infrastruktur penting yang harus disiapkan adalah infrastruktur ketenagalistrikan. Sebagai ibu kota masa depan yang mengusung konsep smart, green, dan beautiful, sistem kelistrikan yang dibangun harus andal, modern, serta ramah lingkungan. Keberadaan infrastruktur ketenagalistrikan yang kuat berperan penting dalam menjamin keandalan operasional berbagai aktivitas di Daerah Khusus, mulai dari pembangunan, operasional pemerintahan, hingga aktivitas masyarakat sehari-hari dan layanan publik, karena tanpa pasokan listrik yang stabil, fungsi kota tidak dapat berjalan optimal. Selain itu, dukungan terhadap konsep green city diwujudkan melalui pembangunan Pusat Listrik Tenaga Surya (PLTS) berkapasitas 50 MWac sebagai bentuk komitmen pemerintah dalam menggunakan energi terbarukan yang minim pencemaran lingkungan. Sistem kelistrikan juga dirancang untuk mendukung konsep smart city dengan penggunaan jaringan kabel bawah tanah (underground cable) yang tidak hanya meningkatkan estetika kota, tetapi juga mengurangi potensi gangguan dibandingkan jaringan udara. Penggunaan energi baru terbarukan turut memperkuat ketahanan energi nasional serta mendorong pemerataan akses listrik di wilayah sekitar. Di sisi lain, ketersediaan listrik yang andal dan berkelanjutan menjadi faktor penting dalam menarik investasi serta mendorong pertumbuhan ekonomi dan penciptaan lapangan kerja. Untuk mewujudkan hal tersebut, pengelola Daerah Khusus telah menerapkan strategi perencanaan dengan konsep zero down time, circular configuration grid, dan smart grid, serta memprioritaskan penggunaan energi hijau guna meminimalkan emisi Gas Rumah Kaca (GRK). Selain itu, proyeksi kebutuhan energi listrik juga telah disusun untuk periode 2024 hingga 2030 guna memastikan kesiapan dan keberlanjutan sistem kelistrikan di masa depan.

Analisis risiko keandalan dari GIS 1 yang akan dibahas dalam penelitian ini bukan hanya melihat faktor internal dari GIS 1 sendiri, tetapi juga adanya risiko keandalan dari sumber energi listrik yang mensuplai GIS 1, antara lain suplai dari sistem kelistrikan Mahakam yang melalui SUTT 150 kV GI A – GI Landing Point Daerah Khusus dan SKTT 150 kV Landing Point Daerah Khusus – GIS 1. Serta adanya suplai dari pembangkit listrik yang bersumber dari energi terbarukan PLTS (50 MWac) yang menjadi prioritas sumber energi listrik untuk Daerah Khusus. Analisis risiko keandalan ini menjadi penting mengingat untuk mengidentifikasi dan mengatasi potensi gangguan pada keandalan suplai energi listrik. Seperti adanya gangguan suplai daya listrik dari salah satu jaringan transmisi berdampak pada kesetimbangan sistem kelistrikan (Hartoyo, 2006).

Metode Failure Mode Effect Analysis (FMEA) merupakan salah satu metode analisis risiko yang digunakan untuk menilai tingkat kemungkinan terjadi suatu risiko kegagalan dan mengklasifikasikan kegagalan untuk diurutkan (Fitriyan, 2016). Salah satu faktor penting dalam penerapan FMEA adalah penaksiran sebelum proses berlangsung (*before the event*) dan bukan melakukan sesudah terjadi (*after the fact*) (Gusmedi, 2022).

Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) efektif digunakan dalam analisis risiko dan peningkatan keandalan sistem. Penelitian (Fitriyan, 2016) menegaskan bahwa FMEA mampu mengidentifikasi dan memprioritaskan risiko kegagalan komponen sebelum terjadi kerusakan sehingga mendukung strategi pemeliharaan prediktif. Selanjutnya, (Gusmedi et al., 2022) menggunakan FMEA untuk mengevaluasi keandalan jaringan distribusi listrik melalui indikator SAIDI, SAIFI, dan CAIDI, yang menunjukkan pentingnya pengukuran kuantitatif dalam sistem kelistrikan. (Burhandono & Sinaga, 2022) juga membuktikan bahwa penerapan FMEA pada sistem PLTS dapat menentukan prioritas perbaikan dan pencegahan gangguan guna meningkatkan keandalan serta efisiensi biaya operasional. Sementara itu, (Adillah et al., 2024) menunjukkan bahwa FMEA efektif dalam mengidentifikasi mode kegagalan pada instrumentasi Boiler Feed Pump, dengan rekomendasi pemeliharaan berkala berdasarkan risiko tertinggi untuk menjaga kinerja sistem. Secara keseluruhan, keempat penelitian ini menguatkan bahwa FMEA merupakan metode yang komprehensif dalam identifikasi, evaluasi, dan mitigasi risiko pada berbagai sektor industri.

Berdasarkan uraian pada sub-bab latar belakang, rumusan masalah dalam penelitian ini difokuskan pada bagaimana menganalisis risiko keandalan pada sistem kelistrikan 150 kV di Daerah Khusus yang berpotensi menyebabkan kegagalan suplai energi listrik. Selain itu, penelitian ini juga mengkaji bagaimana memprioritaskan risiko keandalan sehingga dapat diidentifikasi risiko dengan dampak terbesar, serta bagaimana merumuskan langkah pengelolaan yang tepat terhadap risiko keandalan suplai energi listrik tersebut.

Berdasarkan uraian tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini difokuskan pada bagaimana menganalisis risiko keandalan pada sistem kelistrikan 150 kV di Daerah Khusus yang berpotensi menyebabkan kegagalan suplai energi listrik, bagaimana memprioritaskan risiko keandalan sehingga dapat diidentifikasi risiko dengan dampak terbesar, serta bagaimana merumuskan langkah pengelolaan yang tepat terhadap risiko keandalan suplai energi listrik tersebut. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi risiko keandalan pada sistem kelistrikan 150 kV di Daerah Khusus yang dapat berdampak pada kegagalan suplai energi listrik, memetakan tingkat risiko keandalan berdasarkan prioritas kegagalan, serta merumuskan langkah mitigasi yang efektif guna mengelola risiko yang teridentifikasi sehingga dampak terhadap keandalan sistem kelistrikan dapat diminimalkan atau dihindari.

Secara akademis, penelitian ini memberikan kontribusi dalam memperkaya pemahaman mengenai analisis risiko keandalan pada sistem kelistrikan 150 kV. Penggunaan metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) diharapkan dapat memberikan gambaran komprehensif terkait kerangka kerja dalam mengidentifikasi, menganalisis, serta memetakan tingkat risiko. Selain itu, penelitian ini juga memberikan tambahan wawasan dalam pengelolaan risiko, khususnya pada sektor ketenagalistrikan. Secara praktis, penelitian ini diharapkan mampu memberikan manfaat dalam proses identifikasi, analisis, dan mitigasi

risiko guna menjaga keandalan sistem kelistrikan 150 kV di Daerah Khusus. Dengan mempertimbangkan integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berkapasitas 50 MWac, penelitian ini juga memberikan masukan terkait analisis risiko dalam integrasi pembangkit energi terbarukan pada sistem kelistrikan.

Ruang lingkup penelitian ini mencakup analisis risiko keandalan terhadap seluruh potensi gangguan yang terjadi pada sistem kelistrikan 150 kV yang dapat berdampak pada kegagalan operasional GIS 1 dalam menyuplai energi listrik ke Daerah Khusus. Adapun batasan penelitian difokuskan pada risiko gangguan yang berasal dari sistem yang terhubung dengan GIS 1, termasuk gangguan pada penyulang distribusi serta integrasi suplai energi listrik dari PLTS berkapasitas 50 MWac.

METODE PENELITIAN

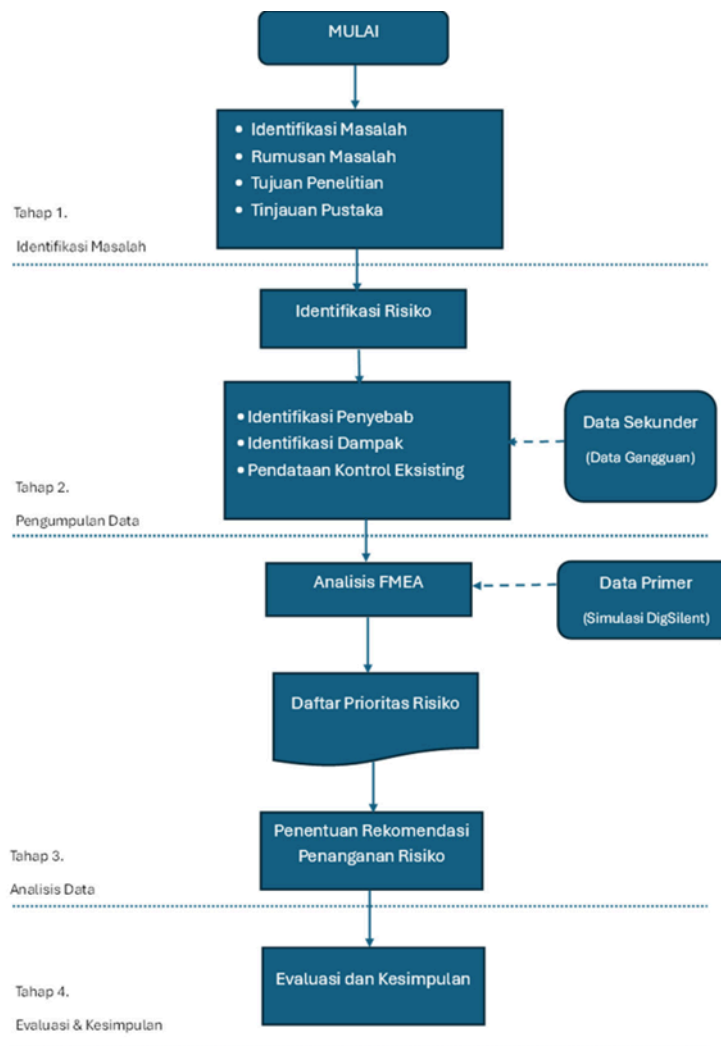
Penelitian ini menggunakan jenis penelitian kuantitatif dengan pendekatan analisis risiko, yang bertujuan untuk mengidentifikasi, mengukur, dan mengevaluasi tingkat keandalan sistem kelistrikan 150 kV di Daerah Khusus. Pendekatan kuantitatif dipilih karena penelitian ini melibatkan pengolahan data numerik, perhitungan parameter keandalan, serta simulasi sistem tenaga listrik untuk memperoleh hasil yang objektif dan terukur. Selain itu, penelitian ini juga bersifat deskriptif-analitis, karena tidak hanya menggambarkan kondisi sistem kelistrikan yang ada, tetapi juga menganalisis potensi risiko kegagalan serta dampaknya terhadap keandalan suplai energi listrik.

Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah melakukan kajian analisis terhadap risiko keandalan sistem kelistrikan 150 kV yang mendukung suplai daya listrik ke Daerah Khusus. Sistem kelistrikan 150 kV yang masuk dalam lingkup penelitian antara lain Transmisi 150 kV (SUTT & SKTT) GI. A –GIS 1, GIS 150 kV 1, dan PLTS (50 MWac). Selain itu juga dipilih infrastruktur ketenagalistrikan lainnya yang berpotensi berpengaruh pada keandalan suplai ke Daerah Khusus, antara lain GI 150 kV Karang Joang dan Transmisi 150 kV GI. Karang Joang – GI. A. Pada tiap infrastruktur kelistrikan tersebut akan dilakukan analisis risiko keandalannya berdasarkan standar kinerja keandalan yang sudah ditetapkan oleh PT PLN (Persero).

Alur Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan pada penelitian ini, antara lain: (1) Tahap Identifikasi Masalah, (2) Tahap Pengumpulan Data, (3) Tahap Analisis Data, (4) Tahap Evaluasi Data & Kesimpulan. Diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 1. Alur Penelitian

Sumber: Hasil perancangan penulis (2026)

Variabel Penelitian

Variabel dalam penelitian ini adalah variabel jenis gangguan yang merupakan mode kegagalan pada infrastruktur kelistrikan yang masuk dalam lingkup penelitian ini. Jenis mode kegagalan ini akan disimulasikan dengan *DigSilent Power Factory*. Jenis mode kegagalan yang akan disimulasikan adalah sebagai berikut.

Tabel 1. Variabel Mode Kegagalan

Komponen	Mode Kegagalan	Penyebab Kegagalan
Transmisi: - SUTT 150 kV GI B - GI. A	Gangguan Saluran Transmisi Yang Berdampak Pemadaman Permanen	Insiden Kecelakaan, Petir, Layang-layang
		Tower Roboh, Longsor Sambungan Lepas, Kerusakan mekanis
Transmisi:	Gangguan Saluran Transmisi Yang Berdampak Pemadaman	Insiden Kecelakaan, Petir, Layang-layang

- SUTT/SKTT 150 kV GI. A - LPGIS	Permanen	Tower Roboh, Longsor Sambungan Lepas, Kerusakan mekanis
Gardu Induk: - GI. B	Trafo Failure/ Internal Fault	Overload, Degradasi Minyak Trafo, Flash internal
Gardu Induk: - GI. A	Trafo Failure/ Internal Fault	Overload, Degradasi Minyak Trafo, Flash internal
Gardu Induk: - GIS	Trafo Failure/ Internal Fault	Overload, Degradasi Minyak Trafo, Flash internal

Sumber: Hasil identifikasi penulis berdasarkan data PLN dan literatur (2026)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Penelitian

Penelitian Analisa risiko keandalan sistem kelistrikan 150kV daerah khusus ini berfokus pada potensi terjadinya kegagalan yang menyebabkan gangguan pada suplai energi listrik atau berupa gangguan permanen. Instalasi yang masuk dalam penelitian ini antara lain adalah sebagai berikut.

Tabel 2. Data Instalasi Lingkup Penelitian

Aset	Tipe	Panjang (kms)
TL150_GIB-GIA	Line	22
Line 1		11
Line 2		11
TL150_GIA-LPGIS1	Line	60
Line 1		30
Line 2		30
UGC150_LPGIS1-GIS1	Line	3,4
Line 1		1,7
Line 2		1,7
Aset	Tipe	Rating
TRF_GIB	Trafo	
TRF 1		150/20 kV; 60 MVA
TRF 2		150/20 kV; 60 MVA
TRF_GIA	Trafo	
GT1		14/150 kV; 150 MVA
GT2		14/150 kV; 150 MVA
TRF 1		150/20 kV; 60 MVA
TRF_GIS1	Trafo	
TRF 1		150/20 kV; 60 MVA
TRF 2		150/20 kV; 60 MVA

Sumber: Data teknis sistem kelistrikan PT PLN (Persero), diolah penulis (2026)

Analisis Laju Kegagalan

Berdasarkan data kinerja utama sebelumnya maka dilakukan perhitungan Laju Kegagalan (λ) untuk jaringan transmisi dan Transformer. Perhitungan analisis Laju Kegagalan ini menggunakan data TLOF untuk jaringan transmisi dan TROF pada gangguan trafo. Dari data 5 tahun pada sub bab sebelumnya, kemudian dilakukan perhitungan rata agar didapatkan rata-rata Laju Kegagalan (λ) yang terjadi.

Tabel 3. Laju Kegagalan Rata-Rata

Laju Kegagalan	Tahun					λ Rata-rata
	2020	2021	2022	2023	2024	
Transmisi (Kali/100km_Tahun)	1,16	0,381	0,495	0,444	0,425	0,5810
Transformer (Kali/Unit_Tahun)	0,28	0,222	0,178	0,102	0,083	0,1730

Sumber: Data historis gangguan PLN (2020–2024), diolah penulis (2026)

Berdasarkan Laju Kegagalan Rata-rata (λ) tersebut, kemudian dihitung laju kegagalan pada tiap aset kelistrikan yang menjadi lingkup studi pada penulisan tesis ini. Untuk laju kegagalan tiap aset jaringan transmisi (λ_a), dilakukan perhitungan dengan rumusan sebagai berikut.

$$\lambda_a = \frac{\lambda \text{ rata-rata} \times \text{Panjang Jaringan (kms)}}{100 \text{ kms}} \quad (4.5)$$

Maka didapatkan laju kegagalan tiap aset pada jaringan transmisi sesuai dengan tabel berikut ini.

Tabel 4. Laju Kegagalan Tiap Aset Jaringan Transmisi (λ_a)

Aset	Jenis Aset	Panjang Jaringan (kms)	λ Rata-rata (Fault/100kms_Tahun)	λ_a (Fault/Tahun)
TL150_GIB-GIA	SUTT	22	0,5810	0,1278
Line 1		11	0,5810	0,0639
Line 2		11	0,5810	0,0639
TL150_GIA-LPGIS	SUTT	60	0,5810	0,3486
1				
Line 1		30	0,5810	0,1743
Line 2		30	0,5810	0,1743
Aset	Jenis Aset	Panjang Jaringan (kms)	λ Rata-rata (Fault/100kms_Tahun)	λ_a (Fault/Tahun)
UGC150_LPGIS1-GIS1	SKTT	3,4	0,5810	0,0198
Line 1		1,7	0,5810	0,0099

Sumber: Data historis gangguan PLN (2020–2024), diolah penulis (2026)

Tabel 5. Laju Kegagalan Tiap Aset Transformer (λ_b)

Aset	Jenis Aset	Rating	λ Rata-rata (Fault/Aset_Tahun)	λ_b (Fault/Tahun)
TRF_GIB	Trafo			
Trf B1		150/20 kV; 60 MVA	0,1730	0,1730
Trf B2		150/20 kV; 60 MVA	0,1730	0,1730
TRF_GIA	Trafo			
Trf A1		14/150 kV; 150MVA	0,1730	0,1730
Trf A2		14/150 kV; 150MVA	0,1730	0,1730
Trf A3		150/20 kV; 60 MVA	0,1730	0,1730
TRF_GIS	Trafo			
Trf GIS 1		150/20 kV; 60 MVA	0,1730	0,1730

Sumber: Data historis gangguan PLN (2020–2024), diolah penulis (2026)

Pada data laju kegagalan untuk aset transformer pada gardu induk (λ_b) menggunakan angka laju kegagalan rata-rata berdasarkan data PLN UPT A dikarenakan data berupa laju kegagalan pada 1 (satu) aset trafo.

Analisis Risiko (*Failure Mode Effect Analysis*)

Tabel 6. Tabulasi Analisis Risiko Keandalan Metode FMEA

Mode Kegagalan	Komponen	Jenis Aset	Efek Suplai Daerah Khusus	Kontrol_Ada	everity (S)	currence (O)	etection (D)	RPN (S x O x D)
GANGGUAN JARINGAN TRANSMISI								
Gangguan 1 Line Padam	TL150_GIB-GIA	Line 1	Tidak Terganggu	Ada	0,0752	0,0639	2	0,0096083
		Line 2	Tidak Terganggu	Ada	0,0752	0,0639	2	0,0096083
	TL150_GIA-LPGIS1	Line 1	Tidak Terganggu	Ada	0,1595	0,1743	2	0,0555853
		Line 2	Tidak Terganggu	Ada	0,1595	0,1743	2	0,0555853
	UGC150_LPGIS1-GIS1	Line 1	Tidak Terganggu	Ada	0,0090	0,0099	2	0,0001785
		Line 2	Tidak Terganggu	Ada	0,0090	0,0099	2	0,0001785
0								
Gangguan 2 Line	TL150_GIB-GIA		Tidak	Ada	0,0668	0,1278	2	0,0170815

Padam		Terganggu						
	TL150_GIA-LPGIS1	Terganggu	Ada	9,9316	0,4556	2	9,0493167	
	UGC150_LPGIS1-GIS1	Terganggu	Ada	0,5628	0,0258	2	0,0290584	
0								
GANGGUAN TRANSFORMER								
Gangguan Trafo Padam	TRF_GIB	TRF B1	Tidak Terganggu	Ada	2,4092	0,1730	5	2,083958
		TRF B2	Tidak Terganggu	Ada	0,6974	0,1730	5	0,603251
	TRF_GIA	GT 1	Tidak Terganggu	Ada	3,5029	0,1730	3	1,8179792
		GT 2	Tidak Terganggu	Ada	4,0576	0,1730	3	2,1058944
		TRF 1	Tidak Terganggu	Ada	0,1585	0,1730	3	0,0822615
	TRF_GIS1	TRF 1	Terganggu	Ada	2,5202	0,1730	5	2,1799298
		TRF 2	Terganggu	Ada	0,6023	0,1730	5	0,5209895

Sumber: Hasil perhitungan penulis menggunakan metode FMEA dan simulasi DigSilent (2026)

Berdasarkan hasil perhitungan RPN, kemudian dilanjutkan dengan penyusunan prioritas risiko keandalan. Urutan prioritas ini bukan hanya dari nilai RPN saja akan tetapi juga kaitan dengan dampak terhadap suplai daya ke Daerah Khusus. Bila berdampak pada suplai daya Daerah Khusus, maka akan menjadi Prioritas Ke-1. Bila tidak berdampak pada pemadaman Daerah Khusus, akan tetapi terhubung langsung dengan suplai daya ke Daerah Khusus dan menimbulkan ENS lebih besar dari 1 MWH, maka menjadi Prioritas ke-2. Sedangkan untuk mode kegagalan yang tidak menyebabkan padam Daerah Khusus dan ENS kurang dari 1 MWH masuk dalam Prioritas ke-3. Berikut urutan prioritas mode kegagalan yang disusun berdasar kriteria di atas.

Tabel 7. Prioritas Mode Kegagalan

Mode Kegagalan	Komponen	Jenis Aset	Padam Daerah Khusus	RPN (S x O x D)	Prioritas
GANGGUAN TRANSMISI 2 LINE PADAM	TL150_GIA- LPGIS		Padam	9,0493	1
GANGGUAN TRANSFORMER	TRF_GIS	TRF 1	Padam	2,1799	1
GANGGUAN TRANSFORMER	TRF_GIS	TRF 2	Padam	0,5210	1
GANGGUAN TRANSMISI 2 LINE PADAM	UGC150_LPGIS- GIS		Padam	0,0291	1
GANGGUAN TRANSFORMER	GT2 GIA	GT 2	Tidak Padam	2,1059	2
GANGGUAN TRANSFORMER	TRF1 GIB	TRF B1	Tidak Padam	2,0840	2

GANGGUAN TRANSFORMER	GT1 GIA	GT 1	Tidak Padam	1,8180	2
GANGGUAN TRANSFORMER	TRF2 GIB	TRF B2	Tidak Padam	0,6033	3
GANGGUAN TRANSFORMER	TRF1 GIA	TRF 1	Tidak Padam	0,0823	3
GANGGUAN TRANSMISI 1 LINE PADAM	TL150_GIA- LPGIS	Line 1	Tidak Padam	0,0556	3
		Line 2	Tidak Padam	0,0556	3
GANGGUAN TRANSMISI 2 LINE PADAM	TL150_GIB-GIA		Tidak Padam	0,0171	3
Mode Kegagalan	Komponen	Jenis Aset	Padam Daerah Khusus	RPN (S x O x D)	Prioritas
GANGGUAN TRANSMISI 1 LINE PADAM	TL150_GIB-GIA	Line 1	Tidak Padam	0,0096	3
		Line 2	Tidak Padam	0,0096	3
GANGGUAN TRANSMISI 1 LINE PADAM	UGC150_LPGIS1-GIS	Line 1	Tidak Padam	0,0002	3
		Line 2	Tidak Padam	0,0002	3

Sumber: Hasil analisis dan pengolahan data penulis (2026)

Besaran RPN ini juga menggambarkan besaran ENS yang dihasilkan sebagai akibat dari mode kegagalan yang terjadi. Dalam hal pengaruh besaran RPN paling dipengaruhi oleh nilai ENS yang ditimbulkan.

Rekomendasi Perlakuan Risiko

1. Identifikasi Penyebab Mode Kegagalan

Berdasarkan hasil identifikasi penyebab mode kegagalan pada tiap aset, maka dapat disimpulkan penyebab terjadinya mode kegagalan berdasarkan kategori aset dan mode kegagalan.

Prioritas 1

a) Mode Kegagalan: Transmisi 2 (dua) Line Padam

- Komponen: TL150_GIA-LPGIS & UGC150_LPGIS1-GIS
- Dampak Mode Kegagalan: ENS 9,93 MWH, Suplai Daerah Khusus Terganggu
- Penyebab Mode Kegagalan:

Internal: Jalur Radial (tidak ada saluran Cadangan), Kegagalan proteksi, Kesalahan operasi, kesalahan pemeliharaan.

Eksternal: Gangguan Vegetasi, Gangguan Binatang, Gangguan Petir, Bencana Alam.

b) Mode Kegagalan: Gangguan Trafo

- Komponen: TRF 1 GIS & TRF 2 GIS
- Dampak Mode Kegagalan: ENS 3,1 MWH, Suplai Daerah Khusus Terganggu
- Penyebab Mode Kegagalan:

Internal: Kegagalan proteksi, Kesalahan operasi, kesalahan pemeliharaan. Eksternal: Gangguan Binatang, Gangguan Petir, Bencana Alam.

Prioritas 2

a) Mode Kegagalan: Gangguan Trafo

- Komponen: GT 1, GT 2 & TRF 1 GIB
- Dampak Mode Kegagalan: ENS 4 – 3,5 MWH, Suplai Daerah Khusus Tidak Terganggu
- Penyebab Mode Kegagalan:

Internal: Kegagalan proteksi, Kesalahan operasi, kesalahan pemeliharaan. Eksternal: Gangguan Binatang, Gangguan Petir, Bencana Alam.

Prioritas 3

a) Mode Kegagalan: Transmisi 1 (satu) Line Padam

- Komponen: TL150_GIA-LPGIS, UGC150_LPGIS1-GIS & TL150_GIA- GIB
- Dampak Mode Kegagalan: ENS < 1 MWH, Suplai Daerah Khusus Tidak Terganggu
- Penyebab Mode Kegagalan:

Internal: Kegagalan proteksi, Kesalahan operasi, kesalahan pemeliharaan. Eksternal: Gangguan Vegetasi, Gangguan Binatang, Gangguan Petir, Bencana Alam.

b) Mode Kegagalan: Transmisi 2 (dua) Line Padam

- Komponen: TL150_GIA-GIB
- Dampak Mode Kegagalan: ENS < 1 MWH, Suplai Daerah Khusus Tidak Terganggu
- Penyebab Mode Kegagalan:

Internal: Kegagalan proteksi, Kesalahan operasi, kesalahan pemeliharaan. Eksternal: Gangguan Vegetasi, Gangguan Binatang, Gangguan Petir, Bencana Alam.

c) Mode Kegagalan: Gangguan Trafo

- Komponen: TRF 1 GIA & TRF 2 GIB
- Dampak Mode Kegagalan: ENS < 1 MWH, Suplai Daerah Khusus Tidak Terganggu
- Penyebab Mode Kegagalan:

Internal: Kegagalan proteksi, Kesalahan operasi, kesalahan pemeliharaan. Eksternal: Gangguan Binatang, Gangguan Petir, Bencana Alam.

2. Rencana Mitigasi

Berdasarkan identifikasi penyebab sebelumnya, langkah selanjutnya berupa penentuan Rencana Mitigasi baik untuk menurunkan tingkat keparahan akan timbulnya ENS (*Severity*), menurunkan Laju Kegagalan (*Occurance*) dan memperbaiki sistem Deteksi (*Detection*). Usulan rencana mitigasi untuk setiap mode kegagalan pada setiap prioritas adalah sebagai berikut:

Prioritas 1

a) Mode Kegagalan: Transmisi 2 (dua) Line Padam

- Komponen: TL150_GIA-LPGIS & UGC150_LPGIS1-GIS
- Rencana Mitigasi Penurunan ENS (Penurunan *Severity*):

Aktivitas: Skema Transfer Alternatif Beban Berupa pembangunan jalur transmisi alternatif yang terhubung dengan GIS Daerah Khusus untuk menjadi alternatif transfer beban bila terjadi mode kegagalan 2 (dua) line jalur suplai utama dari GI A terputus.

- Waktu: ± 2 Tahun (Konstruksi)
- Biaya Investasi: Rp 7 Milyar,-/KMR (Estimasi Biaya Proyek)

Aktivitas: Skema Sewa PLTD

Berupa penyediaan pembangkit listrik berbasis diesel untuk sebagai alternatif suplai tenaga listrik menuju Daerah Khusus. Mekanisme penyediaan dengan sewa.

- Waktu: \pm 1 Tahun
- Biaya Investasi: Rp 35 Milyar,-/tahun (Estimasi Biaya Proyek)

Aktivitas: Skema Alternatif Suplai dari PLTS Daerah Khusus

Berupa pembangunan jalur Saluran Kabel Tanah Tegangan Tinggi (SKTT) 150 kV yang terhubung dengan PLTS Daerah Khusus untuk mensuplai energi listrik menuju Daerah Khusus.

- Waktu: \pm 2 Tahun (Konstruksi)
- Biaya Investasi: Rp 40 Milyar,-/KMR (Estimasi Biaya Proyek)
- Rencana Mitigasi Penurunan Laju Kegagalan (Penurunan *Occurance*):
- Aktivitas: Pemeliharaan dan Pamantauan Rutin Jalur

Berupa penebangan/pemangkasan vegetasi, pemantauan thermovisi, pengujian pentanahan, pemantauan kontruksi tower

- Waktu: 1 bulanan
- Biaya Investasi: Rp 0,- (Biaya Operasi)
- Rencana Mitigasi Deteksi (*Detection*):
- Aktivitas: Pemeliharaan dan Pemantauan Sistem Proteksi

Berdasarkan hasil penilaian *Detection*, yang memiliki nilai rendah pada kegiatan pengujian secara rutin sistem proteksi yang dilakukan jarang sekali dengan interval lebih dari 18 bulan. Maka pengujian sistem proteksi perlu dilakukan pada interval 6 bulan.

- Waktu: 6 bulanan
- Biaya Investasi: Rp 0,- (Biaya Operasi)

b) Mode Kegagalan: Gangguan Trafo

- Komponen: TRF 1 GIS & TRF 2 GIS
- Rencana Mitigasi Penurunan ENS (Penurunan *Severity*):
- Aktivitas: Skema Transfer Alternatif Beban

Berupa skema transfer beban antar Trafo dengan kondisi Trafo yang menjadi alternatif penampung beban belum mencapai 90% kemampuan. Opsi penambahan Trafo untuk sebagai backup bisa menjadi alternatif pilihan bila Trafo yang tersedia sudah *overload*.

- Waktu: \pm 1,5 Tahun Konstruksi
- Biaya Investasi: Rp 46 Milyar,- (Estimasi Biaya Proyek)
- Rencana Mitigasi Penurunan Laju Kegagalan (Penurunan *Occurance*):

Aktivitas: Pemeliharaan dan Pamantauan Rutin Trafo Berupa pemantauan thermovisi, pengujian pentanahan, pemantauan kondisi minyak trafo, pemeriksaan fungsi pendingin

- Waktu: 1 bulanan
- Biaya Investasi: Rp 0,- (Biaya Operasi)
- Rencana Mitigasi Deteksi (*Detection*):
- Aktivitas: Pemeliharaan dan Pemantauan Sistem Proteksi

Berdasarkan hasil penilaian *Detection*, yang memiliki nilai rendah pada kegiatan pengujian secara rutin sistem proteksi yang dilakukan jarang sekali dengan interval lebih dari 18 bulan. Maka pengujian sistem proteksi perlu dilakukan pada interval 6 bulan.

- Waktu: 6 bulanan
- Biaya Investasi: Rp 0,- (Biaya Operasi)

Prioritas 2

a) Mode Kegagalan: Gangguan Trafo

- Komponen: GT 1 GIA, GT 2 GIA,
- Rencana Mitigasi Penurunan ENS (Penurunan *Severity*):
- Aktivitas: Skema Transfer Alternatif Beban

Berupa skema transfer beban hanya untuk menjaga kestabilan sistem sehingga suplai ke GIS Daerah khusus tidak terganggu, mengingat bahwa GIS Daerah khusus tidak masuk dalam skema pelepasan beban bila skema proteksi UFR ($< 48,7$ Hz) berlaku.

- Waktu: -
- Biaya Investasi: Rp 0,- (Estimasi Biaya Proyek)
- Rencana Mitigasi Penurunan Laju Kegagalan (Penurunan *Occurance*):
- Aktivitas: Pemeliharaan dan Pamantauan Rutin Trafo

Berupa pemantauan termovisi, pengujian pentanahan, pemantauan kondisi minyak trafo, pemeriksaan fungsi pendingin

- Waktu: 1 bulanan
- Biaya Investasi: Rp 0,- (Biaya Operasi)
- Rencana Mitigasi Deteksi (*Detection*):
- Aktivitas: Pemeliharaan dan Pemantauan Sistem Proteksi

Berdasarkan hasil penilaian *Detection*, yang memiliki nilai rendah pada kegiatan pengujian secara rutin sistem proteksi yang dilakukan jarang sekali dengan interval lebih dari 18 bulan. Maka pengujian sistem proteksi perlu dilakukan pada interval 6 bulan.

- Waktu: 6 bulanan
- Biaya Investasi: Rp 0,- (Biaya Operasi)

Prioritas 3

a) Mode Kegagalan: Transmisi 2 (dua) Line Padam

- Komponen: TL150_GIA-GIB
- Rencana Mitigasi Penurunan ENS (Penurunan *Severity*):
- Aktivitas: -

Mengingat ENS yang timbul tidak signifikan, sehingga skema proteksi dan pengalihan beban sudah baik.

- Waktu: -
- Biaya Investasi: Rp 0,-
- Rencana Mitigasi Penurunan Laju Kegagalan (Penurunan *Occurance*):
- Aktivitas: Pemeliharaan dan Pamantauan Rutin Jalur

Berupa penebangan/pemangkasan vegetasi, pemantauan termovisi, pengujian pentanahan, pemantauan konstruksi tower

- Waktu: 1 bulanan
- Biaya Investasi: Rp 0,- (Biaya Operasi)
- Rencana Mitigasi Deteksi (*Detection*):
- Aktivitas: Pemeliharaan dan Pemantauan Sistem Proteksi

Berdasarkan hasil penilaian Detection, yang memiliki nilai rendah pada kegiatan pengujian secara rutin sistem proteksi yang dilakukan jarang sekali dengan interval lebih dari 18 bulan. Maka pengujian sistem proteksi perlu dilakukan pada interval 6 bulan.

- Waktu: 6 bulanan
- Biaya Investasi: Rp 0,- (Biaya Operasi)
- b) Mode Kegagalan: Transmisi 1 (satu) Line Padam
- Komponen: TL150_GIA-LPGIS, UGC150_LPGIS1-GIS & TL150_GIA- GIB
- Rencana Mitigasi Penurunan ENS (Penurunan *Severity*):
- Aktivitas: -

Mengingat ENS yang timbul tidak signifikan, sehingga skema proteksi dan pengalihan beban sudah baik.

- Waktu: -
- Biaya Investasi: Rp 0,-
- Rencana Mitigasi Penurunan Laju Kegagalan (Penurunan *Occurance*):
- Aktivitas: Pemeliharaan dan Pamantauan Rutin Jalur

Berupa penebangan/pemangkasan vegetasi, pemantauan thermovisi, pengujian pentanahan, pemantauan kontruksi tower

- Waktu: 1 bulanan
- Biaya Investasi: Rp 0,- (Biaya Operasi)
- Rencana Mitigasi Deteksi (*Detection*):
- Aktivitas: Pemeliharaan dan Pemantauan Sistem Proteksi

Berdasarkan hasil penilaian Detection, yang memiliki nilai rendah pada kegiatan pengujian secara rutin sistem proteksi yang dilakukan jarang sekali dengan interval lebih dari 18 bulan. Maka pengujian sistem proteksi perlu dilakukan pada interval 6 bulan.

- Waktu: 6 bulanan
- Biaya Investasi: Rp 0,- (Biaya Operasi)
- c) Mode Kegagalan: Gangguan Trafo
- Komponen: TRF 2 GIB & TRF 1 GIA
- Rencana Mitigasi Penurunan ENS (Penurunan *Severity*):
- Aktivitas: -

Mengingat ENS yang timbul tidak signifikan, sehingga skema proteksi dan pengalihan beban sudah baik.

- Waktu: -
- Biaya Investasi: Rp 0,- (Estimasi Biaya Proyek)
- Rencana Mitigasi Penurunan Laju Kegagalan (Penurunan *Occurance*):
- Aktivitas: Pemeliharaan dan Pamantauan Rutin Trafo

Berupa pemantauan thermovisi, pengujian pentanahan, pemantauan kondisi minyak trafo, pemeriksaan fungsi pendingin

- Waktu: 1 bulanan
- Biaya Investasi: Rp 0,- (Biaya Operasi)
- Rencana Mitigasi Deteksi (*Detection*):
- Aktivitas: Pemeliharaan dan Pemantauan Sistem Proteksi

Berdasarkan hasil penilaian Detection, yang memiliki nilai rendah pada kegiatan pengujian secara rutin sistem proteksi yang dilakukan jarang sekali dengan interval lebih dari 18 bulan. Maka pengujian sistem proteksi perlu dilakukan pada interval 6 bulan.

- Waktu: 6 bulanan
- Biaya Investasi: Rp 0,- (Biaya Operasi)

KESIMPULAN

Penelitian ini menganalisis risiko keandalan sistem kelistrikan 150 kV pada daerah khusus menggunakan pendekatan terpadu berupa data historis, simulasi DigSilent Power Factory, dan metode Failure Mode Effect Analysis (FMEA). Hasil penelitian menunjukkan adanya titik kritis utama pada jalur transmisi SUTT 150 kV GI A–GIS Daerah Khusus dan trafo GIS yang berpotensi menyebabkan kegagalan suplai akibat konfigurasi sistem single radial tanpa jalur alternatif. Simulasi mengonfirmasi bahwa gangguan pada aset tersebut berdampak signifikan terhadap kehilangan daya dan peningkatan Energy Not Served (ENS). Analisis FMEA menghasilkan nilai Risk Priority Number (RPN) tertinggi pada aset yang menjadi satu-satunya jalur suplai, menegaskan tingkat risiko yang tinggi. Untuk mitigasi, diusulkan pembangunan jalur transmisi baru sebagai cadangan yang terbukti layak secara teknis dan ekonomis berdasarkan indikator NPV, IRR, PBP, dan B/C Ratio. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan gambaran komprehensif berbasis data serta solusi implementatif untuk meningkatkan keandalan sistem kelistrikan di daerah khusus.

DAFTAR PUSTAKA

- Afzal, A. Bin, Mohammed, N., Ahmed, S., & Konstantinou, C. (2024). Advanced resilience planning for distribution systems. *IET Conference Proceedings CP882, 2024(27)*, 271–275.
- Aven, T. (2016). *Risk Assessment and Risk Management: Review of Recent Advances on Their Foundation*. European Journal of Operational Research 253
- Bjorns, J. (2022). *Transmission Expansion Planning Considering Probabilistic Risk Assessment*. KTH Royal Institute of Technology. Stockholm
- Burhandono, A. & Sinaga, N. (2022). *Menjaga Keandalan Sistem PLTS dengan Metode Failure Mode Effect Analysis (FMEA)*. Jurnal Teknik Industri Magister Energi, Sekolah Pascasarjana, Universitas Diponegoro, 12 (1)
- Carlson, C. (2012). *Effective FMEAs: Achieving Safe, Reliable, and Economical Products and Processes Using Failure Mode and Effect Analysis*. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey. Canada
- CIGRÉ. (2018). *Reliability of GIS in Service*. Technical Brochure No. 730
- Departemen Manajemen Teknologi, Fakultas Desain Kreatif dan Bisnis Digital, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
- Fitriyan, R. (2016). *Analisis Risiko Kerusakan Peralatan Dengan Menggunakan Metode FMEA Untuk Meningkatkan Kinerja Pemeliharaan Prediktif Pada Pembangkit Listrik*. Program Magister Bidang Keahlian Manajemen Industri Program Pascasarjana, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

- Fraser, J. & Simkins, B. J. (2010). *Enterprise Risk Management: Today's Leading Research and Best Practices For Tomorrow Executives*. <https://www.perlego.com/ereader/2671313>
- Gusmedi, H., Hakim, L., & Ramadhan, R. (2022). *Evaluasi Keandalan Jaringan Distribusi 20 kV Penyulang Stroberi 2 PT PLN (Persero) ULP Kota Metro dengan Metode Failure Mode Effect Analysis (FMEA)*. *Jurnal Informatika dan Elektro Terapan Universitas Lampung*, 12 (1)
- Husada, T. A. (2007). *Analisa Keandalan Sistem Distribusi 20 kV di PT PLN (Persero) Area Tanjung Karang Menggunakan Metode FMEA*. Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
- International Organization of Standardization (ISO). (2018). *ISO 31000: Risk Management – Guidelines*. www.iso.org
- Journal of Applied Corporate Finance
- Junaedi, Triwiyatno, A., & Sumardi. (2024). *Peninjauan Keandalan Sistem Pentanahan Tower SUTT 150 kV Jakabaring – Keramasan Terhadap Arus Gangguan*. *Jurnal Profesi Insinyur Indonesia UNDIIP*, 2 (5), 327-333
- Khan, B., Alhelou, H.H, dan Mebrahtu, F. (2019). *A Holistic Analysis of Distribution System Reliability Assessment Methods With Conventional and Renewable Energy Sources*. *AIMS Energy*, 7 (4). www.aimspress.com/journal/energy
- Llaval,. F. X. B. dan Li, Z. (2011). *Reliability Worth Assessment of Radial System With Distributed Generation*. Illinois Institute of Technology
- Lopez-Prado, J. L., Velez, J. I., dan Garcia-Llinas, G. A. (2020). *Reliability Evaluation in Distribution Network With Microgrids: Review and Classification of The Literature*. Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Universidad de Sucre. Columbia
- Mas'ud, F., Mursidi, B., Darmawan, L. O. R., & Rustan, F. R. (2023). *Analisis Manajemen Risiko Waktu dan Biaya Pada Proyek Konstruksi Pembangunan RSUD Tipe D Kota Kendari*. *STABILITA || Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 11 (3)
- Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/6/1363>
- Nocco, B. W. & Stulz, R. M. (2006). *Enterprise Risk Management: Theory and Practice*.
- Nugroho, J. M. (2020). *Manajemen Mitigasi Kebakaran Pada PLTU Menggunakan Metode FMEA Studi Kasus PT. Pembangunan Jawa Bali UBJOM Pacitan*.
- Ponce, E. W. I. & Tellez, A. A. (2025). *Integrated Generation and Transmission Expansion Planning Through Mixed-Integer Non Linear Programming In Dynamic Load Scenarios*. GIREI Research Group, Electrical Engineering Department, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/15/4027?>
- Project Management Institute. (2021). *Project Management Body of Knowledge (PMBOK) – Seventh Edition*. Project Management Institute
- Prusty, B. R. & Jena, D. (2018). *An Over-Limit Risk Assessment of PV Integrated Power System Using Probabilistic Load Flow Based on Multi-Time Instant Uncertainty Modeling*. *Renewable Energy Journal*, 116 (A). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148117309473>

- Romim, M., Aryza, S., & Lesmana, D. (2024). *An Analysis of Reliability 150 kV High Voltage Air Line Conductors Towards Electric Field Strength*. Jurnal Scientia Vol. 13 Number 04
- S., Adillah, R., Jufrizel, Maria, P. S., Zarory, H. (2024). *Analisa Keandalan Instrumentasi Boiler Feed Pump Menggunakan Metode Failure Mode Effect Analysis (FMEA) di PT PLN Nusantara Power UP Tenayan*. Jurnal Al-Azhar Indonesia Seri Sains dan Teknologi, 9 (3)
- Salah, B., Alnahal, M., Ali, M. (2023). *Risk Prioritization Using Modified FMEA Analysis in Industry 4.0*. Journal of Engineering Research, 11, 460 – 468
- Sandelic, M., Sangwongwanich, A., dan Blaabjerg, F. (2019). *Reliability Evaluation of PV Systems with Integrated Battery Energy Storage System: DC Coupled and AC Coupled Configuration*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/9/1059>
- Sari, D. M. dan Nur, A. (2022). *Analisis Risiko Keandalan Sistem Distribusi Tenaga Listrik dengan Metode FMEA*. Jurnal Teknik Elektro dan Energi Terbarukan, 11(1)
- Sengi, G. dan Ntagwirumagara, E. (2021). *Improving Reliability of The Power Distribution System in Goma (DRC) Using Solar Distributed Generation*. Journal of Energy in Southern Africa. https://www.scielo.org.za/scielo.php?pid=S1021-447X2021000400007&script=sci_arttext&utm
- Stamatis, D. H. (2003). *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution (Second Edition)*. ASQ Quality Press
- Surasa, H. A. (2007). *Analisis Penyebab Losses Energi Listrik Akibat Gangguan Jaringan Distribusi dengan Metode FMEA di Unit Jaringan Sumberlawang*. Jurusan Teknik Industri, Universitas Sebelas Maret, Surakarta
- Ugranli, F dan Karatepe, E. (2015). *Multi-objective Transmission Expansion Planning Considering Minimization of Curtailed Wind Energy*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems Vol.65. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061514006346?>
- Wideman, R. M. (1992). *Project & Program Risk Management: A Guide to Managing Project Risk and Opportunities*. Perpustakaan Universitas Panacasila https://perpus.univpancasila.ac.id/index.php?p=show_detail&id=110417&keywords=
- Winantara, B. & Husodo, B. (2019). *Evaluasi Tahanan Kontak Pemutus Tenaga Tegangan Tinggi di Gardu Induk 150 kV Bandung Selatan Berdasarkan Failure Mode Effect Analysis (FMEA)*. Jurnal Teknik elektro, Universitas Mercu Buana, ISSN: 2086-9479
- Xu, W., Zeng, S., Zhao, J., He, Y., dan Wu, X. (2023). *Reliability of Distribution Network Considering Uncertainty of Distribution Generation and Load*.
- Y. Wibisana, R. S. Wibowo and I. Arifianto,(2012). *The condition-based maintenance concept for 500 kV circuit breakers in PLN P3B Jawa Bali — Indonesia*. IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Bali, Indonesia, 2012, pp. 529-532,
- Yunus, A. (2020). *Dasar-dasar Sistem Tenaga Listrik*. Jakarta. Penerbit Erlangga